



ВОЗМОЖНОСТИ РАДИОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНЫХ ТОМОГРАММ В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКЕ ПЕРВИЧНЫХ ВНЕМОЗГОВЫХ ОПУХОЛЕЙ

Е. Н. Суровцев^{1,2✉}, А. В. Капишников¹, А. В. Колсанов¹

1. Самарский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Самара, Российская Федерация

2. Лечебно-диагностический центр Международного института биологических систем – Тольятти, г. Тольятти, Российская Федерация

✉ evgeniisurovcev@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Сравнить возможности магнитно-резонансной томографии (МРТ) в дифференциальной диагностике трех типов первичных внеомозговых опухолей (ПВО) (доброкачественных и злокачественных менингиом, невриноом) на основе стандартной семиотики и радиомических признаков.

Пациенты и методы. Ретроспективное исследование включало 66 пациентов с первичными внеомозговыми опухолями, которые были разделены на две группы: обучающую (39 пациентов) и валидационную (27 пациентов). МРТ была выполнена всем пациентам до хирургического лечения. Для сравнения возможностей дифференциальной диагностики на основе признаков семиотики и радиомических параметров использовался единый метод статистического моделирования – дискриминантный анализ.

Результаты. Признаки МРТ-семиотики опухолей не позволяли провести достоверную дифференциацию между доброкачественными и злокачественными менингиомами. Ряд радиомических параметров достоверно различались для всех типов опухолей (невриноом, доброкачественных и злокачественных менингиом). Моделирование на основе дискриминантного анализа продемонстрировало, что радиомические признаки могут быть использованы для дифференциальной диагностики ПВО. Площадь под ROC-кривой модели радиомики составила 0,86, что превосходит результат модели на основе признаков семиотики (AUC 0,78).

Заключение. Высокая диагностическая эффективность классификации ПВО радиомической моделью свидетельствуют о целесообразности продолжения исследований дифференциальной диагностики ПВО с использованием гистограммных и текстовых параметров МРТ-изображений.

Ключевые слова:

первичные внеомозговые опухоли, магнитно-резонансная томография, менингиомы, радиомика, текстурный анализ

Для цитирования: Суровцев Е. Н., Капишников А. В., Колсанов А. В. Возможности радиомического анализа магнитно-резонансных томограмм в дифференциальной диагностике первичных внеомозговых опухолей. Исследования и практика в медицине. 2023; 10(2): 50-61. <https://doi.org/10.17709/2410-1893-2023-10-2-5>, EDN: ZIVOSK

Для корреспонденции: Суровцев Евгений Николаевич – главный врач ООО «Лечебно-диагностический центр Международного института биологических систем – Тольятти», г. Тольятти, Российская Федерация; ассистент кафедры лучевой диагностики и лучевой терапии, ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Самара, Российская Федерация
Адрес: 445009, г. Тольятти, Российская Федерация. ул. Октябрьская, 68
E-mail: evgeniisurovcev@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8236-833X>, SPIN: 5252-5661, AuthorID: 1032101, Scopus Author ID: 57224906215

Соблюдение этических стандартов: в работе соблюдались этические принципы, предьявляемые Хельсинкской декларацией Всемирной медицинской ассоциации (World Medical Association Declaration of Helsinki, 1964, ред. 2013). Исследование одобрено Комитетом по биоэтике ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский университет» (выписка из протокола заседания №203 от 13.11.2019). Информированное согласие получено от всех участников исследования.

Финансирование: финансирование данной работы не проводилось.

Конфликт интересов: все авторы заявляют об отсутствии явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Статья поступила в редакцию 30.01.2023; одобрена после рецензирования 20.02.2023; принята к публикации 23.05.2023.

COMPARATIVE EVALUATION OF THE POSSIBILITIES OF RADIOMIC ANALYSIS OF MAGNETIC RESONANCE IMAGING IN THE DIFFERENTIAL DIAGNOSTICS OF PRIMARY EXTRA-AXIAL INTRACRANIAL TUMORS

E. N. Surovcev^{1,2✉}, A. V. Kapishnikov¹, A. V. Kolsanov¹

1. Samara State Medical University, Samara, Russian Federation

2. Treatment and Diagnostic Center of the International Institute of Biological Systems – Tolyatti, Tolyatti, Russian Federation

✉ evgeniisurovcev@mail.ru

Abstract

Purpose of the study. Comparing magnetic resonance imaging (MRI) abilities in differential diagnostic of three types of primary extra-axial brain tumors (benign and malignant meningiomas, and neuromas) based on standard semiotics and radiomic features.

Patients and methods. Retrospective research included 66 patients with primary extra-axial tumors who were divided into two groups: the instructional (39 patients) and the valid (27 patients). MRI was used towards all patients before surgery. The one method of statistical modeling – discriminant analysis – was used to compare the abilities of differential diagnostic based on semiotic features and radiomic parameters.

Results. The features of tumor semiotics MRI didn't allow to differentiate effectively benign and malignant meningiomas. Several parameters were certainly varied for all those tumor types (neuromas, benign and malignant meningiomas). The modelling based on the discriminant analysis demonstrated that radiomic features can be used for primary extra-axial tumors differential diagnostic. The area of the radiomic model ROC-curve took 0.86 which exceeds the result of the model based on semiotic features (AUC 0.78).

Conclusion. The best results of the tumors classification by radiomic model demonstrate expediency to continue research the primary extra-axial tumors differential diagnostic with support of histogram and textural parameters of MRI imaging.

Keywords:

primary extra-axial intracranial tumors, magnetic resonance imaging, meningiomas, radiomics, texture analysis

For citation: Surovcev E. N., Kapishnikov A. V., Kolsanov A. V. Comparative evaluation of the possibilities of radiomic analysis of magnetic resonance imaging in the differential diagnostics of primary extra-axial intracranial tumors. Research and Practical Medicine Journal (Issled. prakt. med.). 2023; 10(2): 50–61. (In Russ.). <https://doi.org/10.17709/2410-1893-2023-10-2-5>, EDN: ZIVOSK

For correspondence: Evgeniy N. Surovcev – Chief Physician, Medical and Diagnostic Center of the Togliatti International Institute of Biological Systems, Togliatti, Russian Federation; Assistant at the Department of Radiation Diagnostics and Radiation Therapy, Samara State Medical University, Samara, Russian Federation
Address: 68 Oktyabrskaya str., Tolyatti, 445009, Russian Federation
E-mail: evgeniisurovcev@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8236-833X>, SPIN: 5252-5661, AuthorID: 1032101, Scopus Author ID: 57224906215

Compliance with ethical standards: the study followed the ethical principles set forth by the World Medical Association Declaration of Helsinki, 1964, ed. 2013. The study was approved by the Bioethics Committee of the Samara State Medical University (extract from the protocol of the meeting No. 203 dated 11/23/2019). Informed consent was obtained from all participants of the study.

