

EDN: DFJAGC

УДК 616.831-006.328 + 616.12-073.178

DOI: 10.56618/2071-2693_2024_16_4_30



ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ПРОГНОЗИРОВАНИИ ИСХОДОВ И ПРИНЯТИИ ЛЕЧЕБНОЙ ТАКТИКИ У ПАЦИЕНТОВ С РЕЦИДИВИРУЮЩИМИ ИНТРАКРАНИАЛЬНЫМИ МЕНИНГИОМАМИ

Константин Константинович Куканов¹

✉kukanov_kk@almazovcentre.ru, 0000-0002-1123-8271, SPIN-код: 8938-0675

Александр Николаевич Калининченко²

ank-bs@yandex.ru, orcid.org/0000-0001-8946-2831, SPIN-код: 6810-4648

Ксения Евгеньевна Агапова²

a-ksyusha@bk.ru, orcid.org/0009-0000-7327-6217

Мария Александровна Болозя²

mariabolozya@gmail.com, orcid.org/0009-0001-9460-5005

Никита Евгеньевич Воинов¹

voinov_ne@almazovcentre.ru, orcid.org/0000-0001-6608-935X, SPIN-код: 5522-7674

Александр Зурабович Гагиев¹

aleksandrzagagiev@gmail.com, orcid.org/0000-0002-5052-5337, SPIN-код: 3054-6383

Константин Александрович Самочерных¹

samochernykh_ka@almazovcentre.ru, orcid.org/0000-0001-5295-4912, SPIN-код: 4188-9657

¹ Российский научно-исследовательский нейрохирургический институт имени профессора

А. Л. Поленова – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения

«Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова»

Министерства здравоохранения Российской Федерации

(ул. Маяковского, д. 12, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 191025)

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова

(Ленина) (ул. Профессора Попова, д. 5, лит. Ф, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 197022)

Резюме

ВВЕДЕНИЕ. Менингиомы – часто встречающиеся первичные внутричерепные и спинальные опухоли у взрослых. Агрессивные менингиомы у пациентов могут рецидивировать после удаления и радиотерапии. Стандартов лечения таких опухолей нет. Современные технологии искусственного интеллекта (ИИ) могут помочь нейрохирургу спрогнозировать поведение неопластического процесса в центральной нервной системе.

ЦЕЛЬ. Разработка и оценка эффективности нейросетевого алгоритма, прогнозирующего дальнейшее развитие неопластического процесса при рецидивирующих интракраниальных менингиомах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Для решения задачи была использована база данных Excel со сведениями о пациенте, полученными при анализе медицинских карт. Использовано более 160 мультимодальных признаков, сгруппированных по разделам. По результатам статистического анализа были удалены коррелированные, малоинформативные и признаки с неравномерным распределением данных внутри классов. В итоге были выбраны две наиболее адекватные модели классификации – алгоритмы дерева принятия решений (Decision Tree) и случайного леса (Random Forest).

РЕЗУЛЬТАТЫ. По результатам работы были построены и оценены четыре модели. Наилучшую точность классификации (около 90 %) показала базовая модель случайного леса. С ее помощью также получилось оценить значимость исследуемых признаков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Из-за постоянного роста объема мультимодальных данных в нейроонкологии врачам сложно анализировать их с помощью традиционных подходов и прогнозировать поведение неопластического процесса. Таким образом, врачам-нейрохирургам необходимо обращаться за помощью к современным технологиям ИИ.

Ключевые слова: менингиома, рецидив, продолженный рост, искусственный интеллект, машинное обучение, глубокое обучение, биомедицинская информатика

Для цитирования: Куканов К. К., Калининченко А. Н., Агапова К. Е., Болозя М. А., Воинов Н. Е., Гагиев А. З., Самочерных К. А. Технологии искусственного интеллекта в прогнозировании исходов и принятии

лечебной тактики у пациентов с рецидивирующими интракраниальными менингиомами // Российский нейрохирургический журнал им. проф. А. Л. Поленова. 2024. Т. XVI, № 4. С. 30–37. DOI: 10.56618/2071-2693_2024_16_4_30.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES IN PREDICTING OUTCOMES AND ADOPTING THERAPEUTIC TACTICS IN PATIENTS WITH RECURRENT INTRACRANIAL MENINGIOMAS

