

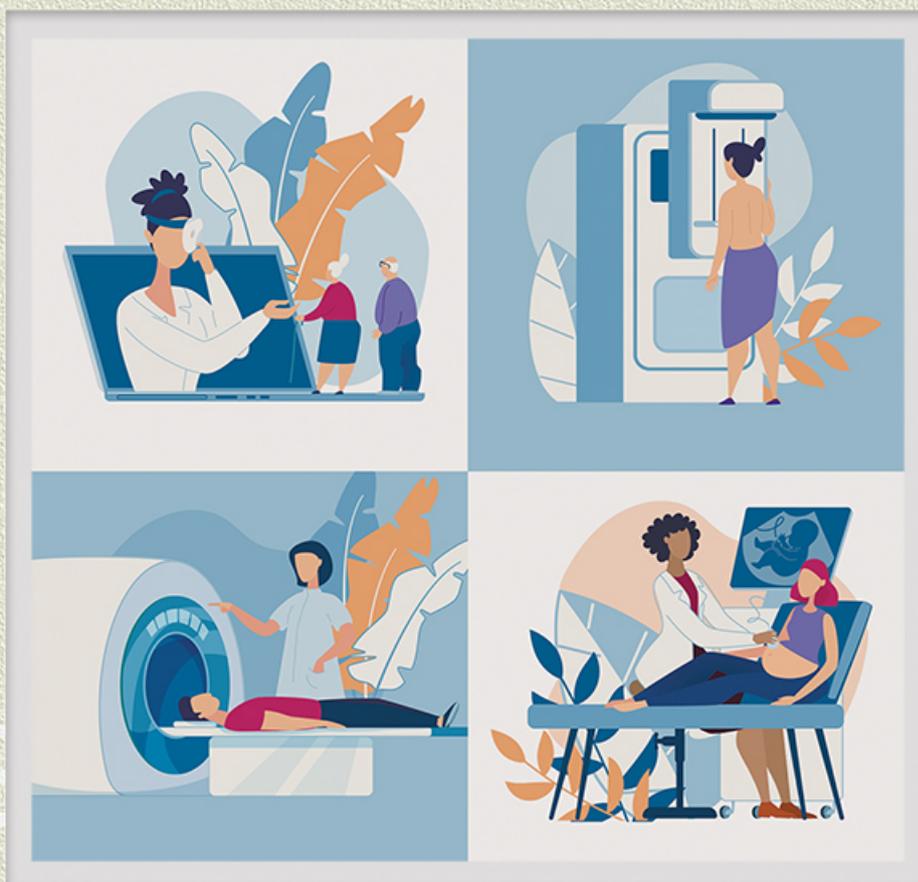
ООО «Центральный научно-исследовательский институт лучевой диагностики»

РАДИОЛОГИЯ – ПРАКТИКА

Научно-практический журнал для работников медицинской радиологической службы России

RADIOLOGY – PRACTICE

№ 1 2024



Научный рецензируемый журнал / Scientific Peer-reviewed Journal

РАДИОЛОГИЯ – ПРАКТИКА / RADIOLOGY – PRACTICE**№ 1, 2024****История, периодичность, цели / History, Periodicity, Goals**

Журнал «Радиология — практика» издается с 2000 года с периодичностью 6 выпусков в год. Основной целью издания является освещение современных технологий и аппаратуры для получения и анализа медицинских радиологических изображений, способов клинического использования лучевой диагностики — рентгенографии, МРТ, КТ, УЗИ, радионуклидных исследований. Рассматриваются вопросы непрерывного образования и подготовки кадров лучевых специалистов, стандартизации всех видов современных лучевых исследований, объективной аккредитации отделений лучевой диагностики, сертификации, лицензирования и аттестации специалистов. Рассматриваются медико-технические проблемы — аппаратура, методика исследований, радиационная безопасность и охрана труда. Издание ориентировано на врачей-рентгенологов, инженеров, рентгенолаборантов, техников, дозиметристов, всех ведущих специалистов по лучевой диагностике, заведующих отделениями этого профиля, главных врачей, руководителей городского и республиканского масштаба, формирующих техническую политику в здравоохранении.

Журнал «Радиология — практика» входит в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК (номер 1705).

The journal «Radiology — practice» is being published since 2000 with a frequency of 6 issues per year. The main goal of the issue is coverage of modern technologies and the equipment which aims radiologic images analyses, methods of clinical application: radiography, MRI, CT, ultrasound and radionuclide investigations. We make a scope of continuing education and preparation of x-ray specialists, standardization of all kinds modern x-ray examinations, objective accreditation of x-ray diagnostic departments, and certification, licensing and specialists attesting. We give medical-technical reviews, such as equipment, examinations methodology, radiation safety, and labour protection. The Journal is intended for x-ray doctors, engineers, medical assistants, technical personnel, dosimetricians, all the leading specialists in x-ray diagnosis, departments' chiefs in this sphere, chief doctors, and leaders of city/republic level who develop equipment policy in healthcare system.

Свидетельство о регистрации средства массовой информации / Certificate of the Mass Media Registration

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС77-80253 от 19 января 2021 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ.

Certificate of the Mass Media Registration ЭЛ № ФС77-80253 issued on the 19.01.2021, issued by Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications (Roskomnadzor), Ministry of Digital Development, Communications and Mass Media of the Russian Federation.

Учредители журнала / Journal Founders

© Общество с ограниченной ответственностью «Центральный научно-исследовательский институт лучевой диагностики» (Москва).

Limited Liability Company «Central Research Institute of Radiation Diagnostics» (Moscow).

109431, г. Москва, ул. Авиаконструктора Миля, д. 15/1, помещение XI, комн. 1–12.

15/1, compartment XI, room 1–12, Aviakonstruktor Mil' st., Moscow, 109431.

© Непубличное акционерное общество «АМИКО» (Москва).

Non-public joint-stock company «AMICO» (Moscow).

Издательство / Publisher

Общество с ограниченной ответственностью «Центральный научно-исследовательский институт лучевой диагностики» (Москва).

Limited Liability Company «Central Research Institute of Radiation Diagnostics» (Moscow).

109431, г. Москва, ул. Авиаконструктора Миля, д. 15/1, помещение XI, комн. 1–12.

15/1, compartment XI, room 1–12, Aviakonstruktor Mil' st., Moscow, 109431.

E-mail: info@radp.ru

+7 (495) 980-52-38

Редакционная коллегия журнала / Editorial Board of the Journal

Главный редактор / Chief Editor

Васильев Александр Юрьевич, доктор медицинских наук, профессор, член-корреспондент РАН, директор ООО «Центральный научно-исследовательский институт лучевой диагностики», профессор кафедры лучевой диагностики ФГБОУ ВО «Московский государственный медико-стоматологический университет им. А. И. Евдокимова» Минздрава России.

Vasil'ev Alexandr Yur'evich, M. D. Med., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor of Department of Radiology of Moscow State Medical University of Medicine and Dentistry named after A. I. Evdokimov, Ministry of Healthcare of Russia.

<https://orcid.org/0000-0002-0635-4438>

[Scopus](#)

Ответственный секретарь / Executive secretary

Петрова Екатерина Борисовна, доктор медицинских наук, доцент, доцент кафедры лучевой диагностики ФДПО, доцент кафедры эндокринологии и внутренних болезней ФГБОУ ВО «ПИМУ» Минздрава России (г. Нижний Новгород), врач ультразвуковой диагностики поликлиники № 5 Приволжского окружного медицинского центра ФМБА России (г. Нижний Новгород), врач ультразвуковой диагностики Городского кардиологического диспансера и ревматологического центра ГБУЗ НО ГКБ № 5 Нижегородского района г. Нижнего Новгорода.

Petrova Ekaterina Borisovna, D. Med., Associate Professor. Associate Professor of the Department of Radiodiagnosis Faculty of Doctors Advanced Training, Associate Professor of the Department of Endocrinology and Internal Diseases of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Privolzhsky Research Medical University» Ministry of Healthcare of Russia. Nizhny Novgorod. Specialist in ultrasound diagnostics at FBUZ «Privolzhsky District Medical Center» FMBA of Russia and City Cardiology Dispensary and Rheumatology Center (Hospital No 5), Nizhny Novgorod, Russia.

<https://orcid.org/0009-0001-2849-1185>

[Scopus](#)

Члены редколлегии / Editorial Board Members

Блинов Николай Николаевич, доктор технических наук, директор НПАО «АМИКО», профессор кафедры медицинской физики МИФИ, профессор кафедры лучевой диагностики ФГБОУ ВО «Московский государственный медико-стоматологический университет им. А. И. Евдокимова» Минздрава России.

Blinov Nikolay Nikolaevich, M. D. Techn., Professor of Department of Medical Physics of the National Nuclear Research University of Moscow Engineering Physics Institute, Professor of Department of Radiology, Moscow State Medical University of Medicine and Dentistry named after A. I. Evdokoimov, Ministry of Healthcare of Russia.

Дергилев Александр Петрович, доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой лучевой диагностики ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный медицинский университет» Минздрава России.

Dergilev Aleksandr Petrovich, M. D. Med., Professor, Head of Diagnostic Imaging Department, Novosibirsk State Medical University, Ministry of Healthcare of Russia.

<https://orcid.org/0000-0002-8637-4083>

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.

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

<https://orcid.org/0000-0002-0516-3613>

[Scopus](#)

Капустин Владимир Викторович, доктор медицинских наук, доцент, профессор кафедры лучевой диагностики ФГБОУ ВО «Московский государственный медико-стоматологический университет им. А. И. Евдокимова» Минздрава России.

Kapustin Vladimir Viktorovich, M. D. Med., Docent, Professor of Department of Radiology, Moscow State University of Medicine and Dentistry named after A. I. Evdokimov, Department of Radiology, Ministry of Healthcare of Russia/Moscow Healthcare Department.
<https://orcid.org/0000-0002-3771-1354>

Климова Наталья Валерьевна, доктор медицинских наук, профессор, заведующая кафедрой многопрофильной клинической подготовки Медицинского института, Сургутский государственный университет; заведующая рентгенологическим отделением, Сургутская окружная клиническая больница.

Klimova Natal'ya Valer'evna, M. D. Med, Professor, Head, Multiprofile Clinic Training Department, Medical Institute, Surgut State University; Head Radiology Department, Surgut Regional Clinical Hospital.
<https://orcid.org/0000-0003-4589-6528>

Кротенкова Марина Викторовна, доктор медицинских наук, заведующая отделом лучевой диагностики института клинической и профилактической неврологии ФГБНУ «Научный центр неврологии».

Krotenkova Marina Viktorovna, M.D. Med., Head of the Department of Radiation Diagnostics of the Institute of Clinical and Preventive Neurology, Research Center of Neurology.
<https://orcid.org/0000-0003-3820-4554>

Левшакова Антонина Валерьевна, доктор медицинских наук, заведующая отделением КТ и МРТ МНИОИ им. П. А. Герцена — филиала ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, доцент кафедры лучевой диагностики ФГБОУ ВО «Московский государственный медико-стоматологический университет им. А. И. Евдокимова» Минздрава России.

Levshakova Antonina Valer'evna, M. D. Med., Head of the Department of computed tomography and magnetic resonance imaging of Moscow, Research Oncological Institute named after P. A. Herzen — branch of «National Medical Research Center of Radiology», Ministry of Healthcare of Russia, Associated Professor of Department of Radiology, Moscow State University of Medicine and Dentistry named after A. I. Evdokimov, Department of Radiology, Ministry of Healthcare of Russia.
<https://orcid.org/0000-0002-2381-4213>

[Scopus](#)

Лежнев Дмитрий Анатольевич, доктор медицинских наук, заведующий кафедрой лучевой диагностики ФГБОУ ВП «Московский государственный медико-стоматологический университет им. А. И. Евдокимова» Минздрава России.

Lezhnev Dmitry Anatol'evich, M. D. Med., Head of Department of Radiology, Moscow State Medical University of Medicine and Dentistry named after A. I. Evdokimov, Ministry of Healthcare of Russia.
<https://orcid.org/0000-0002-7163-2553>

[Scopus](#)

Морозова Татьяна Геннадьевна, доктор медицинских наук, доцент, заведующая кафедрой лучевой диагностики и лучевой терапии с курсом ДПО ФГБОУ ВО «Смоленский государственный медицинский университет» Минздрава России.

Morozova Tat'jana Gennad'evna, M. D. Med., Docent, Head of the Department of Radiation Diagnostics and Radiation Therapy with a course of additional professional education of Smolensk State Medical University, Ministry of Healthcare of Russia.
<https://orcid.org/0000-0003-4983-5300>

Ольхова Елена Борисовна, доктор медицинских наук, профессор, профессор кафедры лучевой диагностики ФГБОУ ВО «Московский государственный медико-стоматологический университет им. А. И. Евдокимова» Минздрава России, заведующая отделением ультразвуковой диагностики ГБУЗ «ДГКБ святого Владимира Департамента здравоохранения г. Москвы».

Oikhova Elena Borisovna, M. D. Med., Professor, Professor of Department of Radiology, Moscow State University of Medicine and Dentistry named after A. I. Evdokimov, Department of Radiology, Ministry of Healthcare of Russia; the Head of Department of the Ultrasound Diagnostic Moscow Clinical Municipal Children Hospital St. Vladimir, Moscow of Healthcare Department.
<https://orcid.org/0000-0003-3757-8001>

Петровская Виктория Васильевна, доктор медицинских наук, профессор кафедры лучевой диагностики ФГБОУ ВО «Московский государственный медико-стоматологический университет им. А. И. Евдокимова» Минздрава России.

Petrovskaya Victoriya Vasil'yevna, M. D Med., Professor of Department of Radiology, Moscow State University of Medicine and Dentistry named after A. I. Evdokimov, Ministry of Healthcare of Russia.

<https://orcid.org/0000-0001-8298-9913>

[Scopus](#)

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.

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

<https://orcid.org/0000-0002-4480-0275>

СОДЕРЖАНИЕ / CONTENTS

Обращение главного редактора / Message from the Editor in Chief 8

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ ORIGINAL RESEARCH

Редкий случай локализации глиобластомы: инфратенториальное расположение (обзор литературы и клинический случай)

Р. С. Талыбов, Т. Н. Трофимова, В. И. Павлова, И. В. Швецов,
В. В. Мочалов, М. Э. Мартиросян, А. А. Прищепов

Atypical case of glioblastoma localization: infratentorial localization (Clinical Case and the Review of the Literature)

R. S. Talybov, T. N. Trofimova, V. I. Pavlova, I. V. Shvetsov,
V. V. Mochalov, M. E. Martirosyan, A. A. Prishchepov 9

Исследования перифокальной зоны глиом головного мозга с помощью магнитно-резонансной томографии (обзор литературы)

Н. Е. Захарова, А. И. Баталов, Э. Л. Погосбемян, С. А. Горяйнов,
Л. М. Фадеева, А. Е. Быканов, А. Н. Тюрина, И. В. Чехонин,
С. А. Галстян, И. Н. Пронин, Д. Ю. Усачев

Magnetic Resonance Imaging in Studies of Perifocal Zone of Brain Gliomas (a Literature Review)

N. E. Zakharova, A. I. Batalov, E. L. Pogosbekyan, S. A. Goryaynov,
L. M. Fadeeva, A. E. Bykanov, A. N. Tyurina, I. V. Chekhonin,
S. A. Galstyan, I. N. Pronin, D. Yu. Usachev 20

Контрастирование стенки аневризмы при магнитно-резонансной томографии: новый предиктор разрыва мешотчатых внутричерепных аневризм

К. С. Семин, Н. Е. Захарова, Ш. Ш. Элиава, А. Н. Коновалов,
А. С. Хейреддин, Д. Б. Калаева, А. И. Баталов, И. Н. Пронин

Aneurysm wall contrast on magnetic resonance imaging: a new predictor of rupture of saccular intracranial aneurysms

K. S. Semin, N. E. Zakharova, Sh. Sh. Eliava, A. N. Kononov,
A. S. Kheireddin, D. B. Kalaeva, A. I. Batalov, I. N. Pronin 37

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

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

Diffusion Kurtosis Imaging and Radiomics in Diffuse Axonal Injury

R. M. Afandiev, N. E. Zakharova, G. V. Danilov, E. L. Pogosbekyan,
S. A. Goryaynov, Ya. A. Latyshev, A. V. Kosyr'kova, A. D. Kravchuk,
D. Y. Usachev, I. N. Pronin 51

**МЕДИЦИНСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
MEDICAL TECHNOLOGY**

Визуализация опухолей головного мозга:

снава о стандартизованном МРТ-протоколе

Н. Е. Захарова, И. Н. Пронин, А. И. Баталов,
И. В. Чехонин, А. Н. Тюрина

Neuroimaging of brain tumors: back to the standardized MRI-protocol

N.E. Zakharova, I.N. Pronin, A.I. Batalov,

I. V. Chekhonin, A.N. Tyurina66

Магнитно-резонансная релаксометрия в оценке

морфологических характеристик глиом головного мозга:

современное состояние вопроса

И. В. Чехонин, А. И. Баталов, Н. Е. Захарова,
В. Н. Корниенко, И. Н. Пронин

Magnetic resonance relaxometry in assessment of morphological

properties of brain gliomas: state of the art

I. V. Chekhonin, A. I. Batalov, N. E. Zakharova,

V. N. Kornienko, I. N. Pronin.....85

**КЛИНИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ И КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ
CLINICAL REVIEWS AND SHORT REPORTS**

МР-морфометрия в диагностике МР-негативной фокальной

кортикальной дисплазии (клинический случай)

А. М. Шевченко, Э. Л. Погосбекян, П. А. Власов, С. Б. Агрба,
С. А. Галстян, А. И. Баталов, А. Г. Меликян, И. Н. Пронин

MR morphometry in the diagnosis of MR-negative focal cortical

dysplasia (clinical case)

A. M. Shevchenko, E. L. Pogosbekyan, P. A. Vlasov, S. B. Agrba,

S. A. Galstyan, A. I. Batalov, A. G. Melikyan, I. N. Pronin 104

**НАУЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ, ХРОНИКА, ОБЪЯВЛЕНИЯ
SCIENTIFIC INFORMATION, CHRONICLE, ADS**

Отчет о научно-практической конференции с международным

участием «Лучевая диагностика: Смоленск – зима 2024»

Report on the Scientific Interregional Scientific and Practical

Conference with International Participation

«Radiation Diagnostics: Smolensk – Winter 2024» 116

Анонс. X Всероссийская научная конференция молодых ученых

и студентов с международным участием «ВолгаМед»

Announcement. X All-Russian Scientific Conference of Young Scientists

and Students with international participation «VolgaMed» 119



Уважаемые читатели!

Перед вами первый номер 2024 года, посвященный нейрорадиологии. Опыт целевых номеров был осуществлен два года назад и оказался успешным и востребованным читателями.

Безусловно, создание данного номера невозможно было бы без лидеров этого направления в стране — специалистов ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. академика Н. Н. Бурденко» Минздрава РФ. Нам, профессиональному сообществу, очень важно донести до читателя новые тенденции в научных исследованиях в этой специализации, показать практически значимые аспекты новых методик, а также на основе единой методологии обеспечить преемственность в исследованиях ЛПУ различного уровня и ведомственной принадлежности. Будем рады, если номер окажется полезным как для опытных врачей, так и для молодых специалистов.

Редакционная коллегия выражает благодарность академику РАН, профессору И. Н. Пронину и профессору РАН Н. Е. Захаровой за действенную помощь в подготовке целевого номера.

Теперь к организационным новостям. С 2024 года у журнала новый ответственный секретарь — доктор медицинских наук, доцент Петрова Екатерина Борисовна. Электронный адрес для переписки и взаимодействия остается прежним (radiology-practice@yandex.ru). Пожелаем Екатерине Борисовне творческой работы и успехов в совершенствовании нашего журнала.

И последнее, мы будем продолжать тематические выпуски два раза в год и ждем инициативы от читателей по тематикам номеров. Будем рады конструктивным предложениям.

В завершение хочу пожелать всем успешной и творческой работы в новом году.

*Главный редактор, заслуженный деятель науки РФ,
член-корреспондент РАН, доктор медицинских наук,
профессор А. Ю. Васильев*



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Оригинальная статья

УДК 616-006

<https://doi.org/10.52560/2713-0118-2024-1-9-19>

Редкий случай локализации глиобластомы: инфратенториальное расположение (обзор литературы и клинический случай)

Р. С. Талыбов¹, Т. Н. Трофимова², В. И. Павлова³, И. В. Швецов⁴,
В. В. Мочалов⁵, М. Э. Мартиросян⁶, А. А. Прищепов⁷

^{1,3,6,7}Тюменский государственный медицинский университет Минздрава России,
Тюмень, Россия

²Институт мозга человека имени Н. П. Бехтеревой Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия

^{4,5}Областная клиническая больница № 2, Тюмень, Россия

¹rustam230789@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3820-2057>

²ttrofimova@groupmmc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4871-2341>

³pavlova.valeria@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0899-0809>

⁴shved1906@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9761-1198>

⁵Luther1992@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0608-8915>

⁶migran-m@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-9709-5031>

⁷alprishchepov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5639-7321>

Автор, ответственный за переписку: Рустам Сабирович Талыбов,
rustam230789@gmail.com

Резюме

Глиобластома — это самая распространенная первичная высокозлокачественная опухоль головного мозга, встречающаяся преимущественно во взрослой возрастной группе. Это инфильтрирующая опухоль, располагающаяся в глубине белого вещества, подкорковых структурах и таламусе, типично супратенториальной локализации, что составляет более 99 % случаев. Первичный инфратенториальный рост глиобластом, поражающий мозжечок, является очень редким состоянием и встречается менее чем в 1 % в структуре описанных в литературе случаев. Дифференциальный диагноз обычно проводится с солитарным метастатическим поражением и медуллобластомой. Клинические проявления поражений мозжечка часто схожи, а методы хирургического и химиолучевого лечения, прогноз и исход при разных гистологических формах опухолей отличаются. Таким образом, лучевая диаг-

© Талыбов Р. С., Трофимова Т. Н., Павлова В. И., Швецов И. В., Мочалов В. В., Мартиросян М. Э., Прищепов А. А., 2024

ностика, реализованная при помощи мультипараметрического МРТ картирования, имеет решающее значение в планировании лечения.

В публикации представлен редкий случай инфратенториального расположения глиобластомы у пациента 45 лет.

Ключевые слова: инфратенториальная глиобластома, солитарное метастатическое поражение, медуллобластома, мультипараметрическое МРТ картирование

Для цитирования: Талыбов Р. С., Трофимова Т. Н., Павлова В. И., Швецов И. В., Мочалов В. В., Мартиросян М. Э., Прищепов А. А. Редкий случай локализации глиобластомы: инфратенториальное расположение (обзор литературы и клинический случай) // Радиология – практика. 2024;1:9-19. <https://doi.org/10.52560/2713-0118-2024-1-9-19>

ORIGINAL RESEARCH

Original research

Atypical case of glioblastoma localization: infratentorial localization (Clinical Case and the Review of the Literature)

R. S. Talybov¹, T. N. Trofimova², V. I. Pavlova³, I. V. Shvetsov⁴,
V. V. Mochalov⁵, M. E. Martirosyan⁶, A. A. Prishchepov⁷

^{1,3,6,7} Tyumen State Medical University of the Ministry of Healthcare of Russia, Tyumen, Russia

² Federal State Budgetary Institution of Science «The Institute of the Human Brain of N. P. Bekhtereva», St. Petersburg, Russia

^{4,5} Regional clinical hospital № 2, Tyumen, Russia

¹ rustam230789@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3820-2057>

² ttrofimova@groupmmc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4871-2341>

³ pavlova.valeria@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0899-0809>

⁴ shved1906@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9761-1198>

⁵ Luther1992@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0608-8915>

⁶ migran-m@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-9709-5031>

⁷ alprishchepov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5639-7321>

Corresponding author: Rustam Sabirovich Talybov, rustam230789@gmail.com

Abstract

Glioblastoma is the most common high-grade primary brain tumor, occurring primarily in adults. This infiltrating tumor locates deep in the white matter, subcortical structures and thalamus. The typical localization of glioblastoma is supratentorial, accounting for more than 99 % of cases. Primary infratentorial growth of glioblastomas involving the cerebellum is a very rare condition, occurring in less than 1 % of cases reported in the literature. The differential diagnosis consists mainly of solitary metastatic lesions and medulloblastoma. The clinical manifesta-

tions of cerebellar lesions are similar, but the methods of surgical and chemoradiotherapy treatment, prognosis and outcome in cases with various histologic types of the tumors are different. Thus radiology, carried out using multiparametric MRI mapping, is an decision making procedure. In this publication we present an atypical case of infratentorial glioblastoma in a 45-year-old patient.

Keywords: infratentorial glioblastoma, solitary metastatic lesion, medulloblastoma, multiparametric MRI mapping

For citation: Talybov R. S., Trofimova T. N., Pavlova V. I., Shvetsov I. V., Mochalov V. V., Martirosyan M. E., Prishchepov A. A. Atypical case of glioblastoma localization: infratentorial localization (Clinical Case and the Review of the Literature) // *Radiology – Practice*. 2024;1:9-19. (In Russ.). <https://doi.org/10.52560/2713-0118-2024-1-9-19>

Актуальность

Глиобластомы (ГБ) являются наиболее распространенными первичными злокачественными супратенториальными опухолями центральной нервной системы. На их долю приходится до 60 % среди всех глиальных опухолей. В Российской Федерации глиобластомы ежегодно регистрируются в 3–4 случаях на 100 тысяч человек. Данные опухоли обычно возникают после 40 лет с пиком заболеваемости между 65 и 75 годами [1]. Менее 1 % занимает локализация в мозжечке [2]. Согласно популяционному исследованию на базе Национального института онкологии в рамках программы «Surveillance, Epidemiology, and End Results» (SEER), за 12-летний период было зарегистрировано не более 100 случаев данной локализации [3]. В связи с редкой встречаемостью в клинической практике, низкой освещенностью в литературе ГБ мозжечка обычно не рассматривается в дифференциальном ряду перед операцией, хотя и имеет определенные диагностические признаки при мультипараметрическом МРТ (мпМРТ) картировании, позволяющие ее заподозрить [4]. В первую очередь рассматриваются метастазы в мозжечок и медуллобластомы [5].

Цель: продемонстрировать практическое применение протокола мультипараметрического МРТ-исследования

в дифференциальной диагностике атипичного варианта расположения глиобластомы.

Клиническое наблюдение

Пациент 45 лет, поступил в ГБУЗ ТО «Областная клиническая больница № 2» с жалобами на постоянную выраженную диффузную головную боль сжимающего характера, эпизоды несистемного головокружения и рвоту, шаткость при ходьбе. При сборе медицинского анамнеза у пациента сопутствующих заболеваний выявлено не было.

Магнитно-резонансная томография головного мозга проводилась на аппарате Signa, Voyager, General Electric, 1,5 Тл, в следующих последовательностях: T1, T2, T2 FLAIR, DWI, SWAN, ASL-перфузии в трех взаимоперпендикулярных плоскостях с толщиной среза 1–5 мм до и после введения гадолиний-содержащего контрастного препарата.

По данным проведенного мпМРТ-исследования в медиальных отделах левой гемисферы мозжечка определялось неоднородное внутримозговое образование, окруженное зоной перифокального отека (рис. 1, а), с ограничением диффузии от солидной части по данным DWI и ADC (рис. 1, б, в). Опухоль отличалась наличием артефактов магнитной

восприимчивости за счет микрокровоизлияний и сосудистых шунтов (рис. 1, *з*) и интенсивным кольцевидным накоплением парамагнетика (рис. 1, *д*). На перфузионных картах ASL (Arterial spin labeling) отмечались высокие значения объемного кровотока опухоли (англ. cerebral blood flow, CBF), $CBF = 183,5 \pm 16,59$ мл/100гр/мин (рис. 1, *е*). Кроме того, отмечалась умеренная компрессия четвертого желудочка без признаков окклюзионной гидроцефалии.

Ввиду локализации, структуры опухоли по данным МРТ и характера кон-

трастного усиления проводился дифференциальный диагноз между метастазом, медуллобластомой, гемангиобластомой и злокачественной диффузной глиомой. Гемангиобластома является мезенхимальной опухолью низкой степени злокачественности (grade 1, WHO 2021), которая не характеризуется высокими показателями плотноклеточности и не имеет высокого МР-сигнала на ДВИ, а также отличается очень высоким объемным кровотоком ($CBF = 360,8 \pm 12,39$ мл/100гр/мин, $rCBF = 7,96 \pm 3,12$) и, следовательно, была исключена из

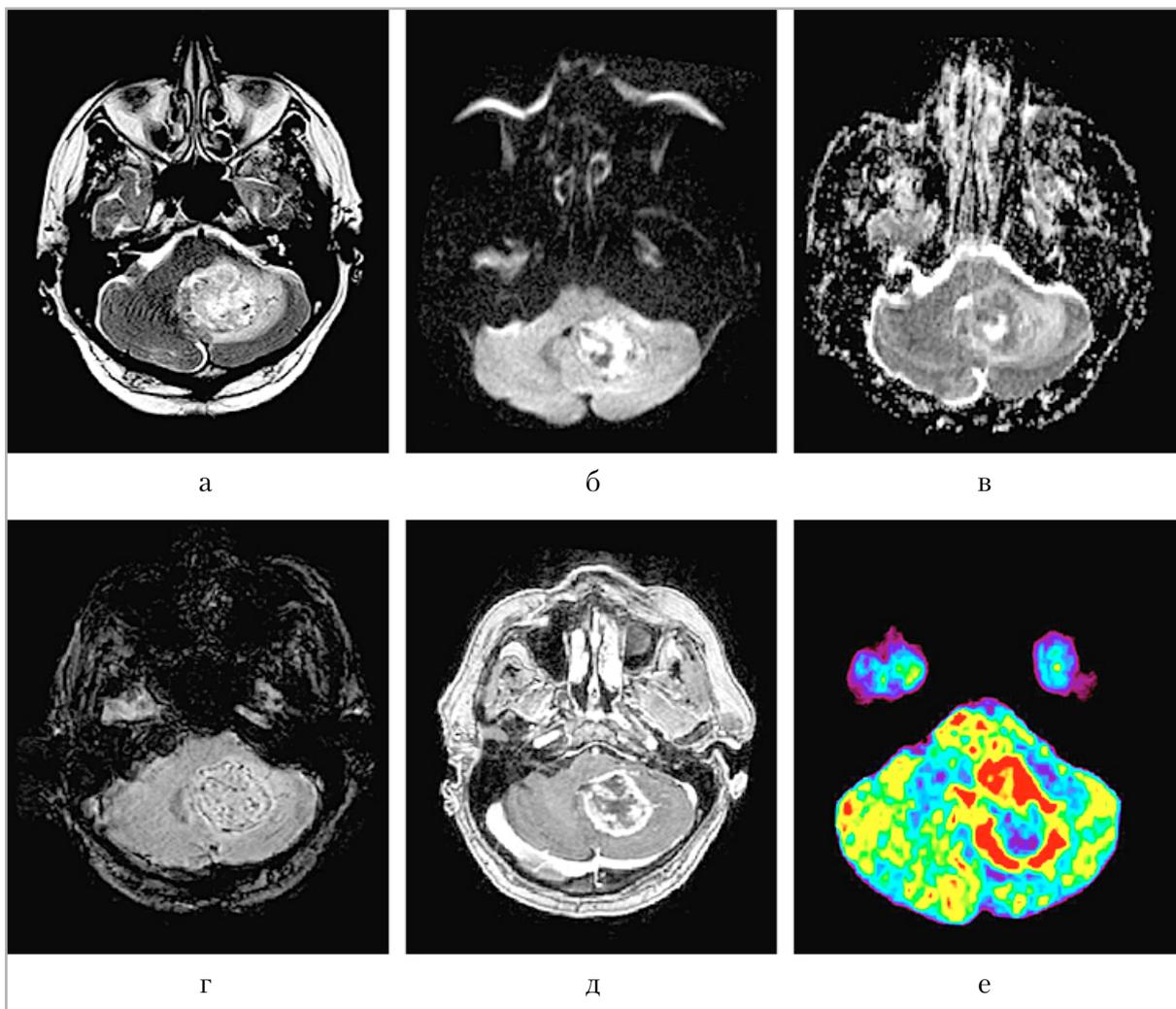


Рис. 1. МРТ головного мозга пациента с глиобластомой в мозжечке: *а* – T2-ВИ; *б, в* – DWI, ADC; *г* – SWAN; *д* – T1-ВИ с контрастированием; *е* – CBF. В левой гемисфере мозжечка на фоне умеренного вазогенного отека визуализируется внутримозговая опухолевая масса, характеризующаяся гипоинтенсивным сигналом на T2-ВИ, интенсивным кольцевидным накоплением контрастного препарата, ограничением диффузии с соответствующими участками повышения значений скорости мозгового кровотока. ИП SWAN указывает на наличие сосудистых шунтов в структуре образования

предполагаемого дифференциально-диагностического ряда. Наличие медуллобластомы также было маловероятно в связи с возрастом пациента, несмотря на подобные злокачественным опухолям визуализационные характеристики: опухоль с выраженным ограничением диффузии, с неоднородным типом контрастирования в зависимости от молекулярного подтипа и промежуточными значениями скорости мозгового кровотока опухоли. Пациенту было выполнено МСКТ-сканирование всего тела по протоколу «онкопоиск», первичный очаг был исключен. Таким образом, финальный дифференциальный диагноз проводился между метастазом и злокачественной глиомой. Вследствие нарастания тяжести состояния пациента и риска возникновения гидроцефалии, представляющей угрозу для жизни, пациенту была произведена резекция опухоли. Материал направлен на патоморфологическое исследование. При микроскопическом исследовании обнаружен классический вариант эпителиоидной глиобластомы,

представленный опухолевой тканью с атипичными полиморфными клетками, гиперхромией ядер и повышенной митотической активностью (рис. 2, *а*). Структура опухоли с неравномерной клеточностью, агрегацией клеток вокруг очагов некроза в виде характерных «псевдопалисадов» (рис. 2, *б*) и наличием сосудов с выраженной пролиферацией эндотелия (рис. 2, *в*).

Пациент был выписан в удовлетворительном состоянии на двенадцатые сутки после операции и перенаправлен на консультацию к онкологу в ГАУЗ ТО «МКМЦ Медицинский город» для решения вопроса о дальнейшей тактике ведения и получения химиолучевой терапии.

Обсуждение

При мпМРТ анализе головного мозга дифференциально-диагностический поиск проводился между метастазом, медуллобластомой и злокачественной глиомой. Вследствие крайней редкости и ограниченно освещенной в литературе глиомной этиологии пора-

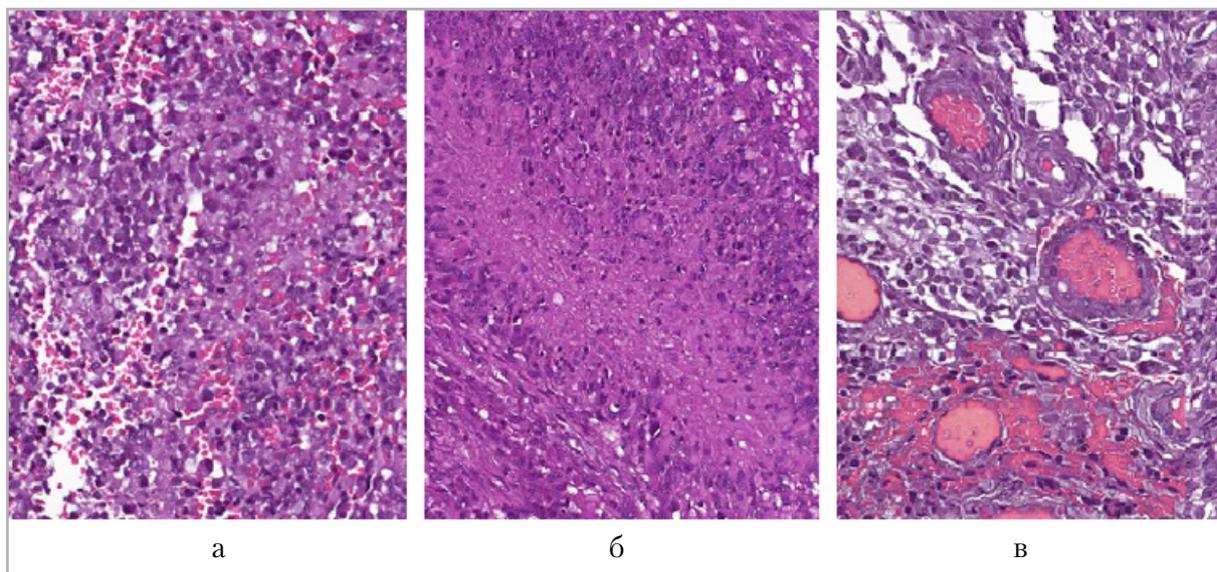


Рис. 2. Гистологическое исследование, увеличение $\times 40$, окраска гематоксилином и эозином. Классические гистопатологические признаки глиобластомы: *а* — гетерогенная опухолевая ткань с атипичными полиморфными клетками, с гиперхромными ядрами и обилием митозов, *б* — очаги некрозов, окруженные опухолевыми клетками с формированием псевдопалисада, *в* — клеточно-васкулярный участок опухоли с крупными сосудами с выраженной эндотелиальной пролиферацией

жения мозжечка диагноз глиобластома был смещен на второстепенный план. Диагностические проявления метастазов и медуллобластом (в частности, sonic hedgehog (SHH) и wing-less-type-subgroup (WNT) группы) имеют схожую морфологию при МРТ-визуализации.

Метастазы характеризуются кольцевидным паттерном контрастирования с центральной зоной некроза, кровоизлияниями, ограничением диффузии в солидном компоненте (рис. 3). Медуллобластомы, как правило, — опу-

холи с вариабельной структурой и контрастированием, которые могут выглядеть гомо- или гетерогенными, иметь кисты, участки некрозов, кровоизлияния и кальцинаты. Контрастирование медуллобластом разнообразно (однородное или гетерогенное с различной выраженностью), диффузия ограничена (рис. 4).

Несмотря на нехарактерное для ГБ расположение при наличии субтенториального процесса, стоит учитывать отличительную особенность злокачественных глиом — внутрипу-

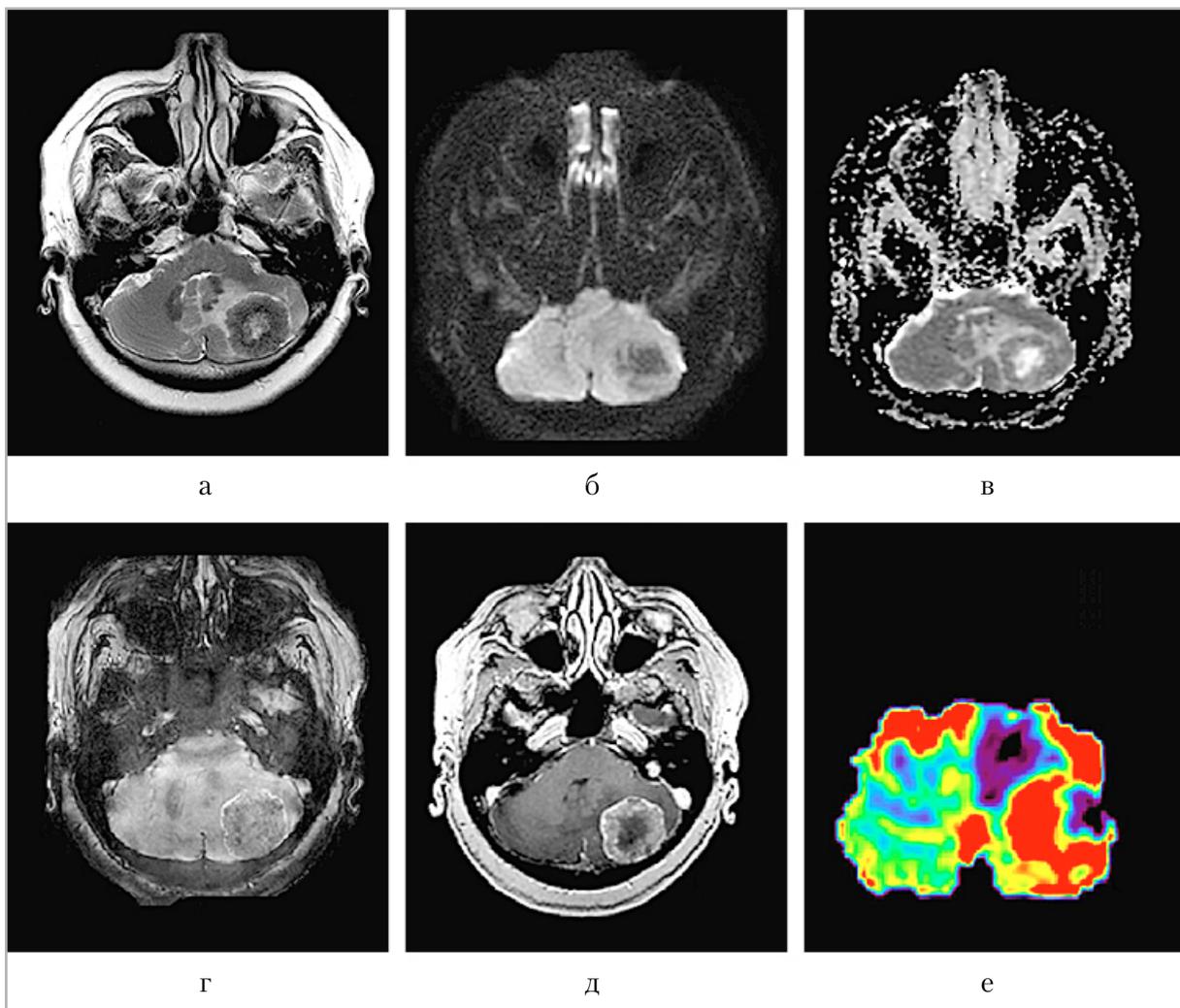


Рис. 3. МРТ головного мозга пациента с солитарным метастазом карциномы легкого: *а* — T2-ВИ; *б, в* — DWI, ADC; *г* — SWAN; *д* — T1-ВИ с контрастированием; *е* — CBF. В левой гемисфере мозжечка определяется опухоль с гетерогенным контрастированием, ограничением диффузии, окруженная выраженной зоной отека. ИП SWAN демонстрирует наличие артефактов магнитной восприимчивости за счет кровоизлияний и интратуморальных сосудистых шунтов. По результатам ASL-перфузии определяются высокие значения CBF в структуре опухоли $220 \pm 11,8$ мл/100гр/мин.