Funding: this work was not funded.

Conflict of interest: the authors declare that there are no obvious and potential conflicts of interest associated with the publication of this article.

The article was submitted 30.01.2023; approved after reviewing 20.02.2023; accepted for publication 23.05.2023.

АКТУАЛЬНОСТЬ

Радиомика определила новые возможности неинвазивной предоперационной диагностики опухолей. Использование радиомических (текстурных и гистограммных) параметров, описывающих особенности опухоли, может повысить точность дифференциальной диагностики [1]. В нейроонкологии радиомика вносит значительный вклад в улучшение диагностики и лечения пациентов с опухолями головного мозга.

В то же время большинство исследований возможностей радиомики в нейроонкологии посвящено глиальным опухолям, которые составляют 12,5 % от всех опухолей центральной нервной системы, распространенность же первичных вне мозговых опухолей (ПВО) оценивается более чем в 40 % [2], однако это направление использования радиомических признаков изучено заметно меньше.

Первичные вне мозговые опухоли (ПВО) – гетерогенная группа, включающая как доброкачественные, так и злокачественные образования черепных не-

рвов и мозговых оболочек. Магнитно-резонансная томография (МРТ) является оптимальным методом их визуализации [3]. Возможности дифференциальной диагностики ПВО на основании визуального анализа МРТ-картины детально изучены, однако надежное разграничение этих новообразований на основе МР-семиотики нередко затруднено [4, 5]. Визуальная оценка данных МРТ, по сведениям литературных источников, обладает высокой чувствительностью для доброкачественных опухолей, при этом чувствительность для определения злокачественных вариантов ПВО существенно ниже [6, 7].

Анализ литературных данных показывает, что увеличение диагностического потенциала МРТ при ПВО требует расширения сферы применения радиомики при различных типах новообразований этой группы, применения автоматической сегментации, стандартизирующую обработку МРТ, извлечения радиомических признаков из полного спектра взвешенностей МРТ-изображений, а также обязательной верификации диагностических моделей с помощью независимой валидационной выборки [8, 9].

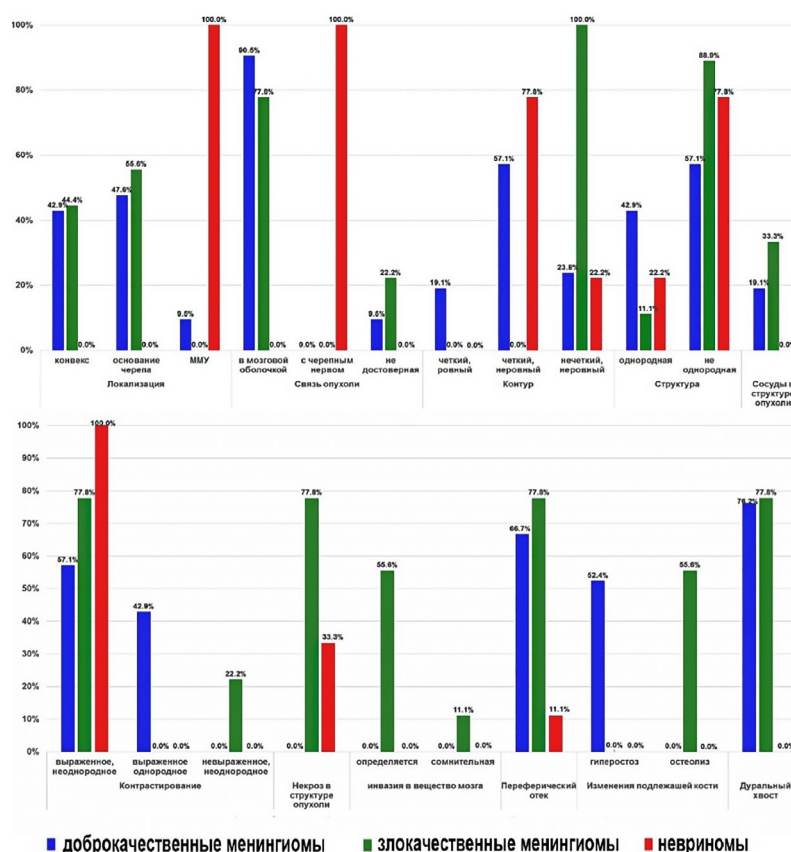


Рис. 1. Распределение качественных (визуальных) признаков МРТ-семиотики ПВО у пациентов обучающей группы: а – локализация, связь с окружающими тканями, контуры, структура, сосуды опухоли; б – контрастирование, некроз, инвазия, изменения подлежащей кости, дуральный хвост.

Fig. 1. Distribution of qualitative (visual) signs of MRI-semiotics of extra-axial tumors of the training group: а – localization, connection, margin, structure, tumor's vessels; б – contrasting, necrosis, invasion, changes in the underlying bone, dural tail.

Цель исследования: сравнительная оценка возможностей МРТ в дифференциальной диагностике трех типов ПВО (доброкачественных и злокачественных менингиом, невриноом) на основе стандартной семиотики и радиомических признаков.

ПАЦИЕНТЫ И МЕТОДЫ

Ретроспективное исследование включало 66 пациентов с ПВО, которые были разделены методом рандомизации на две группы: обучающую и валидационную. Валидационная проверка математической модели на независимом наборе данных необходима для проверки ее работоспособности [10].

Обучающую группу составили 39 пациентов (шесть мужчин и 33 женщины) в возрасте от 33 до 62 лет (медиана возраста – 58 лет). Валидационная группа состояла из 27 пациентов (трое мужчин и 24 женщины) в возрасте от 29 до 79 лет (медиана возраста – 59 лет). Референтным тестом являлось гистологическое исследование операционного материала. В обучающей группе доброкачественные Grade 1 менингиомы (*Мд*) были диагностированы у 21 пациента, злокачественные Grade 2, 3 менингиомы (*Мз*) – в девяти случаях, прочие девять образований составили невриномы (*Н*). Структура выявленных опухолей в валидационной группе следующая: *Мд* – 15 пациентов, *Мз* – 6 пациентов, *Н* – 6 пациентов.

МРТ с применением внутривенного контрастирования (0,1 ммоль/кг) на томографе с индукцией магнитного поля 1,5Т была выполнена всем пациентам до хирургического лечения. Протокол сканирования включал T2-взвешенные изображения (ВИ), T1-ВИ, FLAIR и DWI (с последующим построением ADC-карт). После контрастирования проводилось сканирование

с использованием 3D-последовательности с получением T1-ВИ (T1 CE).