Konstantin K. Kukanov¹

✉kukanov_kk@almazovcentre.ru, 0000-0002-1123-8271, SPIN-code: 8938-0675

Alexander N. Kalinichenko²

ank-bs@yandex.ru, orcid.org/ 0000-0001-8946-2831, SPIN-code: 6810-4648

Ksenia E. Agapova²

a-ksyusha@bk.ru, orcid.org/0009-0000-7327-6217

Maria A. Bolozia²

mariabolozya@gmail.com, orcid.org/0009-0001-9460-5005

Nikita E. Voinov¹

voinov_ne@almazovcentre.ru, orcid.org/0000-0001-6608-935X, SPIN-code: 5522-7674

Alexander Z. Gagiev¹

aleksandrgagiev@gmail.com, orcid.org/0000-0002-5052-5337, SPIN-code: 3054-6383

Konstantin A. Samochernykh¹

samochernykh_ka@almazovcentre.ru, orcid.org/0000-0001-5295-4912, SPIN-code: 4188-9657

¹ Polenov Neurosurgery Institute – the branch of Almazov National Medical Research Centre (12 Mayakovskogo street, St. Petersburg, Russian Federation, 191025)

² St. Petersburg State Electrotechnical University “LETI” named after V. I. Ulyanov (Lenin) (5 Professora Popova street, litera F, St. Petersburg, Russian Federation, 197022)

Abstract

INTRODUCTION. Meningiomas are common primary intracranial and spinal tumors in adults. Aggressive meningiomas can recur after surgical removal and radiotherapy. There are no treatment standards for such tumors. Modern artificial intelligence (AI) technologies can help a neurosurgeon predict the behavior of a neoplastic process in the central nervous system.

AIM. Development and evaluation of the effectiveness of a neural network algorithm predicting the further development of a neoplastic process in recurrent intracranial meningiomas.

MATERIALS AND METHODS. To solve the problem, an Excel database was used with patient information obtained from the analysis of medical records. More than 160 multimodal features grouped into sections were used. According to the results of statistical analysis, correlated, uninformative, and features with uneven data distribution within classes were removed. Finally, two of the most appropriate classification models were chosen: decision tree and random forest algorithms.

RESULTS. Four models were built and evaluated based on the results of the work. The basic random forest model showed the best classification accuracy (about 90 %). It also helped to assess the significance of the studied features.

CONCLUSION. Due to the constant growth of multimodal data in neuro-oncology, it is difficult for doctors to analyze them using traditional approaches and predict the behavior of a neoplastic process. Therefore, neurosurgeons need to turn to modern artificial intelligence (AI) technologies for help.

Keywords: meningioma, relapse, continued growth, artificial intelligence, machine learning, deep learning, biomedical informatics

For citation: Kukanov K. K., Kalinichenko A. N., Agapova K. E., Bolozia M. A., Voinov N. E., Gagiev A. Z., Samochernykh K. A. Artificial intelligence technologies in predicting outcomes and adopting therapeutic tactics in patients with recurrent intracranial meningiomas. Russian neurosurgical journal named after professor A. L. Polenov. 2024;XVI(4):30–37. (In Russ.). DOI: 10.56618/2071-2693_2024_16_4_30.

Введение

По данным Регистра опухолей мозга США 2023 г., менингиома является самой распространенной опухолью центральной нервной системы (ЦНС), составляя 40 % среди всех об-

разований данной локализации [1, 2]. Основными методами терапии пациентов с данными новообразованиями длительное время остаются хирургическое удаление и проведение лучевой терапии [1–3]. При этом радиотерапия и сте-

реотаксическая радиохирургия применяются в качестве послеоперационного лечения атипической (Grade II) и анапластической (Grade III) менингиом [3–5].