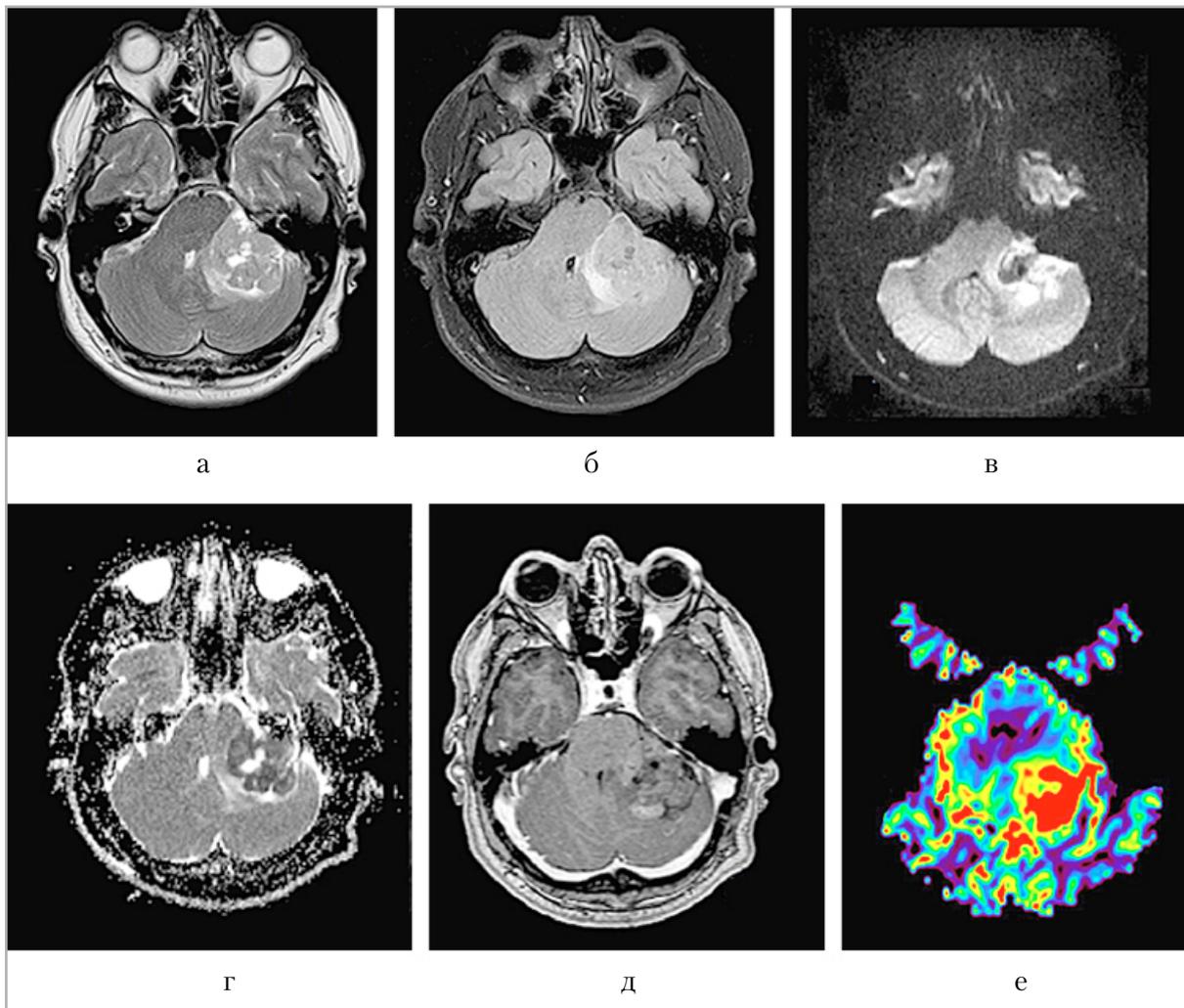


Рис. 4. МРТ головного мозга пациента с медуллобластомой WNT-типа: *a, б* – T2, T2-FLAIR ВИ; *в, г* – DWI, ADC; *д* – T1-ВИ с контрастированием; *е* – CBF. В средней ножке мозжечка слева на фоне вазогенного отека выявляется опухоль, характеризующаяся неоднородным сигналом на T2, интенсивным кольцевидным накоплением контрастного препарата, ограничением диффузии, а также с соответствующими участками повышения значений скоростного мозгового кровотока в пределах $155 \pm 12,5$ мл/100гр/мин

холевую неоднородность. Внутриопухолевая неоднородность проявляется одновременным наличием двух компонентов опухоли: накапливающий и не накапливающий контрастный препарат, последний нередко демонстрирует повышенные значения перфузионных показателей CBF. Данная особенность обусловлена повышением плотности сосудов с эндотелиальной пролиферацией без нарушения целостности гематоэнцефалического барьера (ГЭБ), что невозможно встретить в метастазах или медулло-

бластомах. Пересмотр и разбор нашего клинического случая подтвердил наличие второго, не накапливающего контрастный препарат компонента с высокими значениями CBF, расположенными по периферии контрастнакапливающей части. Неверная интерпретация МРТ, интраоперационное видение нейрохирургов, наличие в экспресс-биопсийном материале периваскулярных псевдорозеток (рис. 5) в совокупности могут направить патоморфолога на этапе доиммуногистохимического исследования

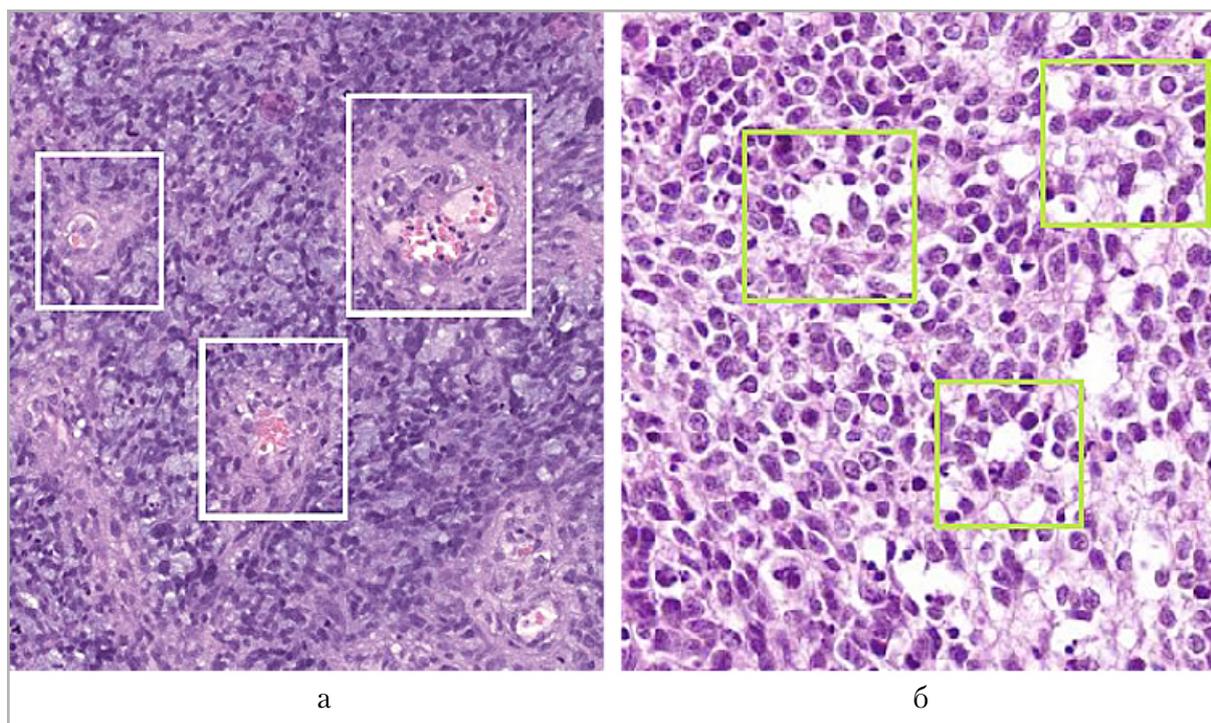


Рис. 5. Гистологическое исследование, увеличение $\times 40$, окраска гематоксилином и эозином. *а* — материал глиобластомы; *б* — материал медуллобластомы. На фоне обилия опухолевых клеток с высокой митотической активностью продемонстрированы плотные клеточные скопления вокруг сосудов с ануклеарной светлой зоной, называемые периваскулярными псевдорозетками

по ложному пути в пользу медуллобластомы, что может повлечь за собой дополнительные временные и материальные затраты. Таким образом, в диагностике опухолей задней черепной ямки не стоит забывать о глиобластомах, для которых данная локализация является крайне редкой, но вполне возможной. При этом следует обращать внимание на наличие не контрастируемой, но высокоперфузируемой периферической части новообразования. ASL протокол должен быть обязательной составной частью диагностического МРТ-исследования.

Вывод

Несмотря на сходные клинико-визуализационные проявления метастазов, медуллобластом и глиобластом, последние могут иметь характерные (уникальные) отличительные особенности. Правильная интерпре-

тация данных мпМРТ картирования с применением перфузионных технологий врачом-рентгенологом способна предоставить колоссальную информацию нейрохирургу, помочь патоморфологу и изменить планирование объема резекции — ключевого фактора в оперативном лечении диффузных злокачественных глиом.

Список источников / References

1. Wei Wu, Jessica L. Klockow, Michael Zhang, Famyrah Lafortune, Edwin Chang, Linchun Jin, Yang Wu, Heike E. Daldrup-Link. Glioblastoma multiforme (GBM): An overview of current therapies and mechanisms of resistance. *Pharmacol. Res.* 2021;171:105780. DOI: 10.1016/j.phrs.2021.105780
2. Raghu A. L. B., Chen J. A., Valdes P. A., Essayed W., Claus E., Arnaout O., Smith T. R., Chiocca E. A., Peruzzi P. P., Bern-

- stock J. D. Cerebellar High-Grade Glioma: A Translationally Oriented Review of the Literature. *Cancers (Basel)*. 2022;1:174. DOI: 10.3390/cancers15010174
3. Li J., Huang W., Chen J., Li Z., Liu B., Wang P., Zhang J. Nomograms for predicting the overall survival of patients with cerebellar glioma: an analysis of the surveillance epidemiology and end results (SEER) data-base. *Sci. Rep.* 2021;11:19348. DOI: 10.1038/s41598-021-98960-3
4. Talybov R., Beylerli O., Mochalov V., Prokopenko A., Ilyasova T., Trofimova T., Sufianov A., Guang Y. Multiparametric MR Imaging Features of Primary CNS Lymphomas. *Front. Surg.* 2022;9:887249. DOI: 10.3389/fsurg.2022.887249
5. Bose A., Prasad U., Kumar A., Kumari M., Suman S. K., Sinha D. K. Characterizing Various Posterior Fossa Tumors in Children and Adults With Diffusion-Weighted Imaging and Spectroscopy. *Cureus.* 2023;5:e39144. DOI: 10.7759/cureus.39144

Сведения об авторах / Information about the authors

Талыбов Рустам Сабирович, врач-рентгенолог, ассистент кафедры онкологии с курсом лучевой диагностики и лучевой терапии Федерального государственного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Тюменский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Тюмень, Россия.

625023, Тюмень, ул. Одесская, д. 54.

+7 (922) 077-79-29

Вклад автора: формирование концепции, написание текста статьи.

Talybov Rustam Sabirovich, Radiologist, assistant of the Department of Oncology with a course of radiation diagnostics and radiation therapy Tyumen State Medical University of the Ministry of Healthcare of Russia, Tyumen, Russia.

54, ul. Odesskaya, 625023, Tyumen, Russia.

+7 (922) 077-79-29

Author's contribution: conceptualization, writing the text draft.

Трофимова Татьяна Николаевна, доктор медицинских наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории нейровизуализации Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт мозга человека имени Н. П. Бехтеревой» Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия.

197376, Санкт-Петербург, ул. Академика Павлова, д. 9.

+7 (921) 993-30-09

Вклад автора: курация статьи, разработка дизайна исследования.

Trofimova Tatyana Nikolaevna, Dr. of Sci. (Med.), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, the Federal State Budgetary Institution of Science «The Institute of the Human Brain of N. P. Bekhtereva», RAS, Chief Scientific Officer of Neuroimaging Laboratory, St. Petersburg, Russia.

9, ul. Academician Pavlov, St. Petersburg, 197376, Russia.

+7 (921) 993-30-09

Author's contribution: editing the text, development of the study design.

Павлова Валерия Игоревна, кандидат медицинских наук, доцент, заведующая кафедрой онкологии с курсом лучевой диагностики и лучевой терапии Федерального государственного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Тюменский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Тюмень, Россия.

625023, Тюмень, Одесская ул., д. 54.

+7 (904) 491-66-22

Вклад автора: внесение правок в текст, оформление визуальной части статьи.

Pavlova Valeria Igorevna, Cand. of Sci. (Med.), Head of the Department of Oncology with a course of radiation diagnostics and radiation therapy Tyumen State Medical University.
54, ul. Odesskaya, 625023, Tyumen, Russia.
+7 (904) 491-66-22
Author's contribution: editing the text, visualization

Швецов Иван Владимирович, кандидат медицинских наук, главный врач областной клинической больницы № 2 Тюмень, Россия.
625039, Тюмень, ул. Мельникайте, д. 75.
+7 (922) 265-65-12
Вклад автора: курация статьи, разработка дизайна исследования.

Shvetsov Ivan Vladimirovich, Cand. of Sci. (Med.), Head physician of the Regional clinical hospital № 2, Tyumen, Russia.
75, ul. Melnikaite, Tyumen, 625039, Russia.
+7 (922) 265-65-12
Author's contribution: data curation, development of the study design.

Мочалов Вадим Васильевич, врач-рентгенолог областной клинической больницы № 2, Тюмень, Россия.
625039, Тюмень, ул. Мельникайте, д. 75.
+7 (950) 494-97-81
Вклад автора: сбор и анализ клинических данных, анализ литературы.

Mochalov Vadim Vasilevich, Radiologist, Regional clinical hospital № 2, Tyumen, Russia.
75, ul. Melnikaite, Tyumen, 625039, Russia.
+7 (950) 494-97-81
Author's contribution: collection and analysis of a clinical data, literature analysis.

Мартирисян Мигран Эдуардович, ассистент кафедры анатомии человека Федерального государственного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Тюменский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Тюмень, Россия.
625023, Тюмень, Одесская ул., д. 54.
+7 (9080) 869-22-22
Вклад автора: внесение правок в текст, курация статьи.

Martirosyan Migran Eduardovich, assistant of the Department of human anatomy Tyumen State Medical University of the Ministry of Healthcare of Russia, Tyumen, Russia.
54, ul. Odesskaya, Tyumen, 625023, Russia.
+7 (908) 869-22-22
Author's contribution: editing the text, data curation.

Прищепов Александр Анатольевич, ассистент кафедры онкологии с курсом лучевой диагностики и лучевой терапии Федерального государственного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Тюменский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Тюмень, Россия.
625023, Тюмень, Одесская ул., д. 54.
+7 (929) 200-15-50
Вклад автора: анализ литературы, сбор клинических данных.

Prishchepov Aleksandr Aleksandrovich, assistant of the Department of Oncology with a course of radiation diagnostics and radiation therapy Tyumen State Medical University of the Ministry of Healthcare of Russia, Tyumen, Russia.
54, ul. Odesskaya, Tyumen, 625023, Russia.
+7 (929) 200-15-50
Author's contribution: analysis of a clinical data, literature analysis.

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 07.11.2023;
одобрена после рецензирования 07.12.2023;
принята к публикации 09.01.2024.

The article was submitted 07.11.2023;
approved after reviewing 07.12.2023;
accepted for publication 09.01.2024.



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Оригинальная статья
УДК 616.8-006
<https://doi.org/10.52560/2713-0118-2024-1-20-36>

Исследования перифокальной зоны глиом головного мозга с помощью магнитно-резонансной томографии (обзор литературы)

Н. Е. Захарова¹, А. И. Баталов², Э. Л. Погосбемян³, С. А. Горяйнов⁴,
Л. М. Фадеева⁵, А. Е. Быканов⁶, А. Н. Тюрина⁷, И. В. Чехонин⁸,
С. А. Галстян⁹, И. Н. Пронин¹⁰, Д. Ю. Усачев¹¹

ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия

¹ nzakharova@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0516-3613>

² abatalov@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8924-7346>

³ epogosbekyan@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4803-6948>

⁴ sgoraynov@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6480-3270>

⁵ lmf@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3240-5585>

⁶ abykanov@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0588-4779>

⁷ aturina@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2333-7867>

⁸ ivan.chekhonorin@gmail.com, ichekhonorin@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6652-2472>

⁹ sgalstyan@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9953-6654>

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

¹¹ dousachev@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9811-9442>

Автор, ответственный за переписку: Наталья Евгеньевна Захарова, nzakharova@nsi.ru

Резюме

Представлен обзор литературы и собственный опыт использования современных последовательностей МРТ, в т. ч. диффузионно-куртозисной МРТ, в исследованиях перифокальной зоны глиом. Анализ комплекса диффузионных и перфузионных количественных МР-показателей дает информацию о границах глиом в зонах с сохранным гематоэнцефалическим барьером, не накапливающих контрастный препарат. Дифференцирование «чистого» перифокального вазогенного отека и отека с инфильтрацией клетками глиомы, а также выявление участков опухолевой инфильтрации в перитуморальном интактном, по данным МРТ, веществе мозга при глиомах высокой степени злокачественности дают возможность определить истинную распространенность опухоли. Полученные данные позволят разра-

© Захарова Н. Е., Баталов А. И., Погосбемян Э. Л., Горяйнов С. А., Фадеева Л. М., Быканов А. Е., Тюрина А. Н., Чехонин И. В., Галстян С. А., Пронин И. Н., Усачев Д. Ю., 2024

батывать персонализированный навигационный алгоритм для хирургического удаления опухоли и последующий индивидуальный план лучевой и химиотерапии, а также прогнозировать течение заболевания.

Ключевые слова: диффузионно-куртозисная МРТ, ASL-перфузия, головной мозг, глиомы

Для цитирования: Захарова Н. Е., Баталов А. И., Погосбемян Э. Л., Горяинов С. А., Фадеева Л. М., Быканов А. Е., Тюрина А. Н., Чехонин И. В., Галстян С. А., Пронин И. Н., Усачев Д. Ю. Исследования перифокальной зоны глиом головного мозга с помощью магнитно-резонансной томографии (обзор литературы) // Радиология – практика. 2024;1:20-36. <https://doi.org/10.52560/2713-0118-2024-1-20-36>

ORIGINAL RESEARCH

Original research

Magnetic Resonance Imaging in Studies of Perifocal Zone of Brain Gliomas (a Literature Review)

N. E. Zakharova¹, A. I. Batalov², E. L. Pogosbekyan³, S. A. Goryaynov⁴,
L. M. Fadeeva⁵, A. E. Bykanov⁶, A. N. Tyurina⁷, I. V. Chekhonin⁸,
S. A. Galstyan⁹, I. N. Pronin¹⁰, D. Yu. Usachev¹¹

Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

¹nzakharova@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0516-3613>

²abatalov@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8924-7346>

³epogosbekyan@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4803-6948>

⁴sgoraynov@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6480-3270>

⁵lmf@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3240-5585>

⁶abykanov@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0588-4779>

⁷aturina@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2333-7867>

⁸ivan.chekhonorin@gmail.com, ichekhonorin@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6652-2472>

⁹sgalstyan@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9953-6654>

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

¹¹dousachev@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9811-9442>

Corresponding author: Natalia E. Zakharova, nzakharova@nsi.ru

Abstract

This review provides insight into application of modern MRI modalities including diffusion kurtosis imaging in assessment of perifocal glioma zone. Differentiation of “pure” perifocal vasogenic edema from edema infiltrated by glioma cells, as well as identification of peritumoral intact (on conventional MRI) brain matter infiltration make it possible to determine glial tumor borders more accurately. Analysis of diffusion and perfusion quantitative

MR data allow determining glioma borders in areas with unaltered blood-brain barrier. There is a growing possibility to develop a personalized navigation algorithm for surgical removal of the tumor, followed by the determination of an individual plan for radiation and chemotherapy, as well as prediction of disease outcomes.

Keywords: Diffusion-kurtosis Mri, Asl-perfusion, Brain, Glioma

For citation: Zakharova N. E., Batalov A. I., Pogosbekyan E. L., Goryaynov S. A., Fadeeva L. M., Bykanov A. E., Tyurina A. N., Chekhonin I. V., Galstyan S. A., Pronin I. N., Usachev D. Yu. Magnetic Resonance Imaging in studies of perifocal zone of brain gliomas (a literature review). *Radiology – Practice*. 2024;1:20-36. (In Russ.). <https://doi.org/10.52560/2713-0118-2024-1-20-36>

Список сокращений и пояснения

ДТ МРТ – диффузионно-тензорная МРТ

ДК МРТ – диффузионно-куртозисная МРТ

ДВИ – диффузионно-взвешенные изображения

FA – fractional anisotropy – фракционная анизотропия (ФА)

МК – mean kurtosis – средний куртозис

АК – axial kurtosis – аксиальный куртозис

РК – radial kurtosis – радиальный куртозис

КА – kurtosis anisotropy – куртозисная анизотропия

AWF – axonal water fraction – фракция аксональной воды

AxIAD – axial intraaxonal diffusion – аксиальная интрааксональная диффузия

ADC – apparent diffusion coefficient – измеряемый коэффициент диффузии

MD – mean diffusion – средняя диффузия

CBV (nCBV) – cerebral blood volume (normalized CBV) – регионарный объем крови (нормализованный объем крови) при перфузии

HGG – high grade glioma – глиома высокой степени злокачественности

Перифокальный отек (отек-инфильтрация) – зона повышения МР-сигнала в T2- и T2-FLAIR-режимах перифокально части опухоли, накапливающей контрастный препарат

Перитуморальная зона – вещество мозга за пределами зоны изменения МР-сигнала на всех стандартных МРТ изображениях

Введение

Средняя продолжительность жизни пациентов с глиомами высокой степени злокачественности, а особенно с глиобластомами, несмотря на современное комбинированное лечение, до сих пор остается невысокой, составляя всего 12–15 месяцев [4, 7]. Этому способству-

ет прогностически абсолютно неблагоприятный инфильтративный характер роста глиом и диффузное поражение структур мозга.

Известно, что глиомы высокой степени злокачественности распространяются за пределы контрастируемого при МРТ и обычно удаляемого во вре-

мя операции фрагмента опухоли. При этом часть глиомы, не накапливающая контрастный препарат, инфильтрирует перифокальный отек. Оценка распространенности неконтрастируемой части опухоли обязательна при исследовании пациентов с глиомами, особенно при постоперационной динамике [7, 9]. Однако изменения, обусловленные инфильтрацией клетками опухоли перифокального вазогенного отека, не визуализируются при использовании стандартных МРТ-протоколов, что приводит к субоптимальному их удалению и ухудшению прогноза. При аутопсии опухолевые клетки глиом высокой степени злокачественности выявляются на отдалении от основной части опухоли и зоны изменения МР-сигнала по T2-взвешенным изображениям [25]. В то же время расширение области резекции или даже gross-total резекция глиом высокой степени злокачественности является одним из основных условий увеличения продолжительности жизни пациентов [21].

Дифференцирование «чистого» перифокального вазогенного отека и отека с инфильтрацией клетками глиомы, а также выявление участков опухолевой инфильтрации в перитуморальном интактном (по данным МРТ) веществе мозга при глиомах высокой степени злокачественности позволило бы более точно определить истинную распространенность опухоли, планировать персонализированное нейрохирургическое лечение и лучевую терапию [26].

Методики МРТ, применяемые в оценке распространенности глиом

Для определения распространенности глиом в разных исследованиях применялись различные последовательности МРТ, в том числе количественные — диффузионно-взвешенные, релаксометрические и перфузионные. На основе диффузионно-взвешенных

изображений (ДВИ) возможно определить градиент коэффициента диффузии в перифокальном отеке как признак опухолевой инфильтрации (вследствие плотноклеточности опухоли) [16]. Количественный анализ при МР-релаксометрии выявил изменения, указывающие на опухолевую инвазию в перифокальном отеке при злокачественных глиомах [7].

При КТ- и МР-перфузии повышение объемного кровотока и объема крови отражает наличие неоангиогенеза, индуцированного опухолью. Ранее была доказана возможность дифференцирования глиом высокой и низкой степени злокачественности при помощи рCASL-перфузии [1, 5]. На основе перфузионных методов была выявлена возможность дифференцирования глиобластом и метастазов, глиобластом и лимфом, а также был исследован перитуморальный отек [6, 22].

В своих работах Баталов А. И. и соавт. (2018), Batalov A. I. et al. (2022), Zakharova N. et al. (2023) использовали методику бесконтрастной МР-перфузии рCASL, которая показала, что объемный кровоток в зоне активного роста глиомы был достоверно выше по сравнению с зоной перифокального отека-инфильтрации, что говорит о выраженном неоангиогенезе в строме опухоли. По мнению авторов, биопсия должна проводиться из участка наибольшего кровотока, определенного при помощи рCASL-методики МР-перфузии [1, 5, 26].

Значимые изменения параметра фракционной анизотропии (FA) диффузионно-тензорной МРТ (ДТ МРТ) были выявлены при изучении опухолевого перифокального отека [17].

Несмотря на диагностические возможности современных МРТ-технологий, все эти методики не могут однозначно определить истинные границы инфильтрации мозгового вещества опухолевыми клетками. Исследование

глиом остается сложным процессом, а результаты исследований часто трудно интерпретировать.

Диффузионно-куртозисная МРТ в оценке глиом головного мозга

Диффузионно-куртозисная МРТ (ДК МРТ) позволяет изучать негауссовское распределение диффузии воды, более точно *in vivo* отражая сложную микроструктуру тканей по сравнению с другими количественными методами нейровизуализации [11, 23]. Согласно многим исследованиям, параметры ДК МРТ являются неинвазивными биомаркерами градации глиом [3, 14, 17–19]. Все эти работы преимущественно направлены на дифференциацию глиом различной степени злокачественности и показывают высокую эффективность ДК МРТ [3].

Средний куртозис (МК) — наиболее изученный параметр ДК МРТ — в исследованиях показал достоверную точность при дифференцировании глиом высокой и низкой степени злокачественности, он более чувствителен, чем стандартные диффузионные показатели, к изменениям микроструктуры тканей мозга, так как диффузия воды в биологических тканях не следует гауссовскому распределению [8].

Однако описание сложной микроструктуры тканей мозга не должно быть ограничено одним параметром. ДК МРТ имеет ряд других значимых параметров, например, радиальный куртозис (РК), снижение которого показывает повышенную диффузию в радиальном направлении вследствие повреждения миелиновых оболочек, клеточных мембран, разрыва аксонов [23]. Аксиальный куртозис (АК) определяет движение молекул воды вдоль аксиального направления диффузионного эллипсоида, т. е. параллельно аксону. Повышение этого параметра указывает на нарушение структуры

тканей и косвенно — на внутриклеточные повреждения [23].

По данным разных авторов и нашим данным, фракционная анизотропия (ФА) ДТ МРТ — достаточно надежный показатель, отражающий интегрированность белого вещества, который всегда снижается при нарушении структуры проводящих путей. Таким же надежным представляется показатель «куртозисная анизотропия» (КА) ДК МРТ, показывающий тканевую анизотропию в зонах со сложным пересечением волокон белого вещества, которую недооценивает фракционная анизотропия [13, 26].

Исследование перифокального отека инфильтрации глиом с помощью ДК МРТ дает возможность получения более точных данных по сравнению с ДВИ и ДТ МРТ, дифференцируя отек с инфильтрацией от чистого вазогенного перифокального отека, например, при глиобластомах и метастазах. Инфильтрованное мозговое вещество имеет более сложную структуру при наличии опухолевых клеток, глиоза, отека, новообразованных сосудов, что, по данным разных исследований, приводит к повышению параметра среднего куртозиса по сравнению с зонами чистого отека, в которых МК ниже [2, 17, 24].

Tan Y. et al. (2015) в своей работе исследовали параметры МК, РК, АК, а также ФА и MD в солидной части опухоли и перифокальном отеке при дифференциации high grade глиом и солитарных метастазов, при этом в солидной части опухоли не было найдено достоверного различия параметров между двумя группами, т. к., по мнению авторов, опухолевые массы солидной части замещают разрушенное белое вещество мозга как при глиомах, так и при метастазах. В перифокальном отеке МК, РК, АК были достоверно выше при HGG по сравнению с метастазами, т. к. структура в отеке при астроцитомах более сложная, чем при метастазах по причине инфильтрации ее опухолевыми клетками [24]. Параметры АК и РК, по данным Tan

Y. et al. (2015), выше в перифокальном отеке при астроцитомах, так как опухолевые клетки ограничивают диффузию как в аксиальном, так и в радиальном направлении. В исследовании Tan Y. et al. (2015) чувствительность и специфичность параметра АК была выше, чем РК, что, вероятно, говорит о том, что ограничение диффузии в аксиальном направлении (вдоль аксона) было более очевидно, чем в радиальном (поперек), или что параметр АК более чувствительный к изменениям в ограничении диффузии. Гистологического подтверждения изменений в перифокальном отеке в этой работе не проводилось.

Qiu J. et al. (2022) в исследовании 40 пациентов с глиомами grade 3 и 4 получили корреляции МК, АК, РК с параметром Ki-67 (индекс пролиферативной активности) в солидной части опухоли, а также достоверные различия этих параметров в перифокальном отеке для глиом grade 3 и 4. Эти авторы не нашли корреляций исследуемых параметров с Ki-67 в зоне отека, а также не сделали из этой зоны биопсию [20].

В работе Delgado A. et al. (2017) у 35 больных с астроцитомами и олигодендроглиомами, grade 2 и 3, при помощи ДК МРТ были исследованы диффузионные параметры в перитуморальном, неизменном (по данным МРТ) белом веществе по сравнению с противоположным, непораженным полушарием мозга, а также был определен гистологический подтип опухолей и степень малигнизации. Авторы обнаружили достоверное различие ДК-МРТ-параметров в перитуморальном белом веществе и в противоположном нормальном полушарии, т. е. обнаружили изменения, которые не видны на структурных МРТ. По результатам этой работы такие параметры, как МК, РК, FA, повышались в перитуморальном белом веществе мозга и в противоположном полушарии [8].

Для исследований белого вещества мозга при помощи ДК МРТ была

предложена идеализированная двухкомпонентная модель, которая допускает существование изолированного интрааксонального пространства (аксоны — это бесконечно длинные тонкие цилиндры), а также экстрааксонального пространства. Диффузионного обмена между интра- и экстрааксональными пространствами нет, а миелиновая оболочка условно непроницаема для воды [11], поэтому диффузию исследуют отдельно в этих пространствах. Для описания двухкомпонентной модели используют параметры интра- и экстрааксональной аксиальной и радиальной диффузии (AxIAD, AxEAD, RadIAD и RadEAD), извитости экстрааксонального пространства (TORT), а также фракции аксональной воды (AWF). Grossman E. et al. (2015) в своей работе показали, что AxEAD и RadEAD являются возможными маркерами внеклеточного воспаления, глиоза, а также в целом демиелинизации. Фракция аксональной воды — маркер потери аксонов — показывает отношение объема воды в интрааксональном пространстве к сумме объемов воды в интра- и экстрааксональном пространстве, исключая миелин. Извитость экстрааксонального пространства (TORT) — это потенциальный маркер демиелинизации. Эти параметры не информативны для серого вещества, так как двухкомпонентная модель для данной структуры не применима [11].

С использованием всех возможных параметров ДК МРТ Туркин А. М. и соавт. (2017) ранее показали, что перифокальный вазогенный отек при глиомах высокой степени злокачественности в отличие от метастазов инфильтрирован опухолевыми клетками [2].

Таким образом, в перифокальном отеке диффузионно-куртозисные параметры белого вещества изменены благодаря наличию вазогенного отека и опухолевой инфильтрации. Но за

пределами измененного МР-сигнала по T2-FLAIR-изображениям патологическое изменение ДК МРТ параметров белого вещества, по нашему мнению, может быть обусловлено инфильтрацией опухолевыми клетками [26].

Мультипараметрические исследования

Мультипараметрический анализ применялся ранее не только для исследования перифокальной опухолевой инфильтрации, но и для прогнозирования направления продолженного роста глиобластом [2, 4, 15, 24]. Целью этих исследований было *in vivo* получение патофизиологической информации о неоангиогенезе, целостности белого вещества и клеточной пролиферации при помощи количественных МРТ-параметров [17].

В работе Gates E. D. H. et al. (2020) авторы предприняли попытку градации глиом с применением машинного обучения при помощи дооперационных МРТ и специфических (виртуальных) данных биопсии в противоположном, не пораженном полушарии (зеркально зоне биопсии опухоли). Зону «виртуальной» биопсии авторы определили как референсную. МРТ-исследования включали не только анатомические изображения, но и диффузионные, перфузионные последовательности, исследование проницаемости, а затем проводилась стереотаксическая биопсия опухоли до ее удаления. Было исследовано 23 пациента с глиомами, grade 2, 3, 4. Степень злокачественности опухолей была показана с 96 % точностью при применении 4 параметров — T2, ADC, CBV и константы переноса при DCE перфузии (dynamic contrast enhanced, перфузия с динамическим контрастированием). В своей работе они указали, что хотели бы получить образцы тканей из перифокального отека и перитуморального нормального вещества мозга, но этический комитет их не поддержал [10].

Мультипараметрический анализ, включающий T1, T1 с контрастным препаратом, T2, T2-FLAIR, диффузионно-тензорную МРТ, DSC-перфузию, машинное обучение, проведенный Akbari H. et al. (2016) для исследования глиобластом, продемонстрировал гетерогенность перитуморальной области и паттерны опухолевой инфильтрации, прогнозирующие последующее направление распространения опухоли. Однако при этом исследовании не были получены образцы тканей из перитуморальных зон предполагаемой инфильтрации (вне зоны изменения МР-сигнала). Предложенная авторами модель позволяет прогнозировать участки продолженного роста опухоли, но распространения опухоли по этим вероятным направлениям затем не было обнаружено при МРТ в динамике. Однако такой вектор работ, по нашему мнению, интересный и перспективный, требует дальнейшего изучения [4].

В работе Kim J. Y. et al. (2019) перифокальную зону, не накапливающую контрастный препарат, у 83 пациентов с глиобластомами исследовали с использованием модели радиомики, комбинируя показатели FA и nCBV (нормализованного объема крови, полученного при DSC-перфузии). Эта модель показала высокий прогностический уровень для 6-месячной прогрессии опухоли. Однако авторами не были получены молекулярные данные, а также отсутствовала возможность подтвердить количественные данные морфологическими, получив из всей достаточно обширной исследуемой зоны образцы тканей, а также не исследовалась перитуморальная зона без изменения МР-сигнала [15].

Исследования перифокальной зоны глиом с применением биопсии

К настоящему времени только в нескольких исследованиях были представлены сопоставления данных

МРТ-исследования и гистологических данных за пределами видимых границ опухоли [12, 27], которые были выполнены небольшим группам пациентов преимущественно с глиомами низкой степени злокачественности либо в смешанных группах – низкой и высокой степени злокачественности, тогда как *postmortem* исследования у пациентов с *high grade* глиомами показали опухолевые клетки на большом расстоянии от основного узла опухоли [25].

Фундаментальной задачей исследования Zakharova N. et al. (2023) явилась оценка распространенности инфильтративной части *high grade* глиом в зонах с сохранным гематоэнцефалическим барьером. Эта оценка была проведена для 50 пациентов с глиомами *grade 3* и *4* с помощью широкого спектра показателей, полученных при ДК МРТ, а также скорости объемного мозгового кровотока, полученного при помощи *rCASL*-перфузии. Исследуемые параметры были определены в области активного роста глиальных опухолей с нарушенным гематоэнцефалическим барьером и накоплением МР-контрастного препарата в зоне перифокального отека-инфильтрации, в перитуморальных интактных тканях пораженного полушария мозга (по стандартным МРТ) по ходу планируемого хирургического доступа, а также в белом веществе контралатерального, непораженного полушария мозга. Количественная оценка сопровождалась взятием биопсии до удаления опухоли из трех вышеуказанных зон интереса пораженного полушария и получением в этих зонах иммуногистохимических и молекулярно-генетических характеристик. Авторы получили достоверные изменения (повышение одних/понижение других) исследуемых параметров MD, FA, MK, RK, KA, AWF, AxIAD в сторону нормальных значений для всей группы пациентов в контралатеральном полушарии по сравнению с интактным, перитуморальным веществом мозга,

что указывает на изменение структуры интактных тканей мозга, вероятную инфильтрацию ее клетками глиомы в пораженном полушарии и возможное отсутствие опухолевых клеток в контралатеральном полушарии. Такие изменения не выявляются на рутинных МРТ, но определяются, как показала эта работа, при помощи ДК МРТ. Биопсия из перифокальной зоны отека-инфильтрации глиом и перитуморального неизменного вещества мозга по ходу хирургического доступа подтвердила наличие опухолевых клеток в тканях [26]. Результаты исследования можно будет применить в дальнейшем для составления индивидуальных карт опухолевой инвазии с целью планирования хирургического и лучевого лечения пациентов с глиомами головного мозга (рис.).

Заключение

В настоящее время все более широко используются методы радиомикрии и сегментации патологических тканей, которые в некоторой степени исключают возможный *bias*-эффект исследования при выборе вручную зон интереса. Однако получение гистологических данных (стереотаксическая биопсия) подразумевает именно выбор зоны интереса, а исследование количественных характеристик из зон биопсии наиболее достоверно отражает состояние тканей в изучаемом регионе. Хотя, вероятно, опухоль может развиваться и инфильтрировать ткани мозга в противоположном направлении от иногда единственно возможного участка для биопсии по ходу операционного доступа с неизменным МРТ-сигналом, т. к. опухолевая инфильтрация при глиомах распространяется неравномерно по отношению к основному узлу опухоли.

Следует отметить, что параметры диффузионного куртозиса до сих пор являются предметом исследовательских работ и не используются в повседневной практике в связи с длительным процес-

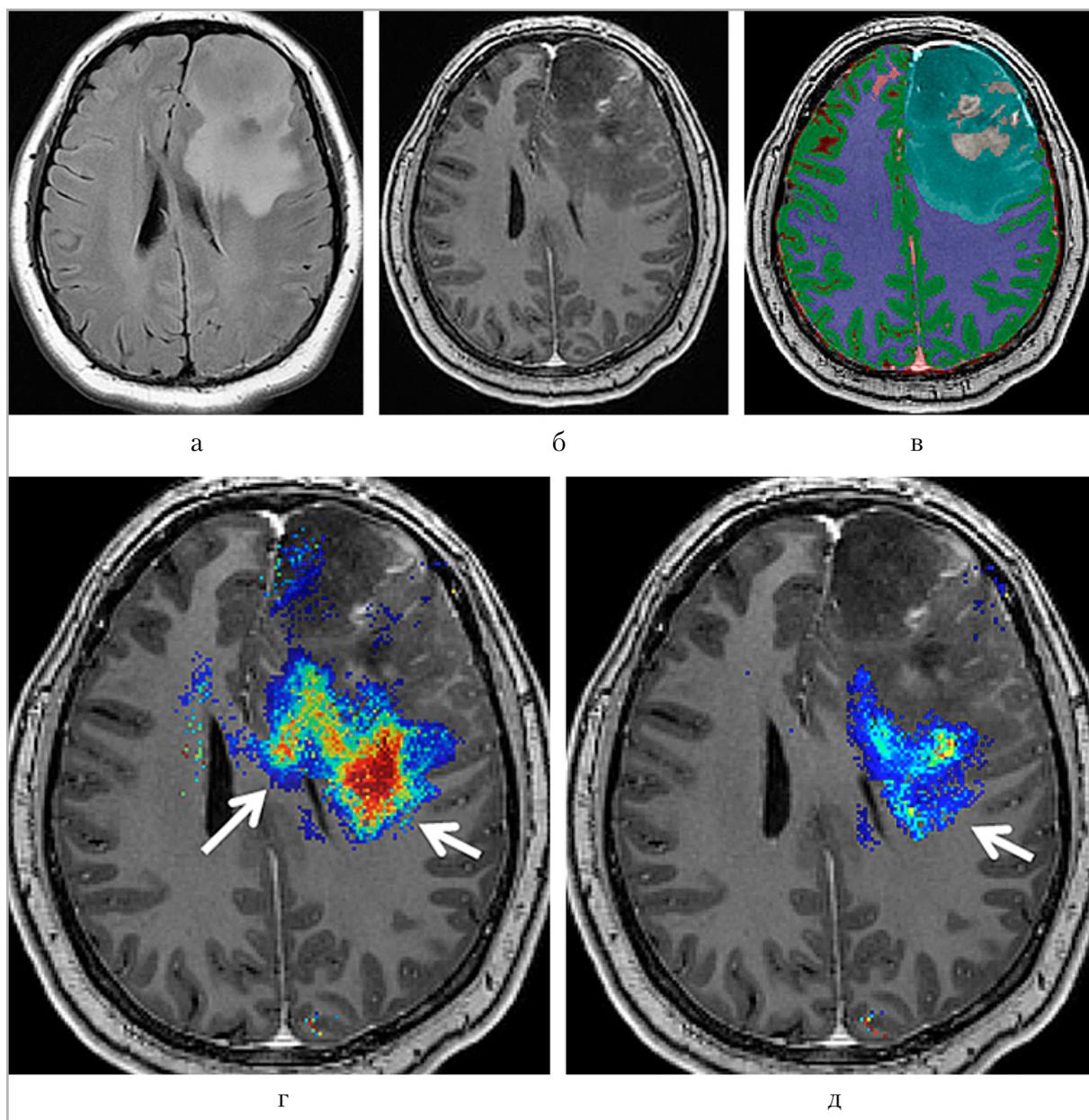


Рис. МРТ-исследование пациентки, 33 года, с глиобластомой, grade 4, при биопсии по ходу операционного доступа в интактном перитуморальном веществе мозга (по данным МРТ) получены клетки глиобластомы. *а* – аксиальный срез в режиме T2-FLAIR – в левой лобной доле определяется диффузно растущая внутримозговая опухоль; *б* – аксиальный срез в режиме T1 после введения контрастного препарата, опухоль гетерогенно накапливает контрастный препарат; *в* – сегментация опухоли по T1+Gd, T2, T2-FLAIR с выделением зоны некроза, контрастируемой части, отека-инфильтрации. При сопоставлении обработанных параметрических карт и структурных изображений на картах фракции аксональной воды (*г*) и среднего куртозиса (*д*) определяются участки патологического изменения параметров за пределами сегментированной зоны изменения МР-сигнала, что не исключает наличие в этих участках инфильтративной части опухоли, не видимой на стандартных последовательностях

сом получения данных, а также трудо- и времязатратной постобработкой. В то же время мы думаем, что применение

комплекса параметров ДК МРТ дает возможность более полного понимания структурных изменений.

Мы полагаем, что анализ комплекса диффузионных (ДТ и ДК МРТ) и перфузионных количественных МР-показателей позволит более точно определить границы глиом высокой степени злокачественности в зонах с сохранным гематоэнцефалическим барьером, не накапливающих контрастный препарат. Знания о распространенности опухоли, в свою очередь, позволят разрабатывать персонализированный навигационный алгоритм для хирургического удаления опухоли с последующим определением индивидуального плана лучевой и химиотерапии, а также с возможностью прогнозирования течения заболевания.