Исследование состояло в оценке возможностей двух подходов к дифференциальной диагностике: на основе признаков МРТ-семиотики опухолей и использования радиомических (гистограммных и текстурных) признаков.

Оценка МРТ-семиотики опухолей и заключение о предполагаемом типе ПВО осуществлялись независимо тремя рентгенологами (опыт работы более 10 лет). В случаях разногласий итоговое заключение принималось на основе консенсуса специалистов. Оценивались как качественные, так и количественные признаки семиотики. Качественными признаками являлись: локализация, форма, контур, структура, наличие петрификации, сосудов, кровоизлияний, кист и некроза в структуре опухоли и перитуморальных кист, характер контрастирования, признаки инвазии в вещество мозга и перифокального отека, наличие симптома «дурального хвоста» и изменений подлежащей кости. Среди количественных признаков МРТ-семиотики специалистами оценивались: площадь и объем опухоли, интенсивность МР-сигнала для каждого типа взвешенности.

Автоматическая сегментация опухолей на МР-томограммах проводилась с использованием сверточной нейронной сети [11]. Выделение радиомических признаков T2-ВИ, T1-ВИ, FLAIR, ADC и T1 CE изображений осуществлялось с применением программы MaZda версия 4.6 [12]. Вычислялись 9 гистограммных и 270 текстурных признаков. Для цифрового анализа предварительно выполнялась нормализация яркости изображений в диапазоне $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$, где μ – среднее значение уровня серого, а σ – стандартное отклонение.

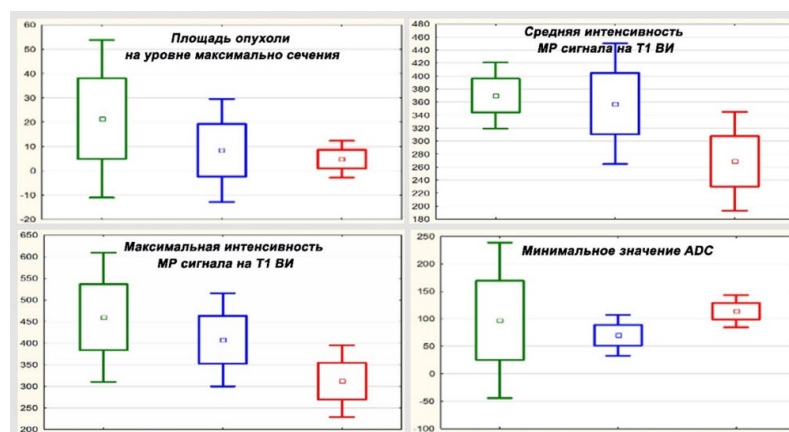


Рис. 2. Количественные характеристики МРТ-семиотики ПВО в обучающей группе.

Зеленая диаграмма – *Мз*, синяя – *Мд*, красная – *Н*. Точки – среднее значение; прямоугольники – диапазон $\pm 1,0$ SD; сотрезки – диапазон $\pm 1,96$ SD.

Fig. 2. Quantitative characteristics of MRI-semiotics of extra-axial tumors of the training group. Green diagram – malignant meningiomas, blue – benign meningiomas, red – neuromas. Points – average value; rectangles – range ± 1.0 SD; cutoffs – range ± 1.96 SD.

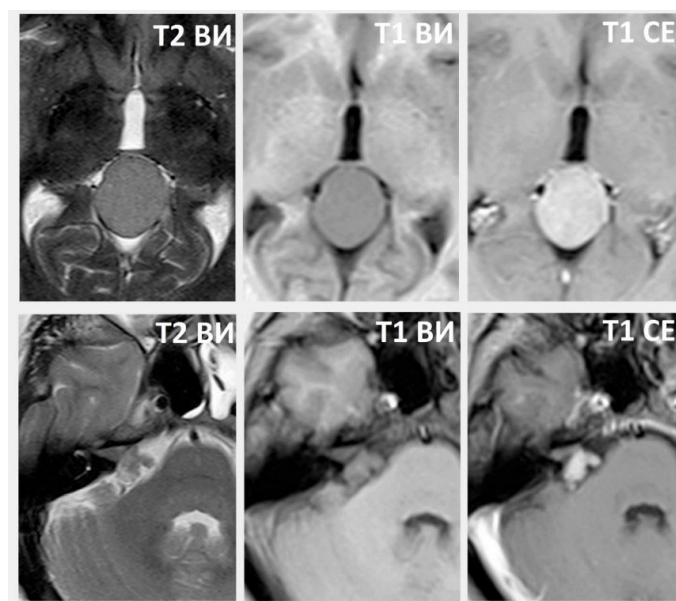


Рис. 3. Примеры ошибочной классификации рентгенологами опухолей на основе МРТ-семиотики.

Злокачественная менингиома (верхний ряд) имеет признаки, типичные для доброкачественных опухолей: однородная структура, отсутствие периферического отека, однородное контрастирование. Невринома (нижний ряд) отличается наличием нетипичных признаков: однородная структура, равномерное повышение МР-сигнала после контрастирования, асимметричное относительно внутреннего слухового прохода положение, широкое прилегание к твердой мозговой оболочке.

Fig. 3. Examples of tumors classification errors by radiologists.

Malignant meningioma (upper) has features typical of benign tumors: homogeneous structure, absence of peripheral edema, homogeneous contrast enhancement. Neurinoma (lower) has atypical features: a homogeneous structure, homogeneous contrast enhancement, an asymmetric position relative to the internal auditory canal, a wide adherence to the dura mater.

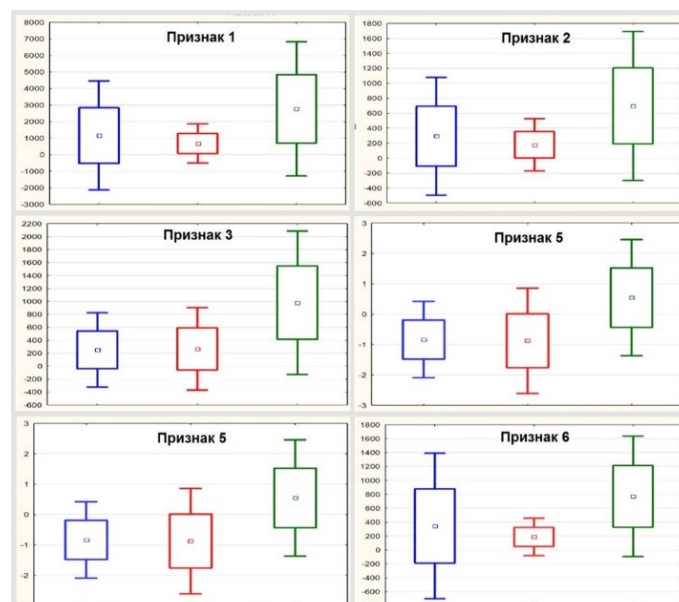


Рис. 4. Распределение значений радиомических (гистограммных и текстурных) признаков МРТ изображений.