Существует группа пациентов с интракраниальными менингиомами, характеризующимися рецидивирующим типом течения заболевания даже после радикального удаления опухоли и проведения радиотерапии. Изучение безрецидивной выживаемости у пациентов с менингиомами позволило установить, что менингиомы Grade I рецидивируют в 7–23 % случаев, Grade II – в 41–55 %, а менингиомы Grade III – в 72–78 % [6, 7]. Для большей части пациентов с менингиомами Grade I–II при радикальном удалении (Simpson I–II) опухоли радиотерапия и стереотаксическая радиохирургия не показаны, а при частичном удалении (Simpson III–IV) радиотерапия или стереотаксическая радиохирургия являются весьма эффективными методами лечения [8–12]. Для пациентов с анапластическими менингиомами (Grade III) характерен высокий процент (72–78 %) рецидивов даже при радикальном их удалении и послеоперационной лучевой терапии, что приводит к осложнениям, снижению качества жизни, неблагоприятному прогнозу [11, 13]. Это делает необходимым поиск новых методов и способов прогнозирования и лечения данных пациентов, в частности, разработку различных систем принятия терапевтических решений на основе технологий искусственного интеллекта (ИИ) [16–27]. Поиск альтернативных методов лечения для данной группы пациентов привел к необходимости активного изучения морфологических и молекулярно-генетических особенностей менингиом. Было установлено, что высокий уровень экспрессии различных клеточных факторов роста, их рецепторов, а также активация ряда внутриклеточных сигнальных путей в опухолевых клетках играют значительную роль в этих процессах [15]. Таким образом, постоянный рост объема мультимодальных данных (клиника, нейровизуализация и биологические характеристики опухоли) в нейроонкологии опережает возможности их анализа экспертами с помощью традиционных подходов. Данную задачу могут решить системы поддержки принятия решений,

которые можно встретить среди решений, построенных с использованием данных Cochrane Library. Наиболее известны в этой области продукты финской компании *DUODECIM* (<https://www.duodecim.fi/english/>) – EBMG и EBMeDS (<http://www.ebmeds.org>). В России их дистрибуция осуществляется компанией «Алгом» (<https://algom.ru/>). Однако в продукции указанных компаний рассматриваемые нами нозологии не представлены.

Материалы и методы

Для решения задачи была использована база данных Exel, в которой содержались имеющиеся сведения о пациенте, полученные на основе изучения истории болезни, лучевых эпикризов, медицинских сведений из сторонних медицинских учреждений, и данные о катамнезе «Регистр пациентов с рецидивом и продолженным ростом интракраниальных менингиом» (свидетельство о гос. регистрации № RU 2023621571/02.05.2023).

В нашем исследовании проанализированы отдельные клинические, нейрофизиологические, нейровизуализационные, патоморфологические и молекулярные характеристики менингиом с выделением симптомокомплексов, характеризующих течение заболевания в разные периоды при нарастании и регрессе клинической симптоматики с учетом фактора хирургического вмешательства и примененных методов адъювантного лечения.

При создании базы данных нами использовано более 160 признаков, сгруппированных в клинический, нейровизуализационный, патоморфологический и молекулярно-генетический разделы. Каждый раздел, в свою очередь, разделяется на подразделы, а в подразделах признаки имеют градации [7].

С точки зрения методов обработки информации данную задачу можно рассматривать как задачу бинарной классификации. Бинарный классификатор подразумевает получение ответов двух типов – «Рецидив» и «Не рецидив». В использованной базе данных содержатся записи, относящиеся к отдельным пациентам. Каждая из записей представляет собой набор признаков, а также сопровождается отметкой принадлежности к одному из двух назван-

ных выше классов. Таким образом, задача сводится к разработке алгоритма, который способен классифицировать произвольный объект из представленной выборки, основываясь на имеющихся признаках.

В качестве первого этапа данного исследования все признаки были проанализированы с точки зрения оценки их значимости для решения конечной задачи. Был выполнен статистический анализ для идентификации различных групп признаков, после чего осуществлен отбор наиболее значимых из них для дальнейшего использования в модели классификатора.

Было установлено, что отобранные прогностические признаки представлены различными типами данных – численными, бинарными и категориальными. Каждая из групп анализировалась по отдельности. Также было установлено, что исходные данные содержат пропущенные значения.