Список источников

1. Баталов А. И., Захарова Н. Е., Погосбекян Э. Л., Фадеева Л. М., Горяйнов С. А., Баев А. А., Шульц Е. И., Чёлушкин Д. М., Потапов А. А., Пронин И. Н. Бесконтрастная ASL-перфузия в предоперационной диагностике супратенториальных глиом // Журнал «Вопросы нейрохирургии» имени Н. Н. Бурденко. 2018. Т. 82, № 6. С.15–22. <https://doi.org/10.17116/neiro20188206115>
2. Туркин А. М., Погосбекян Э. Л., Тоноян А. С., Шульц Е. И., Максимов И. И., Долгушин М. Б., Хачанова Н. В., Фадеева Л. М., Мельникова-Пицхелаури Т. В., Пицхелаури Д. И., Пронин И. Н., Корниенко В. Н. Диффузионная куртозисная МРТ в оценке перитуморального отека глиобластом и метастазов в головной мозг // Мед. Виз. 2017. № 4. С. 97–112. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-2017-4-97-112>
3. Abdalla G., Dixon L., Sanverdi E., Machado P., Kwong J., Panovska-Griffiths J., Rojas-García A., Yoneoka D., Veraart J., Van Cauter S., Abdelkhalek A., Setteim M., Yousry T., Bisdas S. The diagnostic role of diffusional kurtosis imaging in glioma grading and differentiation of gliomas from other intra-axial brain tumours: a systematic review with critical appraisal and meta-analysis. *Neuroradiology*. 2020. V. 62, no. 7. P. 791–802. <https://doi.org/10.1007/S00234-020-02425-9>
4. Akbari H., Macyszyn L., Da X., Bilello M., Wolf R., Martinez-Lage M., Biros G., Alonso-Basanta M., O'Rourke D., Davatzikos C. Imaging surrogates of infiltration obtained via multiparametric imaging pattern analysis predict subsequent location of recurrence of glioblastoma. *Neurosurgery*. 2016. V. 78, no. 4. P. 572–580. <https://doi.org/10.1227/NEU.0000000000001202>
5. Batalov A. I., Zakharova N. E., Pronin I. N., Belyaev A. Yu., Pogosbekyan E. L., Goryaynov S. A., Bykanov A. E., Tyurina A. N., Shevchenko A. M., Solozhentseva K. D., Nikitin P. V., Potapov A. A. 3D pCASL-perfusion in preoperative assessment of brain gliomas in large cohort of patients. *Sci. Rep.* 2022. V. 12. P. 2121. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05992-4>
6. Batalov A. I., Afandiev R. M., Zakharova N. E., Pogosbekyan E. L., Shulgina A. A., Kobayakov G. L., Potapov A. A., Pronin I. N. 3D pseudo-continuous arterial spin labeling-MRI (3D PCASL-MRI) in the differential diagnosis between glioblastomas and primary central nervous system lymphomas. *Neuroradiology*. 2022. V. 64. P. 1539–1545. <https://doi.org/10.1007/s00234-021-02888-4>
7. Blystad I., Warntjes J. B. M., Smedby Ö., Lundberg P., Larsson E.-M., Tisell A. Quantitative MRI for analysis of peritumoral edema in malignant gliomas. *PLoS ONE*. 2017. V. 12. No. 5. P.e0177135. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0177135>
8. Delgado A. F., Fahlström M., Nilsson M., Berntsson S. G., Zetterling M., Libard S., Alafuzoff I., van Westen D., Lätt J., Smits A., Larsson E. M. Diffusion kurtosis imaging of gliomas grades II and III - a study of perilesional tumor infiltration, tumor grades and subtypes at clinical presentation. *Radiol. Oncol.* 2017. V. 51, no. 2. P. 121–129. <https://doi.org/10.1515/raon-2017-0010>

9. Eisele S. C., Wen P. Y., Lee E. Q. Assessment of brain tumor response: RANO and its offspring. *Curr. Treat. Oncol.* 2016. V. 17, no. 7. P. 35. <https://doi.org/10.1007/s11864-016-0413-5>
10. Gates E. D. H., Lin J. S., Weinberg J. S., Prabhu S. S., Hamilton J., Hazle J. D., Fuller G. N., Baladandayuthapani V., Fuentes D. T., Schellingerhout D. Imaging-based algorithm for the local grading of glioma. *AJNR Am. J. Neuroradiol.* 2020. V. 41, no. 3. P. 400–407. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A6405>
11. Grossman E. J., Kirov I. I., Gonen O., Novikov D. S., Davitz M. S., Lui Y. W., Grossman R. I., Inglese M., Fieremans E. N-acetyl-aspartate levels correlate with intra-axonal compartment parameters from diffusion MRI. *NeuroImage.* 2015. V. 118. P. 334–343. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.05.061>
12. Guo J., Yao C., Chen H., Zhuang D., Tang W., Ren G., Wang Y., Wu J., Huang F., Zhou L. The relationship between Cho/NAA and glioma metabolism: implementation for margin delineation of cerebral gliomas. *Acta Neurochir (Wien).* 2012. V. 154, no. 8. P. 1361–1370. <https://doi.org/10.1007/s00701-012-1418-x>
13. Hansen B., Jespersen S. N. Kurtosis fractional anisotropy, its contrast and estimation by proxy. *Sci. Rep.* 2016. No. 6. P. 23999. <https://doi.org/10.1038/srep23999>
14. Hempel J.-M., Schittenhelm J., Bisdas S., Brendle C., Bender B., Bier G., Skardelly M., Tabatabai G., Castaneda Vega S., Ernemann U., Klose U. In vivo assessment of tumor heterogeneity in WHO 2016 glioma grades using diffusion kurtosis imaging: diagnostic performance and improvement of feasibility in routine clinical practice. *J. Neuroradiol.* 2018. V. 45, no. 1. P. 32–40. <https://doi.org/10.1016/j.neurad.2017.07.005>
15. Kim J. Y., Yoon M. J., Park J. E., Choi E. J., Lee J., Kim H. S. Radiomics in peritumoral non-enhancing regions: fractional anisotropy and cerebral blood volume improve prediction of local progression and overall survival in patients with glioblastoma. *Neuroradiology.* 2019. V. 61, no. 11. P. 1261–1272. <https://doi.org/10.1007/s00234-019-02255-4>
16. Lemercier P., Paz M. S., Patrie J. T., Flors L., Leiva-Salinas C. Gradient of apparent diffusion coefficient values in peritumoral edema helps in differentiation of glioblastoma from solitary metastatic lesions. *AJR Am. J. Roentgenol.* 2014. V. 203, no. 1. P. 163–169. <https://doi.org/10.2214/AJR.13.11186>
17. Martín-Noguerol T., Mohan S., Santos-Armentia E., Cabrera-Zubizarreta A., Luna A. Advanced MRI assessment of non-enhancing peritumoral signal abnormality in brain lesions. *European Journal of Radiology.* 2021. V. 143. P. 109900. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2021.109900>
18. Maximov I. I., Tonoyan A. S., Pronin I. N. Differentiation of glioma malignancy grade using diffusion MRI. *Phys. Med.* 2017. V. 40. P. 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2017.07.002>
19. Pogosbekian E. L., Pronin I. N., Zakharova N. E., Batalov A. I., Turkin A. M., Konakova T.A., Maximov I. I. Feasibility of generalised diffusion kurtosis imaging approach for brain glioma grading. *Neuroradiology.* 2021. V. 63, no. 8. P. 1241-1251. <https://doi.org/10.1007/s00234-020-02613-7>
20. Qiu J., Deng K., Wang P., Chen C., Luo Y., Yuan S., Wen J. Application of diffusion kurtosis imaging to the study of edema in solid and peritumoral areas of glioma. *Magn. Reson. Imaging.* 2022. V. 86. P. 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2021.11.001>
21. Sanai N., Polley M. Y., McDermott M. W., Parsa A. T., Berger M. S. An extent of resection threshold for newly diagnosed glioblastomas. *J. Neurosurg.* 2011. V. 115, no. 1. P. 3–8. <https://doi.org/10.3171/2011.2.jns10998>
22. Solozhentseva K., Batalov A., Zakharova N., Goryaynov S., Pogosbekyan E., Pro-

- nin I. The Role of 3D-pCASL MRI in the Differential Diagnosis of Glioblastoma and Brain Metastases. *Front. Oncol.* 2022. No. 12. P. 874924. <https://doi.org/10.3389/fonc.2022.874924>
23. Steven A. J., Zhuo J., Melhem E. R. Diffusion kurtosis imaging: An emerging technique for evaluating the microstructural environment of the brain. *Am. J. Roentgenol.* 2014. V. 202, no. 1. P. 26–33. <https://doi.org/10.2214/AJR.13.11365>
 24. Tan Y., Wang X.-C., Zhang H., Wang J., Qin J.-B., Wu X.-F., Zhang L., Wang L. Differentiation of high-grade astrocytomas from solitary-brain-metastases: comparing diffusion kurtosis imaging and diffusion tensor imaging. *Eur. J. Radiol.* 2015. V. 84, no. 12. P. 2618–2624. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2015.10.007>
 25. Yamahara T., Numay, Oishi T., Kawaguchi T., Seno T., Asai A., Kawamoto K. Morphological and flow cytometric glioblastoma: a comparison of autopsy brain and neuroimaging. *Brain and Tumor Pathol.* 2010. V. 27. P. 81–87. <https://doi.org/10.1007/s10014-010-0275-7>
 26. Zakharova N. E., Batalov A. I., Pogosbekyan E. L., Chekhonin I. V., Goryaynov S. A., Bykanov A. E., Tyurina A. N., Galstyan S. A., Nikitin P. V., Fadeeva L. M., Usachev D. Yu., Pronin I. N. Perifocal Zone of Brain Gliomas: Application of Diffusion Kurtosis and Perfusion MRI Values for Tumor Invasion Border Determination. *Cancers* 2023. V. 15, no. 10. P. 2760. <https://doi.org/10.3390/cancers15102760>
 27. Zetterling M., Roodakker K. R., Berntsson S. G., Edqvist P. H., Latini F., Landtblom A. M., Pontén F., Alafuzoff I., Larsson E. M., Smits A. Extension of diffuse low-grade gliomas beyond radiological borders as shown by the coregistration of histopathological and magnetic resonance imaging data. *J. Neurosurg.* 2016. V. 125, no. 5. P. 1155–1166. <https://doi.org/10.3171/2015.10.JNS15583>
- ## References
1. Batalov A. I., Zakharova N. E., Pogosbekyan E. L., Fadeeva L. M., Goriaynov S. A., Baev A. A., Shul'ts E. I., Chelushkin D. M., Potapov A. A., Pronin I. N. Non-contrast ASL perfusion in preoperative diagnosis of supratentorial gliomas. *Zhurnal Voprosy Neurokhirurgii Imeni N. N. Burdenko.* 2018;82(6):15-22. (In Russ., in Engl.). <https://doi.org/10.17116/nejro20188206115>
 2. Turkin A. M., Pogosbekyan E. L., Tonoyan A. S., Schults E. I., Maximov I. I., Dolgushin M. B., Khachanova N. V., Fadeeva L. M., Melnikova-Pitskhelauri T. V., Pitskhelauri D. I., Pronin I. N., Kornienko V. N. Diffusion kurtosis Imaging in the assessment of peritumoral brain edema in glioblastomas and brain metastases. *Med. Vis.* 2017;4:97-112. (In Russ., in Engl.). <https://doi.org/10.24835/1607-0763-2017-4-97-112>
 3. Abdalla G., Dixon L., Sanverdi E., Machado P., Kwong J., Panovska-Griffiths J., Rojas-García A., Yoneoka D., Veraart J., Van Cauter S., Abdelkhalik A., Settein M., Yousry T., Bisdas S. The diagnostic role of diffusional kurtosis imaging in glioma grading and differentiation of gliomas from other intra-axial brain tumours: a systematic review with critical appraisal and meta-analysis. *Neuroradiology.* 2020; 62(7):791-802. <https://doi.org/10.1007/S00234-020-02425-9>
 4. Akbari H., Macyszyn L., Da X., Bilello M., Wolf R., Martinez-Lage M., Biros G., Alonso-Basanta M., O'Rourke D., Davatzikos C. Imaging surrogates of infiltration obtained via multiparametric imaging pattern analysis predict subsequent location of recurrence of glioblastoma. *Neurosurgery.* 2016;78(4): 572-580. <https://doi.org/10.1227/NEU.000000000001202>
 5. Batalov A. I., Zakharova N. E., Pronin I. N., Belyaev A. Yu., Pogosbekyan E. L., Goryaynov S. A., Bykanov A. E., Tyurina A. N., Shevchenko A. M., Solozhentseva K. D., Nikitin P. V., Potapov A. A. 3D

- pCASL-perfusion in preoperative assessment of brain gliomas in large cohort of patients. *Sci. Rep.* 2022;12:2121. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05992-4>
6. Batalov A. I., Afandiev R. M., Zakharova N. E., Pogosbekyan E. L., Shulgina A. A., Kobayakov G. L., Potapov A. A., Pronin I. N. 3D pseudo-continuous arterial spin labeling-MRI (3D PCASL-MRI) in the differential diagnosis between glioblastomas and primary central nervous system lymphomas. *Neuroradiology.* 2022; 64:1539-1545. <https://doi.org/10.1007/s00234-021-02888-4>
 7. Blystad I., Warntjes J. B. M., Smedby Ö., Lundberg P., Larsson E.-M., Tisell A. Quantitative MRI for analysis of peritumoral edema in malignant gliomas. *PLoS ONE.* 2017;12(5):e0177135. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0177135>
 8. Delgado A. F., Fahlström M., Nilsson M., Berntsson S. G., Zetterling M., Libard S., Alafuzoff I., van Westen D., Lätt J., Smits A., Larsson E. M. Diffusion kurtosis imaging of gliomas grades II and III – a study of perilesional tumor infiltration, tumor grades and subtypes at clinical presentation. *Radiol. Oncol.* 2017;51(2):121-129. <https://doi.org/10.1515/raon-2017-0010>
 9. Eisele S. C., Wen P. Y., Lee E. Q. Assessment of brain tumor response: RANO and its offspring. *Curr. Treat. Oncol.* 2016;17(7):35. <https://doi.org/10.1007/s11864-016-0413-5>
 10. Gates E. D. H., Lin J. S., Weinberg J. S., Prabhu S. S., Hamilton J., Hazle J. D., Fuller G. N., Baladandayuthapani V., Fuentes D. T., Schellingerhout D. Imaging-based algorithm for the local grading of glioma. *AJNR Am. J. Neuroradiol.* 2020. V. 41, no. 3. P. 400–407. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A6405>
 11. Grossman E. J., Kirov I. I., Gonen O., Novikov D. S., Davitz M. S., Lui Y. W., Grossman R. I., Inglese M., Fieremans E. N-acetyl-aspartate levels correlate with intra-axonal compartment parameters from diffusion MRI. *NeuroImage.* 2015; 118:334-343. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.05.061>
 12. Guo J., Yao C., Chen H., Zhuang D., Tang W., Ren G., Wang Y., Wu J., Huang F., Zhou L. The relationship between Cho/NAA and glioma metabolism: implementation for margin delineation of cerebral gliomas. *Acta Neurochir (Wien).* 2012;154(8):1361-1370. <https://doi.org/10.1007/s00701-012-1418-x>
 13. Hansen B., Jespersen S. N. Kurtosis fractional anisotropy, its contrast and estimation by proxy. *Sci. Rep.* 2016;6:23999. <https://doi.org/10.1038/srep23999>
 14. Hempel J.-M., Schittenhelm J., Bisdas S., Brendle C., Bender B., Bier G. Skardelly M., Tabatabai G., Castaneda Vega S., Ernemann U., Klose U. In vivo assessment of tumor heterogeneity in WHO 2016 glioma grades using diffusion kurtosis imaging: diagnostic performance and improvement of feasibility in routine clinical practice. *J. Neuroradiol.* 2018;45(1):32-40. <https://doi.org/10.1016/j.neurad.2017.07.005>
 15. Kim J. Y., Yoon M. J., Park J. E., Choi E. J., Lee J., Kim H. S. Radiomics in peritumoral non-enhancing regions: fractional anisotropy and cerebral blood volume improve prediction of local progression and overall survival in patients with glioblastoma. *Neuroradiology.* 2019; 61(11):1261-1272. <https://doi.org/10.1007/s00234-019-02255-4>
 16. Lemercier P., Paz M. S., Patrie J. T., Flors L., Leiva-Salinas C. Gradient of apparent diffusion coefficient values in peritumoral edema helps in differentiation of glioblastoma from solitary metastatic lesions. *AJR Am. J. Roentgenol.* 2014;203(1): 163-169. <https://doi.org/10.2214/AJR.13.11186>
 17. Martín-Noguerol T., Mohan S., Santos-Armentia E., Cabrera-Zubizarreta A., Luna A. Advanced MRI assessment of non-enhancing peritumoral signal abnormality in brain lesions. *European Journal of Radiology.* 2021;143:109900. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2021.109900>

18. Maximov I. I., Tonoyan A. S., Pronin I. N. Differentiation of glioma malignancy grade using diffusion MRI. *Phys Med.* 2017;40:24–32. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2017.07.002>
19. Pogosbekian E. L., Pronin I. N., Zakharova N. E., Batalov A. I., Turkin A. M., Konakova T.A., Maximov I. I. Feasibility of generalised diffusion kurtosis imaging approach for brain glioma grading. *Neuroradiology.* 2021. V. 63, no. 8. P. 1241-1251. <https://doi.org/10.1007/s00234-020-02613-7>
20. Qiu J., Deng K., Wang P., Chen C., Luo Y., Yuan S., Wen J. Application of diffusion kurtosis imaging to the study of edema in solid and peritumoral areas of glioma. *Magn Reson Imaging.* 2022;86610-16. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2021.11.001>
21. Sanai N., Polley M. Y., McDermott M. W., Parsa A. T., Berger M. S. An extent of resection threshold for newly diagnosed glioblastomas. *J. Neurosurg.* 2011;115(1):3-8. <https://doi.org/10.3171/2011.2.jns10998>
22. Solozhentseva K., Batalov A., Zakharova N., Goryaynov S., Pogosbekyan E., Pronin I. The Role of 3D-pCASL MRI in the Differential Diagnosis of Glioblastoma and Brain Metastases. *Front. Oncol.* 2022;12:874924. <https://doi.org/10.3389/fonc.2022.874924>
23. Steven A. J., Zhuo J., Melhem E. R. Diffusion kurtosis imaging: An emerging technique for evaluating the microstructural environment of the brain. *Am. J. Roentgenol.* 2014;202(1):26-33. <https://doi.org/10.2214/AJR.13.11365>
24. Tan Y., Wang X.-C., Zhang H., Wang J., Qin J.-B., Wu X.-F., Zhang L., Wang L. Differentiation of high-grade astrocytomas from solitary-brain-metastases: comparing diffusion kurtosis imaging and diffusion tensor imaging. *Eur. J. Radiol.* 2015;84(12):2618-2624. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2015.10.007>
25. Yamahara T., Numay, Oishi T., Kawaguchi T., Seno T., Asai A., Kawamoto K. Morphological and flow cytometric glioblastoma: a comparison of autopsy brain and neuroimaging. *Brain and Tumor Pathol.* 2010;27:81-87. <https://doi.org/10.1007/s10014-010-0275-7>
26. Zakharova N. E., Batalov A. I., Pogosbekian E. L., Chekhonin I. V., Goryaynov S. A., Bykanov A. E., Tyurina A. N., Galstyan S. A., Nikitin P. V., Fadeeva L. M., Usachev D. Yu., Pronin I. N. Perifocal Zone of Brain Gliomas: Application of Diffusion Kurtosis and Perfusion MRI Values for Tumor Invasion *Border Determination.* *Cancers.* 2023;15(10):2760. <https://doi.org/10.3390/cancers15102760>
27. Zetterling M., Roodakker K. R., Berntsson S. G., Edqvist P. H., Latini F., Landtblom A. M., Pontén F., Alafuzoff I., Larsson E. M., Smits A. Extension of diffuse low-grade gliomas beyond radiological borders as shown by the coregistration of histopathological and magnetic resonance imaging data. *J. Neurosurg.* 2016;125(5):1155-1166. <https://doi.org/10.3171/2015.10.JNS15583>

Сведения об авторах / Information about the authors

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, Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, 16.
+7 (499) 972-85-55

Вклад автора: определение концепции и дизайн работы, поиск источников, анализ и интерпретация данных, написание текста, подготовка иллюстраций, редактирование.

Zakharova Natal'ya Evgen'evna, radiologist, PhD, professor RAS, Department of Neuroradiology, 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

Contribution of the author: conception and design of the work, source searching, data analysis and interpretation, manuscript drafting, preparation of figures, editing.

Баталов Артем Игоревич, рентгенолог, кандидат медицинских наук, научный сотрудник отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

125047, Москва, 4-я Тверская-Ямская, 16.
+7 (499) 972-85-55

Вклад автора: определение концепции и дизайн работы, подготовка иллюстраций, редактирование.

Batalov Artem Igorevich, radiologist, PhD, Department of Neuroradiology, 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

Contribution of the author: conception and design of the work, preparation of figures, editing.

Погосбемян Эдуард Леонидович, медицинский физик отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. акад. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская д. 16.
+7 (499) 972-85-55

Вклад автора: анализ данных, подготовка иллюстраций.

Pogosbekyan Eduard Leonidovich, medical physicist, Department of Neuroradiology, 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

Contribution of the author: data analysis, preparation of figures.

Горяйнов Сергей Алексеевич, нейрохирург, доктор медицинских наук, заведующий лабораторией нейрохирургической анатомии и криоконсервации биологических материалов ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. акад. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

12504, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская д. 16.
+7 (499) 972-85-55

Вклад автора: определение концепции и дизайн работы.

Goryaynov Sergey Alexeevich, neurosurgeon, PhD, 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

Contribution of the author: conception and design of the work.

Фадеева Людмила Михайловна, ведущий инженер отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

125047, Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, 16.
+7 (499) 972-85-55

Вклад автора: определение концепции и дизайн работы.

Fadeeva Liudmila Mikhaylovna, leading engineer, Department of Neuroradiology, 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

Contribution of the author: conception and design of the work.

Быканов Андрей Егорович, кандидат медицинских наук, нейрохирург, научный сотрудник 7-го клинического отделения ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

125047, Москва, 4-я Тверская-Ямская, 16, Россия.

+7 (499) 972-85-55

Вклад автора: определение концепции и дизайн работы.

Bykanov Andrey Egorovich, neurosurgeon, PhD, 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

Contribution of the author: conception and design of the work.

Тюрина Анастасия Николаевна, рентгенолог, кандидат медицинских наук, научный сотрудник отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

125047, Москва, 4-я Тверская-Ямская, 16.

+7 (499) 972-85-55

Вклад автора: определение концепции и дизайн работы, анализ данных.

Tyurina Anastasia Nikolaevna, radiologist, PhD, Department of Neuroradiology, 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

Contribution of the author: conception and design of the work, data analysis,

Чехонин Иван Владимирович, кандидат медицинских наук, рентгенолог, младший 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: дизайн работы, анализ и интерпретация данных, написание текста, редактирование.

Chekhnin Ivan Vladimirovich, Ph. D. Med., radiologist, junior research associate, Department of Neuroradiology, 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

Contribution of the author: conception and design of the work, data analysis and interpretation, editing.

Галстян Сюзанна Андраниковна, врач-патологоанатом 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: анализ данных.

Galstyan Suzanna Andranikovna, pathologist, 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

Contribution of the author: data analysis.

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, Россия.

+7 (499) 972-85-55

Вклад автора: анализ и интерпретация данных, редактирование, утверждение окончательного варианта публикации.

Pronin Igor Nikolaevich, M. D., D.Sci., Academician of the Russian Academy of Sciences, Head of Department of Neuroradiology 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

Contribution of the author: data analysis and interpretation, editing, final approval.

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, Россия.
+7 (499) 972-85-10

Вклад автора: анализ данных, утверждение окончательного варианта публикации.

Usachev Dmitriy Yur'evich, MD, PhD, 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) 972-85-10

Contribution of the author: data analysis, final approval.

Финансирование исследования и конфликт интересов

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-75-10074, (<https://rscf.ru/project/22-75-10074/>). 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

This research was funded by Russian Science Foundation grant № 22-75-10074 (<https://rscf.ru/project/22-75-10074/>). The authors declare that this paper, its topic, subject matter, and content do not involve competing interests. The views expressed in the article are those of the authors of the manuscript. The authors attest that they meet the ICMJE international criteria for authorship (all authors contributed substantially to the conceptualization, preparation of the article, and read and approved the final version before publication).

Статья поступила в редакцию 07.11.2023;
одобрена после рецензирования 07.12.2023;
принята к публикации 09.01.2024.

The article was submitted 07.11.2023;
approved after reviewing 07.12.2023;
accepted for publication 09.01.2024.



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Оригинальная статья
УДК 616.13.002.2-007.64
<https://doi.org/10.52560/2713-0118-2024-1-37-50>

Контрастирование стенки аневризмы при магнитно-резонансной томографии: новый предиктор разрыва мешотчатых внутричерепных аневризм

К. С. Семин¹, Н. Е. Захарова², Ш. Ш. Элиава³, А. Н. Коновалов⁴,
А. С. Хейреддин⁵, Д. Б. Калаева⁶, А. И. Баталов⁷, И. Н. Пронин⁸

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр детской гематологии, онкологии и иммунологии им. Дмитрия Рогачева» Минздрава России, Москва, Россия

^{1–8} Федеральное государственное автономное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Россия

¹ kirillsemin1@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1897-9312>

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

³ eliava@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6103-9329>

⁴ Ankonovalov@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0932-4752>

⁵ AKheireddin@nsi.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6395-2055>

⁶ dkalaeva@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8719-2225>

⁷ abatalov@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8924-7346>

⁸ pronin@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4480-0275>

Автор, ответственный за переписку: Кирилл Сергеевич Семин, kirillsemin1@rambler.ru

Резюме

Обоснование. Современные исследования показывают, что накопление контрастного препарата стенкой аневризмы коррелирует с высоким риском роста или разрыва.

Цель. Сопоставить признак контрастирования стенки аневризмы с известными характеристиками, влияющими на риск ее разрыва.

Материалы и методы. В исследование включены 95 пациентов (с 132 ранее выявленными мешотчатыми аневризмами), которым проводилась магнитно-резонансная томография (МРТ) на томографе с напряженностью поля 3,0 Тесла (Тл). Наличие или отсут-

© Семин К. С., Захарова Н. Е., Элиава Ш. Ш., Коновалов А. Н., Хейреддин А. С., Калаева Д. Б., Баталов А. И., Пронин И. Н., 2024

ствии контрастирования аневризмы сопоставлялось со следующими характеристиками: пол и возраст пациента, наличие артериальной гипертензии, размер и форма аневризмы, а также с оценкой по шкале PHASES.

Результаты. Исследование показало, что накопление контрастного препарата стенкой аневризмы связано с размером купола аневризмы ($p < 0,001$, Sp = 78,1 %, Se = 72,1 %) и баллом по шкале PHASES ($p < 0,001$, Sp = 64,1 %, Se = 57,1 %). Было выявлено отсутствие взаимосвязи ($p > 0,05$) между контрастированием стенки интракраниальной аневризмы с возрастом, полом, артериальной гипертензией, формой и локализацией аневризмы.

Заключение. Накопление контрастного препарата в стенке аневризмы при МР-визуализации может рассматриваться дополнительным маркером риска их разрыва.

Ключевые слова: аневризма, магнитно-резонансная визуализация, сосудистая стенка

Для цитирования: Семин К. С., Захарова Н. Е., Элиава Ш. Ш., Коновалов А. Н., Хейредин А. С., Калаева Д. Б., Баталов А. И., Пронин И. Н. Контрастирование стенки аневризмы при магнитно-резонансной томографии: новый предиктор разрыва мешотчатых внутричерепных аневризм // Радиология – практика. 2024;(1):37-50. <https://doi.org/10.52560/2713-0118-2024-1-37-50>

ORIGINAL RESEARCH

Original research

Aneurysm Wall Contrast on Magnetic Resonance Imaging: A New Predictor of Rupture of Saccular Intracranial Aneurysms

K. S. Semin¹, N. E. Zakharova², Sh. Sh. Eliava³, A. N. Konovalov⁴,
A. S. Kheireddin⁵, D. B. Kalaeva⁶, A. I. Batalov⁷, I. N. Pronin⁸

¹ Dmitry Rogachev National Research Center of Pediatric Hematology, Oncology and Immunology, Moscow, Russia

^{1–8} Federal State Autonomous Institution «N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery» of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

¹ kirillsemin1@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1897-9312>

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

³ eliava@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6103-9329>

⁴ Ankonovalov@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0932-4752>

⁵ AKheireddin@nsi.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6395-2055>

⁶ dkalaeva@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8719-2225>

⁷ abatalov@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8924-7346>

⁸ pronin@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4480-0275>

Corresponding author: Kirill S. Semin, kirillsemin1@rambler.ru

Abstract

Background. Recent studies suggest that accumulation of contrast agent in the aneurysm's wall may predict a high risk of aneurysm growth or rupture.

Objective. To compare the enhancement of the aneurysm wall with other characteristics that affect at the risk of rupture.

Materials and Methods. The study included 95 patients with 132 previously identified saccular aneurysms, who underwent magnetic resonance imaging (MRI) according to a specialized protocol using 3.0 Tesla MRI scanner. The presence or absence of aneurysm's wall enhancement compared with the following characteristics: gender and age of the patient, the size and shape of the aneurysm, the presence of arterial hypertension, and the PHASES score.

Results. Accumulation of contrast agent by the aneurysm's wall was associated with the aneurysm dome size ($p < 0,001$, Sp = 78,1 %, Se = 72,1 %) and PHASES score ($p < 0,001$, Sp = 64,1 %, Se = 57,1 %). No relationship between age, gender, arterial hypertension, shape, and aneurysm location and contrast enhancement was found ($p > 0,05$).

Conclusion. Contrast enhancement of the aneurysm wall on MRI can be considered an additional risk marker of its rupture.

Keywords: intracranial aneurysm, magnetic resonance imaging, aneurysm's wall

Forcitation: Semin K. S., Zakharova N. E., Eliava Sh. Sh., Konovalov A. N., Kheireddin A. S., Kalaeva D. B., Batalov A. I., Pronin I. N. Aneurysm wall contrast on magnetic resonance imaging: a new predictor of rupture of saccular intracranial aneurysms. *Radiology – Practice*. 2024;1:37-50. (In Russ.). <https://doi.org/10.52560/2713-0118-2024-1-37-50>

Введение

В связи с увеличением доступности неинвазивных методов нейровизуализации в клинической практике становится выше вероятность выявления бессимптомных неразорвавшихся аневризм, распространенность которых среди взрослого населения варьирует от 3 до 7 % [6, 13]. Уровень летальности в результате разрыва аневризмы головного мозга очень высок и составляет от 25 до 50 % [2]. Поэтому превентивное эндоваскулярное и хирургическое лечение неразорвавшихся интракраниальных аневризм получило широкое распространение в мире. При этом риск разрыва интракраниальной аневризмы (ИА) необходимо сопоставлять с рисками предполагаемого лечения в случае отсутствия признаков разрыва, учитывать анатомо-топографические характеристики каждой аневризмы и индивидуальные особенности каждого пациента. Предыдущие исследования

определили ряд факторов, которые могут способствовать разрыву аневризмы и на анализе которых было построено несколько моделей прогнозирования разрыва [3, 7]. В настоящее время, с учетом существующих исследований и прогностических моделей PHASES и ELAPSS, основанных на данных 8283 и 1507 пациентов соответственно, выявлено несколько предикторов роста и разрыва аневризм, к которым относят ранее выявленное субарахноидальное кровоизлияние (САК), локализацию, возраст, популяцию, размер, форму мешотчатой аневризмы и артериальную гипертензию [3, 7]. Однако, по мнению некоторых авторов, эти модели нуждаются в модификации для улучшения индивидуального прогнозирования исходов заболевания [14]. Исследователи считают, что изменения стенки аневризмы с накоплением контрастного препарата могут отражать процессы воспаления, тромбоза и неоваскуляризации, что

играет ключевую роль в формировании, росте и разрыве аневризмы [8, 16, 17]. В этой связи целью нашей работы стало сравнение ранее выявленных предикторов разрыва ИА с новым диагностическим маркером, а именно контрастированием стенки аневризмы на большой когорте пациентов одного клинического центра.

Материалы и методы

С ноября 2020 по май 2023 года в НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко по разработанному протоколу «МР-визуализация сосудистой стенки» было просканировано 113 пациентов с внутречерепными аневризмами, ранее выявленными при компьютерно-томографической ангиографии (КТА), рутинной МРТ или цифровой субтракционной ангиографии (ЦСА). Критерии включения: наличие у пациентов мешотчатых неразорвавшихся аневризм без ограничения по возра-

сту и полу. Критериями исключения являлись наличие признаков разрыва аневризмы, фузиформных аневризм, а также пациентов, которым по тем или иным причинам не удалось выполнить полноценное МРТ. Разорвавшимися аневризмами в нашем исследовании считались те, которые имели признаки ранее произошедшего разрыва, доказанного в дальнейшем при хирургическом лечении. К таковым мы относили наличие крови или продуктов ее распада в субарахноидальном пространстве в области аневризмы, наличие тромботических масс на куполе аневризмы. Данное проспективное исследование было одобрено этическим комитетом ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко». Процесс отбора пациентов в соответствии с критериями включения и исключения показан на рис. 1.

Сканирование проводилось на 3 Тл МР-томографе (Signa HDxT; GE Healthcare, USA) с использованием 8-каналь-

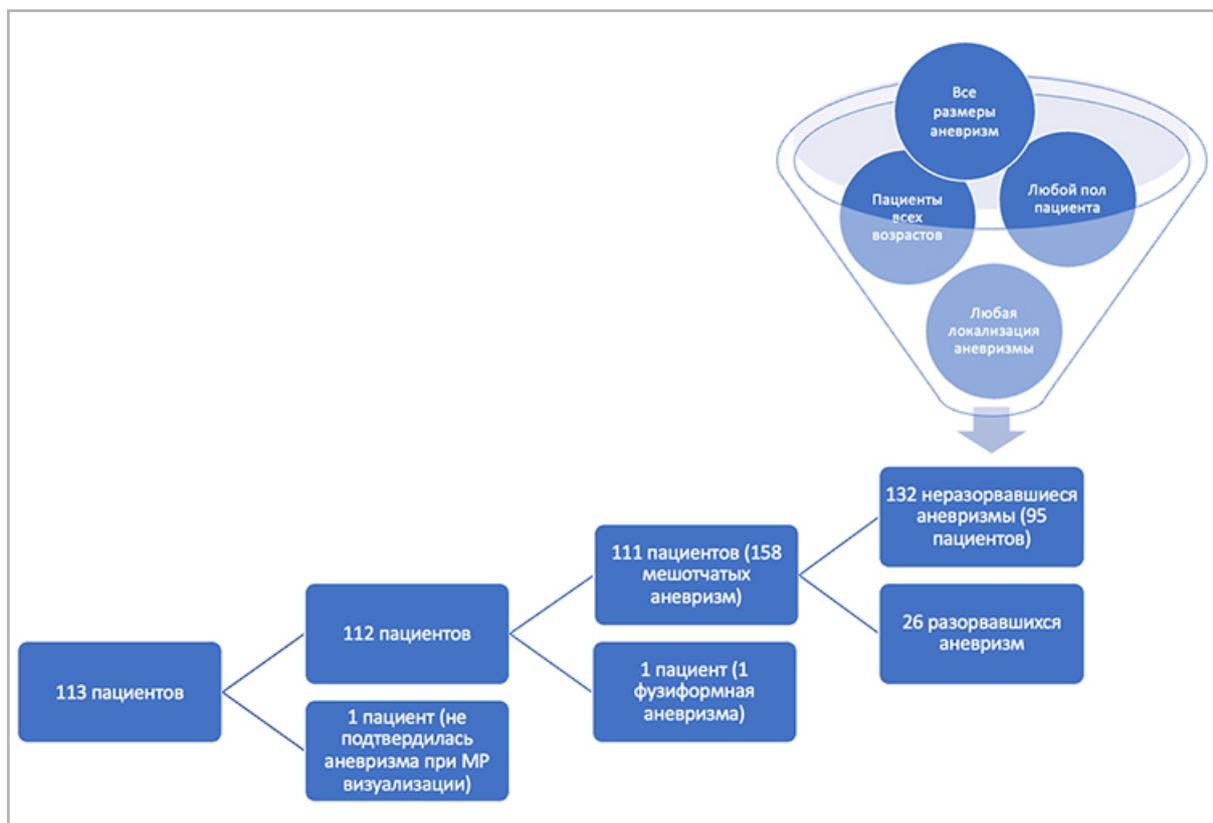


Рис. 1. Блок-схема процесса отбора пациентов в соответствии с критериями включения и исключения

ной катушки. Протокол сканирования «МР-визуализация сосудистой стенки» включал в себя следующие импульсные последовательности: T2 SE, DWI, SWAN, 3D TOF High Resolution, 3D T1 FSE (T1 Cube) до и после в/в введения контрастного препарата (табл. 1).

Контрастный препарат с концентрацией гадолиния 1,0 ммоль/л вводился внутривенно в дозировке 0,1 мл/кг.

Обработка полученных данных проводилась на рабочей станции General Electric (GE) VolumeShare 5 (рис. 2).

После проведенного МРТ-исследования пациенты поступали на хирургический этап лечения, где проводилось микрохирургическое выключение аневризм путем клипирования.

В ходе проведения исследования учитывались следующие характеристики пациентов: возраст, пол, ранее перенесенные САК, наличие артериальной гипертензии. Признак артериальной гипертензии определялся как положительный при систолическом артериаль-

ном давлении ≥ 140 мм рт. ст. и выше, или диастолическом артериальном давлении ≥ 90 мм рт. ст. и выше, и/или приеме антигипертензивных средств. Собирались следующие данные об аневризмах: расположение, высота купола, ширина шейки, соотношение высоты купола к ширине шейки, неправильная форма аневризмы, которую мы определяли как наличие дивертикула или нескольких камер. Локализация мешотчатых аневризм была распределена в соответствии со шкалой PHASES на 3 группы:

- внутренняя сонная артерия (ВСА);
- средняя мозговая артерия (СМА);
- передняя мозговая артерия (ПМА), задняя соединительная артерия (ЗСоА) и вертебробазиллярный бассейн.

Статистическая обработка данных проводилась с использованием открытого программного обеспечения jamovi (2.3.16). Количественные данные сопоставлялись с помощью непараметриче-

Таблица 1

Последовательности и их характеристики протокола «МР-визуализация сосудистой стенки»

	Толщина среза	Расстояние между срезами	TR	TE	FOV	Матрица	Время получения последовательности
T2 SE	5 мм	1 мм	3500 мс	102 мс	24 см	512 × 256	2 мин 28 сек
T2 FLAIR	5 мм	1 мм	9500 мс	120 мс	24 см	352 × 224	3 мин 10 сек
DWI	5 мм	1 мм	8000 мс	72 мс	24 см	128 × 128	40 сек
3D TOF HR	1,2 мм	0	19 мс	3 мс	22 см	640 × 352	3 мин 24 сек
SWAN	1 мм	0	87 мс	43 мс	24 см	416 × 320	5 мин
3D T1 FSE (T1 Cube) до и после введения контрастного препарата	1 мм	0,5 мм	600 мс	10 мс	25,6 см	256 × 256	5 мин 30 сек

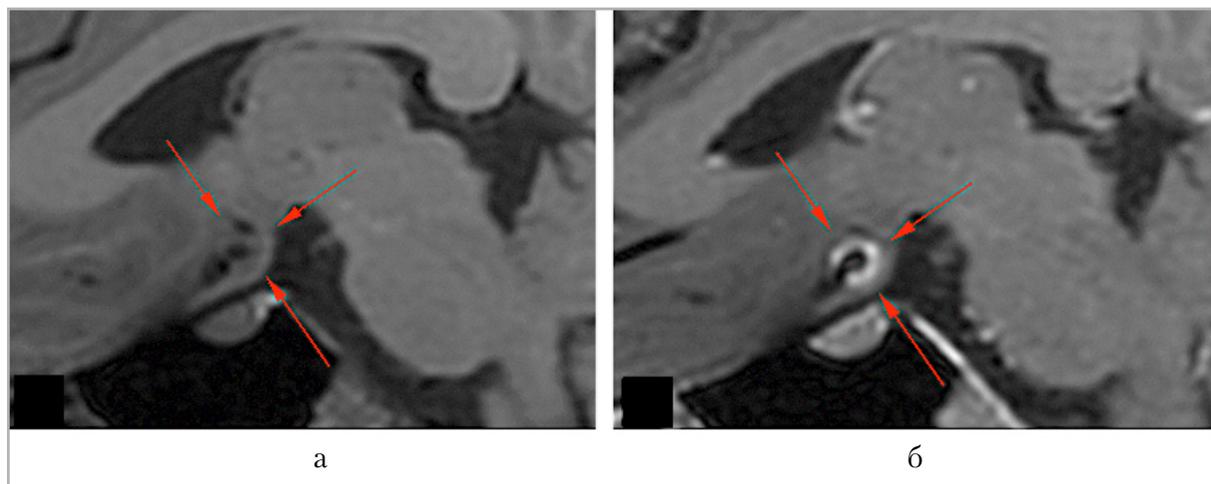


Рис. 2. МРТ: T1 CUBE в сагиттальной плоскости до (а) и после (б) внутривенного введения контрастного препарата. Красными стрелками указана аневризма внутренней сонной артерии, стенки которой накапливают контрастный препарат (б)

ского теста Манна — Уитни, качественные — точного критерия Фишера и хи-квадрата Пирсона в случае нескольких групп. Разница считалась статистически значимой при выбранном уровне значимости $p < 0,05$. Для значимых параметров были рассчитаны показатели относительного риска (ОР) с указанием 95 % доверительного интервала (ДИ), который используется для сравнения вероятности исхода в зависимости от наличия фактора риска.

Результаты

Характеристики пациентов и интракраниальных аневризм представлены в табл. 2. Всего было проанализировано 113 пациентов с общим количеством аневризм 159. Из анализа МРТ были исключены 2 пациента, так как один имел фузиформную аневризму, а не мешотчатую, и у другого пациента не подтвердилось наличие аневризмы при МР-исследовании (на КТ кальцинат вдоль фалькса имитировал аневризму передней мозговой артерии). После проведения хирургического вмешательства из исследуемой выборки были исключены разорвавшиеся аневризмы в количестве 26. Таким образом, для последующего

изучения, сравнения с характеристиками пациента и морфометрическими показателями аневризмы было последовательно отобрано 95 пациентов со 132 неразорвавшимися аневризмами. Размеры аневризм находились в пределах 3,0–36,0 мм. Возраст пациентов исследуемой группы составлял от 10 до 83 лет. Женщин было 64, мужчин 31. Артериальная гипертензия выявлялась у 83 человек (62 %). 32 (24 %) аневризмы располагались в области ВСА, 67 (51 %) аневризм — в области СМА, 33 (25 %) аневризмы — в области передней мозговой артерии и артериях заднего отдела кровообращения мозга.

Средний размер аневризмы в группе с накоплением контрастного препарата в стенке статистически значимо был больше, чем в группе без накопления контрастного препарата ($7,9 \pm 4,7$ против $4,4 \pm 1,5$, $p < 0,001$, параметры чувствительности и специфичности составили 78 и 72% соответственно, с пороговым значением в 5,5 мм, рис. 3).

Вследствие наличия прямой зависимости между размером аневризмы и риском ее разрыва с учетом шкалы PHASES все аневризмы были разделены на 4 группы для определения пропорций между размером и контрастиро-

Таблица 2

Характеристики пациентов и мешотчатых интракраниальных аневризм при наличии/отсутствии накопления контрастного препарата в стенке

	Накопление контрастного препарата	Отсутствие накопления контрастного препарата	p Value
Возраст (средн. ± sd)	50,8 ± 12,7	52,3 ± 11,2	0,751
Пол			0,222
Женщины (n)	55	45	
Мужчины (n)	13	19	
Артериальная гипертензия			0,281
Есть (n)	46	37	
Нет (n)	27	22	
Неправильная форма			0,779
Да (n)	23	19	
Нет (n)	45	45	
Размер (средн. ± sd, мм)	7,9 ± 4,7	4,4 ± 1,5	<0,001
от 0 до 6,9 мм	35	59	
от 7.0 до 9.9 мм	22	5	
от 10 до 19 мм	9	0	
более 20 мм	2	0	
Расположение (n)	83	56	0,565
BCA (n)	19	13	
СМА (n)	32	35	
ПМА/ЗСоА/ПМА (n)	17	16	
Оценка по шкале PHASES			< 0,001
0–4 (балла)	31	50	
5–7 (баллов)	22	14	
8–9 (баллов)	8	0	
≥ 10 (баллов)	7	0	

ванием стенки аневризмы: 37 % (35/94) аневризм размером менее 7,0 мм, 81 % (22/27) размером от 7,0 до 9,9 мм, 100 % (9/9) размером от 10,0 до 19,9 мм и 100 % (2/2) размером более 20,0 мм (рис. 4).

42 аневризмы (32 %) имели неправильную форму, что оказалось признаком, не связанным с фактом наличия или отсутствия контрастирования ($p > 0,05$).