Синяя диаграмма – Мд, красная – Н, зеленая – Мз.

Неоднородность уровня серого Т2-ВИ (признак 1); неоднородность длин серий Т2-ВИ (признак 2); неоднородности длин серий Т1-ВИ (признак 3); энергия вейвлета Т1-ВИ (признак 4); асимметрия гистограммы Т1 СЕ (признак 5); неоднородность длин серий Т1 СЕ (признак 6). Точки – среднее значение; прямоугольники – $\pm 1,0$ SD, отрезки $\pm 1,96$ SD.

Fig. 4. Distribution of values of radiomic (histogram and texture) features of MRI images.

Green diagram – malignant meningiomas, blue – benign meningiomas, red – neuromas.

Grey level nonuniformity T2-WI (feature 1); run length nonuniformity T2-WI (feature 2); run length nonuniformity T1-WI (feature 3); wavelet energy T1-WI (feature 4); histogram's skewness T1 CE (feature 5); run length nonuniformity T1 CE (feature 6).

Points – average value; rectangles – range ± 1.0 SD; cutoffs – range ± 1.96 SD.

Для оценки совокупного вклада множественных признаков в разделение опухолей использовался дискриминантный анализ. Данные обучающей группы были использованы для построения двух статистических моделей: на основе признаков МРТ семиотики и на основе радиомических (гистограммных, текстурных) параметров. Применение в обоих случаях единого метода статистического моделирования обусловлено необходимостью объективного сравнения диагностической эффективности двух групп признаков [10]. Предварительный отбор параметров осуществлялся с помощью вариационного анализа (тесты Краскела–Уоллиса и Пирсена). Валидационная проверка полученных моделей классификации проведена на основе расчета характеристик тестов – чувствительности (Sn), специфичности (Sp) и ROC-анализа с определением площади под характеристической кривой (AUC).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ распределения качественных (визуальных) особенностей МРТ-семиотики ПВО в обучающей группе продемонстрировал наличие ряда признаков, достоверно ($p < 0,05$) отличающих определенный тип опухоли (рис. 1). Визуальная оценка МР-изображений в большинстве случаев позволяет различить менингиомы и невриномы, но дифференцировать доброкачественные и злокачественные менингиомы на ее основании невозможно. Важными дифференциально-диагностическими признаками злокачественных менингиом являются инвазия в вещество головного мозга и остеолит подлежащей кости, которые встречались примерно в половине (55,6 %) наших наблюдений. Среди прочих типичных проявлений злокачественности менингиом можно отметить нечеткость их контуров, неоднородность структуры и не-

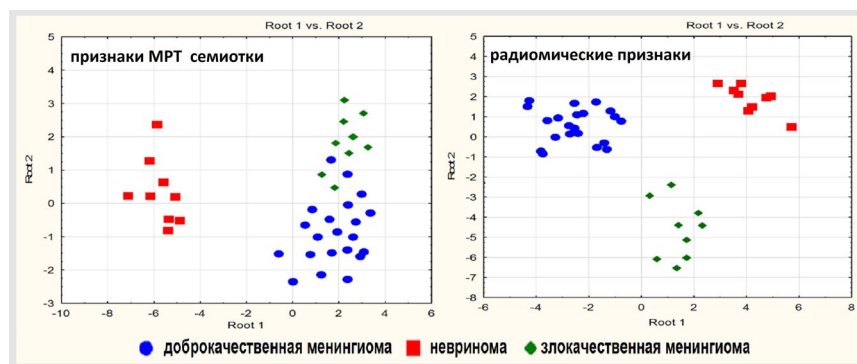


Рис. 5. Дифференцировка типов ПВО в пространстве признаков дискриминантных моделей (диаграммы рассеивания канонических значений в обучающей группе).

Fig. 5. Differentiation of types of extra-axial tumors in the space of features of discriminant models (scatterplots of canonical values in the training group).

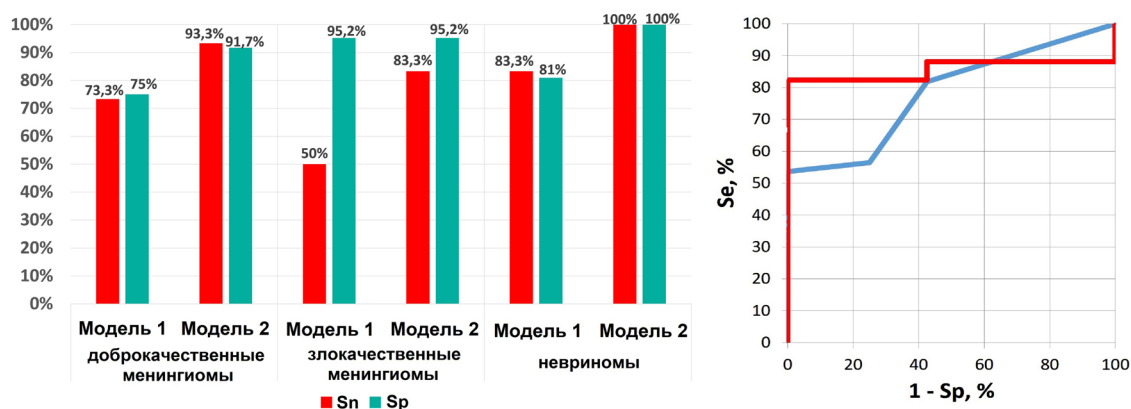


Рис. 6. Операционные характеристики и ROC-кривые классификации опухолей пациентов валидационной группы на основе признаков МРТ-семиотики (Модель 1 – голубая кривая) и радиомических признаков (Модель 2 – красная кривая).

Fig. 6. The bar charts of the operational characteristics and ROC curves of the classification of the extra-axial tumors of the valid group by the models based on semiologic features (Model 1 – blue curve), and on histograms, textural parameters (Model 2 – red curve).