При первичном отборе признаков из исследования удалялись записи с высоким процентом пропущенных значений. Для проверки гипотезы о нормальности распределения численных признаков применялся критерий Шапиро – Уилка. При этом было установлено, что ни один из численных признаков не принадлежит нормальному распределению, поэтому все три категории признаков рассматривались с помощью непараметрических методов.

По результатам статистического анализа из исходного набора были удалены некоторые признаки, которые сильно коррелировали друг с другом; признаки, которые не несут информации внутри одного или двух классов, а также признаки с неравномерным распределением данных внутри классов. Такой подход позволил, во-первых, выявить значимость каждого из входных признаков, а во-вторых – сократить размерность параметров практически в три раза и тем самым увеличить скорость обработки данных, сохраняя при этом большую часть информации.

Принимая во внимание характер представленного набора признаков, наиболее адекватными моделями классификации являются следующие алгоритмы: алгоритмы дерева принятия решений (Decision Tree) и случайного леса

(Random Forest). Выбранные алгоритмы позволяют корректно работать с большим количеством представленных признаков при небольшой выборке объектов, а также являются хорошо интерпретируемыми, позволяя в явном виде отображать внутренние взаимосвязи, присущие каждому из рассматриваемых классов.

Результаты исследования

После отбора информативных показателей были построены модели решающих деревьев и случайного леса. Данные модели обучались на 69 % тренировочных данных, а их эффективность оценивалась на 31 % тестовых данных. В качестве целевой переменной в представленном наборе данных использовался признак «Рецидив». При этом значение «0» означало отсутствие рецидива, а значение «1» – его наличие. Оставшиеся признаки в наборе данных рассматривались как независимые переменные.

Оценка эффективности моделей выполнялась с помощью метрик, принятых в задачах классификации, таких как точность и полнота:

1) *точность (precision)* – доля объектов, названных классификатором положительными и при этом действительно являющихся положительными, вычисляется по формуле:

$$\text{precision} = \frac{TP}{TP + FP};$$

2) *полнота (recall)* – показывает, какую долю объектов положительного класса из всех объектов положительного класса нашел алгоритм (этот показатель также называют чувствительностью), вычисляется по формуле:

$$\text{recall} = \frac{TP}{TP + FN},$$

где TP (True Positive) – истинный положительный результат; TN (True Negative) – истинный отрицательный результат; FP (False Positive) – ложный положительный результат (ошибка 1-го рода); FN (False Negative) – ложный отрицательный результат (ошибка 2-го рода).

В качестве единого интегрального показателя в задачах бинарной классификации принято также использовать F-меру, представляю-

щую собой среднее гармоническое показателей precision и recall:

$$F_{\beta} = (1 + \beta^2) \frac{\text{precision} \times \text{recall}}{\text{precision} \times \beta^2 + \text{recall}}.$$

В этой формуле параметр β определяет вес точности в метрике, и при $\beta=1$ это соответствует среднему гармоническому (с множителем 2, чтобы в случае, когда precision = 1 и recall = 1, получить $F = 1$). F-мера достигает максимума при значениях полноты и точности, равных единице, и близка к нулю, если один из этих показателей близок к нулю.

В результате были разработаны две модели классификаторов – алгоритм дерева решений и алгоритм случайного леса. Подбор параметров моделей выполнялся в два этапа: автоматический подбор параметров системой, а также использование специального программного модуля GridSearchCV для поиска наилучших значений гиперпараметров моделей.

На основе этих шагов было построено и оценено четыре модели. Наибольшую точность классификации продемонстрировала базовая модель случайного леса, которая позволила корректно классифицировать приблизительно 90 % представленных объектов. В таблице приведены результаты, полученные в результате применения всех четырех моделей.