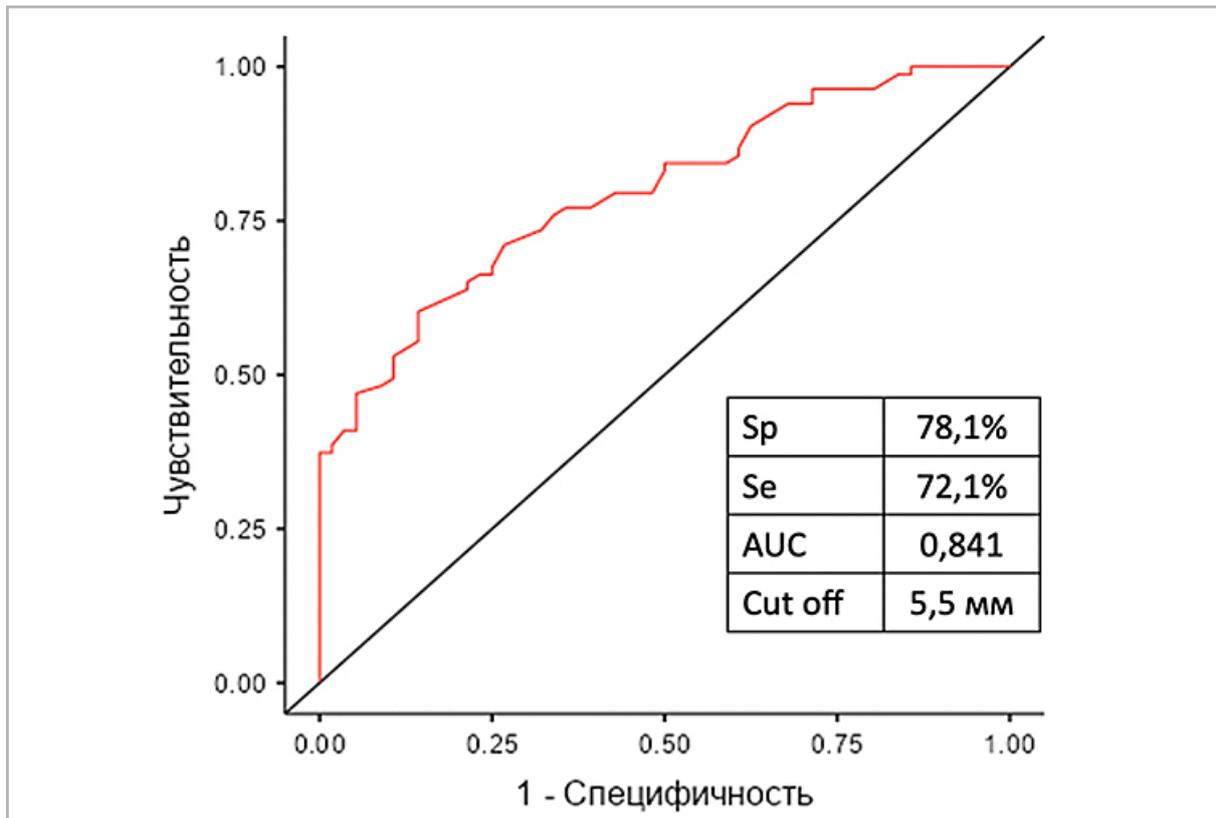


Рис. 3. ROC-анализ: сравнение размера мешотчатых аневризм и патологического контрастирования стенки аневризмы. *Sp* – специфичность, *Se* – чувствительность, *AUC* – площадь под кривой, *Cut off* – пороговое значение

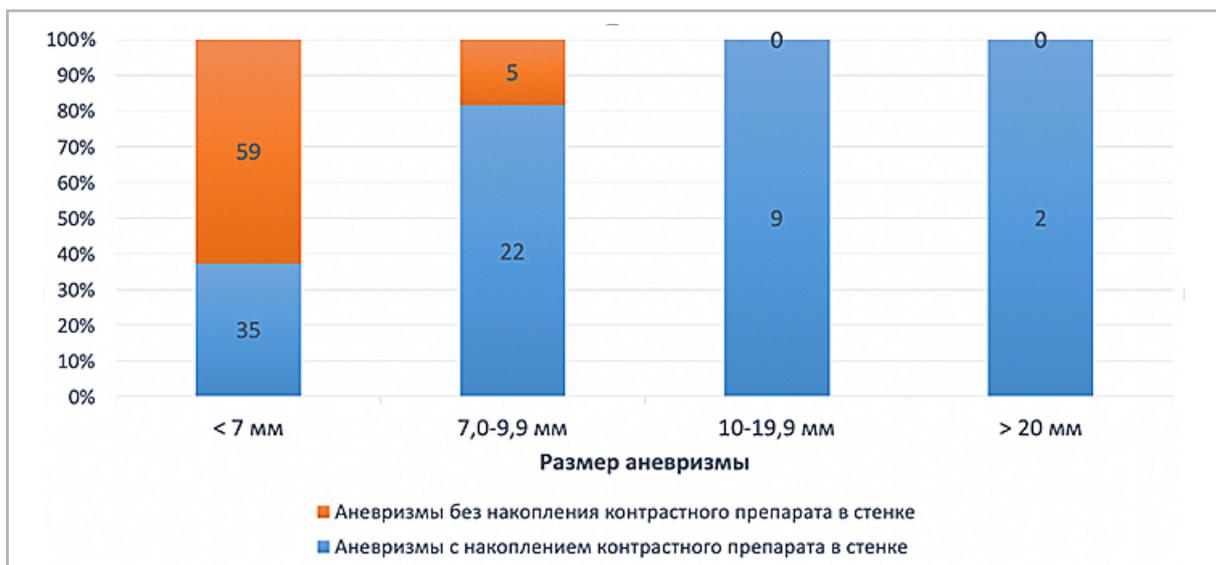


Рис. 4. Пропорция контрастирования стенки аневризмы в зависимости от размера

По нашим данным, факт контрастирования не зависел также от месторасположения аневризмы ($p > 0,05$). Не было выявлено связи между гипертензией ($p > 0,05$), полом ($p > 0,05$), возра-

том пациента ($p > 0,05$) и контрастным усилением.

При сопоставлении контрастирования стенки аневризмы с оценкой по шкале PHASES было выявлено, что с уве-

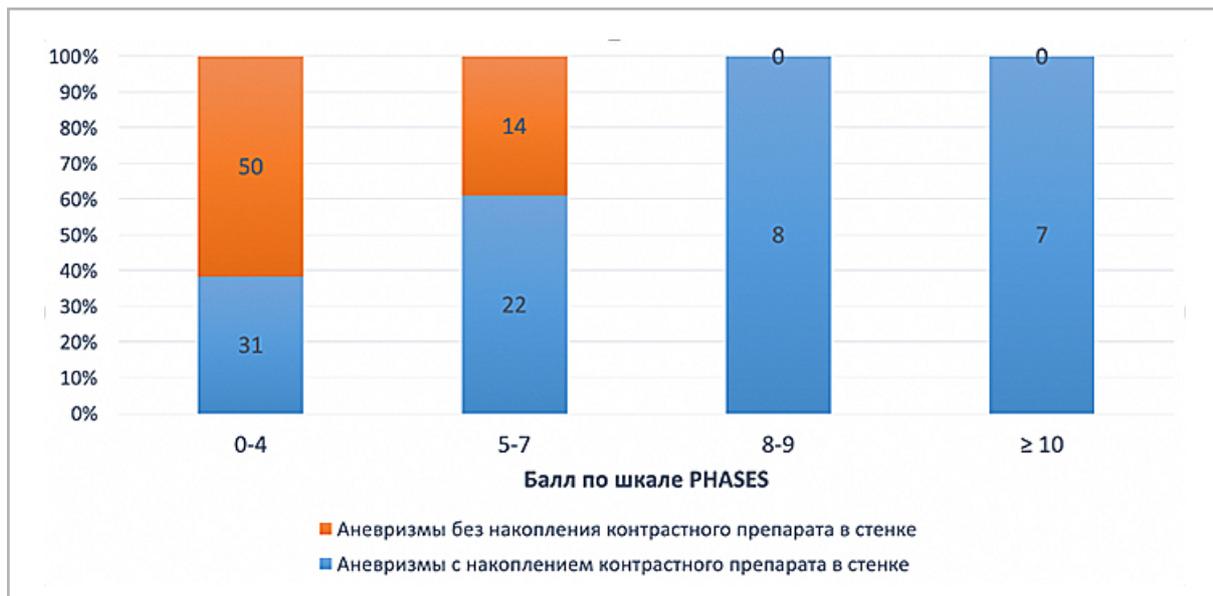


Рис. 5. Пропорция аневризм без/с контрастированием стенки аневризмы в зависимости от балла по шкале PHASES

личением балла доля аневризм с накоплением контрастного препарата прогрессивно увеличивалась ($p < 0,001$, $Se = 57,4 \%$, $Sp = 64,1 \%$, $AUC = 0,66$, $cut\ off = 6$). Для демонстрации пропорции аневризм с накоплением контрастного препарата и балла по шкале PHASES мы разделили пациентов на 4 группы, исходя из вышеперечисленных характеристик: 0–4, 5–7, 8–9 и ≥ 10 баллов (рис. 5). Распределение аневризм с накоплением контрастного препарата в стенке или без него значительно различалось в зависимости от оценки PHASES ($p < 0,001$). На долю аневризм с накоплением контрастного препарата в стенке приходилось 38 % (31/81) аневризм с баллом < 5 по сравнению с 72 % (37/51) аневризм с баллом ≥ 5 .

Обсуждение

В проведенном исследовании мы проанализировали факт патологического накопления контрастного препарата в стенке ИА у пациентов, проходивших лечение в Центре нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко, и выявили взаимосвязь контрастирования стенки аневриз-

мы с ее размером и оценкой по шкале PHASES.

Размер аневризмы является общепринятым фактором риска разрыва, который следует учитывать при принятии решения о хирургическом лечении [1]. Согласно исследованию D. Backes et al. (2018) и ряду других работ, установлена прямая зависимость между вероятностью контрастирования стенки аневризмы и размером купола [4, 13, 18]. Тем не менее Edjlali et al. (2014) в своем исследовании такой взаимосвязи не выявили, что, по нашему мнению, могло быть связано с выбранным авторами диапазоном размера аневризм — от 4 до 8 мм [5]. В нашем исследовании была выявлена статистически значимая взаимосвязь между размером аневризмы и накоплением контрастного препарата ее стенками: с увеличением размера купола доля аневризм с контрастированием стенок постепенно увеличивалась.

Интересным феноменом нашей работы является отсутствие взаимосвязи между формой аневризмы и накоплением контрастного препарата ее стенкой, хотя отдельные зарубежные авторы выявили корреляцию между данными

параметрами. Такое несоответствие требует дальнейшего изучения, тем более что многие нейрохирурги в рутинной практике рассматривают этот параметр как критерий нестабильности [9, 18, 19]. Более того, дискутабельным остается вопрос интерпретации «неправильной формы» аневризмы, под которым разные авторы подразумевают разные характеристики.

В последнее время были разработаны модели прогнозирования разрыва аневризмы путем объединения нескольких традиционных характеристик, связанных с разрывом. Шкала PHASES является наиболее популярной шкалой на данный момент и разработана на основе системного обзора и анализа индивидуальных данных 8382 пациентов [7]. В нашем исследовании балл по шкале PHASES был выше среди группы пациентов с аневризмами, стенка которых накапливала контрастный препарат, чем в группе без накопления последнего. Детальный анализ показал, что по мере увеличения баллов по шкале PHASES доля аневризм с накоплением стенкой контрастного препарата постепенно увеличивалась. Однако, как было продемонстрировано выше, не все факторы риска, включенные в прогностическую модель PHASES, такие как артериальная гипертензия, возраст, локализация, имели взаимосвязь с контрастированием стенки аневризмы по результатам нашего исследования. Идентичные результаты были получены и группами исследователей из Китая и Германии [11, 13].

Таким образом, наибольшую взаимосвязь с контрастированием стенки аневризмы, исходя из параметров шкалы PHASES, имел ее размер. Аневризмы менее 7 мм, согласно шкале PHASES, имеют пятилетнюю вероятность разрыва всего лишь от 0,4 до 2,4 % (кроме финской и японской популяций) [7]. Но хорошо известно, что и эти ИА подвержены разрыву. В некоторых исследова-

ниях до 40 % всех выявленных САК за период наблюдения были обусловлены разрывами ИА размерами менее 7 мм [12]. В таком случае контрастирование стенки ИА на МРТ может стать одним из важнейших параметров оценки аневризм указанной категории пациентов, учитывая, что, по данным ряда авторов, контрастирование стенки аневризмы связано с воспалением и неоваскуляризацией, которые рассматриваются одними из главных механизмов, ведущих к разрыву [11, 15].

В нашей работе не представлены результаты гистологического анализа, хотя в мировой литературе существуют исследования взаимосвязи накопления контрастного препарата стенкой аневризмы и гистологических данных. Однако данные исследования немногочисленны и включают крайне малое количество пациентов [8, 10]. Требуется дальнейшее изучение этих изменений с увеличением общего количества информации о гистологических данных в сравнении с МР-визуализацией стенки аневризмы.

Выводы

Развитие МРТ-технологий позволило разработать методику визуализации сосудистой стенки, которая потенциально является неинвазивным методом для выявления новых диагностических маркеров, предположительно ведущих к разрыву ИА.

Накопление контрастного препарата стенкой аневризмы тесно связано с такой морфометрической характеристикой аневризмы, как высота купола и высокий балл по шкале PHASES.

Учитывая, что ценность шкалы PHASES сомнительна в отношении аневризм менее 7 мм, МР-визуализация стенки аневризмы может стать основным методом для оценки риска разрыва таких аневризм и ключевым критерием отбора пациентов на микрохирургическое лечение, не дожидаясь разрыва.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / References

1. Morita A., Kirino T., Hashi K., Aoki N., Fukuhara S., Hashimoto N., Nakayama T., Sakai M., Teramoto A., Tominari S., Yoshimoto T. The Natural Course of Unruptured Cerebral Aneurysms in a Japanese Cohort. *New England Journal of Medicine*. 2012. No. 26 (366). P. 2474–2482.
2. Jersey A. M., Foster D. M. Cerebral Aneurysm [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK507902/?report=classic> (дата обращения: 29.03.2023).
3. Backes D., Rinkel G. J. E., Greving J. P., Velthuis B. K., Murayama Y., Takao H., Ishibashi T., Igase M., Brugge K. G., Agid R., Jääskeläinen J.E., Lindgren A. E., Koivisto T., Fraunberg M., Matsubara S., Moroi J., Wong G. K. C., Abrigo J. M., Igase K., Matsumoto K., Wermer M. J. H., Walderveen M. A. A., Algra A., Vergouwen M. D. I. ELAPSS score for prediction of risk of growth of unruptured intracranial aneurysms. *Neurology*. 2017. No. 17 (88). P. 1600–1606.
4. Backes D., Hendrikse J., Schaaf I., Algra A., Lindgren A. E., Verweij B. H., Rinkel G. J. E., Vergouwen M. D. I. Determinants of Gadolinium-Enhancement of the Aneurysm Wall in Unruptured Intracranial Aneurysms. *Neurosurgery*. 2018. No. 4 (83). P. 719–725.
5. Edjlali M., Gentric J. C., Régent-Rodriguez C., Trystram D., Hassen W. Ben, Lion S., Nataf F., Raymond J., Wieben O., Turski P., Meder J. F., Oppenheim C., Naggara O. Does aneurysmal wall enhancement on vessel wall MRI Help to distinguish stable from unstable intracranial aneurysms? *Stroke*. 2014. No. 12 (45). P. 3704–3706.
6. Etminan N., Chang H. S., Hackenberg K., Rooij N. K. De, Vergouwen M. D. I., Rinkel G. J. E., Algra A. Worldwide Incidence of Aneurysmal Subarachnoid Hemorrhage According to Region, Time Period, Blood Pressure, and Smoking Prevalence in the Population: A Systematic Review and Meta-analysis. *JAMA Neurology*. 2019. No. 5 (76). P. 588–597.
7. Greving J. P., Wermer M. J. H., Brown R. D., Morita A., Juvela S., Yonekura M., Ishibashi T., Torner J. C., Nakayama T., Rinkel G. J. E., Algra A. Development of the PHASES score for prediction of risk of rupture of intracranial aneurysms: A pooled analysis of six prospective cohort studies. *The Lancet Neurology*. 2014. No. 1 (13). P. 59–66.
8. Hu P., Yang Q., Wang D. D., Guan S. C., Zhang H. Q. Wall enhancement on high-resolution magnetic resonance imaging may predict an unsteady state of an intracranial saccular aneurysm. *Neuroradiology*. 2016. No. 10 (58). P. 979–985.
9. Quan K., Song J., Yang Z., Wang D., An Q., Huang L., Liu P., Li P., Tian Y., Zhou L., Zhu W. Validation of Wall Enhancement as a New Imaging Biomarker of Unruptured Cerebral Aneurysm. *Stroke*. 2019. No. 6 (50). P. 1570–1573.
10. Shimonaga K., Matsushige T., Ishii D., Sakamoto S., Hosogai M., Kawasumi T., Kaneko M., Ono C., Kurisu, K. Clinicopathological Insights From Vessel Wall Imaging of Unruptured Intracranial Aneurysms. *Nature Reviews Neurology*. 2016. T. 12. No. 12. P. 699–713.
11. Larsen N., Flüh C., Saalfeld S., Voß S., Hille G., Trick D., Wodarg F., Synowitz M., Jansen O., Berg P. Multimodal validation of focal enhancement in intracranial aneurysms as a surrogate marker for aneurysm instability. *Neuroradiology*. 2020. No. 12 (62). P. 1627–1635.
12. Lee G. J., Eom K. S., Lee C., Kim D. W., Kang S. D. Rupture of Very Small Intracranial Aneurysms: Incidence and Clinical Characteristics. *Journal of Cerebrovascular and Endovascular Neurosurgery*. 2015. No. 3 (17). P. 217.
13. Lv N., Karmonik C., Chen S., Wang X., Fang Y., Huang Q., Liu J. Relationship between Aneurysm Wall Enhancement in Vessel Wall Magnetic Resonance Imaging and Rupture Risk of Unruptured Intra-

- cranial Aneurysms. *Clinical Neurosurgery*. 2019. No. 6 (84). P. 385–391.
14. Pagiola I., Mihalea C., Caroff J., Ikka L., Chalumeau V., Iacobucci M., Ozanne A., Gallas S., Marques M., Nalli D., Carrete H., Caldas J. G., Frudit M. E., Moret J., Spelle L. The PHASES score: To treat or not to treat? Retrospective evaluation of the risk of rupture of intracranial aneurysms in patients with aneurysmal subarachnoid hemorrhage. *Journal of Neuroradiology*. 2020. No. 5 (47). P. 349–352.
 15. Samaniego E. A., Roa J. A., Hasan D. Vessel wall imaging in intracranial aneurysms 3. *Journal of NeuroInterventional Surgery*. 2019. T. 11. № 11. С. 1105–1112.
 16. Tulamo R., Frösen J., Hernesniemi J., Niemelä M. Inflammatory changes in the aneurysm wall: A review 4. *Journal of NeuroInterventional Surgery*. 2010. T. 2. No. 2. P. 120–130.
 17. Wadghiri Y. Z., Hoang D. M., Leporati A., Gounis M. J., Rodríguez-Rodríguez A., Mazzanti M. L., Weaver J. P., Wakhloo A. K., Caravan P., Bogdanov A. A. High-resolution Imaging of Myeloperoxidase Activity Sensors in Human Cerebrovascular Disease. *Scientific Reports*. 2018. No. 1 (8). P. 1–11.
 18. Wang G., Li W., Lei S., Ge X., Yin J., Zhang D. Relationships between aneurysmal wall enhancement and conventional risk factors in patients with intracranial aneurysm: A high-resolution MRI study. *Journal of Neuroradiology*. 2019. No. 1 (46). P. 25–28.
 19. Zwarzany Ł., Tyburski E., Poncyłjusz W. High-resolution vessel wall magnetic resonance imaging of small unruptured intracranial aneurysms. *Journal of Clinical Medicine*. 2021. No. 2 (10). P. 1–11.

Сведения об авторах / Information about the authors

Сеин Кирилл Сергеевич, аспирант кафедры рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, врач-рентгенолог ФГБУ «НМИЦ ДГОИ им. Дмитрия Рогачева» Минздрава России, Москва, Россия.

117997, г. Москва, ул. Саморы Машела, д. 1.

+7 (916) 586-49-88

Вклад автора: концепция и дизайн исследования, проведение исследования, сбор и обработка данных, анализ и интерпретация полученных данных, написание текста, подготовка, создание опубликованной работы.

Semin Kirill Sergeevich, Postgraduate at the Department of radiology of the N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, radiologist of Dmitry Rogachev National Research Center of Pediatric Hematology, Oncology and Immunology, Moscow, Russia.

1, ul. Samory Mashela, Moscow, 117997, Russia.

+7 (916) 586-49-88

Author's contribution: concept and design of the study, conducting the study, collecting and processing data, analyzing and interpreting the data obtained, writing the text, preparation of the published work.

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

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

+7 (910) 443-89-25

Вклад автора: редакция, дизайн исследования.

Zakharova Natal'ya Evgen'evna, Professor of the Russian Academy of Sciences, PhD, leading researcher at the Department of radiology of the N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

16, 4th Tverskaja-Jamskaja ul., Moscow, 125047, Russia.
+7 (910) 443-89-25
Author's contribution: editorial, research design.

Элиава Шалва Шалвович, профессор, член-корреспондент РАН, доктор медицинских наук, главный научный сотрудник, заведующий 3-м нейрохирургическим отделением ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.
125047, г. Москва, 4-я Тверская-Ямская ул., д. 16.
+7 (985) 991-47-74
Вклад автора: концепция и дизайн исследования, ответственность за целостность всех частей статьи, утверждение окончательного варианта статьи.

Eliava Shalva Shalvovich, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, PhD, Chief Researcher, Head of the 3rd Neurosurgical Department of the N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.
16, 4th Tverskaja-Jamskaja ul., Moscow, 125047, Russia.
+7 (985) 991-47-74
Author's contribution: concept and design of the study, responsibility for the integrity of all parts of the article, approval of the final version of the article.

Коновалов Антон Николаевич, кандидат медицинских наук, научный сотрудник, нейрохирург 3-го нейрохирургического отделения ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.
125047, г. Москва, 4-я Тверская-Ямская ул., д. 16
+7 (916) 861-99-87
Вклад автора: написание статьи, сбор данных.

Konovalov Anton Nikolaevich, Candidate of Medical Sciences, researcher, neurosurgeon of the 3rd neurosurgical department of the N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.
16, 4th Tverskaja-Jamskaja ul., Moscow, 125047, Russia.
+7 (916) 861-99-87
Author's contribution: article writing, data collection.

Хейреддин Али Садек, доктор медицинских наук, доцент, нейрохирург 3-го нейрохирургического отделения ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.
125047, г. Москва, 4-я Тверская-Ямская ул., д. 16.
+7 (903) 153-93-59
Вклад автора: редакция, сбор данных.

Kheireddin Ali Sadek, PhD, Associate Professor, neurosurgeon of the 3rd neurosurgical department of the N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.
16, 4th Tverskaja-Jamskaja ul., Moscow, 125047, Russia.
+7 (903) 153-93-59
Author's contribution: article writing, data collection.

Калаева Диана Борисовна, медицинский физик отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.
125047, г. Москва, 4-я Тверская-Ямская ул., д. 16.
+7 (916) 850-72-18
Вклад автора: сбор и обработка данных, статистическая обработка данных, редакция.

Kalaeva Diana Borisovna, medical physicist of the N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.
16, 4th Tverskaja-Jamskaja ul., Moscow, 125047, Russia.
+7 (916) 850-72-18
Author's contribution: data collection and processing, statistical data processing, editing.

Баталов Артем Игоревич, кандидат медицинских наук, научный сотрудник, врач-рентгенолог отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

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

+7 (926) 066-20-50

Вклад автора: редакция, дизайн исследования.

Batalov Artem Igorevich, Candidate of Medical Sciences, researcher, radiologist of the Department of radiology of the N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

16, 4th Tverskaja-Jamskaja ul., Moscow, 125047, Russia.

+7 (926) 066-20-50

Author's contribution: editorial, research design.

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

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

+7 (916) 651-17-56

Вклад автора: концепция и дизайн исследования, ответственность за целостность всех частей статьи, утверждение окончательного варианта статьи.

Pronin Igor Nikolaevich, Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, PhD, Chief Researcher, Head of the of the Department of radiology of the N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

16, 4th Tverskaja-Jamskaja ul., Moscow, 125047, Russia.

+7 (916) 651-17-56

Author's contribution: concept and design of the study, responsibility for the integrity of all parts of the article, approval of the final version of the article.

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 20.10.2023;
одобрена после рецензирования 18.12.2023;
принята к публикации 12.01.2024.

The article was submitted 20.10.2023;
approved after reviewing 18.12.2023;
accepted for publication 12.01.2024.



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., Погосбекян Э. Л., Горайнов С. А., Латышев Я. А., Косыркова 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-

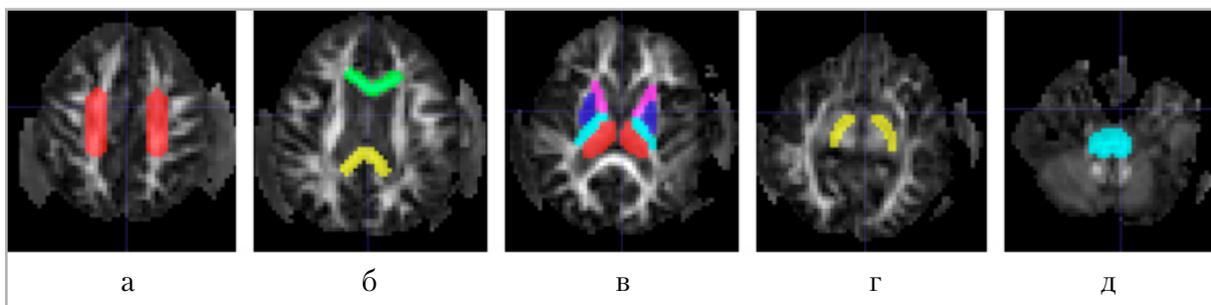


Рис. 1. ДК МРТ пациента с ДАП. На карте FA билатерально выделены области интереса: а — семиовальный центр, б — колено и валик мозолистого тела, в — переднее и заднее бедро внутренней капсулы, чечевицеобразное ядро, таламус, г — ножка мозга, д — ствол мозга

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-

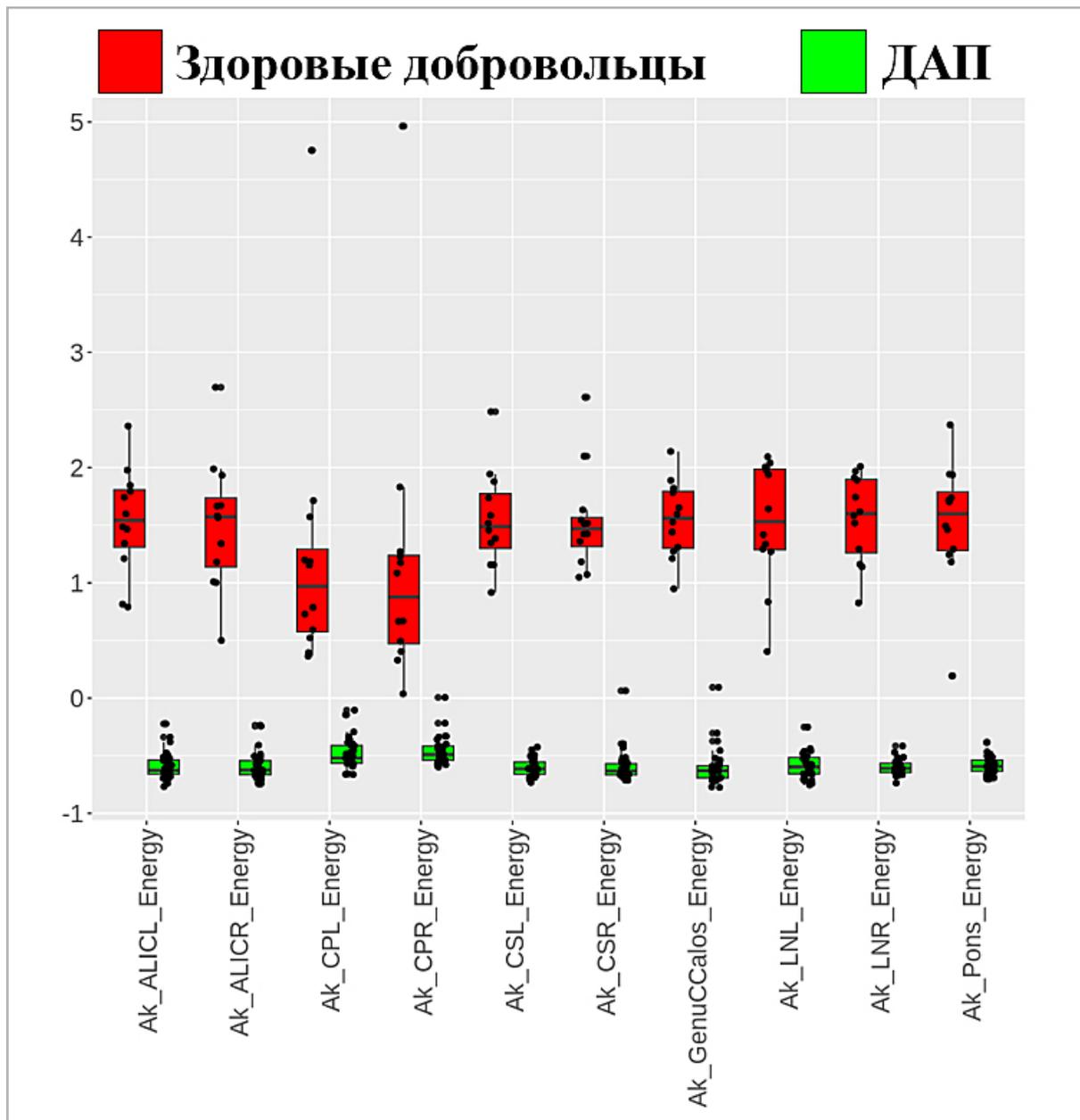


Рис. 2. Распределение наиболее различающихся параметров радиомики у пациентов с ДАП и здоровых добровольцев. Ак – аксиальный куртозис; ALIC L/R – передняя ножка внутренней капсулы, левая/правая; CP L/R – ножка мозга, левая/правая; CS L/R – семиовальный центр, слева/справа; GenuCCalos – колено мозолистого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

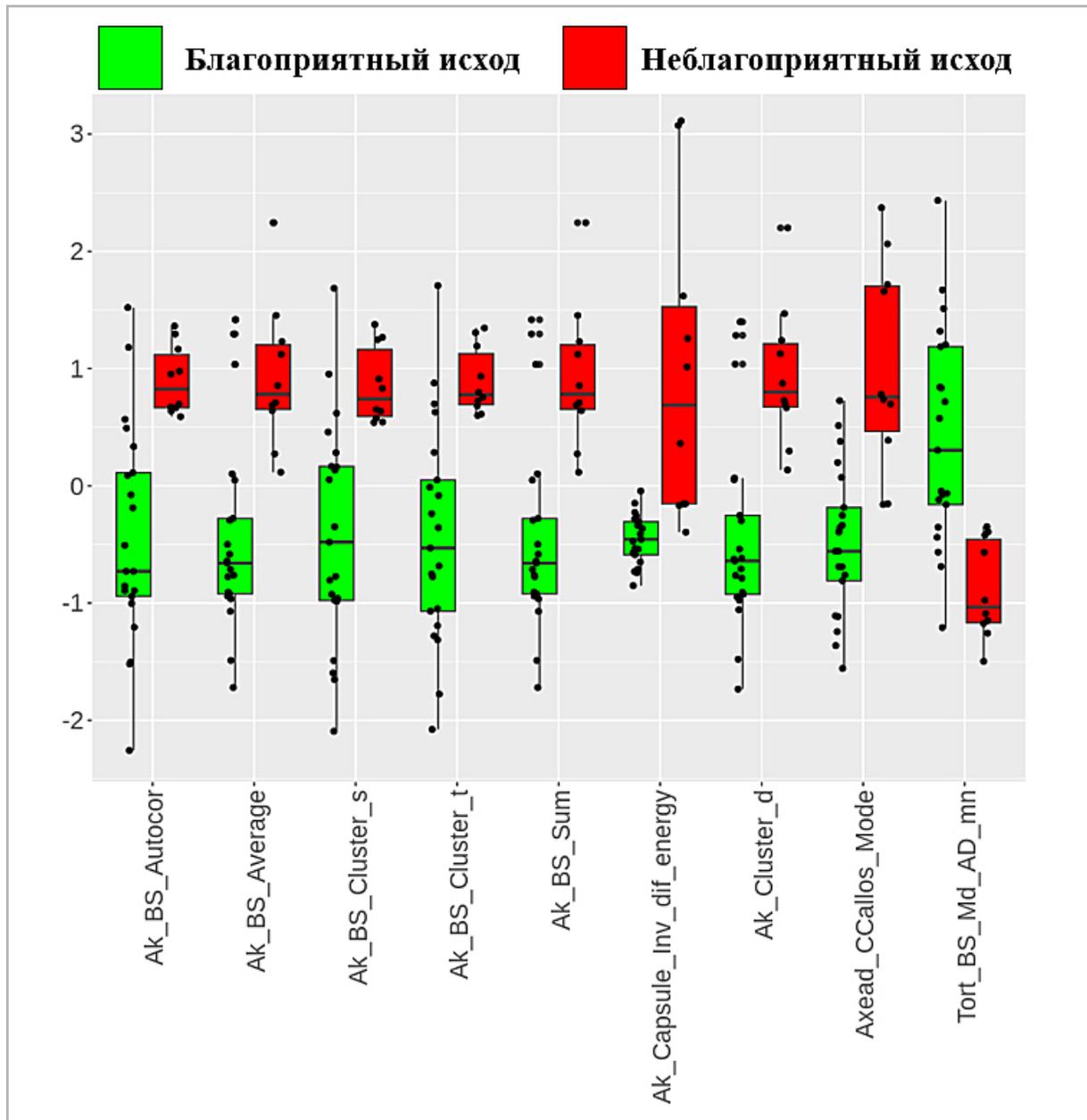


Рис. 3. Распределение наиболее различающихся параметров радиомики у пациентов с благоприятным и неблагоприятным исходом ДАП. Ak – аксиальный куртозис; Ahead – аксиальная экстрааксональная диффузия воды; Tort – извитость экстрааксонального пространства; Pons, BS – ствол мозга; Capsule – заднее бедро внутренней 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.



МЕДИЦИНСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Обзорная статья
УДК 616.8-006
<https://doi.org/10.52560/2713-0118-2024-1-66-84>

Визуализация опухолей головного мозга: снова о стандартизированном МРТ-протоколе

Н. Е. Захарова¹, И. Н. Пронин², А. И. Баталов³, И. В. Чехонин⁴, А. Н. Тюрина⁵

¹⁻⁵ ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия

¹ nzakharova@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0516-3613>

² pronin@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4480-0275>

³ abatalov@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8924-7346>

⁴ ivan.chekhонin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6652-2472>

⁵ aturina@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2333-7867>

Автор, ответственный за переписку: Наталья Евгеньевна Захарова, nzakharova@nsi.ru

Резюме

Стандартизированный подход к исследованию пациентов с опухолями головного мозга, несмотря на повсеместное применение МР-томографов, до сих пор не утвержден. Это иногда затрудняет интерпретацию полученных данных и ограничивает возможность постановки точного диагноза. При таких обстоятельствах становится сложным планировать операцию, химио- или лучевую терапию, определять изменения патологического процесса в динамике. В связи с этим актуальной остается проблема унификации протоколов применения различных методик МРТ и параметров получения изображений. В статье предлагается стандартный протокол МРТ для пациентов с опухолями головного мозга, который должен включать T2-взвешенные изображения (аксиальная и коронарная проекции), T2-FLAIR (аксиальная проекция или 3D-последовательность), 3D T2* (градиентное эхо), диффузионно-взвешенные изображения, аксиальные T1-взвешенные изображения, постконтрастные T1-взвешенные изображения в режиме спиновое эхо (аксиальные или в трех проекциях) с обязательным их дополнением изотропными 3D T1-последовательностями. Этот минимальный набор режимов МРТ дает возможность правильной постановки диагноза и оценки изменений патологического процесса при последующих исследованиях. МРТ должна быть выполнена на томографе напряженностью магнитного поля минимум 1,5 Тл.

Ключевые слова: магнитно-резонансная томография, опухоли головного мозга

Для цитирования: Захарова Н. Е., Пронин И. Н., Баталов А. И., Чехонин И. В., Тюрина А. Н. Визуализация опухолей головного мозга: снова о стандартизированном МРТ-протоколе // Радиология — практика. 2024;1:66-84. <https://doi.org/10.52560/2713-0118-2024-1-66-84>

© Захарова Н. Е., Пронин И. Н., Баталов А. И., Чехонин И. В., Тюрина А. Н., 2024

MEDICAL TECHNOLOGY

Review article

Neuroimaging of brain tumors: back to the standardized MRI-protocol

N. E. Zakharova¹, I. N. Pronin², A. I. Batalov³, I. V. Chekhonin⁴, A. N. Tyurina⁵

¹⁻⁵N. N. Burdenko National Medical Research Center OF Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

¹nzakharova@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0516-3613>

²pronin@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4480-0275>

³abatalov@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8924-7346>

⁴ivan.chekhонin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6652-2472>

⁵aturina@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2333-7867>

Corresponding author: Natal'ya E. Zakharova, nzakharova@nsi.ru

Abstract

Despite the widespread application of MRI in brain tumor MR-imaging, the standardized MRI protocol has not yet been approved. This fact creates obstacles for interpreting of the obtained data and even limits the diagnostic power of MRI. Standardization of MRI studies facilitates successful planning of surgery, chemotherapy, or radiation therapy and provides more reliable follow-up. In this regard, unification of image acquisition parameters and protocols remains relevant. We propose a standard MRI protocol that includes axial and coronal T2-weighted images, axial or 3D T2-FLAIR, 3D T2* (gradient echo), diffusion-weighted imaging, axial T1-weighted images, contrast-enhanced spin-echo T1-weighted images (either axial or three planes) and obligatory subsequent isotropic 3D T1 images. The following combination of sequences facilitates the correct diagnosis and follow-up. The least magnetic field strength should be 1.5 T.

Keywords: Magnetic Resonance Imaging, Brain Tumors

For citation: Zakharova N. E., Pronin I. N., Batalov A. I., Chekhonin I. V., Tyurina A. N. Neuroimaging of brain tumors: back to the standardized MRI-protocol. *Radiology – Practice*. 2024;1:66-84. (In Russ.). <https://doi.org/10.52560/2713-0118-2024-1-66-84>

Введение

До настоящего времени стандартизация подхода к проведению магнитно-резонансной томографии (МРТ) у пациентов с опухолями головного мозга не утверждена, что зачастую ограничивает возможности метода в диагностике, предоперационном планировании, планировании химио- или лучевой те-

рапии, а также динамическом контроле [14, 16]. В связи с этим актуальной остается проблема унификации протоколов применения различных методик МРТ и параметров получения изображений [2, 4, 6].

Предлагаемый в статье стандартизированный протокол МРТ-исследования пациентов с нейроонкологическими

заболеваниями согласуется с российскими и международными рекомендациями по обследованию пациентов с разной патологией ЦНС [2, 4, 6].

Цель: обзор современных подходов к стандартному МРТ-исследованию пациентов с первичными и вторичными опухолями головного мозга и другими интракраниальными объемными образованиями.

Стандартный протокол МРТ-исследования

МРТ — метод выбора при интракраниальных опухолях. Возможности компьютерной томографии (КТ) ограничены. Однако КТ может дать необходимую информацию в экстренных случаях, например, при острых кровоизлияниях, вклинениях мозга и при развитии острой гидроцефалии. КТ может применяться как дополнительный метод при исследовании структуры опухолей с возможностью изучения объемного мозгового кровотока в них, для поиска включений, имеющих специфические плотностные характеристики (например, петрификатов, жировой ткани), а также для выявления деструкции костей свода и основания черепа.

Стандартный протокол МРТ должен всегда включать T2-взвешенные изображения минимум в двух проекциях (аксиальной и коронарной), T2-FLAIR изображения в аксиальной проекции или 3D-последовательность, 3D T2* режим градиентного эха высокого разрешения — например, SWI (susceptibility weighted imaging) или SWAN (susceptibility weighted angiography), диффузионно-взвешенные изображения (эхо-планарная — EPI — последовательность). Линия наклона аксиальных изображений должна проходить по нижним контурам колена и валика мозолистого тела. При исследовании должны выполняться доконтрастные аксиальные T1-взвешенные изображения в режиме спиновое эхо

(spin echo) до 5 мм толщиной (интервал между срезами — 1 мм), а также аналогичные постконтрастные аксиальные T1-взвешенные изображения с дополнением их обязательными 3D T1-последовательностями с изотропным вокселем (например, spoiled gradient echo, SPGR) или 3D T1 (fast spin echo, FSE).

До- и постконтрастные T1 SE изображения должны быть выполнены с одинаковыми параметрами и в одинаковой проекции (лучше аксиальной, однако мы всегда выполняем постконтрастные T1 SE серии в трех проекциях). При отсутствии возможности выполнения 3D T1-режима после введения контрастного препарата необходимо обязательно выполнять T1 FSE/TSE в трех проекциях — аксиальной, коронарной и сагиттальной.

Этот минимальный набор режимов МРТ дает возможность правильной постановки диагноза, выбора тактики лечения и динамического контроля. Стандартом исследования в нейроонкологии считается МРТ-исследование, выполненное на аппарате с напряженностью магнитного поля 1,5 Тл и 3 Тл [6].

В табл. 1 представлен стандартный протокол по исследованию пациентов с опухолями мозга, применимый для 1,5 Тл и 3 Тл МР-томографов.

Обзор основных режимов стандартного МРТ-протокола

Главная цель стандартных МРТ состоит в диагностике, определении размера опухоли и ее локализации, структуры, объемного воздействия с компрессией желудочковой и сосудистой систем, определения распространенности перифокального отека (или отека-инфильтрации) [2, 4, 21].

ВОЗ внесла изменения в классификацию опухолей ЦНС в 2021 году, дополнив диагноз молекулярно-генетическими признаками, сделав процесс постановки диагноза более сложным

Таблица 1

Стандартный МРТ-протокол для диагностики опухолей головного мозга

Последовательности	Параметры	Длительность
Аксиальные и коронарные T2 SE	TR 3000 – 5000 мс TE \geq 80 мс Толщина среза \leq 5мм	4–7 мин
Аксиальные T1 SE	TR 400–650 мс TE 10–20 мс Толщина среза \leq 5 мм	2,5–3 мин
Аксиальные 2D T2-FLAIR FSE/ TSE (или 3D)	TR 8000–12000 мс TE 95–130 мс TI 2200 –2850 мс Толщина среза \leq 5мм	3–3,5 мин
Аксиальные ДВИ (EPI)	b-value – 0, 1000 Толщина среза – 5 мм	1 мин
3D T2* (SWI, SWAN)	Параметры в зависимости от рекомендаций производителя Толщина среза – 1,8–2,8 мм	~5,5 мин
Аксиальные (+сагиттальные, коронарные) T1 SE постконтрастные	Толщина среза \leq 5мм	8–10 мин (в трех проекциях)
3D T1 (CUBE, SPGR, FSPGR- BRAVO, MPRAGE, IR-GRE, 3D Fast FE и т. д.)	Параметры в зависимости от рекомендаций производителя Толщина среза – 1 мм, изотропный воксель	3,5–5 мин

[10, 16, 17]. Однако применение даже стандартного МРТ-протокола дает возможность предположить достаточно точный диагноз на основании только этих последовательностей, значимо укорачивая дифференциальный ряд.

Структурные МРТ-режимы T2 и T2-FLAIR выявляют объемные образования, а также любые другие повреждения мозга и изменения белого/серого вещества. Например, диффузно растущие глиомы grade 2, не накапливающие контрастный препарат, хорошо визуализируются с помощью этих последовательностей (рис. 1).

На T2- и T2-FLAIR-изображениях можно выявить также зону перифокального отека в виде области гиперинтенсивного сигнала по периферии основной ткани опухоли. Перифокальный отек при метастазах или неинфильтративно

растущих внемозговых опухолях является вазогенным и образуется в результате повышения объема внеклеточной воды при диффузии плазмы из хрупких капилляров опухоли во внесосудистое пространство. При глиомах высокой степени злокачественности перифокальная в T2 и T2-FLAIR зона повышенного МР-сигнала – это вазогенный отек с инфильтрацией его клетками опухоли (рис. 2). Истинные границы глиальной опухоли, а особенно опухоли высокой степени злокачественности, определить по данным T2/T2-FLAIR, а также других стандартных последовательностей невозможно [2, 4].