Таблица. Коэффициенты и переменные функции классификации дискриминантной модели на основе радиомических признаков для дифференциальной диагностики доброкачественных и злокачественных менингиом, невриноом
Table. Classification function's coefficients and variables of the of the discriminant model's based on radiomic features for the differential diagnosis of benign and malignant meningiomas, neurinomas

Переменные / Values				Коэффициенты / Coefficient		
ВИ / WI	Название / Name	Обозначение в программе MaZda / Designation in the MaZda program	Обозначение / Designation	Тип опухоли / Tumor type	Обозначение / Designation	Значение / Value
–	Константа / Contrast	–	–	$M\partial$	A	–153641
				$Mз$	A	–146129
				H	A	166594
T_2	Сумма квадратов / Summary of squares	S(1,0) SumOfSqs	P_1	$M\partial$	k_1	–61786
				$Mз$		–146129
				H		–166594
	Сумма квадратов / Summary of squares	S(5, –5) SumOfSqs	P_2	$M\partial$	k_2	8518
				$Mз$		8310
				H		8946
	Сумма квадратов / Summary of squares	S(1,0) SumVarnс	P_3	$M\partial$	k_3	4144
				$Mз$		4036
				H		4332
	Сумма энтропии / Entropy summary	S(1, –1) SumEntrp	P_4	$M\partial$	k_4	460974
				$Mз$		449728
				H		480528
	Сумма средних / Average summary	S(0,5) SumAverg	P_5	$M\partial$	k_5	–5187
				$Mз$		–5085
				H		–5444
	Неоднородность уровня серого / Gray level heterogeneity	Vertl GLevNonU	P_6	$M\partial$	k_6	–5
				$Mз$		–4
				H		–5
	Энергия вейвлета / The energy of the wavelet	WavEn LH_s-3	P_7	$M\partial$	k_7	26
				$Mз$		26
				H		27
T_1	Разность энтропии / Entropy difference	S(2, –2) DifEntrp	P_8	$M\partial$	k_8	5647
				$Mз$		5304
				H		5623
	Обратный разностный момент / Inverse difference moment	S(5,0) InvDfMom	P_9	$M\partial$	k_9	–11028
				$Mз$		–10480
				H		–11018
	Энергия вейвлета / The energy of the wavelet	WavEn HH_s-4	P_{10}	$M\partial$	k_{10}	–23
				$Mз$		–22
				H		–24

Таблица. Коэффициенты и переменные функции классификации дискриминантной модели на основе радиомических признаков для дифференциальной диагностики доброкачественных и злокачественных менингиом, невриноом (окончание)
Table. Classification function's coefficients and variables of the of the discriminant model's based on radiomic features for the differential diagnosis of benign and malignant meningiomas, neurinomas (ending)

Переменные / Values				Коэффициенты / Coefficient		
ВИ / WI	Название / Name	Обозначение в программе MaZda / Designation in the MaZda program	Обозначение / Designation	Тип опухоли / Tumor type	Обозначение / Designation	Значение / Value
FLAIR	Энергия вейвлета / The energy of the wavelet	WavEn LH_s-2	P_{11}	<i>Мд</i>	k_{11}	8
				<i>Мз</i>		8
				<i>Н</i>		9
ADC	Сумма дисперсии / The amount of variance	S(0,3) SumVarnс	P_{12}	<i>Мд</i>	k_{12}	2052
				<i>Мз</i>		2004
				<i>Н</i>		2004
	Неоднородность длин серий / Heterogeneity of series lengths	HorzI RLNonUni	P_{13}	<i>Мд</i>	k_{13}	1
				<i>Мз</i>		1
				<i>Н</i>		0
T1 CE	Дисперсия гистограммы / Histogram variance	Variance	P_{14}	<i>Мд</i>	k_{14}	8
				<i>Мз</i>		7
				<i>Н</i>		8
	Асимметрия гистограммы / Histogram skewness	Skewness	P_{15}	<i>Мд</i>	k_{15}	6117
				<i>Мз</i>		5976
				<i>Н</i>		6373

однородное контрастирование. Однако последние признаки не были строго специфичны и наблюдались как при доброкачественных менингиомах, так и при невриномах.

Среди количественных параметров МР-семиотики не было выявлено параметра, позволяющего достоверно дифференцировать одновременно все три типа изученных нами ПВО (рис. 2). В то же время некоторые из них достоверно ($p < 0,05$) отличались при парном сравнении: у доброкачественных и злокачественных опухолей, а также у невриноом и менингиом. Злокачественные менингиомы имеют больший размер по сравнению с *Мд* невриномами. Для менингиом (как доброкачественных, так и злокачественных) была характерна более высокая интенсивность МР-сигнала на T1-ВИ и более низкие значения коэффициента диффузии по сравнению с невриномами. Яркие характеристики изображений не позволяли дифференцировать *Мд* и *Мз*.

Трудность дифференциальной диагностики ПВО на основании признаков стандартной МРТ-семиотики доказывает, что при независимой оценке 16

(24,2 %) опухолей были неверно классифицированы экспертами. В большинстве из них (в 12 из 16 случаев, 75 %) *Мд* были отнесены к *Мз*, в остальных случаях возникли ошибки при дифференциации невриноом и менингиом. Пример ошибочной дифференциальной диагностики представлен на рисунке 3.

Анализ радиомических признаков МР-изображений выявил шесть параметров, достоверно ($p < 0,05$) отличающих прогностически неблагоприятные злокачественные менингиомы от доброкачественных опухолей – менингиом Grade 1 и невриноом (рис. 4).

В разделение между *Мд* и *Н* вносили вклад следующие радиомические параметры: пять признаков матрицы взаимодействий и энергия вейвлета для T2-ВИ, два признака матрицы взаимодействий и энергия вейвлета для T1-ВИ, энергия вейвлета FLAIR-изображений, сумма дисперсий и неоднородность длин серий карт измеряемого коэффициента диффузии и дисперсия гистограммы T1 CE.

Для интегральной оценки дифференциально-диагностических возможностей МР-визуализации был применен многомерный дискриминантный анализ.

Совокупность признаков семиотики, а также текстурные и гистограммные параметры, достоверно отличавшиеся для различных опухолей, были использованы для построения дискриминантных моделей: Модель 1 – на основе признаков МРТ-семиотики, Модель 2 – на основе радиомических признаков.

В Модель 1 вошли: средняя интенсивность МР сигнала на T1-ВИ, минимальное значение измеряемого коэффициента диффузии, объем опухоли, наличие зон некроза и гиперостоза/остеолиза подлежащей кости. В Модель 2 – 15 радиомических признаков.