Значения метрик качества для разработанных моделей

Quality metrics for the developed models

Модель	Точность (precision), %		Полнота (recall), %		F-мера, %	
	класс 0	класс 1	класс 0	класс 1	класс 0	класс 1
Базовая модель решающего дерева	91	60	71	86	80	71
Оптимизированная модель решающего дерева	92	44	69	80	79	57
Базовая модель случайного леса	94	67	94	67	94	67
Оптимизированная модель случайного леса	81	66	100	70	89	61

С помощью метода случайного леса также была выполнена оценка значимости каждого из исследуемых признаков. Наиболее информативными и прогностически значимыми признаками, которые удалось идентифицировать, оказались следующие: P2 – число койко-дней; K35 – шкала Рэнкина на момент сбора катамнеза; P3 – длительность анамнеза; P9 – объем отека до операции; P1 – возраст; B59 – мелкоклеточные компоненты; B58 – вихревые структуры; P11 – остаточный объем образований после операции; K1 – диагноз (степень анаплазии, Grade); B34 – включение в опухоль магистральных артерий.

Обсуждение

Несмотря на современные технологии и возможности нейрохирургии, значительно повышающие качество жизни пациентов и снижающие процент послеоперационной летальности, проблема лечения больных рецидивирующими менингиомами остается актуальной и до конца не решенной. Менингиомы Grade II в 30,3 % случаев рецидивируют в течение трех лет после постановки диагноза, а анапластические менингиомы прогрессируют в 78 % случаев в течение первого года после операции [5, 6, 8].

Разработанный нейросетевой алгоритм решает задачу прогноза дальнейшего развития неопластического процесса при рецидивирующих интракраниальных менингиомах. Алгоритм продемонстрировал точность прогноза порядка 90 % на тестовом наборе данных. На основе алгоритма был разработан программный комплекс на языке программирования Python, что дает возможность использовать предложенный метод на практике в качестве дополнительного источника информации при принятии врачебных решений. В то же время дальнейшее совершенствование алгоритма предполагает расширение используемого для обучения моделей набора экспериментальных данных, что должно повысить статистическую достоверность получаемых алгоритмом ответов. Подобный нетрадиционный подход позволяет пересмотреть общеизвестные характеристики и обосновать индивидуальную клиническую и прогностическую значимость отдельных признаков как клинического, так и нейровизуализационного, а также патоморфологического характера и в не-

вой последовательности сгруппировать данные совокупности признаков таким образом, чтобы, в конечном итоге, был сформирован универсальный диагностический и прогностический алгоритм для пациентов с рецидивирующими менингиомами. Данный результат имеет не только прикладное значение для диагностики и формирования стратегии лечения, но и теоретическое, относящееся к выявлению общих закономерностей нейроонкогенеза.

Заключение

Использование технологий ИИ становится трендом в клинической практике, в том числе в нейрохирургии и нейроонкологии. Нейросетевые алгоритмы в известной степени преодолевают ограничения классической статистики при обработке многомерных и неструктурированных данных. Изображения и структурированные клинические данные (базы данных) на сегодняшний день являются основными источниками машинного обучения. Разработчики технологий ИИ и врачи-исследователи ожидают, что его внедрение в практику улучшит научную и лечебную деятельность в медицине.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. **Conflict of interest.** The author declares no conflict of interest.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания № 123021000128-4 «Разработка новой технологии лечения больных вторичными новообразованиями головного мозга и рецидивирующими менингиомами». **Financing.** The work was carried out as part of the state assignment No. 123021000128-4 “Development of a new technology for treating patients with secondary brain tumors and recurrent meningiomas”.

Соблюдение прав пациентов и правил биоэтики. Все пациенты подписали информированное согласие на участие в исследовании. Исследование выполнено в соответствии с требованиями Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации (в ред. 2013 г.). **Compliance with patient rights and principles of bioethics.** All patients gave written informed consent to participate in the study. The study was carried out in accordance with the requirements of the World Medical Association Declaration of Helsinki (updated in 2013).