Рутинный T2-режим дает возможность определить внемозговую локализацию некоторых интракраниальных опухолей (менингиом, невриноом, внемозговых метастазов и других образо-

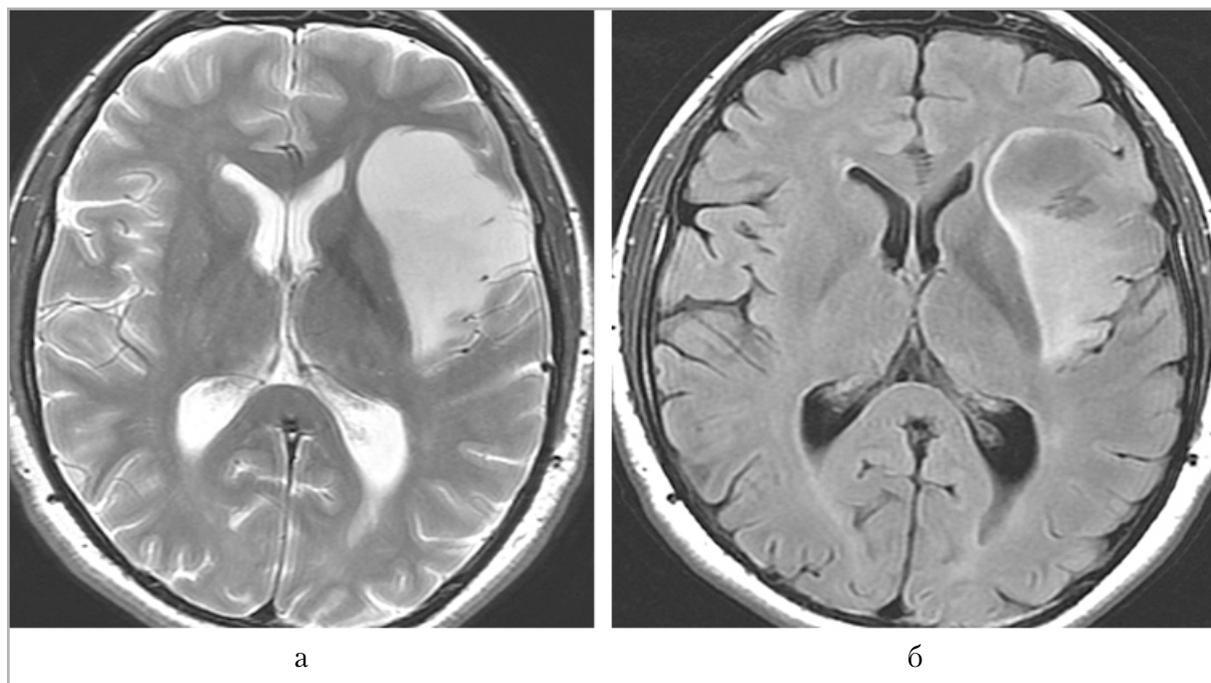


Рис. 1. МРТ пациента с диффузной астроцитомой, grade 2, в левой лобно-височно-островковой области, T2 (а), T2-FLAIR (б)

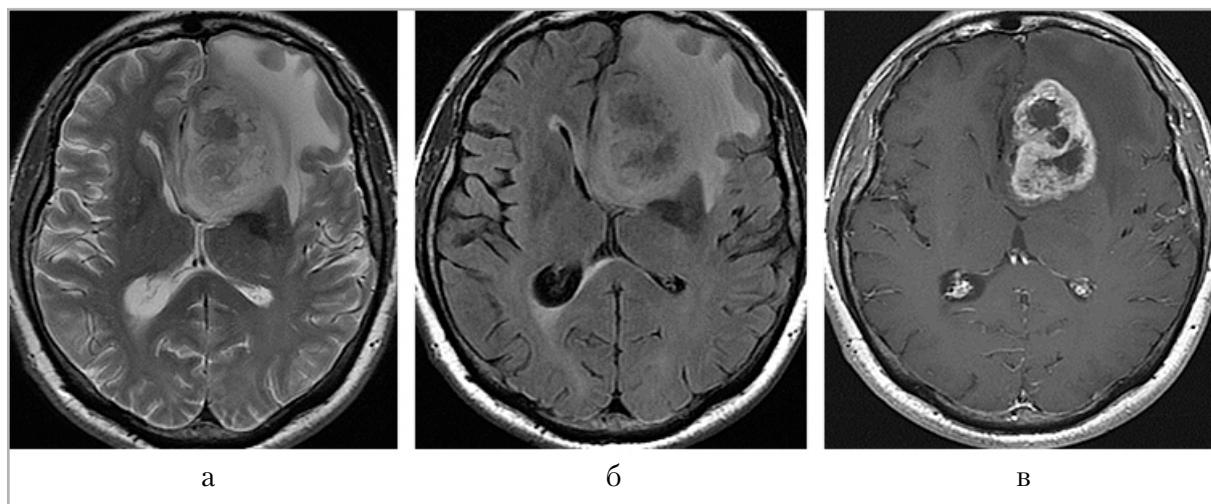


Рис. 2. Внутриголовная опухоль в левой лобной области и колоне мозолистого тела (глиобластома, grade 4). На МРТ в режимах T2 — а, T2-FLAIR — б, T1 после введения контрастного препарата (в) визуализируется диффузно растущая опухоль гетерогенной структуры с участками некроза, неоднородно накапливающая контрастный препарат, имеющая перифокальную зону отека-инfiltrации

ваний) при выявлении ликворной щели (тонкой полоски повышенного МР-сигнала), сосудов или твердой мозговой оболочки между опухолью и мозговой тканью [4].

Последовательность SWI (SWAN) чувствительна к продуктам распада кро-

ви (парамагнетикам) и кальцинатам (диамагнетикам) [3], поэтому используется для выявления кровоизлияний, а также для визуализации новообразованных сосудов опухоли с деоксигенированной кровью, что позволяет уточнить степень злокачественности глиомы. SWI также

помогает дифференцировать опухоли с кальцинатами, например, олигодендроглиомы, астроцитомы, эпендимомы.

Стандартный рутинный МРТ-протокол обязательно содержит диффузионно-взвешенные изображения (ДВИ) с определением количественного параметра — измеряемого коэффициента диффузии (ИКД). ДВИ — важная по-

следовательность для дифференцирования опухолей. Например, повышенный МР-сигнал на ДВИ и низкий ИКД показывают опухоль с высокой плотностью клеток и ограниченной диффузией во внеклеточном пространстве — частое явление в случае лимфом (рис. 3).

Высокий МР-сигнал на ДВИ и низкий ИКД также наблюдаются при

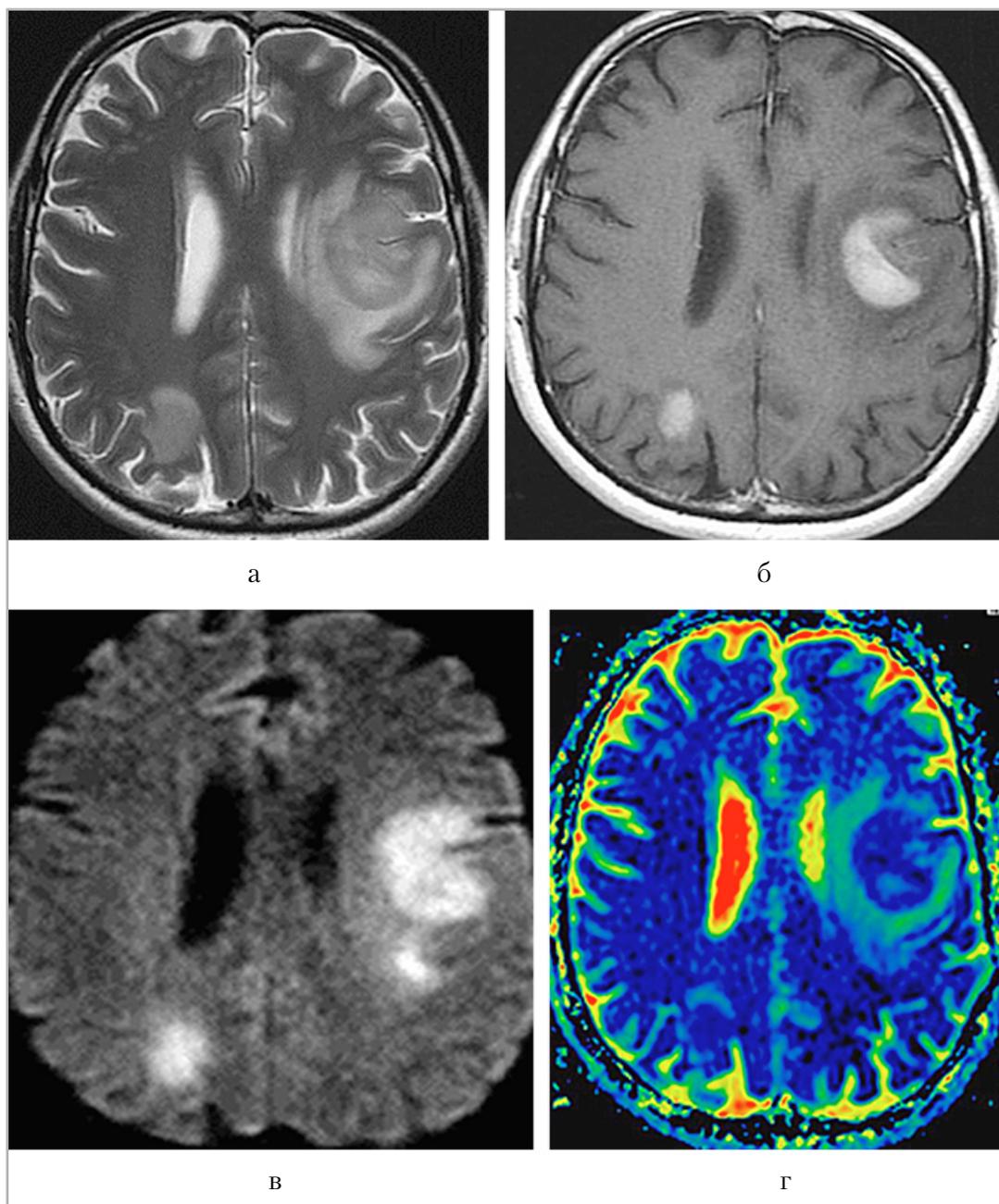


Рис. 3. Первичная лимфома ЦНС. На МРТ в режимах T2 (а), T1 после введения контрастного препарата (б), на диффузионно-взвешенном изображении (в), а также на карте ИКД (г) определяются объемные образования в белом веществе больших полушарий, имеющие высокий МР-сигнал в режиме диффузии, сниженный ИКД, интенсивно накапливающие контрастный препарат

некоторых подтипах менингиом, при медуллобластомах и некоторых других патологических процессах [4, 11]. С помощью режима диффузии уверенно дифференцируются эпидермоидные кисты — объемные образования, не являющиеся опухолями, но иногда имитирующие их. Кистозные, некротические компоненты опухолей (например, при глиобластомах) имеют повышенный ИКД, что дает возможность дифференцировать опухоли с некрозом в центре и кольцевидным накоплением контрастного препарата от абсцессов, имеющих, наоборот, высокий МР-сигнал на ДВИ и низкие показатели ИКД (рис. 4).

Диффузионно-взвешенные изображения и ИКД применяются для

предположения степени злокачественности глиом, т. к. известно, что глиомы grade 3–4 имеют более низкие значения ИКД по сравнению с глиомами grade 1–2 [7, 12, 16]. В ряде исследований были показаны корреляции генетических особенностей опухоли и показателей ИКД — IDH-мутантные глиомы, имеющие более благоприятный прогноз, имеют более высокие значения ИКД по сравнению с IDH-дикого типа [9, 16, 19]. Однако в других исследованиях было выявлено перекрытие значений ИКД в глиомах высокой и низкой степеней злокачественности, что снижает роль этих количественных показателей в дифференциальной диагностике [21].

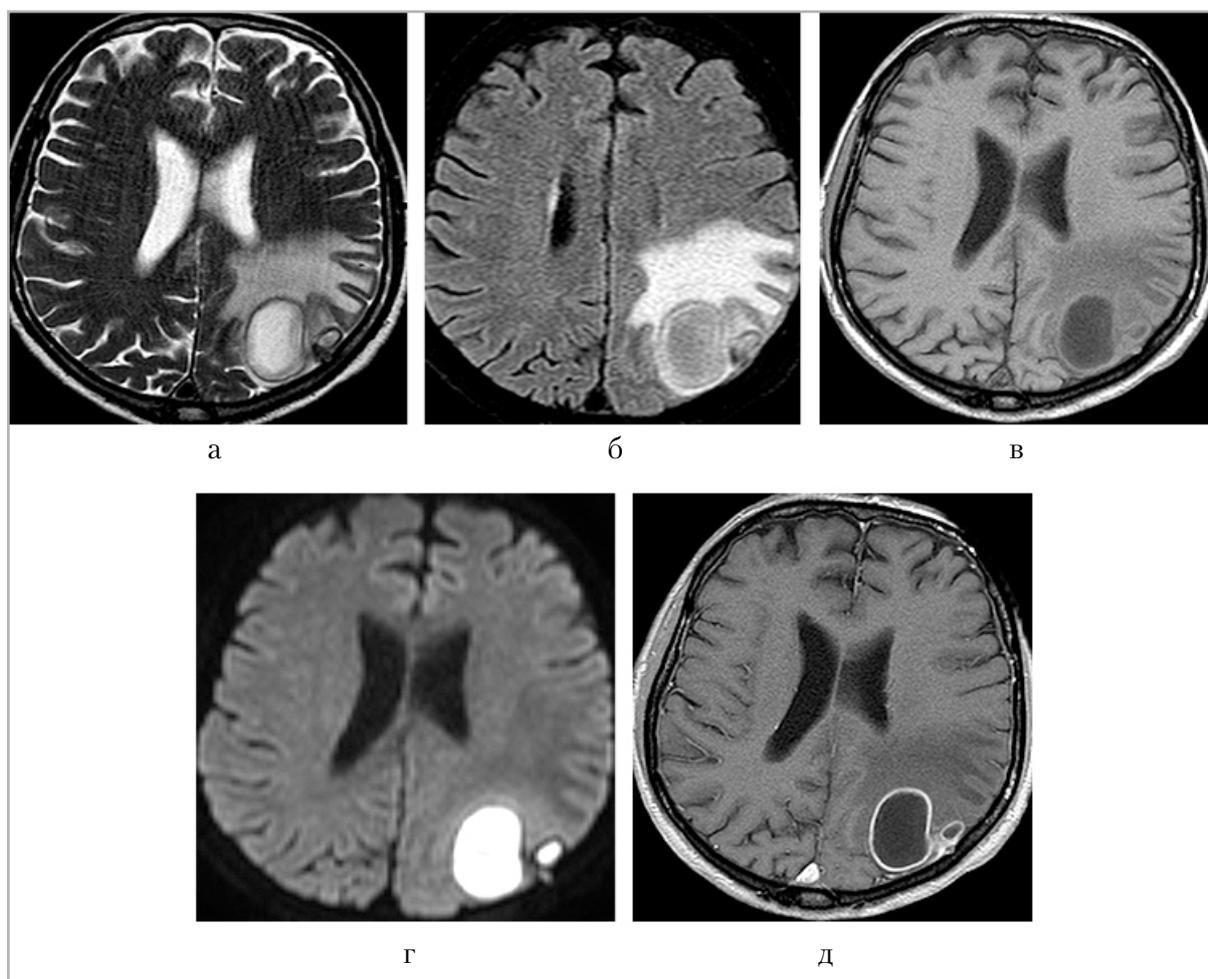


Рис. 4. Абсцесс в левой теменной области. На МРТ в режимах T2 — *а*, T2-FLAIR — *б*, T1 до и после введения контрастного препарата (*в*, *д*) определяется объемное образование с жидкостным содержимым и капсулой, кольцевидно, равномерно и тонко накапливающей контраст (*д*), содержимое абсцесса имеет высокий МР-сигнал в режиме диффузии (*е*)

Высокий МР-сигнал на T1-взвешенных изображениях может говорить о наличии в исследуемых структурах подострой крови, меланина или жира. При подозрении на жировую ткань в объемном образовании или при исследованиях опухолей в области основания черепа и орбит, богатых жировой тканью, целесообразно выполнять T1-взвешенные изображения с технологией подавления жира (рис. 5).

Применение контрастирования при МРТ-исследованиях

Применение внутривенного контрастирования при опухолях мозга является частью стандартного МРТ-протокола. Контрастирование патологических тканей выявляется в участках нарушенного гематоэнцефалического или гемато-опухолевого барьера, что наблюдается при разных патологических со-

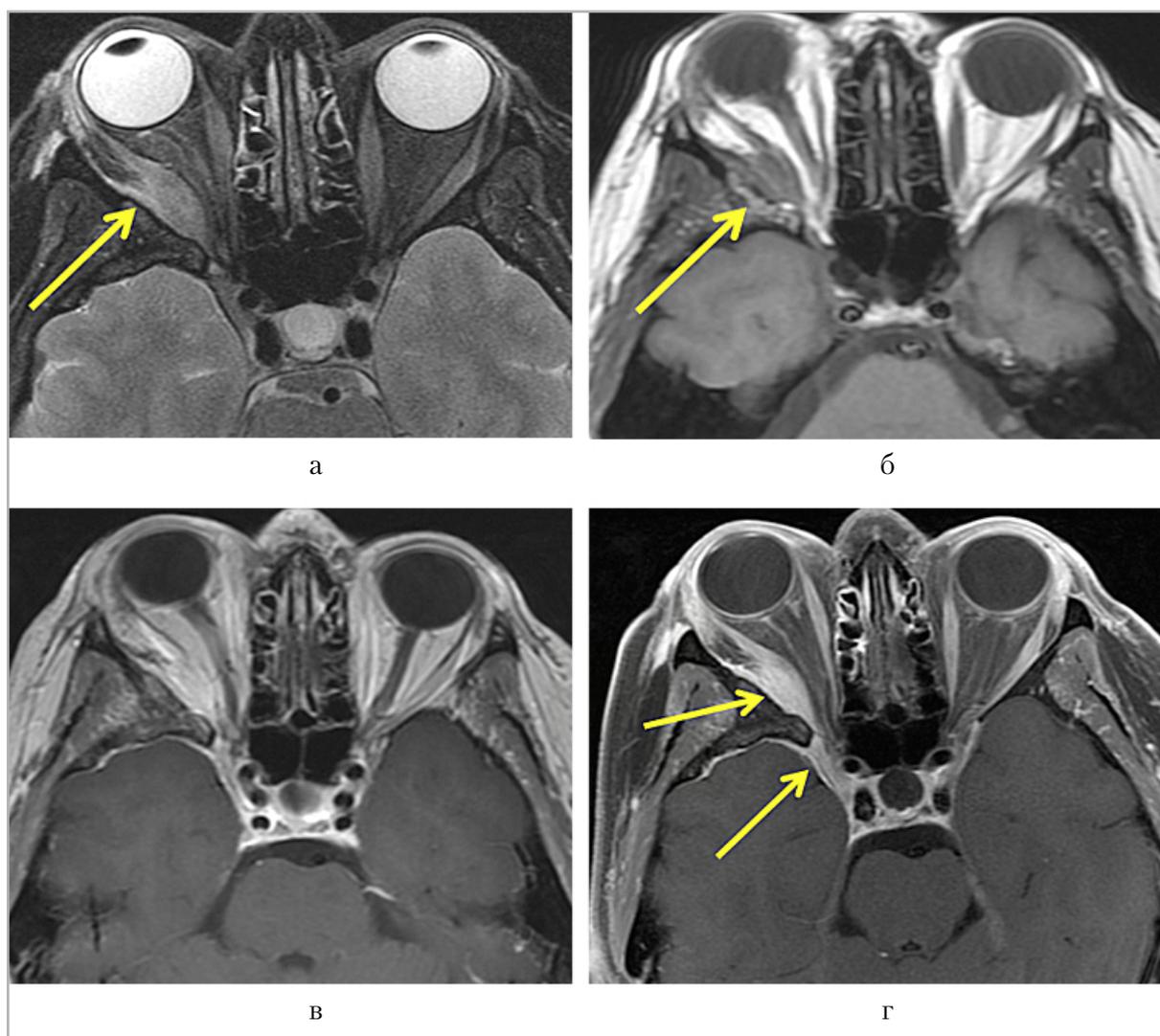


Рис. 5. Менингиома в области кавернозного синуса, средней черепной ямки справа и правой орбиты. На МРТ в T2-режиме с подавлением жира (а) и в режиме T1 (б) визуализируется объемное образование в латеральных отделах правой орбиты (стрелки), вызывающее экзофтальм. После введения контрастного препарата (режим T1, в) определяется его накопление по медиальным отделам средней черепной ямки справа, однако МР-сигнал от накопившей контраст опухоли в орбите имеет аналогичный МР-сигнал с ретробульбарной жировой клетчаткой, контуры опухоли четко не определяются. В режиме T1 с подавлением жира (г) контуры менингиомы хорошо визуализируются как интракраниально, так и в орбите (стрелки)

стояниях ЦНС опухолевой или другой природы. Для злокачественных опухолей характерен неангиогенез, т. е. образование сети патологически измененных, хрупких сосудов, через которые контрастный препарат распространяется во внесосудистое пространство, при этом интенсивность сигнала в T1-режиме в этих зонах повышается (происходит накопление контраста). Вместе с тем для некоторых злокачественных опухолей, например первичных лимфом ЦНС, неангиогенез нехарактерен, однако опухолевые клетки, располагаясь ангиоцентрически, повреждают ранее существовавшие сосуды головного мозга, повышая их проницаемость, и это проявляется в виде интенсивного контрастирования.

Накопление контрастного препарата часто сочетается с высокой степенью злокачественности диффузных глиом, но глиомы grade 3 и даже grade 4 иногда вообще не накапливают контрастный препарат, а некоторые доброкачественные глиомы grade 1 могут интенсивно контрастироваться (например, пилоидная астроцитома). Однако контрастирование остается важным элементом дифференцирования опухолей и определения степени злокачественности глиальных образований [4]. Важно также использовать стандартные дозы контрастных препаратов согласно инструкциям производителей.

В настоящее время широко применяются 3D-последовательности в режимах T2, T2-FLAIR, T1, которые, имея тонкие срезы и изотропный воксель, позволяют визуализировать небольшие структурные изменения мозга, небольшие объемные образования, реконструировать изображения в любых плоскостях и без потери качества первичных данных [6].

При выполнении T1 SE последовательности с толщиной среза 3–5 мм возможно пропустить небольшие, иногда точечные метастазы, а также затруд-

нительно сравнить размеры остатков опухоли и другие структуры до и после химио- и лучевой терапии. 3D T1-изображения с изотропным вокселем (толщиной среза до 1 мм) до и после введения контрастного препарата повышают возможность раннего выявления и точность контроля изменений в динамике при опухолях малых объемов, что важно в случаях метастатического поражения, а особенно перед радиохирургическим лечением [2, 4, 13]. Однако если нет возможности применения 3D T1 FSE (CUBE, SPACE, VISTA), а имеется только 3D T1 GRE-последовательность (FSPGR BRAVO, MPRAGE и др.), то в протокол исследования необходимо добавлять аксиальные T1 SE-изображения (толщиной среза 3–5 мм), а лучше в трех проекциях, что сделает исследование более полноценным (рис. 6).

Несмотря на то что 3D T1 GRE является надежной, хорошо отражающей анатомическую картину последовательностью, широко применяемой повсеместно, она имеет недостатки. Накопление контрастного препарата в этом режиме менее очевидно по сравнению со spin echo (SE) режимами [13], например, метастазы, интенсивно накопившие контрастный препарат на фоне яркого белого вещества мозга, менее заметны (рис. 6). Также в режимах 3D T1 GRE контрастируются нормальные сосуды, которые могут выглядеть как множественные яркие точки и препятствовать выявлению небольших метастазов в корково-субкортикальных отделах больших полушарий. Еще одним недостатком 3D T1 GRE (по сравнению с 3D T1 FSE) является отсутствие возможности адекватного подавления жира, что не позволяет четко определить объемные образования в костях свода и основания черепа, а также в орбитальной зоне [13].

При использовании 3D-последовательностей следует также помнить о правильном выборе параметров получения изображения — толщина среза

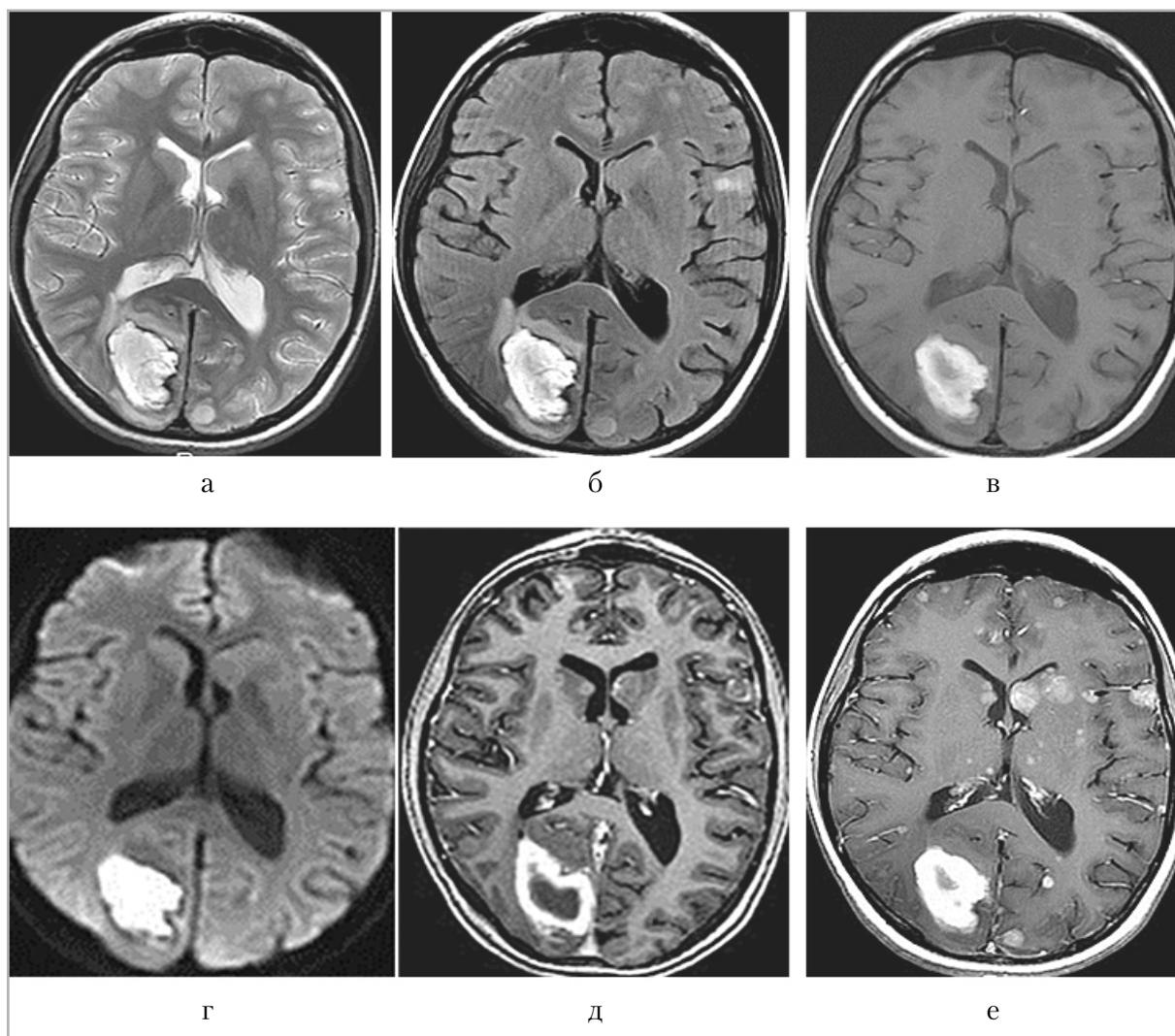


Рис. 6. Метастазы беспигментной меланомы в головном мозге. На МРТ в режимах T2 (а), T2-FLAIR (б), T1 (в), диффузии (г) выявляется внутримозговое кровоизлияние в правой затылочной доле, а также множественные участки повышения МР-сигнала в режимах T2 и T2-FLAIR в полушарных структурах. На постконтрастных T1 FSE толщиной 5 мм (е) метастазы визуализируются лучше, чем на 3D T1 SPGR толщиной 1 мм (д)

должна быть до 1 мм, поле обзора 250–256 мм, а матрица в частотном и фазовом направлениях должна совпадать (256 × 256). Только при таких условиях будет возможно построение реформатов без потери качества изображения.

Использование режимов перфузии при МРТ-исследованиях пациентов с опухолями головного мозга

Применение МРТ до и после введения контрастного препарата – это золо-

той стандарт диагностики при опухолевом поражении головного мозга, однако одно только контрастирование часто не позволяет дифференцировать степень злокачественности опухоли (например, глиомы), а также разделить возможную прогрессию опухоли и постлучевую реакцию тканей мозга. В таких случаях на помощь приходят более сложные дополнительные методики – МР-перфузионные режимы – бесконтрастная ASL (arterial spin labeling, маркирование артериальных спинов), DSC T2 или T2* (динамическая МРТ по кон-

трастной восприимчивости, dynamic susceptibility contrast), DCE (перфузия с динамическим контрастированием, dynamic contrast-enhanced). Эти методики дают возможность исследовать объемный мозговой кровоток, характеризуют микроваскулярный объем в опухоли, определяют патологическую проницаемость сосудов пораженных тканей [8, 15, 16, 18, 20]. T2- или T2* DSC-перфузия требует введения контрастного препарата и измеряет относительный микроваскулярный объем, что может помочь при определении степени злокачественности опухоли. DCE-перфузия (также с введением контрастного препарата) дает инфор-

мацию о проницаемости гематоэнцефалического барьера, необходимую для дифференциального диагноза. Бесконтрастная ASL-перфузия использует эндогенные маркеры артериальной крови и имеет преимущества в виде получения абсолютных параметров скорости кровотока и возможности многократного повторения этой последовательности [1]. ASL-перфузия показала высокую чувствительность и специфичность в дифференциальной диагностике глиом низкой и высокой степени злокачественности [1, 5] (рис. 7–9), а также в послеоперационном периоде при динамическом наблюдении пациентов после лучевой терапии и химиотерапии.

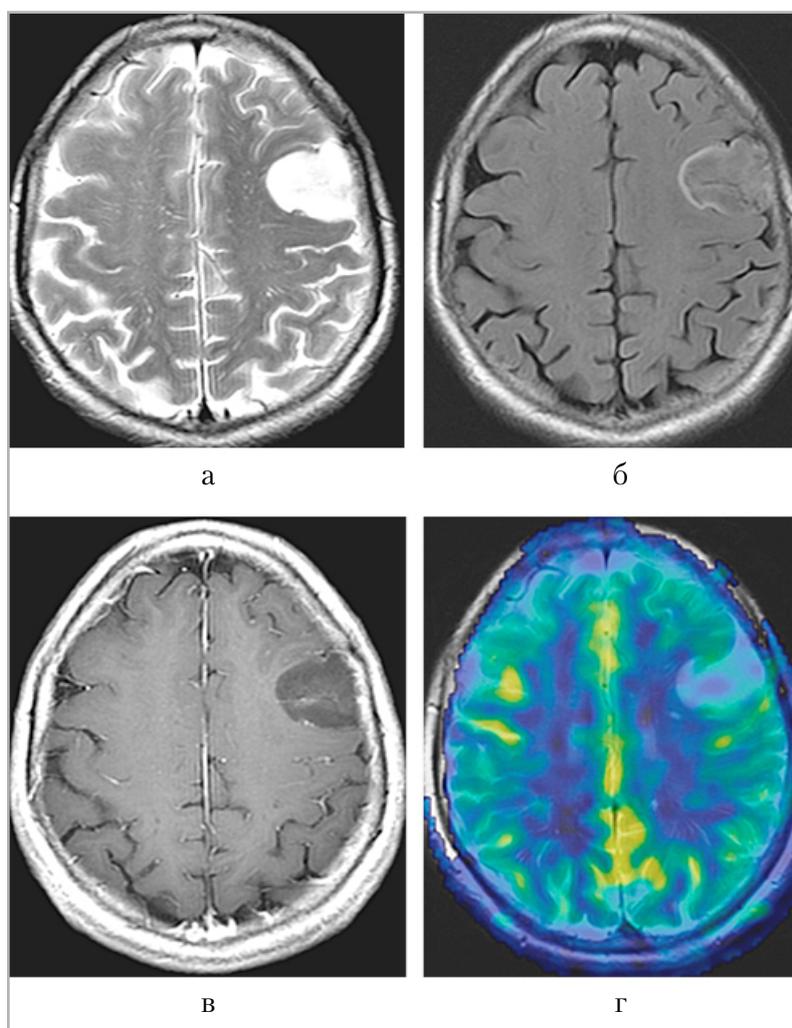


Рис. 7. Диффузная астроцитома, grade 2, в левой лобной доле. На МРТ в режимах T2 (а), T2-FLAIR (б), T1 после введения контрастного препарата (в), ASL-перфузии, совмещенной с T2 (г), выявляется опухоль, не накапливающая контрастный препарат, с низким кровотоком

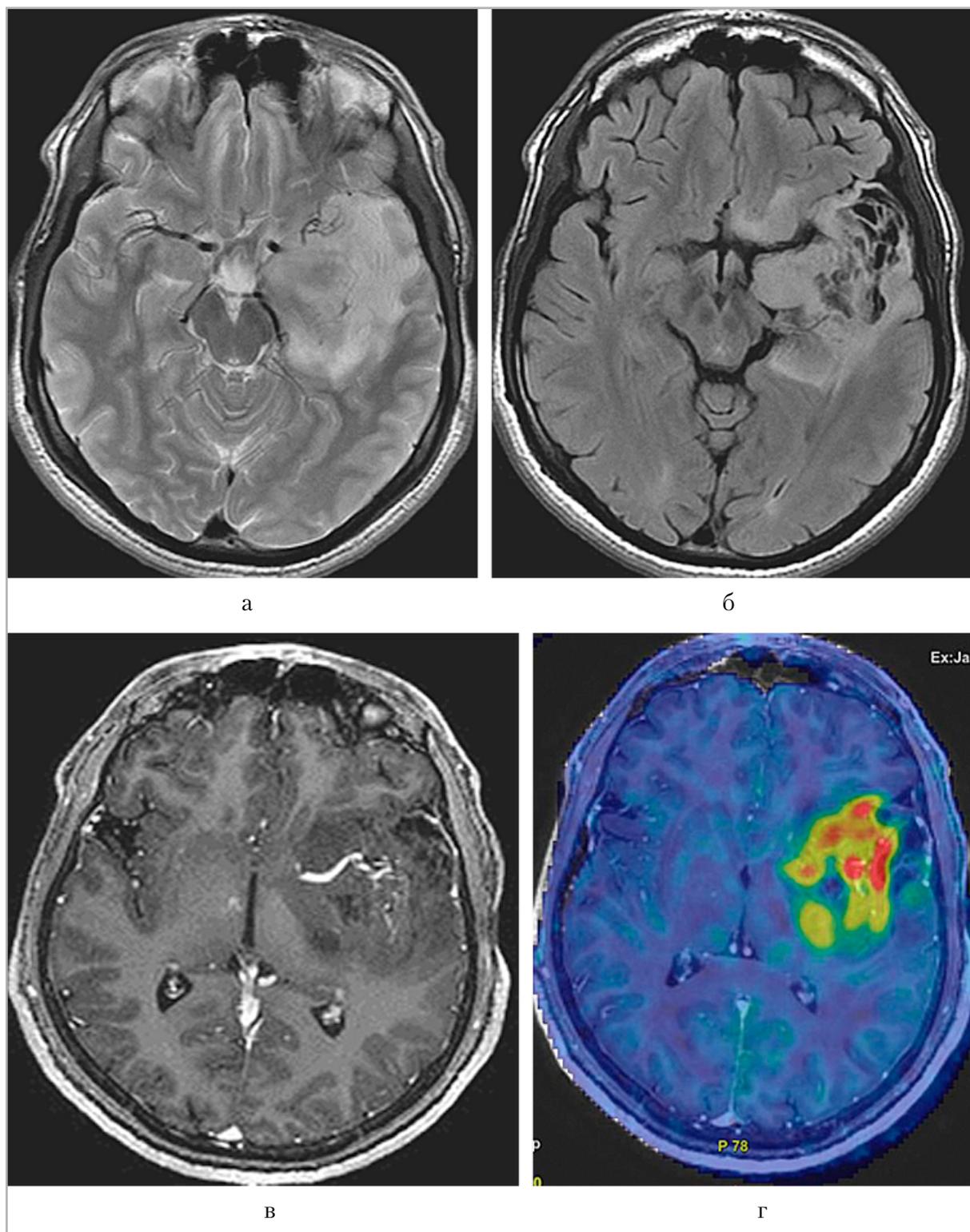


Рис. 8. Астроцитома, grade 3, в левой лобно-височной области. МРТ в режимах T2 (а), T2-FLAIR (б), T1 после введения контрастного препарата (в), ASL-перфузии, совмещенной с постконтрастными T1 (г), показывает диффузно растущую опухоль, слабо гетерогенно накапливающую контрастный препарат, с участками повышенного кровотока до 340,0 мл/100 г/мин

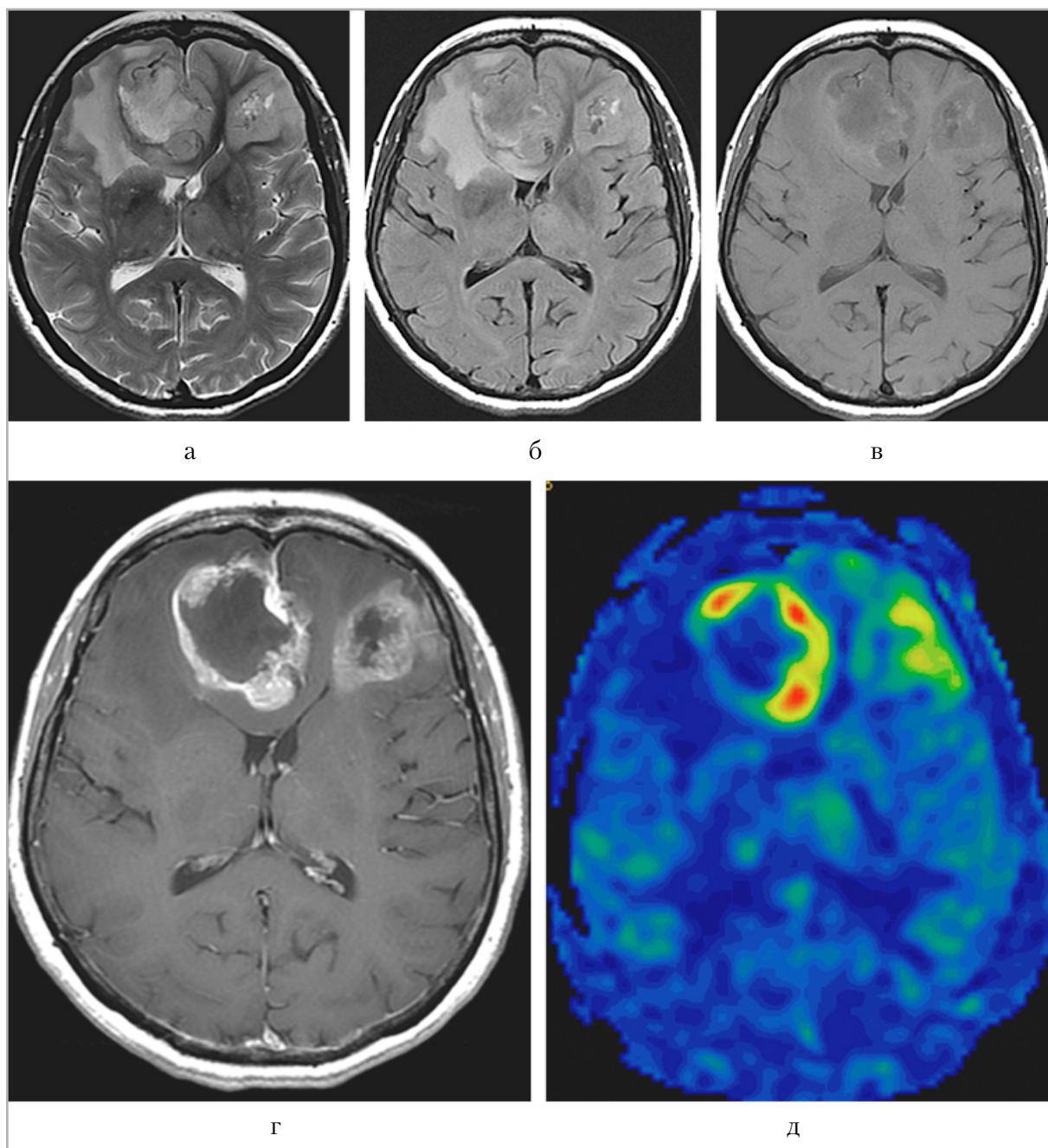


Рис. 9. Мультифокальная глиобластома, grade 4, в лобных долях. МРТ в режимах T2 (а), T2-FLAIR (б), T1 (в), T1 после введения контрастного препарата (г), ASL-перфузии (д) демонстрирует опухолевые образования гетерогенной структуры с некрозом в центре, интенсивно кольцевидно накапливающие контрастный препарат, с повышенным кровотоком до 247 мл/100г/мин

Заключение

Применение стандартного протокола МРТ у пациентов с опухолями головного мозга необходимо для точной диагностики, планирования нейрохирургических вмешательств, а также лучевой терапии и химиотерапии. Вы-

полнение исследований, не включающих импульсные последовательности с указанными характеристиками, может приводить к увеличению вероятности диагностических ошибок (например, неверной интерпретации объемного образования или пропуска мелких обра-

зований), вызывать необходимость повторения МРТ с целью дообследования (что неизбежно откладывает необходимое лечение), а также усложнять сравнение исследований в динамике и вызывать неверную трактовку динамических изменений. Повсеместное внедрение предложенного нами клинически апробированного унифицированного подхода уменьшит время от обнаружения опухоли или выявления изменений при динамическом контроле до принятия решения о тактике ведения пациента.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Баталов А. И., Захарова Н. Е., Погосбекян Э. Л., Фадеева Л. М., Горяйнов С. А., Баев А. А., Шульц Е. И., Чёлушкин Д. М., Потапов А. А., Пронин И. Н. Бесконтрастная ASL-перфузия в предоперационной диагностике супратенториальных глиом // Вопросы нейрохирургии имени Н. Н. Бурденко. 2018. Т. 82, № 6. С. 15–22. <https://doi.org/10.17116/neiro20188206115>
2. Захарова Н.Е., Пронин И.Н., Баталов А.И., Шульц Е.И., Тюрина А.Н., Баев А.А., Фадеева Л.М. Современные стандарты МРТ-диагностики опухолевых поражений головного мозга // Журнал «Вопросы нейрохирургии» имени Н. Н. Бурденко. 2020. Т. 84, № 3. С. 102–112. <https://doi.org/10.17116/neiro202084031102>
3. Пронин И. Н., Захарова Н. Е., Фадеева Л. М., Пронин А. И., Шульц Е. И., Баталов А. И. Импульсная последовательность SWI/SWAN в МРТ-диагностике микрокровоизлияний и сосудистых мальформаций // Онкологический журнал: лучевая диагностика, лучевая терапия. 2018. Т. 1, № 3. С. 49–59.
4. Пронин И. Н., Захарова Н. Е., Баталов А. И., Шульц Е. И., Тюрина А. Н., Баев А. А., Фадеева Л. М. К вопросу о стандартах диагностики поражений головного мозга // Кремлевская медицина. Клинический вестник. 2020. № 1. С. 107–118.
5. Batalov A. I., Zakharova N. E., Pronin I. N., Belyaev A. Yu., Pogosbekyan E. L., Goryaynov S. A., Bykanov A. E., Tyurina A. N., Shevchenko A. M., Solozhentseva K. D., Nikitin P. V., Potapov A. A. 3D pCASL-perfusion in preoperative assessment of brain gliomas in large cohort of patients. *Sci. Rep.* 2022. V. 12. P. 2121. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05992-4>
6. Ellingson B., Bendszus M., Boxerman J., Barboriak D., Erickson B., Smits M., Nelson S., Gerstner E., Alexander B., Goldmacher G. et al. Consensus recommendations for a standardized Brain Tumor Imaging Protocol in clinical trials. *Neuro. Oncol.* 2015. V. 17, no. 9. P. 1188–1198. <https://doi.org/10.1093/neuonc/nov095>
7. Gühr G., Horvath-Rizea D., Kohlhof-Meinecke P., Ganslandt O., Henkes H., Härtig W., Donitza A., Skalej M., Schob S. Diffusion Weighted Imaging in Gliomas: A Histogram-Based Approach for Tumor Characterization. *Cancers.* 2022. V. 14, no. 14. P. 3393.
8. Guida L., Stumpo V., Bellomo J., van Niftrik C. H. B., Sebök M., Berhouma M., Bink A., Weller M., Kulcsar Z., Regli L. et al. Hemodynamic Imaging in Cerebral Diffuse Glioma-Part A: Concept, Differential Diagnosis and Tumor Grading. *Cancers.* 2022. V. 14, no. 14. P. 1432.
9. Hong E. K., Choi S. H., Shin D. J., Jo S. W., Yoo R. E., Kang K. M., Yun T. J., Kim J. H., Sohn C. H., Park S. H. et al. Radiogenomics correlation between MR imaging features and major genetic profiles in glioblastoma. *Eur. Radiol.* 2018. V. 28, no. 10. P.4350–4361. <https://doi.org/10.1007/s00330-018-5400-8>
10. Iv M., Bisdas S. Neuroimaging in the Era of the Evolving WHO Classification of Brain Tumors, From the AJR Special Series on Cancer Staging. *AJR Am. J. Roentgenol.* 2021. V. 217, no. 1. P. 3–15. <https://doi.org/10.2214/AJR.20.25246>
11. Jain R., Essig M. Brain tumor imaging. New York, Stuttgart, Delhi, Rio de Ja-