Диаграммы рассеивания канонических значений наглядно показывают возможности дискриминантных моделей в дифференцировке опухолей (рис. 5). Отмечается пересечение пространств признаков Мд и Мз при использовании модели на признаках семиотики и полное разделение опухолей в радиомической модели, что свидетельствует о лучшей дискриминации образований радиомической моделью. Это подтверждается и тем, что общая λ Уилкса Модели 1 составила 0,027, что существенно выше значения общей лямбды Уилкса Модели 2 (0,018). Меньшему значению общей λ Уилкса соответствует лучшее

разделение групп дискриминантной моделью [13].

Валидационная проверка дискриминантных моделей, проведенная путем сравнения операционных характеристик и площади под ROC-кривыми (рис. 6), показала лучшую классификацию опухолей моделью на основе радиомических признаков, особенно для злокачественных менингиом.

Модель на основе признаков гистограммы и текстуры верно классифицировала 83,3 % Мз валидационной группы, что значительно превосходит возможности модели на основе признаков семиотики, которая верно классифицировала лишь 50 % таких опухолей. Специфичность обеих моделей для дифференциальной диагностики злокачественных менингиом была одинаковой. Чувствительность и специфичность радиомной модели так же были выше (на 16,7–20 %) для классификации доброкачественных опухолей (менингиом и неврином).

Площадь под ROC-кривой для радиомной модели составила 0,86, что существенно превосходило результат модели на основе признаков семиотики, ее AUC составила 0,78.

Для применения радиомической модели исполь-

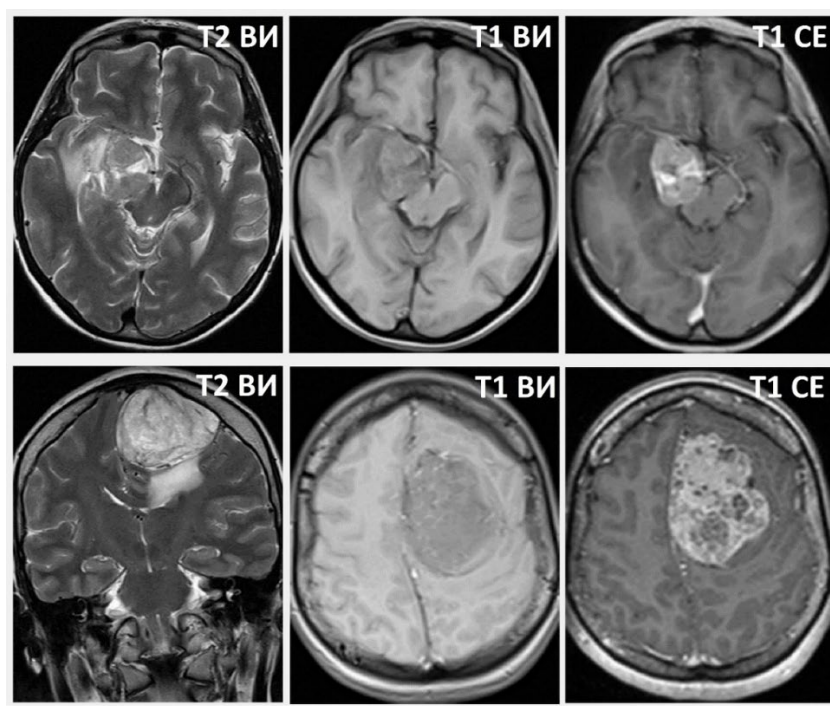


Рис. 7. Клинические примеры ошибочной классификации опухолей из валидационной группы моделью на основе признаков МРТ-семиотики, которые были правильно дифференцированы моделью на основе радиомических признаков.

Первое образование (верхний ряд) по данным гистологического исследования является доброкачественной менингиомой, второе (нижний ряд) – злокачественной менингиомой. Обе опухоли характеризуются схожей визуальной МРТ-семиотикой: неоднородностью структуры, неравномерным контрастированием, наличием отека по периферии.

Fig. 7. Examples of tumors classification errors by the model based on MRI semiotic features, which were correctly differentiated by the model based on radiomic features (the tumors from the valid group). The first tumor (upper) is histologically verified benign meningioma, the second (lower) is malignant meningioma. Tumors have similar visual MRI semiotics feature: heterogeneity structural and enhancement, peripheral edema.

зуется дискриминантная функция классификации, которая имеет следующий вид:

$$f = A + \sum_{i=1}^{15} P_i \times k_i,$$

где A – константа, k_i – коэффициент (представлены в таблице) и P_i – значение текстурного, гистограммного параметра. Новообразование будет принадлежать к тому классу опухолей (Мд, Мз или Н), для которого дискриминантная функция (f) примет наибольшее значение.

Клинические примеры менингиом валидационной группы, которые были неверно классифицированы моделью на основе признаков МРТ-семиотики и правильно дифференцированы радиомной моделью, представлены на рисунке 7.

ОБСУЖДЕНИЕ

Концепция радиомики находит все большее распространение в качестве перспективной методологии, позволяющей улучшить диагностику, качество прогноза и лечения опухолей [10]. Обобщение результатов работ, посвященных радиомическому анализу МРТ при ПВО, проведенное в литературных обзорах [8, 9], позволяет выделить ряд особенностей, сдерживающих практическое применение полученных результатов: ряд исследований ограничивается лишь установлением факта взаимосвязи между текстурными параметрами МРТ и типом опухоли без построения классификационной модели и оценки их диагностической эффективности; более чем в половине работ дифференциально-диагностическая модель не подвергалась проверке на валидационной выборке пациентов; функциональность всех представленных в литературе моделей классификации лимитирована способностью различать только какие-либо два вида ПВО. Необходимо отметить, что для выбора оптимального варианта лечения важно установить не только злокачественность опухоли, но и дифференцировать доброкачественные варианты ПВО [4, 14].

Особенностью нашего исследования является сравнительный анализ возможностей признаков МР-семиотики (визуальных, количественных) и радиомических (гистограммных и текстурных) параметров МРТ-изображений в дифференциальной диагностике трех наиболее распространенных типов ПВО (менингиомы различной степени злокачественности и невриномы) с проверкой моделей классификации на валидационной выборке и оценкой диагностической эффективности. Сравнение выполнялось с использованием единого метода статистического моделирования – дискриминантного анализа.

Возможности разработанной в нашем исследовании модели классификации опухолей на основе их

радиомических признаков значительно превосходили модель классификации опухолей на основе изучения МРТ-семиотики. Комплекс текстурных параметров обеспечил полное разделение всех видов опухолей обучающей группы в пространстве признаков. Тогда как для модели на основе МРТ-семиотики было характерно наложение областей доброкачественных и злокачественных менингиом.