Литература / References

1. Roland G., Pantelis S., Michael D. et al. EANO guideline on the diagnosis and management of meningiomas. *Neurooncol.* 2021;23(11):1821–1834. Doi: <https://doi.org/10.1093/neuonc/noab150>.
2. Priya K., Sean A., Roxanne T. et al. A multi-institutional phase II trial of bevacizumab for recurrent and refractory meningioma. *Neurooncol Adv.* 2022;4(1):1–10. Doi: <https://doi.org/10.1093/oaajnl/vdac123>.
3. Maximilian J., Anna S., Priscilla K., Matthias P. Emerging systemic treatment options in meningioma. *J Neuro-oncol.* 2023;161(2):245–258. Doi: <http://doi.org/10.1007/s11060-022-04148-8>.
4. Ostrom Q. T., Patil N., Cioffi G., Waite K., Kruchko C., Barnholtz-Sloan J. S. CBTRUS Statistical Report: Primary Brain and Other Central Nervous System Tumors Diagnosed in the United States in 2013–2017. *Neuro-Oncology.* 2020;22(1):1–96. Doi: <https://doi.org/10.1093/neuonc/noaa200>.
5. Куканов К. К., Воробьева О. М., Забродская Ю. М. и др. Интракраниальные менингиомы: клинко-интраскопические и патоморфологические причины рецидивирования с учетом современных методов лечения (обзор литературы) // Сибир. онкол. журн. 2022. Т. 21, № 4. С. 110–123. [Kukanov K. K., Vorobyova O. M., Zabrodskaya Yu. M., Potemkina E. G., Ushanov V. V., Tastanbekov M. M., Ivanova N. E. Intracranial meningiomas: clinical, intrascopic and pathomorphological causes of recurrence (literature review). *Siberian journal of oncology.* 2022;21(4):110–123. (In Russ.)]. Doi: <https://doi.org/10.21294/1814-4861-2022-21-4-110-123>.
6. Куканов К. К., Ушанов В. В., Забродская Ю. М. и др. Пути персонализации лечения пациентов с рецидивом и продолженным ростом интракраниальных менингиом // Рос. журн. персонализ. мед. 2023. Т. 3, № 3. С. 48–63. [Kukanov K. K., Ushanov V. V., Zabrodskaya Yu. M., Tastanbekov M. M., Vorobyova O. M., Sitovskaya D. A., Dikonenko M. V. Ways to personalize the treatment of patients with relapse and continued growth of intracranial meningiomas. *Russian Journal for Personalized Medicine.* 2023;3(3):48–63. (In Russ.)]. Doi: <https://doi.org/10.18705/2782-38062023-3-3-48-63>.
7. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № RU 2023621571 Регистр пациентов с рецидивом и продолженным ростом интракраниальных менингиом / Куканов К. К., Ушанов В. В., Вoinov H. E. 02.05.2023. [Certificate of state registration of the database No. RU 2023621571. Register of patients with recurrence and continued growth of intracranial meningiomas; Kukanov K. K., Ushanov V. V., Voinov N. E. 02.05.2023. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/vbrsbm>.
8. Violaris K., Katsarides V., Sakellariou P. The Recurrence Rate in Meningiomas: Analysis of Tumor Location, Histological Grading, and Extent of Resection. *Open J Modern Neurosurg.* 2012;(2):6–10. Doi: <https://doi.org/10.4236/ojmn.2012.21002>.
9. Kotecha R. S., Pascoe E. M., Rushing E. J., Rorke-Adams L. B., Zuerdling T., Gao X., Li X., Greene S., Amirjamshidi A., Kim S. K., Lima M. A., Hung P. C., Lakhdar F., Mehta N., Liu Y., Devi B. I., Sudhir B. J., Lund-Johansen M., Gjerris F., Cole C. H., Gottardo N. G. Meningiomas in children and adolescents: a meta-analysis of individual patient data. *Lancet Oncol.* 2011;12(13):1229–1239. Doi: [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(11\)70275-3](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(11)70275-3).
10. Huntoon K., Toland A. M. S., Dahiya S. Meningioma: a review of clinicopathological and molecular aspects. *Front Oncol.* 2020;10(10):1–14. Doi: <https://doi.org/10.3389/fonc.2020.579599>.
11. Commings D., Atkinson R., Burnett M. Review of meningioma histopathology. *Neurosurg Focus.* 2007;23(4):1–9. Doi: <https://doi.org/10.3171/FOC-07/10/E3>.
12. Brastianos P., Galanis E., Butowski N. et al. Advances in multidisciplinary therapy for meningiomas. *Neuro Oncol.*