- neiro Thieme. 2016. <https://doi.org/10.1055/b-0035-122291>
12. Kang X. W., Xi Y. B., Liu T. T., Wang N., Zhu Y. Q., Wang X. R., Guo F. Grading of Glioma: Combined diagnostic value of amide proton transfer weighted, arterial spin labeling and diffusion weighted magnetic resonance imaging. *BMC Med. Imaging*. 2020. V. 20. P. 50.
 13. Kaufmann T. J., Smits M., Boxerman J., Huang R., Barboriak D. P., Weller M., Chung C., Tsien C., Brown P. D., Shankar L., Galanis E., Gerstner E., van den Bent M. J., Burns T. C., Parney I. F., Dunn G., Brastianos P. K., Lin N. U., Wen P. Y., Ellingson B. M. Consensus recommendations for a standardized brain tumor imaging protocol for clinical trials in brain metastases. *Neuro. Oncol.* 2020. V. 22, no. 6. P. 757–772. <https://doi.org/10.1093/neuonc/noaa030>
 14. Mabray M., Barajas R. F., Cha S. Modern brain tumor imaging. *Brain Tumor Res Treat.* 2015. V. 3, no. 1. P. 8–23. <https://doi.org/10.14791/btrt.2015.3.1.8>
 15. Malik D. G., Rath T. J., Urcuyo Acevedo J. C., Canoll P. D., Swanson K. R., Boxerman J. L., Quarles C. C., Schmainda K. M., Burns T. C. and Hu L. S. Advanced MRI Protocols to Discriminate Glioma From Treatment Effects: State of the Art and Future Directions. *Front. Radiol.* 2022. No. 2. P. 809373. <https://doi.org/10.3389/fradi.2022.809373>
 16. Martucci M., Russo R., Schimperna F., D'Apolito G., Panfili M., Grimaldi A., Perna A., Ferranti A. M., Varcasia G., Giordano C. et al. Magnetic Resonance Imaging of Primary Adult Brain Tumors: State of the Art and Future Perspectives. *Biomedicines*. 2023. V. 11, no. 2. P. 364. <https://doi.org/10.3390/biomedicines11020364>
 17. Osborn A. G., Louis D. N., Poussaint T. Y., Linscott L. L., Salzman K. L. The 2021 World Health Organization Classification of Tumors of the Central Nervous System: What Neuroradiologists Need to Know. *AJNR Am. J. Neuroradiol.* 2022. V. 43, no. 7. P. 928–937. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A7462>
 18. Stumpo V., Guida L., Bellomo J., Van Niftrik C. H. B., Sebö, M., Berhouma M., Bink A., Weller M., Kulcsar Z., Regli L. et al. Hemodynamic Imaging in Cerebral Diffuse Glioma-Part B: Molecular Correlates, Treatment Effect Monitoring, Prognosis, and Future Directions. *Cancers*. 2022. V. 14, no. 5. P. 1342. <https://doi.org/10.3390/cancers14051342>
 19. Thust S. C., Hassanein S., Bisdas S., Rees J. H., Hyare H., Maynard J. A., Brandner S., Tur C., Jäger H. R., Yousry T.A. et al. Apparent diffusion coefficient for molecular subtyping of non-gadolinium-enhancing WHO grade II/III glioma: Volumetric segmentation versus two-dimensional region of interest analysis. *Eur. Radiol.* 2018. V. 28. P. 3779–3788. <https://doi.org/10.1007/s00330-018-5351-0>
 20. Van Santwijk L., Kouwenberg V., Meijer F., Smits M., Henssen D. A systematic review and meta-analysis on the differentiation of glioma grade and mutational status by use of perfusion-based magnetic resonance imaging. *Insights Imaging*. 2022. V. 13. P. 102.
 21. Villanueva-Meyer J. E., Mabray M. C., Cha S. Current Clinical Brain Tumor Imaging. *Neurosurgery*. 2017. V. 81, no. 3. P. 397–415. <https://doi.org/10.1093/neuros/nyx103>

References

1. Batalov A. I., Zakharova N. E., Pogosbekyan E. L., Fadeeva L. M., Goryaynov S. A., Baev A. A., Shul'ts E. I., Chelushkin D. M., Potapov A. A., Pronin I. N. Non-contrast ASL perfusion in preoperative diagnosis of supratentorial gliomas. *Zhurnal Voprosy Neurokhirurgii Imeni N. N. Burdenko*. 2018;82(6):15-22. (In Russ., In Engl.) <https://doi.org/10.17116/neiro20188206115>
2. Zakharova N. E., Pronin I. N., Batalov A. I., Shul'ts E. I., Tyurina A. N., Baev A. A., Fadeeva L. M. Modern standards

- for magnetic resonance imaging of the brain tumors. *Zhurnal Voprosy Neurokhirurgii Imeni N. N. Burdenko*. 2020;84(3):102-112. (In Russ., In Engl.) <https://doi.org/10.17116/neiro202084031102>
3. Pronin I. N., Zakharova N. E., Fadeeva L. M., Pronin A. I., Shul'ts E. I., Batalov A. I. SWI/SWAN pulse sequence in MR imaging of microhemorrhages and vascular malformations. *Onkologicheskij zhurnal: lucheвая diagnostika, lucheвая terapiya*. 2018;1(3):49-59. (In Russ.)
 4. Pronin I. N., Zakharova N. E., Batalov A. I., Schul'ts E. I., Tyurina A. N., Baev A.A., Fadeeva L. M. Diagnostic standards in diagnostics of brain disorders. Kremlevskaya medicina. *Klinicheskij vestnik*. 2020;1:107-118. (In Russ.)
 5. Batalov A. I., Zakharova N. E., Pronin I. N., Belyaev A. Yu., Pogosbekyan E. L., Goryaynov S. A., Bykanov A. E., Tyurina A. N., Shevchenko A. M., Solozhentseva K. D., Nikitin P. V., Potapov A. A. 3D pCASL-perfusion in preoperative assessment of brain gliomas in large cohort of patients. *Sci. Rep.* 2022;12:2121. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05992-4>
 6. Ellingson B., Bendszus M., Boxerman J., Barboriak D., Erickson B., Smits M., Nelson S., Gerstner E., Alexander B., Goldmacher G. et al. Consensus recommendations for a standardized Brain Tumor Imaging Protocol in clinical trials. *Neuro Oncol.* 2015;17(9):1188-1198. <https://doi.org/10.1093/neuonc/nov095>
 7. Gühr G., Horvath-Rizea D., Kohlhof-Meinecke P., Ganslandt O., Henkes H., Härtig W., Donitza A., Skalej M., Schob S. Diffusion Weighted Imaging in Gliomas: A Histogram-Based Approach for Tumor Characterization. *Cancers*. 2022;14(14):3393.
 8. Guida L., Stumpo V., Bellomo J., van Niftrik C. H. B., Sebök M., Berhouma M., Bink A., Weller M., Kulcsar Z., Regli L. et al. Hemodynamic Imaging in Cerebral Diffuse Glioma-Part A: Concept, Differential Diagnosis and Tumor Grading. *Cancers*. 2022;14(14):1432.
 9. Hong E. K., Choi S. H., Shin D. J., Jo S. W., Yoo R. E., Kang K. M., Yun T. J., Kim J. H., Sohn C. H., Park S. H. et al. Radiogenomics correlation between MR imaging features and major genetic profiles in glioblastoma. *Eur. Radiol.* 2018;28(10):4350-4361. <https://doi.org/10.1007/s00330-018-5400-8>
 10. Iv M., Bisdas S. Neuroimaging in the Era of the Evolving WHO Classification of Brain Tumors, From the AJR Special Series on Cancer Staging. *AJR Am. J. Roentgenol.* 2021;217(1):3-15. <https://doi.org/10.2214/AJR.20.25246>
 11. Jain R., Essig M. Brain tumor imaging. New York, Stuttgart, Delhi, Rio de Janeiro Thieme. 2016. <https://doi.org/10.1055/b-0035-122291>
 12. Kang X. W., Xi Y. B., Liu T. T., Wang N., Zhu Y. Q., Wang X. R., Guo F. Grading of Glioma: Combined diagnostic value of amide proton transfer weighted, arterial spin labeling and diffusion weighted magnetic resonance imaging. *BMC Med. Imaging*. 2020;20:50.
 13. Kaufmann T. J., Smits M., Boxerman J., Huang R., Barboriak D. P., Weller M., Chung C., Tsien C., Brown P. D., Shankar L., Galanis E., Gerstner E., van den Bent M. J., Burns T. C., Parney I. F., Dunn G., Brastianos P. K., Lin N. U., Wen P. Y., Ellingson B. M. Consensus recommendations for a standardized brain tumor imaging protocol for clinical trials in brain metastases. *Neuro. Oncol.* 2020;22(6):757-772. <https://doi.org/10.1093/neuonc/noaa030>
 14. Mabray M., Barajas R.F., Cha S. Modern brain tumor imaging. *Brain. Tumor. Res. Treat.* 2015;3(1):8-23. <https://doi.org/10.14791/btrt.2015.3.1.8>
 15. Malik D. G., Rath T. J., Urcuyo Acevedo J. C., Canoll P. D., Swanson K. R., Boxerman J. L., Quarles C. C., Schmainda K. M., Burns T. C., Hu L. S. Advanced MRI Protocols to Discriminate Glioma From Treatment Effects: State of the

- Art and Future Directions. *Front. Radiol.* 2022;2:809373. <https://doi.org/10.3389/fradi.2022.809373>
16. Martucci M., Russo R., Schimperia F., D'Apolito G., Panfili M., Grimaldi A., Perna A., Ferranti A. M., Varcasia G., Giordano C. et al. Magnetic Resonance Imaging of Primary Adult Brain Tumors: State of the Art and Future Perspectives. *Biomedicines.* 2023;11(2):364. <https://doi.org/10.3390/biomedicines11020364>
17. Osborn A. G., Louis D. N., Poussaint T. Y., Linscott L. L., Salzman K. L. The 2021 World Health Organization Classification of Tumors of the Central Nervous System: What Neuroradiologists Need to Know. *AJNR Am. J. Neuroradiol.* 2022;43(7):928-937. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A7462>
18. Stumpo V., Guida L., Bellomo J., Van Niftrik C. H. B., Sebö, M., Berhouma M., Bink A., Weller M., Kulcsar Z., Regli L. et al. Hemodynamic Imaging in Cerebral Diffuse Glioma-Part B: Molecular Correlates, Treatment Effect Monitoring, Prognosis, and Future Directions. *Cancers.* 2022;14(5):1342. <https://doi.org/10.3390/cancers14051342>
19. Thust S. C., Hassanein S., Bisdas S., Rees J. H., Hyare H., Maynard J. A., Brandner S., Tur C., Jäger H. R., Yousry T.A. et al. Apparent diffusion coefficient for molecular subtyping of non-gadolinium-enhancing WHO grade II/III glioma: Volumetric segmentation versus two-dimensional region of interest analysis. *Eur. Radiol.* 2018;28:3779-3788. <https://doi.org/10.1007/s00330-018-5351-0>
20. Van Santwijk L., Kouwenberg V., Meijer E., Smits M., Henssen D. A systematic review and meta-analysis on the differentiation of glioma grade and mutational status by use of perfusion-based magnetic resonance imaging. *Insights Imaging.* 2022;13:102.
21. Villanueva-Meyer J. E., Mabray M. C., Cha S. Current Clinical Brain Tumor Imaging. *Neurosurgery.* 2017;81(3):397-415. <https://doi.org/10.1093/neuros/nyx103>

Сведения об авторах / Information about the authors

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, Москва, 4-я Тверская-Ямская, 16.

+7 (499) 972-85-55

Вклад автора: определение концепции и дизайн работы, поиск источников, анализ и интерпретация данных, написание текста, подготовка иллюстраций, редактирование.

Zakharova Natal'ya Evgen'evna, radiologist, PhD, professor RAS, Department of Neuroradiology, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

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

+7 (499) 972-85-55

Contribution of the author: conception and design of the work, source searching, data analysis and interpretation, manuscript drafting, preparation of figures, editing.

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, 4-я Тверская-Ямская улица, д. 16.

+7 (499) 972-85-55

Вклад автора: анализ и интерпретация данных, редактирование, утверждение окончательного варианта публикации.

Pronin Igor Nikolaevich, M. D., D. Sci., Academician of the Russian Academy of Sciences, Head of Department of Neuroradiology N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

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

+7 (499) 972-85-55

Contribution of the author: data analysis and interpretation, editing, final approval.

Баталов Артем Игоревич, рентгенолог, кандидат медицинских наук, научный сотрудник отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

125047, Москва, 4-я Тверская-Ямская, 16.

+7 (499) 972-85-55

Вклад автора: определение концепции и дизайн работы, подготовка иллюстраций, редактирование.

Batalov Artem Igorevich, radiologist, PhD, Department of Neuroradiology, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

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

+7 (499) 972-85-55

Contribution of the author: conception and design of the work, preparation of figures, editing.

Чехонин Иван Владимирович, кандидат медицинских наук, рентгенолог, младший научный сотрудник отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

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

+7 (499) 972-85-55

Вклад автора: дизайн работы, анализ и интерпретация данных, написание текста, редактирование.

Chekhnin Ivan Vladimirovich, radiologist, Ph. D. Med., junior research associate, Department of Neuroradiology, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

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

+7 (499) 972-85-55

Contribution of the author: conception and design of the work, data analysis and interpretation, editing.

Тюрина Анастасия Николаевна, рентгенолог, кандидат медицинских наук, научный сотрудник отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

125047, Москва, 4-я Тверская-Ямская, 16.

+7 (499) 972-85-55

Вклад автора: определение концепции и дизайн работы, анализ данных.

Tyurina Anastasia Nikolaevna, radiologist, PhD, Department of Neuroradiology, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

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

+7 (499) 972-85-55

Contribution of the author: conception and design of the work, data analysis

Финансирование исследования и конфликт интересов

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-75-10074, <https://rscf.ru/project/22-75-10074/>

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).

Funding for the study and conflicts of interest

This research was funded by Russian Science Foundation grant № 22-75-10074 (<https://rscf.ru/project/22-75-10074/>).

The authors declare that this paper, its topic, subject matter, and content do not involve competing interests. The views expressed in the article are those of the authors of the manuscript. The authors attest that they meet the ICMJE international criteria for authorship (all authors contributed substantially to the conceptualization, preparation of the article, and read and approved the final version before presentation).

Статья поступила в редакцию 26.10.2023;
одобрена после рецензирования 06.12.2023;
принята к публикации 15.01.2024.

The article was submitted 26.10.2023;
approved after reviewing 06.12.2023;
accepted for publication 15.01.2024.



МЕДИЦИНСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Обзорная статья
УДК 616-006.484
<https://doi.org/10.52560/2713-0118-2024-1-85-103>

Магнитно-резонансная релаксометрия в оценке морфологических характеристик глиом головного мозга: современное состояние вопроса

И. В. Чехонин¹, А. И. Баталов², Н. Е. Захарова³,
В. Н. Корниенко⁴, И. Н. Пронин⁵

^{1–5} ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, г. Москва, Россия

¹ ichekhonin@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6652-2472>

² abatalov@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8924-7346>

³ nzakharova@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0516-3613>

⁴ kornienko@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0487-1183>

⁵ pronin@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4480-0275>

Автор, ответственный за переписку: Иван Владимирович Чехонин, ichekhonin@nsi.ru, ivan.chekhonin@gmail.com

Резюме

Магнитно-резонансная (МР) релаксометрия — методика измерения тканевых релаксационных показателей — является способом количественной визуализации физической основы структурных МР-изображений. Настоящий обзор посвящен перспективным направлениям изучения и применения МР-релаксометрии в диагностике глиом головного мозга на предоперационном и предтерапевтическом этапе. Наряду с анализом работ ведущих мировых коллективов приводятся результаты собственных исследований. Накопленная информация свидетельствует о появлении возможностей дифференцирования глиом различных степеней злокачественности, несмотря на определенное сходство их релаксометрических характеристик, а также о потенциале метода в дифференциальной диагностике глиом и опухолей иного генеза. Ряд результатов может свидетельствовать о наличии изменений МР-сигнала, связанных с инфильтративным ростом глиом. Отдельно рассмотрены работы, направленные на поиск наиболее агрессивных и злокачественных участков в ткани глиом, что может быть крайне полезным при планировании биопсии или удаления опухоли. Не меньшую значимость имеют возможности МР-релаксометрии в контексте радиогеномики, в первую очередь в оценке IDH-статуса глиом.

Ключевые слова: МР-релаксометрия, глиома, глиобластома, радиогеномика, IDH-статус

© Чехонин И. В., Баталов А. И., Захарова Н. Е., Корниенко В. Н., Пронин И. Н., 2024

Для цитирования: Чехонин И. В., Баталов А. И., Захарова Н. Е., Корниенко В. Н., Пронин И. Н. Магнитно-резонансная релаксометрия в оценке морфологических характеристик глиом головного мозга: современное состояние вопроса // Радиология — практика. 2024;1:85-103. <https://doi.org/10.52560/2713-0118-2024-1-85-103>

MEDICAL TECHNOLOGY

Review article

Magnetic resonance relaxometry in assessment of morphological properties of brain gliomas: state of the art

I. V. Chekhonin¹, A. I. Batalov², N. E. Zakharova³,
V. N. Kornienko⁴, I. N. Pronin⁵

¹⁻⁵Federal State Autonomous Institution «N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery» of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

¹ichekhonin@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6652-2472>

²abatalov@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8924-7346>

³nzakharova@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0516-3613>

⁴kornienko@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0487-1183>

⁵pronin@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4480-0275>

Corresponding author: Ivan V. Chekhonin, ichekhonin@nsi.ru, ivan.chekhonin@gmail.com

Abstract

Magnetic resonance (MR) relaxometry, or measurement of tissue magnetic relaxation properties, is a technology intended to quantitatively depict the physical basis of structural MR imaging. This review is devoted to perspective directions of studies and application of MR relaxometry in brain glioma preoperative and pretherapeutic diagnosis. The current data advocate for emerging capabilities of relaxometry in glioma grading (despite possible overlap between different grades) and differentiating between gliomas and tumors of other origin. Some studies showed features of relaxometric values within the perifocal infiltrative edema zone possibly related to glioma infiltrative growth. We separately reviewed the works aimed at searching for the most aggressive and malignant foci in glioma tissue and extremely useful for tumor biopsy or removal. No less important are capabilities of relaxometry in radiogenomics, first of all, in IDH status prediction. The relaxometric method possesses perspective in multiparametric brain glioma diagnostics.

Keywords: MR relaxometry, glioma, glioblastoma, radiogenomics, IDH-status

For citation: Chekhonin I. V., Batalov A. I., Zakharova N. E., Kornienko V. N., Pronin I. N. Magnetic resonance relaxometry in assessment of morphological properties of brain gliomas: state of the art. *Radiology – Practice*. 2024;1:85-103. (In Russ.). <https://doi.org/10.52560/2713-0118-2024-1-85-103>

Введение

Современная нейровизуализация, в том числе при глиальных опухолях головного мозга, характеризуется тенденциями к развитию количественной интерпретации изображений и ее стандартизации [15]. Важной практической задачей рентгенологии в нейроонкологии является предсказание их нейроморфологических свойств на предоперационном и предтерапевтическом этапе [27]. Протонная магнитно-резонансная (МР) релаксометрия представляет собой совокупность методик измерения времени и скорости магнитной релаксации тканевых протонов, количественных характеристик, лежащих в основе стандартных МР-изображений. Некоторые методы позволяют измерять протонную плотность тканей.

Клиническая применимость МР-релаксометрии стала возможной по мере развития импульсных последовательностей, позволивших обеспечить более быстрый процесс сканирования при одновременном измерении нескольких параметров. К современным последовательностям и методикам обработки изображений, доступным в виде коммерческих продуктов, относятся, например, метод МР-отпечатков пальцев («MR fingerprinting», MRF) [5] и метод компиляции МР-изображений (Magnetic Resonance Image Compilation, MAGiC), основанный на импульсной последовательности QRAPMASTER (quantification of relaxation times and proton density by multi-echo acquisition of a saturation-recovery using turbo spin-echo readout) [30, 42]. Полученные показатели тканевой релаксации могут быть использованы для получения (синтеза) МР-изображений с разными параметрами взвешенности [38].

МР-релаксометрия в оценке степеней злокачественности глиом

Изучение МР-релаксометрии в диагностике глиом головного мозга нача-

лось одновременно с развитием МР-визуализации и продолжается в настоящее время. В исследовании Badve et al. с использованием MRF не было обнаружено значимых различий между солидным компонентом глиом низкой и высокой степеней злокачественности [4]. Напротив, de Blank et al. в когорте детей и молодых взрослых пациентов выявили более высокие значения времени T1 и времени T2 в опухолях высокой степени злокачественности в сравнении с глиомами низкой степени злокачественности. Работа была выполнена на относительно малой выборке (19 глиом низкой степени злокачественности, 4 опухоли высокой степени злокачественности), выборка также была в целом неоднородной, а группа опухолей высокой степени злокачественности также содержала 2 неглиальные опухоли (1 пациент с медуллобластомой и 1 пациент с атипичной тератоидно-рабдоидной опухолью). В данном исследовании также были получены более высокие значения времени T1 в перитуморальной зоне опухолей высокой степени злокачественности [12]. Следует обращать внимание на методики выделения областей интереса и их обозначения разными авторами. Например, в описанной работе de Blank et al. «солидной опухоли» обозначали контрастируемую ткань (в случае присутствия контрастирования в опухоли) или T2-FLAIR-гиперинтенсивную зону в случае неконтрастируемых опухолей. Перитуморальную зону обозначали как белое вещество в пределах 1 см от края солидной части опухоли. Таким образом, т. н. перитуморальные зоны в случае контрастируемых и неконтрастируемых опухолей могли различаться еще на этапе выделения областей интереса. Во многих зарубежных работах распространен термин «перитуморальный отек» (peritumoral edema) [26, 34], но в случае неконтрастируемой глиомы перитуморальная зона может быть представлена визуально интактным белым

веществом. В работах нашего коллектива используется иная терминология для описания областей интереса. Контрастируемая зона соответствует области опухоли с нарушенным гематоэнцефалическим барьером, для неконтрастируемой T2-FLAIR-гиперинтенсивной зоны глиальных опухолей с накоплением контрастного препарата обычно применяется термин «перифокальная зона», или «зона отека-инфильтрации», а перитуморальное белое вещество определяется как визуально интактное, по данным стандартных МРТ, белое вещество вблизи контура перифокальной зоны отека-инфильтрации [1, 44], притом отсутствие визуальных изменений МР-сигнала от вещества мозга не исключает наличия опухолевых клеток [45]. Так, было проведено сравнение релаксометрических характеристик областей интереса диффузных глиом grade II, III, IV по классификации ВОЗ 2016 года [24]. Оценка контрастируемых и неконтрастируемых зон глиом разных степеней злокачественности проводилась отдельно, а зоны интереса выделялись на всех срезах. Несмотря на возможное преобладание вазогенного отека в некоторых случаях, неконтрастируемая T2-FLAIR-гиперинтенсивная зона сегментировалась полностью и без исключений, поскольку при глиальных опухолях вероятно присутствие инфильтративного роста на всем ее протяжении [16]. При сравнении неконтрастируемых зон значения T1, T2 и протонной плотности, полученные по технологии MAGiC, были выше в группе глиом grade III по сравнению с grade IV. В неконтрастируемой зоне глиом grade II протонная плотность была выше по сравнению с глиомами grade IV. Указанные различия могут быть объяснены большей выраженностью клеточной инфильтрации в неконтрастируемой перифокальной зоне глиом grade IV по сравнению с вазогенным отеком. При сравнении контрастируемых зон опухо-

лей разной степени злокачественности не было получено значимых различий релаксометрических показателей [3].

Значительно повысить эффективность каждого из методов МРТ в диагностике степеней злокачественности глиом может их комбинация. Ge et al., применив комплекс параметров релаксометрии (времени T1, протонной плотности), церебрального кровотока по данным перфузионного исследования с псевдонепрерывным маркированием артериальных спинов (pCASL-перфузии) и измеряемого коэффициента диффузии (ИКД), показали возможность дифференцирования глиом низкой и высокой степени злокачественности с высокими значениями чувствительности (95,5 %) и специфичности (100 %) [15].

МР-релаксометрия в дифференциальной диагностике глиом

Оценка перифокальной зоны глиом может быть полезна не только для дифференцирования глиом разной степени злокачественности, но и для дифференцирования глиом от других типов опухолей в силу различной ее структуры и представленностью преимущественно вазогенным отеком (в случае метастазов и менингиом) или клеточной инфильтрацией в сочетании с вазогенным отеком (в случае глиом) [41]. Piper et al. выявили различия времени T1 и фракционной анизотропии в ткани опухоли и перифокальной зоне менингиом и глиом низкой степени злокачественности. Солидная часть опухоли и перифокальная зона в глиомах отличалась более высокими значениями T1 и более низкой фракционной анизотропией, чем соответствующие зоны менингиом. Несмотря на то что данное различие противоречит концепции о гидратированной структуре отека в менингиомах, авторы предположили, что менингиомы могут иметь более «организованную» структуру как солидной части опухо-

ли, так и перифокальной зоны [33]. В некоторых работах использована T1rho (T1ρ) релаксометрия, основанная на импульсной последовательности, в которой после перемещения вектора намагниченности в поперечную плоскость применяется дополнительный импульс, блокирующий вектор в поперечной плоскости (spin-lock). Таким образом, значения T1ρ зависят от времени T1 и времени T2 и также чувствительны к макромолекулам тканей и закислению тканевой среды. В работе Villanueva-Meyer et al. показатель T1ρ в перифокальной зоне метастазов был выше, чем в перифокальной зоне глиом низкой и высокой степеней злокачественности, однако не различался между глиомами разных степеней злокачественности. Различия между глиомами и метастазами объясняются присутствием в перифокальной зоне глиом инфильтрирующих клеток, с которыми связаны кислая среда и наличие макромолекул, что, в свою очередь, приводит к снижению T1ρ [41]. В противоположность данному исследованию Vadve et al. не смогли выявить различия перитуморальных зон (зон по контуру солидной опухоли) глиобластом и метастазов на основании времени T1 и времени T2, измеренных по данным MRF. Вместе с тем были продемонстрированы большие значения времени T1 в перитуморальном белом веществе глиобластом, чем в аналогичной зоне глиом низкой степени злокачественности. Время T2 в солидных участках глиом низкой степени злокачественности было выше, чем в метастазах. Различия релаксометрических показателей в солидных участках глиобластом и метастазов приближались к значимым [4]. При изучении текстуры данных MRF, выполненном Dastmalchian et al., были обнаружены значимые различия между солидными компонентами глиом низкой степени злокачественности, глиом высокой степени злокачественности и метастазов. Были показаны разли-

чия перитуморального белого вещества между всеми тремя группами [11]. В исследовании с большей выборкой анализ текстуры 3D MRF также показал различия между глиобластомами и метастазами, между глиомами grade 2 и grade 4, а также между глиомами grade 3 и grade 4 [40]. По результатам De Blank et al. значения T1 и T2 в глиомах низкой степени злокачественности были ближе к значениям для интактного белого вещества, чем в глиомах высокой степени злокачественности [12].

МР-релаксометрические изменения, ассоциированные с инфильтративным ростом глиом и тканевой гипоксией

Активно изучаются возможности МР-релаксометрии в определении опухолевой инфильтрации. Результаты работы Blystad et al. с использованием MAGiC продемонстрировали гетерогенность скорости релаксации R1 и скорости релаксации R2 (которые обратны величинам времени T1 и времени T2 соответственно) в перифокальной зоне глиом высокой степени злокачественности, что, вероятно, было связано с опухолевой инфильтрацией. Градиент уменьшения R1 при движении от центра опухоли к периферии был выше после введения контрастного препарата при сравнении с доконтрастным картированием [6]. В дальнейшем по данным карт R1 было обнаружено статистически значимое накопление контрастного препарата в перифокальной зоне глиом высокой степени злокачественности по сравнению с визуально интактным белым веществом, что также могло быть ассоциировано с присутствием опухолевой инфильтрации [7]. Nöth et al. при помощи дифференциальных карт времени T1 (полученных при вычитании карт T1 после контрастирования из карт T1 до контрастирования) было выявлено значимое накопление контрастного

препарата не только в зоне отека-инfiltrации глиобластом, но также и в перитуморальном белом веществе в пределах 5 мм к периферии от границы зоны патологических изменений на стандартных МР-изображениях. Авторы считают, что диффузия контрастного препарата из солидной опухоли в перифокальную и перитуморальную зоны маловероятна. С большей вероятностью Nöth et al. предполагают продукцию мигрирующими на периферию опухолевыми клетками цитокинов, повышающих проницаемость сосудистого русла [29].

К перспективным направлениям определения роста глиальных опухолей и предсказания формирующихся более злокачественных участков относится изучение тканевой гипоксии на основе состояний гемоглобина по изменениям времени $T2^*$, зависящего от магнитной восприимчивости [35]. Часто исследуется показатель $T2'$, который отражает $T2^*$ с поправкой на спин-спиновые эффекты, и рассчитывается по формуле $1/T2' = 1/T2^* - 1/T2$. Значения $T2'$ зависят от насыщения гемоглобина кислородом, и потребление кислорода тканями приводит к его снижению. Глиомы высокой степени злокачественности характеризуются более низкими значениями $T2'$ по сравнению с глиомами grade II, притом имеется обратная взаимосвязь между регионарным кровотоком и $T2'$, что свидетельствует о более высокой степени потребления кислорода в более злокачественных и васкуляризированных опухолях. В свою очередь, в опухоли возможно наличие участков с одновременно низкими значениями как $T2'$, так и кровотока, что может соответствовать формирующимся злокачественным участкам, где еще не успел произойти ангиогенез [35]. Кроме того, Mauger et al. показали снижение $T2'$ в участках глиом со сформированным сосудистым руслом и отсутствие корреляции $T2'$ с уровнем фермента энергетического метаболизма лактатдегидрогеназы А, что,

скорее, указывает на высокое потребление кислорода тканью, чем на наличие тканевой гипоксии (наряду с этим корреляция $T2^*$ с уровнем лактатдегидрогеназы А была слабой положительной, но значимой: $R_s = 0,212$; для $T1$ и $T2$ $R_s = 0,249$, $R_s = 0,151$ соответственно). Авторами показаны слабые (R_s от $-0,2$ до $-0,264$) отрицательные корреляции времени $T1$, времени $T2$, времени $T2^*$ и $T2'$ с плотностью сосудистого русла, слабая отрицательная корреляция ($R_s = -0,191$) между изменением времени $T1$ при контрастировании (относительно доконтрастного времени $T1$) и уровнем метаболического фермента карбоангидразы IX [27]. Участки снижения $T2'$ представляют интерес при планировании биопсии.

Взаимосвязь данных МР-релаксометрии, патоморфологии и молекулярно-генетического статуса

Большую значимость имеет предсказание наиболее злокачественных участков в ткани опухоли, что может использоваться на этапе предоперационного планирования, например, для выбора репрезентативных тканевых образцов с целью биопсии, в том числе с применением нейронавигационных систем (рис. 1).

В качестве референсных маркеров могут быть использованы плотноклеточность [22] или индекс пролиферативной активности [28]. В клинике широко используется иммуногистохимическое исследование с применением моноклональных антител к ядерному белку Ki-67, который характеризует клеточную пролиферацию и не определяется в фазе покоя. Индекс пролиферативной активности Ki-67, большие значения которого ассоциируются с меньшей благоприятностью прогноза течения опухолевого процесса в целом [28, 39], может иметь неоднородные значения в пределах опу-

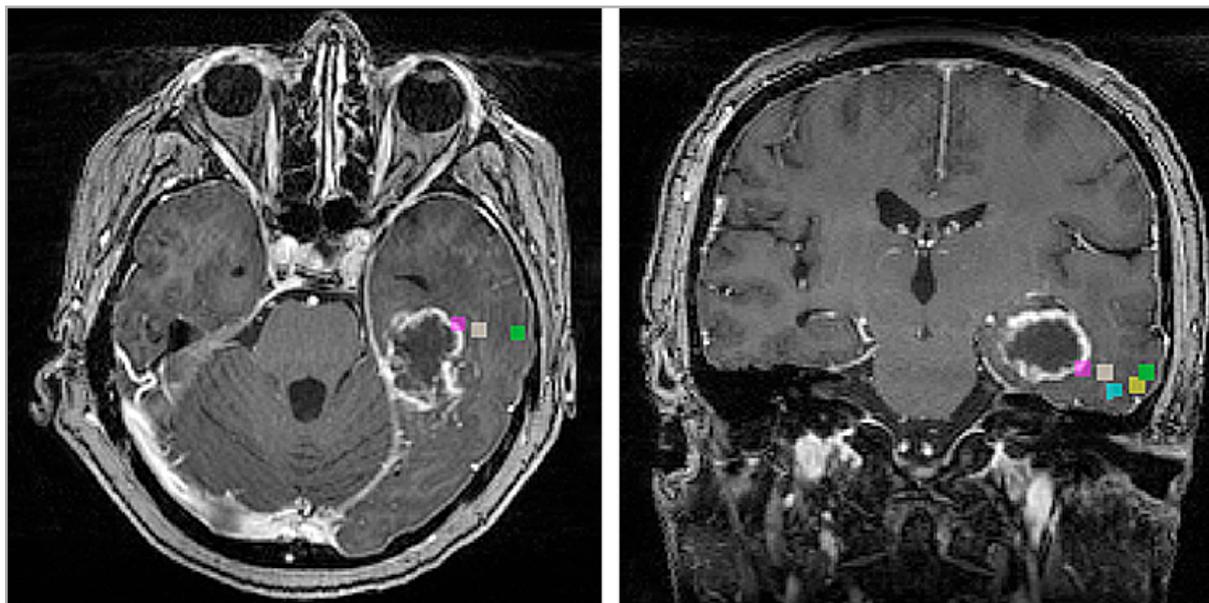


Рис. 1. МР-томограммы. Режим FSPGR BRAVO с контрастным усилением (аксиальный и фронтальный срезы). Глиобластома. Пример выбора точек биопсии по ходу операционного доступа к опухоли с применением нейронавигационной системы Fiagon (визуализация плана навигации в программе ITK-SNAP [43])

холевой ткани конкретного пациента. Таким образом, локализация участков опухоли с более выраженной пролиферацией клеток является важной для нейрохирурга.

Первоначально в работе Chang et al. при анализе данных стандартных МР-исследований были продемонстрированы обратные корреляции между плотноклеточностью опухоли и МР-сигналом на изображениях T2-FLAIR и картах измеряемого коэффициента диффузии (ИКД), а также положительная корреляция между плотноклеточностью опухоли и интенсивностью МР-сигнала на постконтрастных изображениях [10]. При нейронавигационном совмещении данных МРТ и патоморфологии Mauger et al., наоборот, показали большие значения времени T1 и времени T2 и значимо большее изменение времени T1 при контрастировании (относительно доконтрастного времени T1) в областях глиом (в выборке преобладали глиобластомы), из которых были получены биоптаты, содержавшие опухолевые клетки, по сравнению образцами, не содержащими

ми опухолевой инфильтрации (17 % от общего числа). Кроме того, относительное изменение T1 при контрастировании было более выраженным в участках, в которых отмечался ангиогенез. Корреляция относительного изменения времени T1 при контрастировании с плотноклеточностью и индексом Ki-67 была едва выраженной ($R_s = 0,116$, $R_s = 0,140$). Отмечалась также положительная корреляция между плотноклеточностью и индексом Ki-67, с одной стороны, и плотностью сосудистого русла – с другой. По данным исследования биопсия проводилась в контрастируемой части опухоли [27]. Нам, в свою очередь, представляется нетипичным наличие выявленных в данной зоне участков без признаков опухолевого роста. Нашим коллективом была выявлена тенденция к обратной корреляции между индексом пролиферативной активности Ki-67 и временем T2 в контрастируемой зоне глиом высокой степени злокачественности ($R = -0,46$, $p = 0,015$). Нами также была показана статистически значимая корреляция между временем T2 и объ-

емным кровотоком по данным бесконтрастной ASL-перфузии в этой зоне ($R = -0,58$, $p < 0,01$) и тенденция к сходной корреляции в перифокальной зоне отека-инфильтрации ($R = -0,42$, $p = 0,03$). Наиболее вероятным объяснением данных взаимосвязей может быть меньшая гидратация наиболее плотноклеточных фокусов [2]. Kinoshita et al. определили значения времени T1 1850–3200 мс как релаксометрический предиктор наиболее плотноклеточных участков глиом (в свою очередь, значения T2 и ИКД не коррелировали с плотноклеточностью в данном исследовании). Кроме того, значения времени (T1 и T2 выше 1850 мс и 115 мс, но ниже 3200 мс и 225 мс соответственно) были связаны с большей метаболической активностью по данным ПЭТ-КТ с 11С-метионином [22].

К сфере поиска практического применения МР-релаксометрии относится радиогеномика — область исследований, посвященная анализу рентгенологических характеристик, ассоциированных с патологическим процессом молекулярных и генетических паттернов [36]. Ключевым молекулярно-генетическим маркером в диагностике глиальных опухолей является мутация в гене изоцитратдегидрогеназы — IDH. Факт присутствия данной мутации в опухолевой ткани положен в основу последней классификации глиом (классификация опухолей центральной нервной системы ВОЗ 2021 года), а дикий тип глиомы по IDH является ключевым (но не единственным) признаком для ее трактовки как глиобластомы [25]. Таким образом, молекулярно-генетический метод оказывает все большее влияние на нейрорентгенологическую диагностику глиом, в том числе на определение степени злокачественности опухоли. По данным стандартных МРТ в качестве предикторов молекулярно-генетического статуса могут выступать интенсивность МР-сигнала, наличие или отсутствие контрастирования, структура (в т. ч. характери-

стика отека, строение контура опухоли) и локализация опухоли [14, 23]. Методика МР-спектроскопии, связанная с выявлением ассоциированного с IDH-мутацией патологического метаболита 2-гидроксиглутарата, имеет определенные недостатки, например, ложноположительные результаты при наличии геморрагического или некротического компонента в опухолевой ткани и спектральное перекрытие с фоновыми метаболитами [19, 20, 37]. Обогащение арсенала радиогеномики методами, различающимися по физическим основам и имеющими разные патофизиологические точки приложения, представляется важным для развития нейрорентгенологии. Наиболее известный визуализационный предиктор молекулярно-генетического статуса по данным стандартных МР-изображений — симптом T2-FLAIR несоответствия (T2-FLAIR mismatch sign), который представляет собой повышенный МР-сигнал от опухоли на T2-взвешенных изображениях в сочетании с гипоинтенсивностью на T2-FLAIR-изображениях (за исключением периферического гиперинтенсивного ободка) и является маркером IDH-мутантной астроцитомы без 1p/19q коделеции. По данным Deguchi et al., в основе симптома лежит формирование микрокист в тех регионах опухолей, в которых отмечается гипоинтенсивный МР-сигнал в режиме T2-FLAIR и гиперинтенсивный МР-сигнал на T2-ВИ (в противоположность этому, для областей глиом с одинаково гиперинтенсивным МР-сигналом на T2-ВИ и T2-FLAIR формирование микрокист не является типичным) [13]. Несмотря на практически абсолютную (100 %) специфичность, чувствительность симптома T2-FLAIR несоответствия невысока (42 или 51 % по данным разных метаанализов) [9, 31, 32]. Расширению диагностических возможностей в данном контексте может помочь МР-релаксометрия. Согласно Kinoshita et al., симптом T2-FLAIR несоответствия свя-

зан с бoльшими значениями времени T1 и времени T2 [21]. Kern et al. выявили более высокие значения времени T2 в центральной солидной части IDH-мутантных астроцитом grade II и grade III по сравнению с опухолями дикого типа [18]. Применение карт протонной плотности, полученных по методу MRF, в сочетании с T1-ВИ позволило Haubold et al. добиться высоких диагностических показателей в определении коделеции 1p19q (чувствительность 94 %, специфичность 91,2 %), а сочетание с постконтрастными T1-ВИ и T2-FLAIR обеспечило показатели чувствительности 77,3 % и специфичности 87,2 % в диагностике IDH1-мутации [17]. Tippareddy et al. показали возможность предсказания IDH1-статуса на основании данных 3D MRF [40]. Kikuchi et al. определили чувствительность и специфичность синтетических T2-релаксометрических МР-изображений в дифференцирова-

нии IDH-мутантных астроцитом и олигодендроглиом как абсолютную, что важно на ранних этапах диагностики, поскольку олигодендроглиомы ассоциированы с лучшим ответом на химиотерапию и лучевую терапию и в целом с более благоприятным прогнозом [19]. В нашем исследовании наилучшие показатели чувствительности и специфичности в дифференцировании IDH1-мутантных диффузных глиом и глиом дикого типа (на основании измерений в неконтрастируемой зоне) имело время T2 (чувствительность 79,3 % и специфичность 71,9 %) [3].