Проведенная нами валидационная проверка на независимой выборке подтвердила преимущества модели классификации на основе текстурных признаков перед моделью, основанной на МРТ-семиотике опухолей.

Ранее было выполнено одно исследование с подобным дизайном [15], однако оно основывалось на анализе одной МР-последовательности (T1 CE) и касалось только дифференцировки доброкачественных и злокачественных менингиом. В нем Coroller T. P. et al. установили практически идентичные возможности радиомических признаков и признаков семиотики (AUC моделей составили 0,78 и 0,76). Отличие от полученных нами результатов обусловлено, вероятнее всего, тем, что в нашей работе использован более широкий спектр взвешенностей МРТ.

Согласно полученным нами результатам при одинаковых значениях специфичности (95,2 %) чувствительность модели на основе признаков МРТ-семиотики для определения злокачественных менингиом составила всего 50 %, в то время как данный показатель модели на основе текстурных параметров достигал 83,3 %. Доброкачественные опухоли (менингиомы и невриномы) так же лучше классифицировались моделью на основе текстурных признаков, превосходя по чувствительности и специфичности модель на основе семиотики на 16,7–20 %. Площадь под ROC-кривой радиомной классификации ПВО (0,86) существенно превосходила данный показатель модели на основе признаков МРТ-семиотики, равный 0,78.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты нашего исследования показывают, что анализ данных МРТ на основе предложенного комплекса радиомических признаков обеспечивает лучший уровень дифференциальной диагностики наиболее распространенных видов ПВО (доброкачественных и злокачественных менингиом и неврином) по сравнению с визуальной оценкой. Высокая диагностическая информативность разработанной модели, полученной с помощью доступного и распространенного программного обеспечения, свидетельствует о перспективности и целесообразности дальнейшей разработки концепции радиомики для внедрения в компьютерные системы поддержки принятия диагностических решений.

Список источников

1. Lohmann P, Galldiks N, Kocher M, Heinzel A, Filss CP, Stegmayr C, et al. Radiomics in neuro-oncology: Basics, workflow, and applications. *Methods*. 2021 Apr;188:112–121. <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2020.06.003>
2. Ostrom QT, Cioffi G, Gittleman H, Patil N, Waite K, Kruchko C, Barnholtz-Sloan JS. CBTRUS Statistical Report: Primary Brain and Other Central Nervous System Tumors Diagnosed in the United States in 2012–2016. *Neuro Oncol*. 2019 Nov 1;21(Suppl 5):v1–v100. <https://doi.org/10.1093/neuonc/noz150>
3. Осборн А.Г., Зальцман К.Л., Завери М.Д. Лучевая диагностика. Головной мозг. Пер. с англ. Д.И. Волобуева. 3-е изд. М.: Изво Панфилова; 2018, 1216 с.
4. Saigal G, Pisani L, Allakhverdieva E, Aristizabal J, Lehmkuhl D, Contreras F, et al. Utility of Microhemorrhage as a Diagnostic Tool in Distinguishing Vestibular Schwannomas from other Cerebellopontine Angle (CPA) Tumors. *Indian J Otolaryngol Head Neck Surg*. 2021 Sep;73(3):321–326. <https://doi.org/10.1007/s12070-021-02372-8>
5. Fountain DM, Young AMH, Santarius T. Malignant meningiomas. *Handb Clin Neurol*. 2020;170:245–250. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-822198-3.00044-6>
6. Kabashi S, Ugurel MS, Dedushi K, Mucaj S. The Role of Magnetic Resonance Imaging (MRI) in Diagnostics of Acoustic Schwannoma. *Acta Inform Med*. 2020 Dec;28(4):287–291. 10.5455/aim.2020.28.287-291. <https://doi.org/10.5455/aim.2020.28.287-291>
7. Yan PF, Yan L, Zhang Z, Salim A, Wang L, Hu TT, Zhao HY. Accuracy of conventional MRI for preoperative diagnosis of intracranial tumors: A retrospective cohort study of 762 cases. *Int J Surg*. 2016 Dec;36(Pt A):109–117. <https://doi.org/10.1016/j.ijssu.2016.10.023>
8. Ugga L, Spadarella G, Pinto L, Cuocolo R, Brunetti A. Meningioma Radiomics: At the Nexus of Imaging, Pathology and Biomolecular Characterization. *Cancers (Basel)*. 2022 May 25;14(11):2605. <https://doi.org/10.3390/cancers14112605>
9. Компьютерная программа для расчета гистограммных и текстурных параметров изображений MaZda ver.4.6. Режим доступа: http://www.eletel.p.lodz.pl/programy/mazda/index.php?action=mazda_46
10. Капишников А. В., Суровцев Е. Н., Удалов Ю. Д. Магнитно-резонансная томография первичных внемозговых опухолей: проблемы диагностики и перспективы радиомики. *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2022;67(4):49–56. <https://doi.org/10.33266/1024-6177-2022-67-4-49-56>
11. Pfaehler E, Zhovannik I, Wei L, Boellaard R, Dekker A, Monshouwer R, et al. A systematic review and quality of reporting checklist for repeatability and reproducibility of radiomic features. *Phys Imaging Radiat Oncol*. 2021 Nov 9;20:69–75. <https://doi.org/10.1016/j.phro.2021.10.007>
12. Coroller TP, Bi WL, Huynh E, Abedalthagafi M, Aizer AA, Greenwald NF, et al. Radiographic prediction of meningioma grade by semantic and radiomic features. *PLoS One*. 2017 Nov 16;12(11):e0187908. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187908>
13. Agafonova YD, Gaidel AV, Surovtsev EN, Kapishnikov AV. Meningioma Detection in MR Images Using Convolutional Neural Network and Computer Vision Methods. *Journal of Biomedical Photonics & Engineering [Internet]*. 2020 Sep 30;030301. <https://doi.org/10.18287/jbpe20.06.030301>
14. Халафян А.А. Statistica 6: статистический анализ данных. Учебное пособие. М.: Бином-Пресс; 2008, 512 с.
15. Fatima N, Maxwell AK, La Dine A, Barnard ZR, Mehta GU, Wilkinson EP, et al. Predictors of hearing functional outcome following surgery for cerebellopontine angle meningioma. *J Neurooncol*. 2022 Mar;157(1):165–176. <https://doi.org/10.1007/s11060-022-03958-0>