- 2019;21(1):118–131. Doi: <http://doi.org/10.1093/neuonc/noy136>.
13. *Chen R., Aghi M. K.* Atypical meningiomas. *Handb Clin Neurol.* 2020; (170):233–244. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822198-3.00043-4>.
 14. *Debus J., Wuendrich M., Pirzkall A. et al.* High efficacy of fractionated stereotactic radiotherapy of large base-of-skull meningiomas: long-term results. *J Clin Oncol.* 2001;19(15):3547–3553. Doi: <https://doi.org/10.1200/JCO.2001.19.15.3547>.
 15. *Cao X., Hao S., Wu Z. et al.* Treatment Response and Prognosis After Recurrence of Atypical Meningiomas. *World Neurosurg.* 2015;84(4):1014–1019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2015.05.032>.
 16. *Данилов Г. В., Ишанкулов Т. А., Котик К. В. и др.* Технологии искусственного интеллекта в клинической нейроонкологии. Вопросы нейрохирургии им. Н. Н. Бурденко. 2022. Т. 86, № 6. С. 127–133. [Danilov G. V., Ishankulov T. A., Kotik K. V., Shifrin M. A., Potapov A. A. Artificial intelligence technologies in clinical neurooncology. *Burdenko's Journal of Neurosurgery = Zhurnal voprosy neirokhirurgii imeni N. N. Burdenko.* 2022;86(6):127–133. (In Russ.)]. Doi: <https://doi.org/10.17116/neiro202286061127>.
 17. *Danilov G. V., Shifrin M. A., Kotik K. V., Ishankulov T. A., Orlov Y. N., Kulikov A. S., Potapov A. A.* Artificial intelligence in neurosurgery: A systematic review using topic modeling. Part I: Major research areas. *Sovremennye Tehnologii v Medicine.* 2020;12(5):106–112. Doi: <https://doi.org/10.17691/stm2020.12.5.122>.
 18. *Danilov G. V., Shifrin M. A., Kotik K. V., Ishankulov T. A., Orlov Y. N., Kulikov A. S., Potapov A. A.* Artificial Intelligence Technologies in Neurosurgery: a Systematic Literature Review Using Topic Modeling. Part II: Research Objectives and Perspectives. *Sovremennye Tehnologii v Medicine.* 2021;12(6):111–118. Doi: <https://doi.org/10.17691/stm2020.12.6.12>.
 19. *Breiman L.* Random Forests. *Machine Learning.* 2001;(45):5–32. Doi: <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.
 20. *Kittler J., Hatef M., Duin R. P. W., Matas J.* On combining classifiers. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.* 1998;20(3):226–239.
 21. *Caruana R., Niculescu-Mizil, A.* An Empirical Comparison of Supervised Learning Algorithms. *Proceedings of the 23rd International Conference on Machine Learning (Pittsburgh, 25–29 June 2006).* 2006. Doi: <http://dx.doi.org/10.1145/1143844.1143865>.
 22. *Меламед И. И., Сигал И. Х.* Исследование линейной свертки критериев в многокритериальном дискретном программировании // Журн. вычисл. матем. и матем. физ. 1995. Т. 35, № 8. С. 1260–1270. [Melamed I. I., Sigal I. H. The study of linear convolution of criteria in multi-criteria discrete programming. *Journal. mathem. and mathem. physical.* 1995;35(8):1260–1270. (In Russ.)].
 23. *Ho J., Hull S. N.* Srihari Decision combination in multiple classifier systems. *IEEE Transaction Pattern Analysis and Machine Intelligence.* 1994;16(1):66–75.
 24. *Гаджиев Я., Шалбузова К. И.* Применение методов машинного обучения в прогнозировании и раннем обнаружении рака // *Sciences of Europe.* 2022. № 108. С. 48. [Hajiyev Ya., Shalbuzova K. I. Application of machine learning methods in predicting and early detection of cancer. *Sciences of Europe.* 2022;(108):48. (In Russ.)].
 25. *Красько О. В.* Статистический анализ данных в медицинских исследованиях. Минск: МГЭУ им. А. Д. Сахарова. 2014. 127 с. [Krasko O. V. Statistical analysis of data in medical research. Minsk: Minsk State University of Economics named after A. D. Sakharov; 2014. 127 p.].
 26. *Лемешко Б. Ю.* Критерии проверки отклонения распределения от нормального закона (руководство по применению) / Новосибир. гос. техн. ун-т. 2014. 192 с. [Lemeshko B. Yu. Criteria for checking the deviation of the distribution from the normal law (application guide); Novosibirsk State Technical University. 2014. 192 p. (In Russ.)].
 27. Объяснение метода случайного леса. URL: <https://nerdit.ru/obiasnieniie-mietoda-sluchainogho-liesa> (дата обращения: 04.10.2024). [Explain the random forest method. Available from: <https://nerdit.ru/obiasnieniie-mietoda-sluchainogho-liesa> [Accessed 4 October 2024]].