Рис. 2 и 3 демонстрируют типичные релаксометрические свойства IDH1-мутантной диффузной астроцитомы (более высокие значения релаксометрических показателей) и диффузной астроцитомы дикого типа (более низкие значения релаксометрических показателей). Карты времени T1, вре-

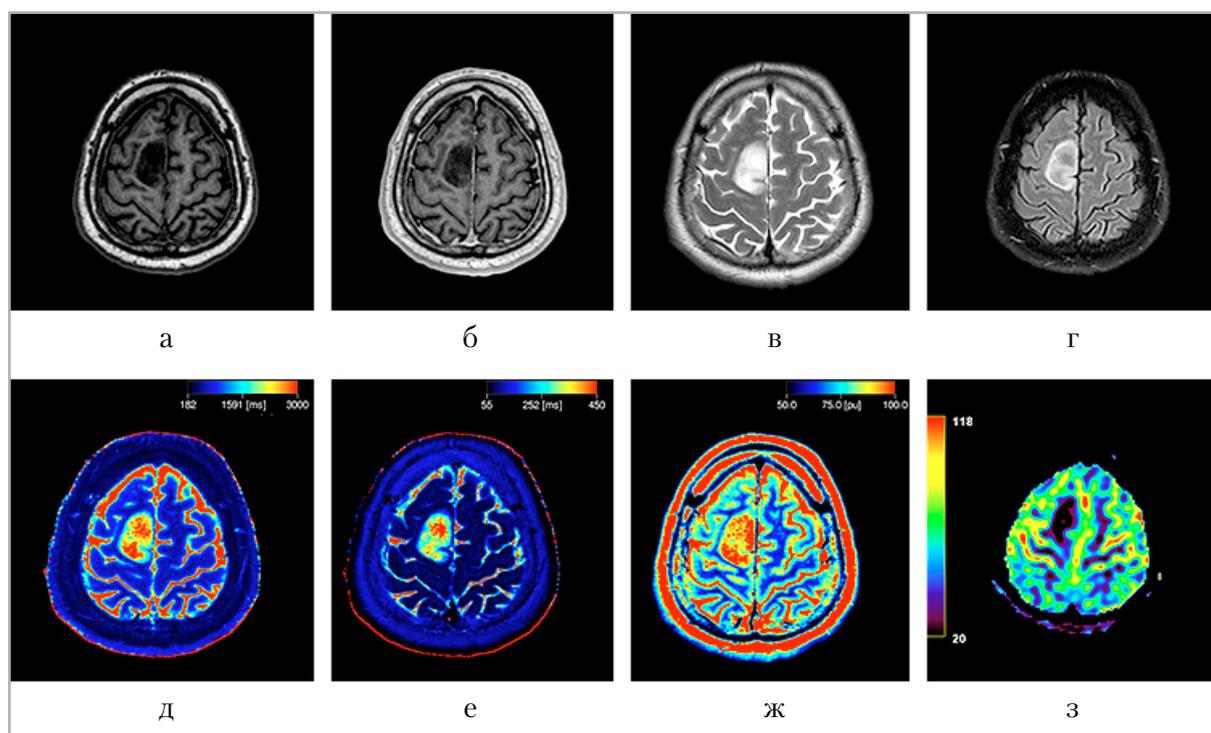


Рис. 2. МР-изображения и релаксометрические карты пациента с диффузной астроцитомой grade II, IDH1-мутантной (по классификации ВОЗ 2016 года). *а* – режим FSPGR BRAVO до контрастирования; *б* – режим FSPGR BRAVO после контрастирования; *в* – режим T2; *г* – режим T2-FLAIR; *д* – карта времени T1; *е* – карта времени T2; *ж* – карта протонной плотности (proton density, PD); *з* – карта объемного кровотока (pCASL – перфузия) с признаками его снижения в опухоли относительно контралатерального вещества мозга

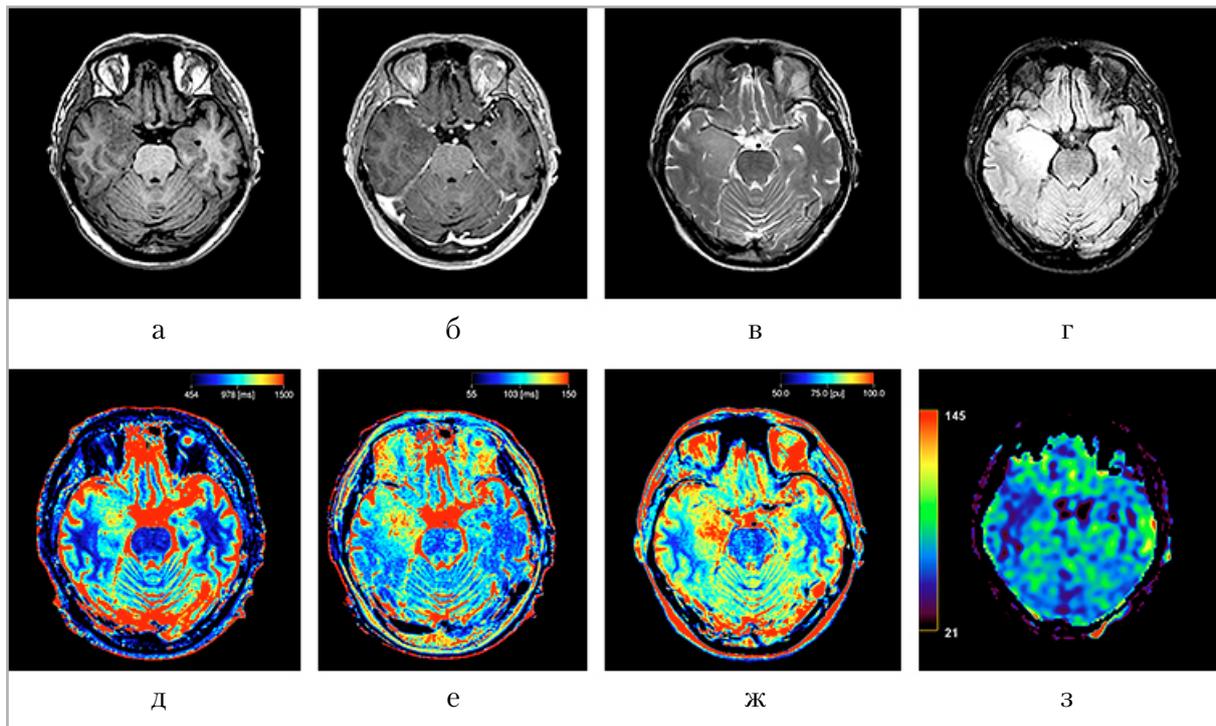


Рис. 3. МР-изображения и релаксометрические карты пациентки с диффузной астроцитомой grade II, IDH1-дикого типа (по классификации ВОЗ 2016 года). *а* – режим FSPGR BRAVO до контрастирования; *б* – режим FSPGR BRAVO после контрастирования; *в* – режим T2; *г* – режим T2-FLAIR; *д* – карта времени T1; *е* – карта времени T2; *ж* – карта протонной плотности (proton density, PD); *з* – карта объемного кровотока (pCASL – перфузия) без признаков его повышения в опухоли относительно контралатерального вещества мозга

мени T2 и протонной плотности получены при помощи метода MAGiC.

Заключение

МР-релаксометрия была одним из первых количественных визуализационных методов, примененных для диагностики опухолей головного мозга. В настоящее время возможность предполагать патоморфологические свойства опухоли при помощи МР-релаксометрии определяет направления ее практического применения. Предметом неинвазивной оценки в данном случае становится одна из базовых физиологических особенностей тканей, изменяющаяся при патологических процессах, – ее гидратация. Различная степень тканевой гидратации отмечается в глиомах разного IDH-статуса, а также в участках с различными плотноклеточно-

стью, пролиферативным потенциалом и агрессивностью, что создает основу для выявления злокачественных участков и оценки профиля инфильтрации. Количественный характер получаемых данных обуславливает перспективу применения машинного обучения. Помимо описанных в данном обзоре направлений изучения МР-релаксометрии на предоперационном и предтерапевтическом этапе также существуют положительные результаты исследований метода при динамическом контроле глиом [8]. Современная нейрорентгенология диктует необходимость применения комплексной и мультимодальной визуализации, при которой МР-релаксометрия может использоваться совместно с диффузионной, перфузионной МРТ, МР-спектроскопией и позитронно-эмиссионной томографией.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Захарова Н. Е., Пронин И. Н., Баталов А. И., Шульц Е. И., Тюрина А. Н., Баев А. А., Фадеева Л. М. Современные стандарты МРТ-диагностики опухолевых поражений головного мозга // Журнал «Вопросы нейрохирургии» имени Н. Н. Бурденко. 2020. Т. 84, № 3. С. 102–112.
2. Чехонин И. В., Баталов А. И., Захарова Н. Е., Погосбекян Э. Л., Никитин П. В., Быканов А. Е., Пицхелаури Д. И., Пронин И. Н. Магнитно-резонансная релаксометрия в оценке субрегионов глиом головного мозга высокой степени злокачественности – нейровизуализационные и морфологические корреляты // Журнал «Вопросы нейрохирургии» имени Н. Н. Бурденко. 2021. Т. 85, № 4. С. 41–48.
3. Чехонин И. В., Погосбекян Э. Л., Никитин П. В., Баталов А. И., Быканов А. Е., Маряшев С. А., Пицхелаури Д. И., Захарова Н. Е., Пронин И. Н. Магнитно-резонансная релаксометрия и диффузионно-взвешенная МРТ в оценке степеней злокачественности и IDH1-статуса глиальных опухолей головного мозга // Russian Electronic Journal of Radiology (REJR) – Российский электронный журнал лучевой диагностики. 2022. Т. 12, № 1. С. 21–31.
4. Badve C., Yu A., Dastmalchian S., Rogers M., Ma D., Jiang Y., Margevicius S., Pahwa S., Lu Z., Schluchter M., Sunshine J., Griswold M., Sloan A., Gulani V. MR Fingerprinting of Adult Brain Tumors: Initial Experience. *AJNR Am. J. Neuroradiol.* 2017. V. 38, no. 3. P. 492–499.
5. Bipin Mehta B., Coppo S., Frances McGivney D., Ian Hamilton J., Chen Y., Jiang Y., Ma D., Seiberlich N., Gulani V., Alan Griswold M. Magnetic resonance fingerprinting: a technical review. *Magn. Reson. Med.* 2019. V. 81, no. 1. P. 25–46.
6. Blystad I., Warntjes J. B. M., Smedby O., Lundberg P., Larsson E. M., Tisell A. Quantitative MRI for analysis of peritumoral edema in malignant gliomas. *PLoS One.* 2017. V. 12, no. 5. P. e0177135.
7. Blystad I., Warntjes J. B. M., Smedby Ö., Lundberg P., Larsson E. M., Tisell A. Quantitative MRI using relaxometry in malignant gliomas detects contrast enhancement in peritumoral oedema. *Sci. Rep.* 2020. V. 10, no. 1. P. 17986.
8. Bontempi P., Rozzanigo U., Amelio D., Scartoni D., Amichetti M., Farace P. Quantitative Multicomponent T2 Relaxation Showed Greater Sensitivity Than Flair Imaging to Detect Subtle Alterations at the Periphery of Lower Grade Gliomas. *Front Oncol.* 2021. V. 11. P. 651137.
9. Broen M. P. G., Smits M., Wijnenga M. M. J., Dubbink H. J., Anten M., Schijns O., Beckervordersandforth J., Postma A. A., van den Bent M. J. The T2-FLAIR mismatch sign as an imaging marker for non-enhancing IDH-mutant, 1p/19q-intact lower-grade glioma: a validation study. *Neuro. Oncol.* 2018. V. 20, no. 10. P. 1393–1399.
10. Chang P. D., Malone H. R., Bowden S. G., Chow D. S., Gill B. J. A., Ung T. H., Samanamud J., Englander Z. K., Sonabend A. M., Sheth S. A., McKhann G. M., 2nd, Sisti M. B., Schwartz L. H., Lignelli A., Grinband J., Bruce J. N., Canoll P. A Multiparametric Model for Mapping Cellularity in Glioblastoma Using Radiographically Localized Biopsies. *AJNR Am. J. Neuroradiol.* 2017. V. 38, no. 5. P. 890–898.
11. Dastmalchian S., Kilinc O., Onyewadume L., Tippareddy C., McGivney D., Ma D., Griswold M., Sunshine J., Gulani V., Barnholtz-Sloan J. S., Sloan A. E., Badve C. Radiomic analysis of magnetic resonance fingerprinting in adult brain tumors. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging.* 2021. V. 48, no. 3. P. 683–693.
12. de Blank P., Badve C., Gold D. R., Stearns D., Sunshine J., Dastmalchian S., Tomei K., Sloan A. E., Barnholtz-Sloan J. S., Lane A., Griswold M., Gulani V., Ma D. Magnetic Resonance Fingerprinting to

- Characterize Childhood and Young Adult Brain Tumors. *Pediatr. Neurosurg.* 2019. V. 54, no. 5. P. 310–318.
13. Deguchi S., Oishi T., Mitsuya K., Kakuda Y., Endo M., Sugino T., Hayashi N. Clinicopathological analysis of T2-FLAIR mismatch sign in lower-grade gliomas. *Sci. Rep.* 2020. V. 10, no. 1. P. 10113.
 14. Ding H., Huang Y., Li Z., Li S., Chen Q., Xie C., Zhong Y. Prediction of IDH Status Through MRI Features and Enlightened Reflection on the Delineation of Target Volume in Low-Grade Gliomas. *Technol. Cancer. Res. Treat.* 2019. V. 18. P. 1533033819877167.
 15. Ge X., Wang M., Ma H., Zhu K., Wei X., Li M., Zhai X., Shen Y., Huang X., Hou M., Liu W., Wang M., Wang X. Investigated diagnostic value of synthetic relaxometry, three-dimensional pseudo-continuous arterial spin labelling and diffusion-weighted imaging in the grading of glioma. *Magn Reson Imaging.* 2022. V. 86. P. 20–27.
 16. Haddad A. F., Young J. S., Morshed R. A., Berger M. S. FLAIRectomy: Resecting beyond the Contrast Margin for Glioblastoma. *Brain. Sci.* 2022. V. 12, no. 5. P. 544
 17. Haubold J., Demircioglu A., Gratz M., Glas M., Wrede K., Sure U., Antoch G., Keyvani K., Nittka M., Kannengiesser S., Gulani V., Griswold M., Herrmann K., Forsting M., Nensa F., Umutlu L. Non-invasive tumor decoding and phenotyping of cerebral gliomas utilizing multiparametric (18)F-FET PET-MRI and MR Fingerprinting. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging.* 2020. V. 47. P. 1435–1445.
 18. Kern M., Auer T. A., Picht T., Misch M., Wiener E. T2 mapping of molecular subtypes of WHO grade II/III gliomas. *BMC Neurol.* 2020. V. 20, no. 1. P. 8.
 19. Kikuchi K., Togao O., Yamashita K., Momosaka D., Kikuchi Y., Kuga D., Hata N., Mizoguchi M., Yamamoto H., Iwaki T., Hiwatashi A., Ishigami K. Quantitative relaxometry using synthetic MRI could be better than T2-FLAIR mismatch sign for differentiation of IDH-mutant gliomas: a pilot study. *Sci. Rep.* 2022. V. 12, no. 1. P. 9197.
 20. Kim H., Kim S., Lee H. H., Heo H. In-Vivo Proton Magnetic Resonance Spectroscopy of 2-Hydroxyglutarate in Isocitrate Dehydrogenase-Mutated Gliomas: A Technical Review for Neuroradiologists. *Korean J. Radiol.* 2016. V. 17, no. 5. P. 620–632.
 21. Kinoshita M., Uchikoshi M., Sakai M., Kanemura Y., Kishima H., Nakanishi K. T2-FLAIR Mismatch Sign Is Caused by Long T(1) and T(2) of IDH-mutant, 1p19q Non-codeleted Astrocytoma. *Magn. Reson. Med. Sci.* 2021. V. 20, no. 1. P. 119–123.
 22. Kinoshita M., Uchikoshi M., Tateishi S., Miyazaki S., Sakai M., Ozaki T., Asai K., Fujita Y., Matsushashi T., Kanemura Y., Shimosegawa E., Hatazawa J., Nakatsuka S. I., Kishima H., Nakanishi K. Magnetic Resonance Relaxometry for Tumor Cell Density Imaging for Glioma: An Exploratory Study via (11)C-Methionine PET and Its Validation via Stereotactic Tissue Sampling. *Cancers (Basel).* 2021. V. 13, no. 16. P. 4067
 23. Lasocki A., Anjari M., Örs Kokurcan S., Thust S. C. Conventional MRI features of adult diffuse glioma molecular subtypes: a systematic review. *Neuroradiology.* 2021. V. 63, no. 3. P. 353–362.
 24. Louis D. N., Perry A., Reifenberger G., von Deimling A., Figarella-Branger D., Cavenee W. K., Ohgaki H., Wiestler O. D., Kleihues P., Ellison D. W. The 2016 World Health Organization Classification of Tumors of the Central Nervous System: a summary. *Acta Neuropathol.* 2016. V. 131, no. 6. P. 803–820.
 25. Louis D. N., Perry A., Wesseling P., Brat D. J., Cree I. A., Figarella-Branger D., Hawkins C., Ng H. K., Pfister S. M., Reifenberger G., Soffietti R., von Deimling A., Ellison D. W. The 2021 WHO Classification of Tumors of the Central Nervous System: a summary. *Neuro. Oncol.* 2021. V. 23, no. 8. P. 1231–1251.

26. Malik N., Geraghty B., Dasgupta A., Maralani P. J., Sandhu M., Detsky J., Tseng C. L., Soliman H., Myrehaug S., Husain Z., Perry J., Lau A., Sahgal A., Czarnota G. J. MRI radiomics to differentiate between low grade glioma and glioblastoma peritumoral region. *J. Neurooncol.* 2021. V. 155, no. 2. P. 181–191.
27. Maurer G. D., Tichy J., Harter P. N., Nöth U., Weise L., Quick-Weller J., Deichmann R., Steinbach J. P., Bähr O., Hattingen E. Matching Quantitative MRI Parameters with Histological Features of Treatment-Naïve IDH Wild-Type Glioma. *Cancers (Basel).* 2021. V. 13, no. 16. P. 4060.
28. Nielsen L. A. G., Bangsø J. A., Lindahl K. H., Dahlrot R. H., Hjelmborg J. V. B., Hansen S., Kristensen B. W. Evaluation of the proliferation marker Ki-67 in gliomas: Interobserver variability and digital quantification. *Diagn. Pathol.* 2018. V. 13, no. 1. P. 38.
29. Nöth U., Tichy J., Tritt S., Bähr O., Deichmann R., Hattingen E. Quantitative T1 mapping indicates tumor infiltration beyond the enhancing part of glioblastomas. *NMR Biomed.* 2020. V. 33, no. 3. P. e4242.
30. Nunez-Gonzalez L., Kotek G., Gómez P. A., Buonincontri G., Vogel M., Krestin G. P., Poot D. H. J., Hernandez-Tamames J. A. Accuracy and repeatability of QRAPMASTER and MRF-vFA. *Magn. Reson. Imaging.* 2021. V. 83. P. 196–207.
31. Park S. I., Suh C. H., Guenette J. P., Huang R. Y., Kim H. S. The T2-FLAIR mismatch sign as a predictor of IDH-mutant, 1p/19q-noncodeleted lower-grade gliomas: a systematic review and diagnostic meta-analysis. *Eur Radiol.* 2021. V. 31, no. 7. P. 5289–5299.
32. Patel S. H., Poisson L. M., Brat D. J., Zhou Y., Cooper L., Snuderl M., Thomas C., Franceschi A. M., Griffith B., Flanders A. E., Golfinos J. G., Chi A. S., Jain R. T2-FLAIR Mismatch, an Imaging Biomarker for IDH and 1p/19q Status in Lower-grade Gliomas: A TCGA/TCIA Project. *Clin. Cancer. Res.* 2017. V. 23, no. 20. P. 6078–6085.
33. Piper R. J., Mikhael S., Wardlaw J. M., Laidlaw D. H., Whittle I. R., Bastin M. E. Imaging signatures of meningioma and low-grade glioma: a diffusion tensor, magnetization transfer and quantitative longitudinal relaxation time MRI study. *Magn Reson Imaging.* 2016. V. 34, no. 4. P. 596–602.
34. Qiu J., Deng K., Wang P., Chen C., Luo Y., Yuan S., Wen J. Application of diffusion kurtosis imaging to the study of edema in solid and peritumoral areas of glioma. *Magn. Reson. Imaging.* 2022. V. 86. P. 10–16.
35. Saitta L., Heese O., Forster A. F., Matschke J., Siemonsen S., Castellán L., Westphal M., Fiehler J., Goebell E. Signal intensity in T2' magnetic resonance imaging is related to brain glioma grade. *Eur. Radiol.* 2011. V. 21, no. 5. P. 1068–1076.
36. Singh G., Manjila S., Sakla N., True A., Wardeh A. H., Beig N., Vaysberg A., Matthews J., Prasanna P., Spektor V. Radiomics and radiogenomics in gliomas: a contemporary update. *Br. J. Cancer.* 2021. V. 125, no. 5. P. 641–657.
37. Suh C. H., Kim H. S., Paik W., Choi C., Ryu K. H., Kim D., Woo D. C., Park J. E., Jung S. C., Choi C. G., Kim S. J. False-Positive Measurement at 2-Hydroxyglutarate MR Spectroscopy in Isocitrate Dehydrogenase Wild-Type Glioblastoma: A Multifactorial Analysis. *Radiology.* 2019. V. 291, no. 3. P. 752–762.
38. Tanenbaum L. N., Tsiouris A. J., Johnson A. N., Naidich T. P., DeLano M. C., Melhem E. R., Quarterman P., Parameswaran S. X., Shankaranarayanan A., Goyen M., Field A. S. Synthetic MRI for Clinical Neuroimaging: Results of the Magnetic Resonance Image Compilation (MAGiC) Prospective, Multicenter, Multireader Trial. *AJNR Am. J. Neuroradiol.* 2017. V. 38, no. 6. P. 1103–1110.
39. Tavares C. B., Braga F. C. S. A. G., Sousa E. B., Brito J. N. P. O. Expression of Ki-67 in Low-Grade and High-Grade

- Astrocytomas. A Literature Review. *J. Bras. Neurocirurg.* 2016. V. 27, no. 3. P. 225–230.
40. Tippareddy C., Onyewadume L., Sloan A. E., Wang G. M., Patil N. T., Hu S., Barnholtz-Sloan J. S., Boyacıoğlu R., Gulani V., Sunshine J., Griswold M., Ma D., Badve C. Novel 3D magnetic resonance fingerprinting radiomics in adult brain tumors: a feasibility study. *Eur. Radiol.* 2023. V. 33, no. 2. P. 836–844.
 41. Villanueva-Meyer J. E., Barajas R. F., Jr., Mabray M. C., Chen W., Shankaranarayanan A., Koon P., Barani I. J., Tihan T., Cha S. Differentiation of brain tumor-related edema based on 3D T1rho imaging. *Eur. J. Radiol.* 2017. V. 91. P. 88–92.
 42. Warntjes M., Blystad I., Tisell A., Larsson E. M. Synthesizing a Contrast-Enhancement Map in Patients with High-Grade Gliomas Based on a Postcontrast MR Imaging Quantification Only. *AJNR Am. J. Neuroradiol.* 2018. V. 39, no. 12. P. 2194–2199.
 43. Yushkevich P. A., Piven J., Hazlett H. C., Smith R. G., Ho S., Gee J. C., Gerig G. User-guided 3D active contour segmentation of anatomical structures: significantly improved efficiency and reliability. *Neuroimage.* 2006. V. 31, no. 3. P. 1116–1128.
 44. Zakharova N. E., Batalov A. I., Pogosbekian E. L., Chekhonin I. V., Goryaynov S. A., Bykanov A. E., Tyurina A. N., Galstyan S. A., Nikitin P. V., Fadeeva L. M., Usachev D. Y., Pronin I. N. Perifocal Zone of Brain Gliomas: Application of Diffusion Kurtosis and Perfusion MRI Values for Tumor Invasion Border Determination. *Cancers (Basel).* 2023. V. 15, no. 10. P. 2760.
 45. Zetterling M., Roodakker K. R., Berntsson S. G., Edqvist P. H., Latini F., Landtblom A. M., Pontén F., Alafuzoff I., Larsson E. M., Smits A. Extension of diffuse low-grade gliomas beyond radiological borders as shown by the coregistration of histopathological and magnetic resonance imaging data. *J. Neurosurg.* 2016. V. 125, no. 5. P. 1155–1166.

References

1. Zakharova N. E., Pronin I. N., Batalov A. I., Shul'ts E. I., Tyurina A. N., Baev A. A., Fadeeva L. M. Modern standards for magnetic resonance imaging of the brain tumors. *Zhurnal Voprosy Neurokhirurgii Imeni N. N. Burdenko.* 2020; 84(3):102-112. (In Russ.).
2. Chekhonin I. V., Batalov A. I., Zakharova N. E., Pogosbekyan E. L., Nikitin P. V., Bykanov A. E., Pitskhelauri D. I., Pronin I. N. Magnetic resonance relaxometry in high-grade glioma subregion assessment – neuroimaging and morphological correlates. *Zhurnal Voprosy Neurokhirurgii Imeni N. N. Burdenko.* 2021; 85(4):41-48. (In Russ.).
3. Chekhonin I. V., Pogosbekyan E. L., Nikitin P. V., Batalov A. I., Bykanov A. E., Maryashev S. A., Pitskhelauri D. I., Zakharova N. E., Pronin I. N. Magnetic resonance relaxometry and diffusion-weighted imaging in glioma grading and IDH1 mutational status assessment. *REJR.* 2022;12(1):21-31. (In Russ.).
4. Badve C., Yu A., Dastmalchian S., Rogers M., Ma D., Jiang Y., Margevicius S., Pahwa S., Lu Z., Schluchter M., Sunshine J., Griswold M., Sloan A., Gulani V. MR Fingerprinting of Adult Brain Tumors: Initial Experience. *AJNR Am. J. Neuroradiol.* 2017;38(3):492-499.
5. Bipin Mehta B., Coppo S., Frances McGivney D., Ian Hamilton J., Chen Y., Jiang Y., Ma D., Seiberlich N., Gulani V., Alan Griswold M. Magnetic resonance fingerprinting: a technical review. *Magn. Reson. Med.* 2019;81(1):25-46.
6. Blystad I., Warntjes J. B. M., Smedby O., Lundberg P., Larsson E. M., Tisell A. Quantitative MRI for analysis of peritumoral edema in malignant gliomas. *PLoS One.* 2017;12(5):e0177135.
7. Blystad I., Warntjes J. B. M., Smedby Ö., Lundberg P., Larsson E. M., Tisell A. Quantitative MRI using relaxometry in malignant gliomas detects contrast enhancement in peritumoral oedema. *Sci. Rep.* 2020;10(1):17986.

8. Bontempi P., Rozzanigo U., Amelio D., Scartoni D., Amichetti M., Farace P. Quantitative Multicomponent T2 Relaxation Showed Greater Sensitivity Than Flair Imaging to Detect Subtle Alterations at the Periphery of Lower Grade Gliomas. *Front. Oncol.* 2021;11:651137.
9. Broen M. P. G., Smits M., Wijnenga M. M. J., Dubbink H. J., Anten M., Schijns O., Beckervordersandforth J., Postma A. A., van den Bent M. J. The T2-FLAIR mismatch sign as an imaging marker for non-enhancing IDH-mutant, 1p/19q-intact lower-grade glioma: a validation study. *Neuro. Oncol.* 2018;20(10):1393-1399.
10. Chang P. D., Malone H. R., Bowden S. G., Chow D. S., Gill B. J. A., Ung T. H., Samanamud J., Englander Z. K., Sonabend A. M., Sheth S. A., McKhann G. M., 2nd, Sisti M. B., Schwartz L. H., Lignelli A., Grinband J., Bruce J. N., Canoll P. A Multiparametric Model for Mapping Cellularity in Glioblastoma Using Radiographically Localized Biopsies. *AJNR Am. J. Neuroradiol.* 2017;38(5):890-898.
11. Dastmalchian S., Kilinc O., Onyewadume L., Tippareddy C., McGivney D., Ma D., Griswold M., Sunshine J., Gulani V., Barnholtz-Sloan J. S., Sloan A. E., Badve C. Radiomic analysis of magnetic resonance fingerprinting in adult brain tumors. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging.* 2021;48(3):683-693.
12. de Blank P., Badve C., Gold D. R., Stearns D., Sunshine J., Dastmalchian S., Tomei K., Sloan A. E., Barnholtz-Sloan J. S., Lane A., Griswold M., Gulani V., Ma D. Magnetic Resonance Fingerprinting to Characterize Childhood and Young Adult Brain Tumors. *Pediatr. Neurosurg.* 2019;54(5):310-318.
13. Deguchi S., Oishi T., Mitsuya K., Kakuda Y., Endo M., Sugino T., Hayashi N. Clinicopathological analysis of T2-FLAIR mismatch sign in lower-grade gliomas. *Sci. Rep.* 2020;10(1):10113.
14. Ding H., Huang Y., Li Z., Li S., Chen Q., Xie C., Zhong Y. Prediction of IDH Status Through MRI Features and Enlightened Reflection on the Delineation of Target Volume in Low-Grade Gliomas. *Technol. Cancer. Res. Treat.* 2019;18: P. 1533033819877167.
15. Ge X., Wang M., Ma H., Zhu K., Wei X., Li M., Zhai X., Shen Y., Huang X., Hou M., Liu W., Wang M., Wang X. Investigated diagnostic value of synthetic relaxometry, three-dimensional pseudo-continuous arterial spin labelling and diffusion-weighted imaging in the grading of glioma. *Magn. Reson. Imaging.* 2022;86:20-27.
16. Haddad A. F., Young J. S., Morshed R. A., Berger M. S. FLAIRctomy: Resecting beyond the Contrast Margin for Glioblastoma. *Brain. Sci.* 2022;12(5):544.
17. Haubold J., Demircioglu A., Gratz M., Glas M., Wrede K., Sure U., Antoch G., Keyvani K., Nittka M., Kannengiesser S., Gulani V., Griswold M., Herrmann K., Forsting M., Nensa F., Umutlu L. Non-invasive tumor decoding and phenotyping of cerebral gliomas utilizing multiparametric (18)F-FET PET-MRI and MR Fingerprinting. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging.* 2020;47:1435-1445.
18. Kern M., Auer T. A., Picht T., Misch M., Wiener E. T2 mapping of molecular subtypes of WHO grade II/III gliomas. *BMC Neurol.* 2020;20(1):8.
19. Kikuchi K., Togao O., Yamashita K., Momosaka D., Kikuchi Y., Kuga D., Hata N., Mizoguchi M., Yamamoto H., Iwaki T., Hiwatashi A., Ishigami K. Quantitative relaxometry using synthetic MRI could be better than T2-FLAIR mismatch sign for differentiation of IDH-mutant gliomas: a pilot study. *Sci. Rep.* 2022;12(1):9197.
20. Kim H., Kim S., Lee H. H., Heo H. In-Vivo Proton Magnetic Resonance Spectroscopy of 2-Hydroxyglutarate in Isocitrate Dehydrogenase-Mutated Gliomas: A Technical Review for Neuroradiologists. *Korean. J. Radiol.* 2016;17(5):620-632.
21. Kinoshita M., Uchikoshi M., Sakai M., Kanemura Y., Kishima H., Nakanishi K. T2-FLAIR Mismatch Sign Is Caused by Long T(1) and T(2) of IDH-mutant,

- 1p19q Non-codeleted Astrocytoma. *Magn. Reson. Med. Sci.* 2021;20(1):119-123.
22. Kinoshita M., Uchikoshi M., Tateishi S., Miyazaki S., Sakai M., Ozaki T., Asai K., Fujita Y., Matsushashi T., Kanemura Y., Shimosegawa E., Hatazawa J., Nakatsuka S. I., Kishima H., Nakanishi K. Magnetic Resonance Relaxometry for Tumor Cell Density Imaging for Glioma: An Exploratory Study via (11)C-Methionine PET and Its Validation via Stereotactic Tissue Sampling. *Cancers (Basel)*. 2021; 13(16):4067
 23. Lasocki A., Anjari M., Örs Kokurcan S., Thust S. C. Conventional MRI features of adult diffuse glioma molecular subtypes: a systematic review. *Neuroradiology*. 2021;63(3):353-362.
 24. Louis D. N., Perry A., Reifenberger G., von Deimling A., Figarella-Branger D., Cavenee W. K., Ohgaki H., Wiestler O. D., Kleihues P., Ellison D. W. The 2016 World Health Organization Classification of Tumors of the Central Nervous System: a summary. *Acta. Neuropathol.* 2016; 131(6):803-820.
 25. Louis D. N., Perry A., Wesseling P., Brat D. J., Cree I. A., Figarella-Branger D., Hawkins C., Ng H. K., Pfister S. M., Reifenberger G., Soffietti R., von Deimling A., Ellison D. W. The 2021 WHO Classification of Tumors of the Central Nervous System: a summary. *Neuro. Oncol.* 2021;23(8):1231-1251.
 26. Malik N., Geraghty B., Dasgupta A., Maralani P. J., Sandhu M., Detsky J., Tseng C. L., Soliman H., Myrehaug S., Husain Z., Perry J., Lau A., Sahgal A., Czarnota G. J. MRI radiomics to differentiate between low grade glioma and glioblastoma peritumoral region. *J. Neurooncol.* 2021;155(2):181-191.
 27. Maurer G. D., Tichy J., Harter P. N., Nöth U., Weise L., Quick-Weller J., Deichmann R., Steinbach J. P., Bähr O., Hattingen E. Matching Quantitative MRI Parameters with Histological Features of Treatment-Naïve IDH Wild-Type Glioma. *Cancers (Basel)*. 2021;13(16):4060.
 28. Nielsen L. A. G., Bangsø J. A., Lindahl K. H., Dahlrot R. H., Hjelmberg J. V. B., Hansen S., Kristensen B. W. Evaluation of the proliferation marker Ki-67 in gliomas: Interobserver variability and digital quantification. *Diagn. Pathol.* 2018; 13(1):38.
 29. Nöth U., Tichy J., Tritt S., Bähr O., Deichmann R., Hattingen E. Quantitative T1 mapping indicates tumor infiltration beyond the enhancing part of glioblastomas. *NMR Biomed.* 2020; 33(3):e4242.
 30. Nunez-Gonzalez L., Kotek G., Gómez P. A., Buonincontri G., Vogel M., Krestin G. P., Poot D. H. J., Hernandez-Tamames J. A. Accuracy and repeatability of QRAP-MASTER and MRF-vFA. *Magn. Reson. Imaging.* 2021;83:196–207.
 31. Park S. I., Suh C. H., Guenette J. P., Huang R. Y., Kim H. S. The T2-FLAIR mismatch sign as a predictor of IDH-mutant, 1p/19q-noncodeleted lower-grade gliomas: a systematic review and diagnostic meta-analysis. *Eur. Radiol.* 2021;31(7):5289-5299.
 32. Patel S. H., Poisson L. M., Brat D. J., Zhou Y., Cooper L., Snuderl M., Thomas C., Franceschi A. M., Griffith B., Flanders A. E., Golfinos J. G., Chi A. S., Jain R. T2-FLAIR Mismatch, an Imaging Biomarker for IDH and 1p/19q Status in Lower-grade Gliomas: A TCGA/TCIA Project. *Clin. Cancer Res.* 2017;23(20):6078-6085.
 33. Piper R. J., Mikhael S., Wardlaw J. M., Laidlaw D. H., Whittle I. R., Bastin M. E. Imaging signatures of meningioma and low-grade glioma: a diffusion tensor, magnetization transfer and quantitative longitudinal relaxation time MRI study. *Magn. Reson. Imaging.* 2016;34(4):596-602.
 34. Qiu J., Deng K., Wang P., Chen C., Luo Y., Yuan S., Wen J. Application of diffusion kurtosis imaging to the study of edema in solid and peritumoral areas of glioma. *Magn. Reson. Imaging.* 2022;86:10-16.
 35. Saitta L., Heese O., Forster A. F., Matschke J., Siemonsen S., Castellán L., Westphal

- M., Fiehler J., Goebell E. Signal intensity in T2' magnetic resonance imaging is related to brain glioma grade. *Eur. Radiol.* 2011;21(5):1068-1076.
36. Singh G., Manjila S., Sakla N., True A., Wardeh A. H., Beig N., Vaysberg A., Matthews J., Prasanna P., Spektor V. Radiomics and radiogenomics in gliomas: a contemporary update. *Br. J. Cancer.* 2021;125(5):641-657.
37. Suh C. H., Kim H. S., Paik W., Choi C., Ryu K. H., Kim D., Woo D. C., Park J. E., Jung S. C., Choi C. G., Kim S. J. False-Positive Measurement at 2-Hydroxyglutarate MR Spectroscopy in Isocitrate Dehydrogenase Wild-Type Glioblastoma: A Multifactorial Analysis. *Radiology.* 2019;291(3):752-762.
38. Tanenbaum L. N., Tsiouris A. J., Johnson A. N., Naidich T. P., DeLano M. C., Melhem E. R., Quarterman P., Parameswaran S. X., Shankaranarayanan A., Goyen M., Field A. S. Synthetic MRI for Clinical Neuroimaging: Results of the Magnetic Resonance Image Compilation (MAGiC) Prospective, Multicenter, Multireader Trial. *AJNR Am. J. Neuroradiol.* 2017;38(6):1103-1110.
39. Tavares C. B., Braga F. C. S. A. G., Sousa E. B., Brito J.N.P.O. Expression of Ki-67 in Low-Grade and High-Grade Astrocytomas. A Literature Review. *J. Bras. Neurocirurg.* 2016;27(3):225-230.
40. Tippareddy C., Onyewadume L., Sloan A. E., Wang G. M., Patil N. T., Hu S., Barnholtz-Sloan J. S., Boyacıoğlu R., Gulani V., Sunshine J., Griswold M., Ma D., Badve C. Novel 3D magnetic resonance fingerprinting radiomics in adult brain tumors: a feasibility study. *Eur. Radiol.* 2023;33(2):836-844.
41. Villanueva-Meyer J. E., Barajas R. F., Jr., Mabray M. C., Chen W., Shankaranarayanan A., Koon P., Barani I. J., Tihan T., Cha S. Differentiation of brain tumor-related edema based on 3D T1rho imaging. *Eur. J. Radiol.* 2017;91:88-92.
42. Warntjes M., Blystad I., Tisell A., Larsson E. M. Synthesizing a Contrast-Enhancement Map in Patients with High-Grade Gliomas Based on a Postcontrast MR Imaging Quantification Only. *AJNR Am. J. Neuroradiol.* 2018;39(12):2194-2199.
43. Yushkevich P. A., Piven J., Hazlett H. C., Smith R. G., Ho S., Gee J. C., Gerig G. User-guided 3D active contour segmentation of anatomical structures: significantly improved efficiency and reliability. *Neuroimage.* 2006;31(3):1116-1128.
44. Zakharova N. E., Batalov A. I., Pogosbekian E. L., Chekhonin I. V., Goryaynov S. A., Bykanov A. E., Tyurina A. N., Galstyan S. A., Nikitin P. V., Fadeeva L. M., Usachev D. Y., Pronin I. N. Perifocal Zone of Brain Gliomas: Application of Diffusion Kurtosis and Perfusion MRI Values for Tumor Invasion Border Determination. *Cancers (Basel).* 2023;15(10):2760
45. Zetterling M., Roodakker K. R., Berntsson S. G., Edqvist P. H., Latini F., Landtblom A. M., Pontén F., Alafuzoff I., Larsson E. M., Smits A. Extension of diffuse low-grade gliomas beyond radiological borders as shown by the coregistration of histopathological and magnetic resonance imaging data. *J. Neurosurg.* 2016; 125(5):1155-1166.

Сведения об авторах / Information about the authors

Чехонин Иван Владимирович, кандидат медицинских наук, врач-рентгенолог, младший научный сотрудник отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.
125047, г. Москва, 4-я Тверская-Ямская ул, д. 16.
+7 (903) 292-11-53

Вклад автора: определение концепции и дизайн работы, поиск источников, анализ и интерпретация данных, написание текста, подготовка иллюстраций, редактирование, утверждение окончательного варианта публикации.

Chekhnin Ivan Vladimirovich, M. D., Ph. D. Med., radiologist, junior research associate, Department of X-ray and Radioisotope Diagnostic Methods, Federal State Autonomous Institution N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

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

+7 (903) 292-11-53

Author's contribution: conception and design of the work, source searching, data analysis and interpretation, manuscript drafting, preparation of figures, revision and editing, final approval.

Баталов Артем Игоревич, кандидат медицинских наук, врач-рентгенолог, старший научный сотрудник отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

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

+7 (916) 066-20-50

Вклад автора: определение концепции и дизайн работы, анализ и интерпретация данных, редактирование, утверждение окончательного варианта публикации.

Batalov Artem Igorevich, M. D., Ph. D. Med., radiologist, senior research associate, Department of X-ray and Radioisotope Diagnostic Methods, Federal State Autonomous Institution N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

16, 4th Tverskaya-Yamskaya ul., Moscow, 125047, Russian Federation.

+7 (916) 066-20-50

Author's contribution: conception and design of the work, data analysis and interpretation, revision and editing, final approval.

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, 4-я Тверская-Ямская улица, д. 16.

+7 (499) 972-85-55

Вклад автора: анализ и интерпретация данных, редактирование, утверждение окончательного варианта публикации.

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

16, 4th Tverskaya-Yamskaya ul., Moscow, 125047, Russian Federation.

+7 (499) 972-85-55

Author's contribution: data analysis and interpretation, revision and editing, final approval.

Корниенко Валерий Николаевич, доктор медицинских наук, профессор, академик РАН, научный консультант отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

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

+7 (499) 972-85-55

Вклад автора: анализ и интерпретация данных, редактирование, утверждение окончательного варианта публикации.

Kornienko Valeriy Nikolaevich, M. D., D. Sci. Med., Academician of the Russian Academy of Sciences, Scientific Consultant, Department of X-ray and Radioisotope Diagnostic Methods, Federal State Autonomous Institution N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

16, 4th Tverskaya-Yamskaya ul., Moscow, 125047, Russian Federation.

+7 (499) 972-85-55

Author's contribution: data analysis and interpretation, revision and editing, final approval.

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, 4-я Тверская-Ямская улица, д. 16.

+7 (499) 972-85-55

Вклад автора: анализ и интерпретация данных, редактирование, утверждение окончательного варианта публикации.

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

16, 4th Tverskaya-Yamskaya ul., Moscow, 125047, Russian Federation.

+7 (499) 972-85-55

Финансирование исследования и конфликт интересов

Настоящая работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-75-10074 (<https://rscf.ru/project/22-75-10074/>). 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

This research was funded by the Russian Science Foundation [Grant № 22-75-10074 (<https://rscf.ru/project/22-75-10074/>)]. The authors declare that the current work, its topic, subject, and contents do not affect competing interests. The opinions stated in the article belong to the authors of the manuscript. The authors confirm that their authorship corresponds to ICMJE criteria (all authors have contributed substantially to the concept development and article preparation, have read and approved the final version before the publication).

Статья поступила в редакцию 31.10.2023;
одобрена после рецензирования 14.12.2023;
принята к публикации 12.01.2024.

The article was submitted 31.10.2023;
approved after reviewing 14.12.2023;
accepted for publication 12.01.2024.



КЛИНИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ И КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Краткое сообщение

УДК 616.853

<https://doi.org/10.52560/2713-0118-2024-1-104-114>

МР-морфометрия в диагностике МР-негативной фокальной кортикальной дисплазии (клинический случай)

А. М. Шевченко¹, Э. Л. Погосбемян², П. А. Власов³, С. Б. Агрба⁴,
С. А. Галстян⁵, А. И. Баталов⁶, А. Г. Меликян⁷, И. Н. Пронин⁸

ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия

¹ shevchenko@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4779-2370>

² epogosbekyan@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4803-6948>

³ pvlasov@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2381-8609>

⁴ sagrba@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1668-6409>

⁵ SGalstyan@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9953-6654>

⁶ abatalov@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8924-7346>

⁷ Melikian@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0737-5983>

⁸ Pronin@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4480-0275>

Автор, ответственный за переписку: Александр Михайлович Шевченко,
Shevchenko@nsi.ru

Резюме

Представлен случай МР-негативной формы фокальной кортикальной дисплазии (ФКД) IIb типа, в которой продемонстрирована диагностическая информативность показателей полу- и автоматической МР-морфометрии. С помощью данного метода были выделены специфичные признаки ФКД: нарушение границы серого и белого вещества и утолщение коры у пациента с МР-негативной формой фокальной эпилепсии. Гистологический диагноз фокальной кортикальной дисплазии IIb типа в выделенной зоне интереса был подтвержден. После хирургического лечения была достигнута стойкая ремиссия приступов (Engel class Ia, катамнез 5 лет).

Ключевые слова: магнитно-резонансная томография, магнитно-резонансная морфометрия, фокальная кортикальная дисплазия, толщина коры, размытие серого-белого вещества

© Шевченко А. М., Погосбемян Э. Л., Власов П. А., Агрба С. Б., Галстян С. А., Баталов А. И., Меликян А. Г., Пронин И. Н., 2024

Для цитирования: Шевченко А. М., Погосбекян Э. Л., Власов П. А., Агрба С. Б., Галстян С. А., Баталов А. И., Меликян А. Г., Пронин И. Н. МР-морфометрия в диагностике МР-негативной фокальной кортикальной дисплазии (клинический случай) // Радиология — практика. 2024;(1):104-114. <https://doi.org/10.52560/2713-0118-2024-1-104-114>

CLINICAL REVIEWS AND SHORT REPORTS

Short report

MR morphometry in the diagnosis of MR-negative focal cortical dysplasia (clinical case)

A. M. Shevchenko¹, E. L. Pogosbekyan², P. A. Vlasov³, S. B. Agrba⁴,
S. A. Galstyan⁵, A. I. Batalov⁶, A. G. Melikyan⁷, I. N. Pronin⁸

Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

¹ shevchenko@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4779-2370>

² epogosbekyan@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4803-6948>

³ pvlasov@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2381-8609>

⁴ sagrba@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1668-6409>

⁵ SGalstyan@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9953-6654>

⁶ abatalov@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8924-7346>

⁷ Melikian@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0737-5983>

⁸ Pronin@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4480-0275>

Corresponding author: Alexander M. Shevchenko, Shevchenko@nsi.ru

Abstract

We presented a clinical case of MR-negative focal cortical dysplasia (FCD) type IIb, in which diagnostic value of semi- and automatic MR morphometry has been established. This method identified specific features for FCD in a patient with MR-negative form of focal epilepsy, such as blurring of the grey-white matter border and thickening of the cortex. The histological diagnosis of FCD type IIb has been confirmed in the region of interest detected by MR morphometry. Seizure freedom (Engel class Ia, follow-up 5 years) has been achieved after the surgical resection.