References

1. Lohmann P, Galldiks N, Kocher M, Heinzel A, Filss CP, Stegmayr C, et al. Radiomics in neuro-oncology: Basics, workflow, and applications. *Methods*. 2021 Apr;188:112–121. <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2020.06.003>
2. Ostrom QT, Cioffi G, Gittleman H, Patil N, Waite K, Kruchko C, Barnholtz-Sloan JS. CBTRUS Statistical Report: Primary Brain and Other Central Nervous System Tumors Diagnosed in the United States in 2012–2016. *Neuro Oncol*. 2019 Nov 1;21(Suppl 5):v1–v100. <https://doi.org/10.1093/neuonc/noz150>
3. Osborn AG, Zalcmann KL, Zaveri MD. Radiology. Brain. Moscow: Panfilova Publishing House; 2018, 1216 p. (In Russ.).
4. Saigal G, Pisani L, Allakhverdieva E, Aristizabal J, Lehmkuhl D, Contreras F, et al. Utility of Microhemorrhage as a Diagnostic Tool in Distinguishing Vestibular Schwannomas from other Cerebellopontine Angle (CPA) Tumors. *Indian J Otolaryngol Head Neck Surg*. 2021 Sep;73(3):321–326. <https://doi.org/10.1007/s12070-021-02372-8>
5. Fountain DM, Young AMH, Santarius T. Malignant meningiomas. *Handb Clin Neurol*. 2020;170:245–250. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-822198-3.00044-6>
6. Kabashi S, Ugurel MS, Dedushi K, Mucaj S. The Role of Magnetic Resonance Imaging (MRI) in Diagnostics of Acoustic Schwannoma. *Acta Inform Med*. 2020 Dec;28(4):287–291. 10.5455/aim.2020.28.287-291. <https://doi.org/10.5455/aim.2020.28.287-291>
7. Yan PF, Yan L, Zhang Z, Salim A, Wang L, Hu TT, Zhao HY. Accuracy of conventional MRI for preoperative diagnosis of intracranial tumors: A retrospective cohort study of 762 cases. *Int J Surg*. 2016 Dec;36(Pt A):109–117. <https://doi.org/10.1016/j.ijssu.2016.10.023>

8. Ugga L, Spadarella G, Pinto L, Cuocolo R, Brunetti A. Meningioma Radiomics: At the Nexus of Imaging, Pathology and Biomolecular Characterization. *Cancers (Basel)*. 2022 May 25;14(11):2605. <https://doi.org/10.3390/cancers14112605>
9. MaZda is a computer program for calculation of texture parameters.
Available at: http://www.eletel.p.lodz.pl/programy/mazda/index.php?action=mazda_46
10. Kapishnikov AV, Surovcev EN, Udalov YuD. Magnetic resonance imaging of primary extra-axial intracranial tumors: diagnostic problems and prospects of radiomics. *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2022;67(4):49–56. (In Russ.).
<https://doi.org/10.33266/1024-6177-2022-67-4-49-56>
11. Pfaehler E, Zhovannik I, Wei L, Boellaard R, Dekker A, Monshouwer R, et al. A systematic review and quality of reporting checklist for repeatability and reproducibility of radiomic features. *Phys Imaging Radiat Oncol*. 2021 Nov 9;20:69–75.
<https://doi.org/10.1016/j.phro.2021.10.007>
12. Coroller TP, Bi WL, Huynh E, Abedalthagafi M, Aizer AA, Greenwald NF, et al. Radiographic prediction of meningioma grade by semantic and radiomic features. *PLoS One*. 2017 Nov 16;12(11):e0187908. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187908>
13. Agafonova YD, Gaidel AV, Surovtsev EN, Kapishnikov AV. Meningioma Detection in MR Images Using Convolutional Neural Network and Computer Vision Methods. *Journal of Biomedical Photonics & Engineering [Internet]*. 2020 Sep 30;030301.
<https://doi.org/10.18287/jbpe20.06.030301>
14. Khalafyan AA. *Statistica 6. Statistical analysis of data*. 3rd ed. Moscow: “Binom-Press” Publ., 2007, 512 p. (In Russ.).
15. Fatima N, Maxwell AK, La Dine A, Barnard ZR, Mehta GU, Wilkinson EP, et al. Predictors of hearing functional outcome following surgery for cerebellopontine angle meningioma. *J Neurooncol*. 2022 Mar;157(1):165–176. <https://doi.org/10.1007/s11060-022-03958-0>

Информация об авторах:

Суровцев Евгений Николаевич ✉ – главный врач ООО «Лечебно-диагностический центр Международного института биологических систем – Тольятти», г. Тольятти, Российская Федерация; ассистент кафедры лучевой диагностики и лучевой терапии ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Самара, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8236-833X>, SPIN: 5252-5661, AuthorID: 1032101, Scopus Author ID: 57224906215

Капишников Александр Викторович – д.м.н., заведующий кафедрой лучевой диагностики и лучевой терапии ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Самара, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6858-372X>, SPIN: 6213-7455, AuthorID: 337215, Scopus Author ID: 6507900025

Колсанов Александр Владимирович – д.м.н., профессор РАН, заведующий кафедрой оперативной хирургии и клинической анатомии с курсом медицинских информационных технологий ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Самара, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4144-7090>, SPIN: 2028-6609, AuthorID: 681123, ResearcherID: B-6050-2018

Information about authors:

Evgeniy N. Surovcev ✉ – Chief Physician, Medical and Diagnostic Center of the Togliatti International Institute of Biological Systems, Togliatti, Russian Federation; Assistant at the Department of Radiation Diagnostics and Radiation Therapy, Samara State Medical University, Samara, Russian Federation
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8236-833X>, SPIN: 5252-5661, AuthorID: 1032101, Scopus Author ID: 57224906215

Aleksandr V. Kapishnikov – Dr. Sci. (Med.), Head of the Department of Radiation Diagnostics and Radiation Therapy, Samara State Medical University, Samara, Russian Federation
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6858-372X>, SPIN: 6213-7455, AuthorID: 337215, Scopus Author ID: 6507900025

Alexander V. Kolsanov – Dr. Sci. (Med.), Professor of the RAS, Head of the Department of Operative Surgery and Clinical Anatomy with the course in medical information technologies, Samara State Medical University, Samara, Russian Federation
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4144-7090>, SPIN: 2028-6609, AuthorID: 681123, ResearcherID: B-6050-2018

Вклад авторов:

Суровцев Е. Н. – концепция исследования, написание исходного текста, итоговые выводы;
Капишников А. В. – научное руководство, развитие методологии, доработка текста, итоговые выводы;
Колсанов А. В. – научное руководство, доработка текста.

Contribution of the authors:

Surovcev E. N. – the concept of the study, writing of the source text, final conclusions;
Kapishnikov A. V. – scientific guidance, development of methodology, revision of the text, final conclusions;
Kolsanov A. V. – scientific guidance, revision of the text.