Сведения об авторах

Константин Константинович Куканов – кандидат медицинских наук, врач-нейрохирург высшей квалификационной категории Нейрохирургического отделения № 4, старший научный сотрудник группы стереотаксической и функциональной нейрохирургии НИЛ нейроонкологии Российского научно-исследовательского нейрохирургического института им. проф. А. Л. Поленова – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова» (Санкт-Петербург, Россия);

Александр Николаевич Калинин – доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (Санкт-Петербург, Россия);

Ксения Евгеньевна Агапова – магистрант кафедры биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (Санкт-Петербург, Россия);

Мария Александровна Болозя – магистрант кафедры биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (Санкт-Петербург, Россия);

Никита Евгеньевич Воинов – врач-нейрохирург Российского научно-исследовательского нейрохирургического института им. проф. А. Л. Поленова – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова» (Санкт-Петербург, Россия); специалист по научно-аналитической работе Научного центра мирового уровня «Центр персонализированной медицины» (Санкт-Петербург, Россия);

Александр Зурабович Гагиев – клинический ординатор кафедры нейрохирургии Российского научно-исследовательского нейрохирургического института им. проф. А. Л. Поленова – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова» (Санкт-Петербург, Россия);

Константин Александрович Самочерных – доктор медицинских наук, профессор Российской академии наук, врач-нейрохирург высшей квалификационной категории Отделения нейрохирургии для детей № 7, директор Российского научно-исследовательского нейрохирургического института им. проф. А. Л. Поленова – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова» (Санкт-Петербург, Россия).

Information about the authors

Konstantin K. Kukanov – Cand. of Sci. (Med.), Neurosurgeon of the Highest Qualification Category at the Neurosurgical Department No. 4, Senior Researcher at the Institute of Neuro-Oncology, Polenov Neurosurgery Institute – the branch of Almazov National Medical Research Centre (St. Petersburg, Russia);

Aleksandr N. Kalinichenko – Dr. of Sci. (Tech.), Senior Researcher, Professor at the Department of Bioengineering Systems, St. Petersburg State Electrotechnical University “LETI” named after V. I. Ulyanov (Lenin) (St. Petersburg, Russia);

Kseniya E. Agapova – Master’s Student at the Department of Bioengineering Systems, St. Petersburg State Electrotechnical University “LETI” named after V. I. Ulyanov (Lenin) (St. Petersburg, Russia);

Mariya A. Bolozya – Master’s Student at the Department of Bioengineering Systems, St. Petersburg State

Electrotechnical University “LETI” named after V. I. Ulyanov (Lenin) (St. Petersburg, Russia);

Nikita E. Voinov – Neurosurgeon, Polenov Neurosurgery Institute – the branch of Almazov National Medical Research Centre (St. Petersburg, Russia); Specialist in Scientific and Analytical Work, World-Class Research Centre for Personalized Medicine (St. Petersburg, Russia);

Alexander Z. Gagiev – Clinical Resident at the Department of Neurosurgery, Polenov Neurosurgery Institute – the branch of Almazov National Medical Research Centre (St. Petersburg, Russia);

Konstantin A. Samochernykh – Dr. of Sci. (Med.), Professor of the Russian Academy of Sciences, Neurosurgeon of the Highest Category at the Department of Neurosurgery for Children No. 7, Director, Polenov Neurosurgery Institute – the branch of Almazov National Medical Research Centre (St. Petersburg, Russia).

Принята к публикации 29.11.2024

Accepted 29.11.2024