Keywords: magnetic resonance imaging, magnetic resonance morphometry, focal cortical dysplasia, cortical thickness, gray-white matter blur

For citation: Shevchenko A. M., Pogosbekyan E. L., Vlasov P. A., Agrba S. B., Galstyan S. A., Batalov A. I., Melikyan A. G., Pronin I. N. MR morphometry in the diagnosis of MR-negative focal cortical dysplasia (clinical case). *Radiology — Practice*. 2024;1:104-114. (In Russ.). <https://doi.org/10.52560/2713-0118-2024-1-104-114>

Актуальность

Фокальная корковая дисплазия (ФКД) является наиболее распространенным заболеванием детского возраста, которая проявляется фармакорезистентной эпилепсией. ФКД представляет собой подгруппу корковых пороков развития, характеризующихся аномальной миграцией и дифференцировкой нейронов. ФКД составляет 20–25 % случаев эпилепсии детского возраста [1] и 25–40 % случаев с фармакорезистентным течением [2]. Хирургическое лечение пациентов с фармакорезистентным течением ФКД является методом выбора. Успех хирургического лечения эпилепсии зависит от точного определения границ дисплазии [3]. Когда фармакорезистентность наблюдается при отсутствии видимых структурных изменений на МРТ, это создает наибольшую проблему для дооперационного обследования и планирования лечения пациента. В таких случаях в литературе использовался термин «МР-негативная эпилепсия». Однако у этого термина нет общепринятого определения, так как нет четкой границы между МР-позитивной (видимое поражение на МРТ) и МР-негативной эпилепсией. При определенных условиях, например, в зависимости от используемых последовательностей и напряженности магнитного поля и опыта нейрорентгенолога, один и тот же пациент может быть диагностирован как МР-позитивный, так и МР-негативный. Все это повышает интерес исследователей к поиску методов, способных выявлять структурные изменения у МР-негативных пациентов, вне зависимости от «внешних» факторов. Одним из таких методов является МР-морфометрия на основе воксельного анализа [4]. По данным литературы, морфометрия способна выявлять признаки, типичные для ФКД, а именно нарушение перехода серого и белого вещества, а также изменения объема серого вещества. В предыдущей работе нами был представлен оригинальный алгоритм автомати-

ческого определения зон ФКД, который может выявлять признаки фокальной кортикальной дисплазии при отсутствии ее визуальных изменений на стандартных МР-последовательностях [5]. В качестве иллюстративного примера информативности предложенного метода МР-морфометрии в работе обсуждается клинический случай МР-негативной формы фокальной кортикальной дисплазии.

Клиническое наблюдение

Девочка 12 лет. Дебют эпилепсии с 4 лет 11 мес. в виде приступов, развивающихся во время сна и проявляющихся расширением левого зрачка, дистонией в левой руке, покашливанием. Наследственность по эпилепсии не отягощена. На момент поступления в стационар приступы по 7–8 сек по типу висцеральной ауры (боли в животе), далее покраснения лица и напряжения в лицевой и периорбитальной мускулатуре слева, затем тонического напряжения в правой верхней конечности (вытягивает руку) в сочетании с флексией с хватательными автоматизмами в левой верхней конечности, а также падением тонуса в нижних конечностях. Частота приступов достигала 35 раз в сутки. Пациентка была осмотрена нейропсихологом, который установил трудности переработки кинестической информации, несформированность зрительно-пространственных функций на фоне недостаточности нейродинамических характеристик деятельности. Пациентке был выполнен суточный видео-ЭЭГ-мониторинг (ВЭМ), на котором была выявлена эпилептиформная активность в левой нижнелобно-центральной области F3-F7-C3 (рис. 1).

Для оценки структурных изменений вещества головного мозга пациентке выполнена МРТ по протоколу HARNESS, но типичных признаков ФКД не было выявлено (т. е. утолщения коры, нарушения перехода серого

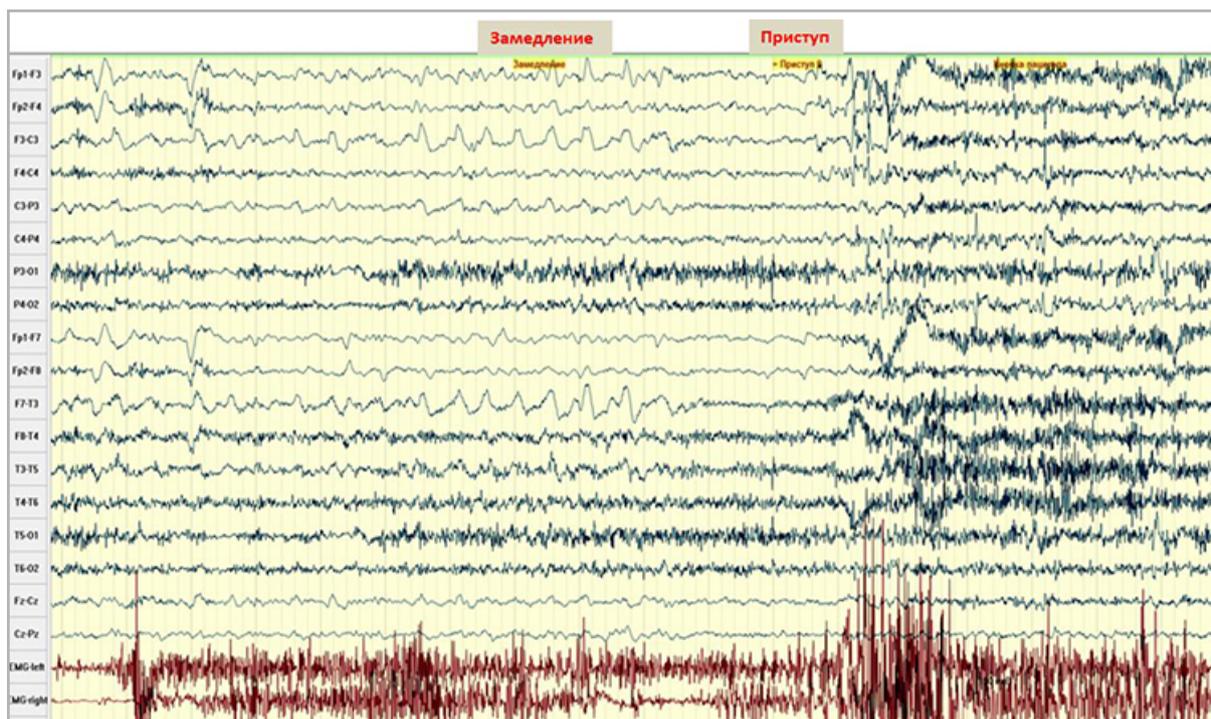


Рис. 1. ЭЭГ пациента. Продолженное ритмичное тета-замедление в левой нижнелобно-центральной области (F3-F7-C3). В структуре замедления регистрируется постоянная эпилептиформная активность в виде комплексов пик-, полипик-медленная волна

и белого вещества, а также трансмантального тяжа) (рис. 2).

В связи с тем, что ЭЭГ показывала достаточно обширную зону начала эпилептического приступа, а МРТ головного мозга не дала четких представлений о наличии структурных изменений, было принято решение о проведении МР-морфометрии.

Для проведения МР-морфометрии была взята импульсная последовательность FSPGR с изотропным вокселем $1,0 \times 1,0 \times 1,0 \text{ мм}^3$. Расчет морфометрических карт включал следующие шаги: постобработку МРТ, вычисление параметрических карт зон перехода серого-белого вещества, расчет толщины коры, автоматический поиск зон ФКД. В результате были получены z-карты по признакам утолщения коры и нарушения перехода серого и белого вещества. На z-картах были визуально обнаружены аномально яркие зоны в левой лобной доле по обоим признакам (рис. 3).

Для того чтобы определить вероятную локализацию и границы ФКД, мы дополнительно применили автоматический алгоритм МР-морфометрии с заданными параметрами: k — параметрический коэффициент, который был равен 2, и пороговый объем: программа оконтуривала только те яркие области z-карт, у которых объем был больше 50 мм^3 (рис. 4).

Таким образом, МР-морфометрия указывает на наличие двух признаков, характерных для структурных проявлений ФКД: нарушение перехода серого и белого вещества, а также утолщение коры на границе средней и нижней лобной извилины левой лобной доли. Аномально яркие зоны пересекаются между собой, что свидетельствует о большой вероятности ФКД в этой области.

Полученные данные были проанализированы эпилептологической группой, в которую входят нейрохирург, эпилептолог, нейропсихолог, нейрорентгенолог. Были определены границы зоны резек-

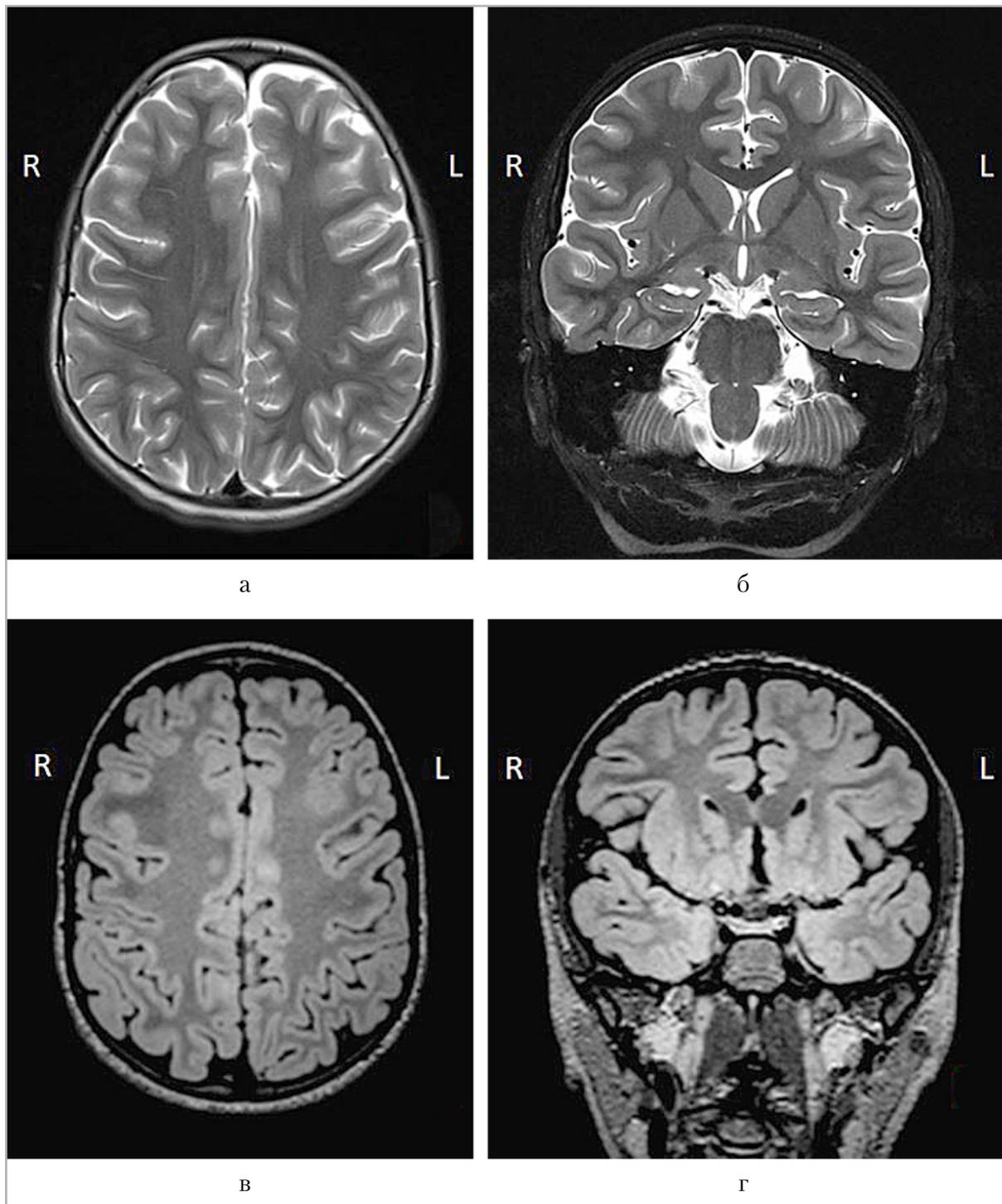


Рис. 2. МРТ пациентки 12 лет с ФКД левой лобной доли: *а* — структурное T2-ВИ в аксиальной проекции; *б* — в коронарной проекции; *в* — структурное T2-FLAIR в аксиальной проекции; *г* — в коронарной проекции. МРТ визуально оценена как негативная

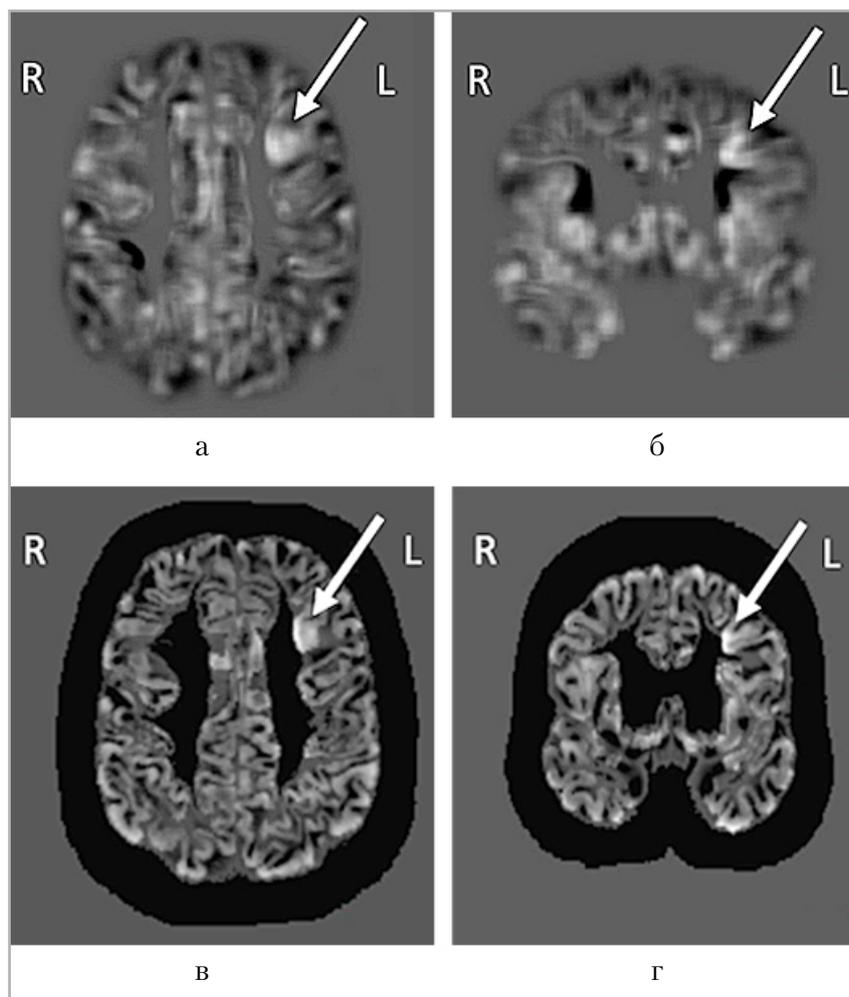


Рис. 3. Z-карты пациентки 12 лет с ФКД левой лобной доли: *а* – z-карты перехода серого и белого вещества в аксиальной проекции; *б* – z-карты перехода серого и белого вещества в коронарной проекции; *в* – z-карты толщины коры в аксиальной проекции; *г* – z-карты толщины коры в коронарной проекции. Белые стрелки указывают на anomalно яркую зону левой лобной доли, которая предположительно соответствует ФКД

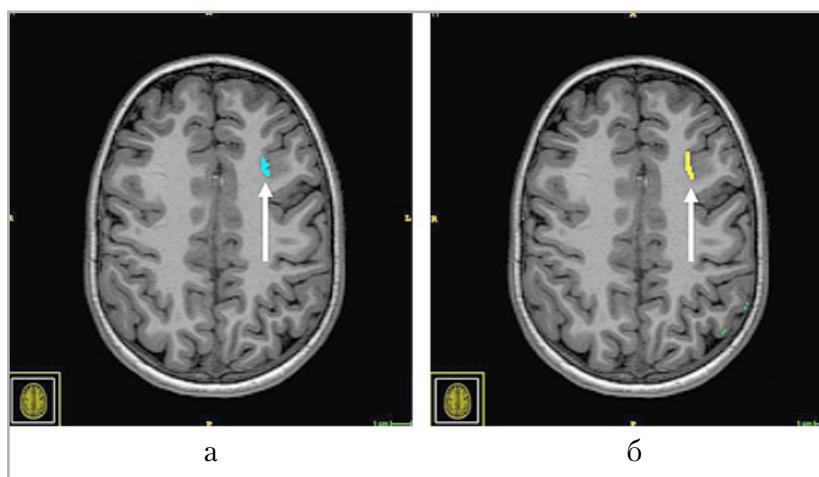


Рис. 4. Z-карты с совмещенными структурными изображениями пациентки 12 лет с ФКД левой лобной доли: *а* – по признаку перехода серого и белого вещества; *б* – по признаку утолщения коры. Белые стрелки указывают на наличие ФКД на границе средней и нижней лобной извилины левой лобной доли

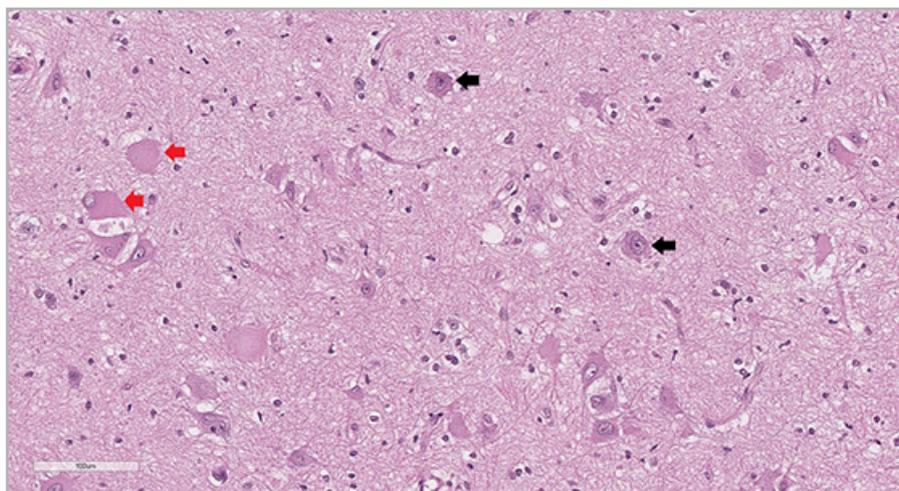


Рис. 5. Фокальная кортикальная дисплазия IIb типа. Черными стрелками отмечены дисморфичные нейроны, красными — баллонные клетки. Окраска гематоксилином и эозином, увеличение $\times 200$

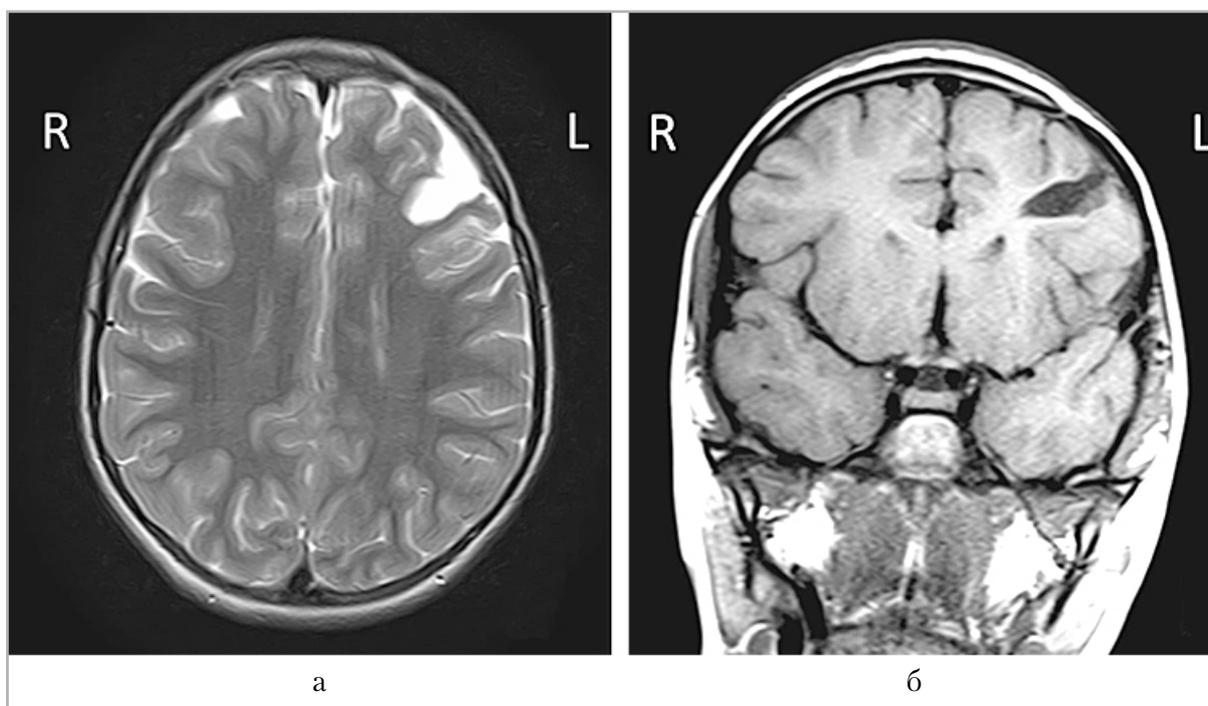


Рис. 6. МРТ головного мозга с послеоперационной ликворной полостью у пациентки с ФКД левой лобной доли (*а* — T2-ВИ; *б* — T1-ВИ)

ции, после чего пациентке была проведена резекция ФКД левой лобной доли с применением нейромониторинга электрокортикографии. Послеоперационный период протекал удовлетворительно. После операции приступов не отмечалось. Гистологический анализ подтвердил диагноз фокальной кортикальной дисплазии IIb типа (рис. 5).

На контрольном МРТ головного мозга отмечается локальная зона резекции мозга в левой лобной области, которая полностью соответствует зоне ФКД, выполненной на основе данных МР-морфометрии (рис. 6).

Через 3 месяца после операции пациентке были отменены все противоэпилептические препараты, без возоб-

новления эпилептических приступов. Исход по Engel Ia (стойкая ремиссия приступов в течение 5 лет).

Обсуждение

Успех хирургического лечения эпилепсии основан на точной локализации эпилептической зоны и определении ее границ. При МР-негативных формах чрезвычайно сложно локализовать эпилептологический очаг и отметить его границы у пациентов с ФКД, что, в свою очередь, усложняет определение объема хирургического лечения. Ранее выполненные исследования показывают, что при недостаточной радикальности хирургического лечения высок риск возобновления эпилептических приступов. Часто данные ЭЭГ позволяют определить зону начала эпилептического приступа, однако не могут определить границы при МР-негативных формах ФКД. МР-морфометрия может помочь выявить зону дисплазии по ее типичным признакам, таким как нарушение перехода серого и белого вещества и утолщение коры. Сочетание обоих этих признаков делает вероятность наличия дисплазии очень высокой. Кроме того, МР-морфометрия демонстрирует информативность в определении объема хирургического лечения. Можно отметить бесспорные плюсы МР-морфометрии, а именно отсутствие лучевой нагрузки на пациента, дополнительных временных затрат на сканировании пациента, что особенно важно в детском возрасте. В связи с тем что морфометрия относится к постпроцессинговым методикам, за основу можно брать любое структурное изображение. Разработанный нами автоматический алгоритм позволяет сразу акцентировать внимание на наиболее подозрительных аномальных зонах, что минимизирует вероятность пропуска потенциальной эпилептической зоны врачом-рентгенологом. Однако существует и ряд ограничений для приме-

нения морфометрии, одно из них — это прежде всего качество изображений. Большую важность имеет напряженность магнитного поля томографа, на котором было выполнено исходное изображение. На аппаратах напряженностью магнитного поля 3,0 Тл, выявляемость патологии на основе морфометрии выше, чем на аппаратах 1,5 Тл.

Выводы

МР-морфометрия демонстрирует высокую диагностическую значимость в выявлении МР-негативной формы ФКД и позволяет сузить зону предполагаемой локализации ФКД при сравнении с данными ЭЭГ, а также определить примерные границы поражения мозга.

Список источников

1. Kuzniecky R. I. Magnetic resonance imaging in developmental disorders of the cerebral cortex. *Epilepsia*. 1994;35:S44-S56. DOI: 10.1111/j.1528-1157.1994.tb05988.x
2. Guerrini R., Sicca F., Parmeggiani L. Epilepsy and malformations of the cerebral cortex. *Epileptic Disorders*. 2003;5(2): 9-26.
3. Schuele S. U., Lüders H. O. Intractable epilepsy: Management and therapeutic alternatives. *Lancet Neurol*. 2008;7:514-524. DOI: 10.1016/S1474-4422(08)70108-X
4. Ganji Z., Hakak M. A., Zamanpour S. A., Zare H. Automatic Detection of Focal Cortical Dysplasia Type II in MRI: Is the Application of Surface-Based Morphometry and Machine Learning Promising? *Front Hum Neurosci*. 2021;19: 15:608285. DOI: 10.3389/fnhum.2021.608285. PMID: 33679343; PMCID: PMC7933541.
5. Шевченко А. М., Погосбекян Э. Л., Баталов А. И., Шульц Е. И., Тюрина А. Н., Фадеева Л. М., Шевченко М. В., Власов П. А., Захарова Н. Е., Меликян А. Г., Пронин И. Н. Автоматический алгоритм магнитно-резонансной мор-

фометрии в диагностике фокальной кортикальной дисплазии // Радиология – практика. 2022;(1):63-76. <https://doi.org/10.52560/2713-0118-2022-1-63-76>

References

1. Kuzniecky R. I. Magnetic resonance imaging in developmental disorders of the cerebral cortex. *Epilepsia*. 1994;35:S44-S56. DOI: 10.1111/j.1528-1157.1994.tb05988.x
2. Guerrini R., Sicca F., Parmeggiani L. Epilepsy and malformations of the cerebral cortex. *Epileptic Disorders*. 2003;5(2):9-26.
3. Schuele S. U., Lüders H. O. Intractable epilepsy: Management and therapeutic alternatives. *Lancet Neurol*. 2008;7:514-524. DOI:10.1016/S1474-4422(08)70108-X
4. Ganji Z., Hakak M. A., Zamanpour S. A., Zare H. Automatic Detection of Focal Cortical Dysplasia Type II in MRI: Is the Application of Surface-Based Morphometry and Machine Learning Promising? *Front. Hum. Neurosci*. 2021;19:15:608285. DOI: 10.3389/fnhum.2021.608285. PMID: 33679343; PMCID: PMC7933541.
5. Shevchenko A. M., Pogosbekyan E. L., Batalov A. I., Shul'tz E. I., Tyurina A. N., Fadeeva L. M., Shevchenko M. V., Vlasov P. A., Zakharova N. E., Melikyan A. G., Pronin I. N. Automatic Algorithm of Magnetic Resonance Morphometry in the Diagnosis of Focal Cortical Dysplasia. *Radiology – Practice*. 2022;(1):63-76. (In Russ.) <https://doi.org/10.52560/2713-0118-2022-1-63-76>

Сведения об авторах / Information about the authors

Шевченко Александр Михайлович, доктор 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 (925) 488-83-60

Вклад автора: концепция и дизайн исследования, сбор и обработка материала, написание текста.

Shevchenko Alexander Mikhailovich, 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 (925) 488-83-60

Contribution of the author: the concept and design of the study, the collection and processing of the material, the writing of the text.

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: статистическая обработка.

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 (925) 488-83-60

Contribution of the author: statistical processing.

Власов Павел Александрович, доктор второго нейрохирургического отделения ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.
+7 (926) 586-47-23

Вклад автора: сбор и обработка материала.

Vlasov Pavel Alexandrovich, Doctor of the Second Neurosurgical Department of Federal State Autonomous Institution 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 (926) 586-47-23

Contribution of the author: the collection and processing of the material.

Агрба Сария Бадриевна, доктор второго нейрохирургического отделения ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

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

+7 (901) 427-92-91

Вклад автора: сбор и обработка материала.

Agrba Sariya Badrievna, Doctor of the Second Neurosurgical Department of Federal State Autonomous Institution 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 (901) 427-92-91

Contribution of the author: the collection and processing of the material.

Галстян Сюзанна Андраниковна, врач-патологоанатом ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

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

+7 (915) 002-76-36

Вклад автора: сбор и обработка материала.

Galstyan Syuzanna Andranikovna, pathologist of Federal State Autonomous Institution 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 (915) 002-76-36

Contribution of the author: the collection and processing of the material.

Баталов Артем Игоревич, научный сотрудник отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

12504, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская д. 16.

+7 (916) 066-20-50

Вклад автора: концепция и дизайн исследования.

Batalov Artem Igorevich, researcher of physicist of 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 (916) 066-20-50

Contribution of the author: the concept and design of the study.

Меликян Арменак Григорьевич, доктор медицинских наук, профессор, заведующий вторым нейрохирургическим отделением 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: редактирование.

Melikyan Armenak Grigorievich, Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Second Neurosurgical Department, 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
Contribution of the author: editing.

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: концепция и дизайн исследования, редактирование.

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. Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.
+7 499 972-85-55
Contribution of the author: the concept and design of the study, editing.

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 18.10.2023;
одобрена после рецензирования 08.12.2023;
принята к публикации 15.01.2024.

The article was submitted 18.10.2023;
approved after reviewing 08.12.2023;
accepted for publication 15.01.2024.

ВСЁ ДЛЯ РЕНТГЕНОДИАГНОСТИКИ



НПАО «АМИКО» — один из ведущих российских разработчиков и производителей медицинского рентгенодиагностического оборудования и аксессуаров для рентгенодиагностики.

1994
год
основания

6
производственных
площадок

25
стран
экспорта

30+
медицинских выставок
и научных конференций
в год

ISO
международные
стандарты
качества


поставки
во все регионы
России



amico.ru

Отчет о научно-практической конференции с международным участием «Лучевая диагностика: Смоленск – зима 2024»

Report on the Scientific Interregional Scientific and Practical Conference with International Participation «Radiation Diagnostics: Smolensk – Winter 2024»

26 января 2024 года состоялась научно-практическая конференция с международным участием «Лучевая диагностика: Смоленск — зима 2024». Программа была посвящена основным современным направлениям лучевой диагностики. Организаторами мероприятия выступили кафедра лучевой диагностики и лучевой терапии с курсом ДПО ФГБОУ ВО «Смоленский государственный медицинский университет» Минздрава РФ, Проблемная научно-исследовательская лаборатория «Диагностические исследования и малоинвазивные технологии» ФГБОУ ВО «Смоленский государственный медицинский университет» Минздрава РФ, кафедра лучевой диагностики ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России (г. Москва), кафедра рентгенологии и радиационной медицины ФГБОУ ВО «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова» Минздрава РФ (г. Санкт-Петербург), ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр хирургии имени А. В. Вишневского» Минздрава РФ, Министерство здравоохранения Смоленской области. Информационная поддержка осуществлялась обществом рентгенологов, радиологов и специалистов ультра-

звуковой диагностики города Москвы, Смоленским государственным медицинским университетом. Состав организационного комитета представляли: Бекезин Владимир Владимирович, доктор медицинских наук, профессор, проректор по научной работе ФГБОУ ВО «Смоленский государственный медицинский университет» Минздрава РФ; Борсуков Алексей Васильевич, доктор медицинских наук, профессор, директор Проблемной научно-исследовательской лаборатории «Диагностические исследования и малоинвазивные технологии» ФГБОУ ВО «Смоленский государственный медицинский университет» Минздрава РФ; Морозова Татьяна Геннадьевна, доктор медицинских наук, доцент, заведующая кафедрой лучевой диагностики и лучевой терапии с курсом ДПО ФГБОУ ВО «Смоленский государственный медицинский университет» Минздрава РФ; Лежнев Дмитрий Анатольевич, доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой лучевой диагностики ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава РФ; Степанова Юлия Александровна, доктор медицинских наук, профессор, ученый секретарь ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр хирургии имени А. В. Вишневского» Минздрава РФ, профессор кафедры

хирургии и хирургических технологий ФДПО ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава РФ; Сперанская Александра Анатольевна, доктор медицинских наук, профессор кафедры рентгенологии и радиационной медицины ФГБОУ ВО «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова» Минздрава РФ. В рамках конференции было проведено четыре секции: научный лекторий, секция устных докладов, секция постерных докладов, секция клинических случаев.

Все члены оргкомитета приняли участие в открытии заседания и проведении секций.

В секции № 1 «Научный лекторий» принял участие Громов Александр Игоревич, профессор, руководитель группы лучевых методов диагностики и лечения НИИ урологии и интервенционной радиологии им. Н. А. Лопаткина — филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, г. Москва. Лектор осветил тему «Радиологические стратификационные системы в урологии».

Секция № 2 «Устные доклады» проводилась всеми организаторами, что позволило параллельно вести совместное обсуждение.

В рамках конференции проводился конкурс молодых ученых в **секции № 3 «Постерные доклады»** и **секции № 4 «Клинические случаи»**. Председателем жюри являлся профессор Лежнев Д. А. Жюри конкурса: Степанова Ю. А., Громов А. И., Сперанская А. А., Багненко С. С., доктор медицинских наук, доцент, ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр онкологии имени Н. Н. Петрова» Минздрава РФ, заместитель директора, заведующий научным отделением диагностической и интервенционной радиологии (г. Санкт-Петербург); Муравьев А. А., кандидат медицинских наук, доцент, начальник отдела аспирантуры ФГБОУ ВО «Смоленский государственный ме-

дицинский университет» Минздрава РФ (г. Смоленск).

Среди участников были представители медицинского сообщества и коллеги из различных регионов России (Воронеж, Москва, Санкт-Петербург, Смоленск, Тверь, Иркутск). В конференции приняли участие также наши коллеги из Казахстана.

Победители секции клинических случаев

Молодые ученые

1-е место

Лаврентьев Е. Д., Гельт Т. Д. Клинический случай безжелтушного холеликтаза у беременной с множественными конкрементами желчевыводящих путей (г. Смоленск);

Топольник М. В., Ольхова Е. Б. Клинический случай перекрута крипторхированного яичка у ребенка (г. Москва).

2-е место

Щедрина К. А., Ольхова Е. Б. Клинический случай магнитных инородных тел ЖКТ у ребенка (г. Москва);

Старовойтова Е. А., Ковалев А. В. Клинический случай пациента амбулаторного звена с МР-признаками меланомы хориоидеи левой глазницы (г. Смоленск).

3-е место

Борзий А. В., Старовойтова Е. А., Морозова Т. Г. Клинический случай пациента с впервые установленной миеломной болезнью (г. Смоленск);

Очилов А. Р., Тимофеева А. В. Клинический случай компьютерной томографии при острой травме орбит у детей (г. Москва).

Студенты

1-е место

Мошуров И. П., Ольшанский М. С., Андреева О. В., Ряснянская Л. В. Клинический случай опыта диагностики и

лечения ятрогенной аневризмы почечных сосудов в онкологической практике (г. Воронеж).

2-е место

Андреева О. В., Панкова Е. А., Устинова Е. Ю., Коротких Н. В., Петецкая С. Д. Клинический случай многоузлового зоба как «диагноза — маски» при метастатическом раке орофарингеальной области (г. Воронеж).

3-е место

Захарова М. Л., Ковалев А. В. Клинический случай рака правой молочной железы (г. Смоленск).

Победители секции постерных докладов

Молодые ученые

1-е место

Скутарь А. И., Борсуков А. В. Стандартизация методик эластографии печени и трансторакальной эхокардиографии у пациентов с субклиническим течением сердечной недостаточности (г. Смоленск).

2-е место

Шкуратова Ю. Ю., Морозова Т. Г. Клиническое значение использования диффузионно-взвешенных изображений в диагностике паранефритов (г. Смоленск);

Тюрин С. М., Морозова Т. Г., Мишутина О. Л. Хронический генерализованный пародонтит при ревматоидном артрите: основные аспекты (г. Смоленск).

3-е место

Потапов К. В., Гельт Т. Д. Особенности поражения ЦНС у новорожденных по данным магнитно-резонансной томографии (г. Смоленск);

Гукова А. Д., Петровская В. В., Лубашев Я. А. Пути снижения радиационного воздействия при лучевой диагностике патологических состояний краниовертебрального перехода (г. Москва).

Студенты

1-е место

Соловьева Е. А., Серова А. В. Нейросонографические маркеры поражения центральной нервной системы у новорожденных от матерей с маловодием, манифестирующим в первой половине беременности (ранним маловодием) (г. Тверь).

2-е место

Колчина М. И., Пивиков В. В., Черняева Е. А., Юсуфов А. А. Особенности репаративной регенерации трубчатых костей в различных условиях (г. Тверь).

3-е место

Бутнару А. П., Черкасова И. А., Юсуфов А. А. Синдром травматической тряски ребенка и жестокого обращения с детьми по данным К. (г. Тверь);

Штукина А. Н., Юсуфов А. А., Штукина Е. В. Клинический случай инородного тела во внутричерепном пространстве с проникновением через правую глазницу (г. Тверь).

Отдельно ознакомиться с материалами конференции можно, перейдя [по ссылке](#) или отсканировав QR-код:



Научно-практическая конференция прошла на высоком научном и организационном уровне. Организаторы выражают благодарность всем участникам, отмечают актуальность представленных докладов, творческую и дружественную атмосферу. Еще раз всем большое спасибо! Всем добра! Работаем дальше!



Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Приволжский исследовательский медицинский университет»
Министерства здравоохранения Российской Федерации
(ФГБОУ ВО «ПИМУ» Минздрава России)



Научное общество молодых ученых и студентов ПИМУ

Уважаемые коллеги!

Приглашаем вас принять участие в
X Всероссийской научной конференции молодых
ученых и студентов с международным участием
«ВолгаМед», которая состоится **27–29 марта 2024 г.**
в г. Нижний Новгород в смешанном формате.

К участию приглашаются студенты,
ординаторы, аспиранты и молодые ученые вузов
в возрасте до 35 лет включительно.

Участие в конференции бесплатное.
Рабочие языки: русский и английский.

Регистрация для участия и приема тезисов
открыта до **7 марта 2024 года включительно**. Для
этого необходимо заполнить [форму подачи заявки](#).

Тезисы будут изданы в сборнике материалов
конференции в электронном виде
и зарегистрированы в системе
Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Формы участия в конференции:

- Публикация без выступления
- Выступление с публикацией
- Выступление без публикации
- Участие в качестве слушателя



X Всероссийская научно-практическая
конференция молодых ученых и
студентов с международным участием
«ВолгаМед»

27–29 марта 2024 года



Требования к тезисам:

- Заявленные работы должны содержать **собственное оригинальное** исследование.
- В тексте тезиса должны быть указаны подразделы: введение, цель работы, материал и методы, результаты, выводы (заключение).
- В соавторстве может быть не более пяти человек.
- Тезисы могут быть оформлены на русском и английском языках.
- Объем тезисов не должен превышать двух страниц печатного текста (Times New Roman, 14 пт; межстрочный интервал – множитель 1,2; поля – верхнее, нижнее, правое, левое по 2 см).
- Выравнивание текста – по ширине без переносов по всему тексту.
- Абзацный отступ – 1,25, и должен быть одинаковым по всему тексту.
- Иллюстрации, таблицы и формулы не принимаются.
- Список литературы не указывается.

Требования к оформлению «шапки» работы:

- **заголовок тезисов** печатается по центру строчными буквами, шрифт **полужирный** (14 пт). Точка в конце не ставится;
- следующая строка – перечисление авторов: ФИО автора (авторов) **курсивом, полужирным** (Имя и Отчество – инициалы, Фамилия – полностью, инициалы впереди фамилии) через запятую (14 пт);
- следующая строка по центру – полное официальное название организации – места работы или учебы (название подразделения, факультета, кафедры не нужно), город, страна (12 пт). Без курсива и полужирного;
- через 1 интервал набирается сам **текст работы** с необходимыми подразделами (названия подразделов печатаются **курсивом, полужирным**).



X Всероссийская научно-практическая
конференция молодых ученых и
студентов с международным участием
«ВолгаМед»

27–29 марта 2024 года



Пример:

**Роль мобильных генетических элементов в микроэволюции
метициллинрезистентного эпидемического штамма *Staphylococcus aureus* (MRSA),
принадлежащего к клональному комплексу CC8**

И.И. Иванов, А.М. Петров, П.Н. Степанов

ФГБОУ ВО «Приволжский исследовательский медицинский университет» Минздрава России,
г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Введение. CC8 – одна из доминирующих эпидемических линий MRSA, имеющих глобальное распространение...

Цель работы. Сравнительный анализ изолятов, выделенных в разное время и относящихся...

Материал и методы. Исследовали 2 группы клинических изолятов...

Результаты. Размер секвенированных геномов MRSA, включая внехромосомные...

Заключение. Особенностью микроэволюции представителей CC8 является...

По окончании приема тезисов все работы проверяются также на соответствие *следующим критериям:*

- актуальность;
- научная новизна;
- логичность и ясность изложения;
- оригинальность (работы, содержащие менее 70 процентов оригинальности, отклоняются проверяющей комиссией);
- орфографические и стилистические ошибки;
- соответствие выводов поставленной цели;
- теоретическая и практическая значимость работы;
- достоверность результатов.

Проверяющая комиссия оставляет за собой право отклонить работы, не соответствующие требованиям, без объяснения причин.

Просим соблюдать сроки регистрации участников и подачи тезисов. Это необходимо для формирования программы мероприятия и регистрации сборника тезисов в РИИЦ.



X Всероссийская научно-практическая
конференция молодых ученых и
студентов с международным участием
«ВолгаМед»

27-29 марта 2024 года



Планируется работа следующих секций:

1	Фундаментальные науки	А. Биомедицинские технологии, биохимия, биофизика Б. Нейрофизиология, нейрохимия, нейротехнологии В. Регенерация, адаптация, функциональная морфология и гомеостаз Г. Свободнорадикальная биомедицина, генетика, эпигенетика, молекулярная биология, «омик»-технологии (протеомика, геномика, метаболомика)
2	Внутренние болезни, дерматовенерология	А. Внутренние болезни Б. Дерматовенерология
3	Педиатрия	А. Детские болезни Б. Детская хирургия
4	Хирургические болезни	А. Акушерство и гинекология Б. Общая хирургия, сердечно-сосудистая хирургия В. Анестезиология и реаниматология Г. Травматология, ортопедия и нейрохирургия Д. Офтальмология
5	Нейронауки	А. Психология, психиатрия Б. Клиническая неврология
6	Здравоохранение	А. Социально-гигиенические, экологические и экономические проблемы охраны и укрепления здоровья населения Б. Медицинское право, экономика и менеджмент в здравоохранении
7	Телемедицина	А. Информационные технологии в здравоохранении и медицинском образовании Б. Медицинская кибернетика, биоинформатика
8	Микробиология и иммунология, эпидемиология	А. Микробиология, инфекционная и неинфекционная иммунология Б. Эпидемиология
9	Онкология, лучевая диагностика	А. Онкология Б. Лучевая диагностика, лучевая терапия
10	Стоматология	А. Терапевтическая стоматология, стоматология детского возраста и профилактика Б. Хирургическая стоматология и челюстно-лицевая хирургия В. Ортопедическая стоматология Г. Ортогонтия
11	Фармация и фармакология	А. Технология фармацевтических препаратов и лекарственных форм, фармакогнозия и фармацевтическая химия Б. Организация фармацевтического дела, вопросы общей и клинической фармакологии

Контактные данные:

E-mail: nomus.pimu@yandex.ru

Официальное сообщество ВКонтакте: https://vk.com/pimu_science

Сайт: <https://nomus.pimunn.ru>

УЧРЕДИТЕЛИ ЖУРНАЛА

© ООО «Центральный научно-исследовательский институт лучевой диагностики» (ЦНИИЛД), Москва

© НПАО «АМИКО», Москва

Свидетельство о регистрации
средства массовой информации
ЭЛ № ФС77-80253 от 19 января 2021 г.
выдано Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)
Министерства цифрового развития, связи
и массовых коммуникаций РФ

АДРЕС ИЗДАТЕЛЬСТВА

109431, г. Москва, ул. Авиаконструктора Миля, д. 15/1, помещение XI, комн. 1–12