

<https://doi.org/10.29001/2073-8552-2025-40-4-140-149>
УДК 616.379-008.64:618.29-073.432.1

Возможности радиомики в оценке нейросонографических изменений у новорожденных с диабетической фетопатией: анализ ультразвуковых изображений

Зими́на Н.Д.^{1, 2}, Плешков М.О.¹, Вощенко А.О.¹, Фомина С.В.¹,
Самойлова Ю.Г.^{1, 3}, Кудлай Д.А.^{3, 4}, Мицеля Е.В.^{1, 2}, Толмачев И.В.¹

¹ Сибирский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации (СибГМУ Минздрава России), 634050, Российская Федерация, Томск, Московский тракт, 2

² Областной перинатальный центр имени И.Д. Евтушенко, 634063, Российская Федерация, Томск, Ивана Черных, 96/1

³ Новосибирский государственный университет (НГУ), Институт медицины и медицинских технологий, 630090, Российская Федерация, Новосибирск, Пирогова, 1

⁴ Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет) (Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России), 119991, Российская Федерация, Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2

Аннотация

Введение. Ранняя неинвазивная оценка изменений головного мозга у новорожденных является значимой задачей в педиатрии. В статье представлен подход к неинвазивной оценке изменений головного мозга у новорожденных с использованием радиомиксного анализа ультразвуковых изображений. Радиомиксный анализ позволяет характеризовать морфологическую структуру ультразвуковых снимков нейросонографии (НСГ) комплексом текстурных показателей и выявлять изменения, не видимые на снимках невооруженным глазом.

Цель: исследовать возможности применения радиомиксного анализа ультразвуковых изображений для выявления изменений головного мозга при диабетической фетопатии у новорожденных.

Материал и методы. Данные были собраны из ультразвуковых изображений головного мозга 89 доношенных новорожденных (срок гестации – более 37 нед.), среди которых 45 (51%) составили здоровые новорожденные (контрольная группа), а 44 (49%) страдали диабетической фетопатией (основная группа). Отбор данных проводился с использованием специальных проекций для отображения четырех локализаций:

1. Лобная доля (F0-сканирование на уровне передних отделов обеих лобных долей): 45 здоровых и 37 больных.
2. Парасагиттальный срез в области сосудистого сплетения (S2-сканирование в парасагиттальной плоскости): 41 здоровый и 40 больных.
3. Сагиттальный срез в области мозолистого тела (S0-сканирование в срединно-сагиттальной плоскости): 44 здоровых и 40 больных.
4. Фронтальный срез в перивентрикулярной области (F4-сканирование в области теменной и височной долей, а также мозжечка): 45 здоровых и 44 больных.

Результаты. При проведении НСГ в В-режиме наблюдалась одинаковая частота субэпендимальных кист и дилатации боковых желудочков в обеих группах (7 против 5%; $p = 0,53$), но внутривентрикулярные кровоизлияния и перивентрикулярный отек наблюдались только в основной группе (7 против 0%; $p < 0,05$). В результате радиомиксного анализа ультразвуковых изображений головного мозга были установлены радиомиксные предикторы текстурных изменений у новорожденных с диабетической фетопатией в четырех локализациях. Построены классификационные модели, проведен их ROC-анализ. Лучшие результаты показали модель 1 для лобной доли (точность – 0,71; AUC = 0,69) и модель 4 для перивентрикулярной области (точность – 0,89; AUC = 0,85). Установленные текстурные изменения головного мозга новорожденных с диабетической фетопатией проявляются следующим образом: в лобной доле наблюдается неравномерное хаотичное распределение эхогенности с множественными гиперэхогенными участками. Перивентрикулярная зона демонстрирует выраженное диффузное повышение эхогенности, что создает эффект гомогенизации изображения. Радиомиксный анализ ультразвуковых изображений позволяет выявить изменения текстуры головного мозга, которые не определяются при стандартной НСГ.

Выводы. Мультипараметрический анализ ультразвуковых изображений с применением радиомиксного подхода продемонстрировал возможность выявлять структурные изменения в головном мозге новорожденных, страдающих от диабетической фетопатии. Полученные результаты подтверждают перспективность использования радиомиксного анализа в выявлении тонких нейроанатомических изменений.

© Зими́на Н. Д., Плешков М. О., Вощенко А. О., Фомина С. В., Самойлова Ю. Г., Кудлай Д. А., Мицеля Е. В., Толмачев И. В., 2025

Ключевые слова:	ультразвуковая диагностика; гестационный сахарный диабет; радиомика; нейросонография; новорожденные.
Финансирование:	исследование выполнено без финансовой поддержки грантов, общественных, некоммерческих, коммерческих организаций и структур.
Соответствие принципам этики:	исследование одобрено этическим комитетом ФГБОУ ВО СибГМУ Минздрава России (протокол № 10159, 02.10.2025 г.). Законные представители пациентов подписали информированные согласия.
Для цитирования:	Зими́на Н.Д., Плешков М.О., Вощенко А.О., Фомина С.В., Самойлова Ю.Г., Кудлай Д.А., Мицеля Е.В., Толмачев И.В. Возможности радиомики в оценке нейросонографических изменений у новорожденных с диабетической фетопатией: анализ ультразвуковых изображений. <i>Сибирский журнал клинической и экспериментальной медицины</i> . 2025;40(4):140–149. https://doi.org/10.29001/2073-8552-2025-40-4-140-149

Radiomics in assessing neurosonographic changes in newborns with diabetic fetopathy: analysis of ultrasound images

Zimina N.D.^{1,2}, Pleshkov M.O.¹, Voshchenko A.O.¹, Fomina S.V.¹,
Samoilova Yu.G.^{1,3}, Kudlai D.A.^{3,4}, Mitselya E.V.^{1,2}, Tolmachev I.V.¹

¹ Siberian State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (SSMU), 634050, Russian Federation, Tomsk, Moskovsky tract, 2

² Regional Perinatal Center named after I.D. Yevtushenko, 634063, Russian Federation, Tomsk, Ivana Chernykh, 96/1

³ Institute of Medicine and Medical Technologies, 630090, Russian Federation, Novosibirsk, Pirogova, 1

⁴ First Moscow State Medical University named after I.M. Sechenov (Sechenov University), 119048, Russian Federation, Moscow, Trubetskaya, 8, building 2

Abstract

Introduction. Early noninvasive assessment of brain changes in newborns is a significant challenge in pediatrics. This article presents an approach to noninvasive assessment of brain changes in newborns using radiomics analysis of ultrasound images. Radiomics analysis allows characterization of the morphological structure of neurosonographic ultrasound images using a set of texture parameters and the identification of changes invisible to the naked eye.

Aim: To investigate the feasibility of using radiomics analysis of ultrasound images to detect brain changes in diabetic fetopathy in newborns.

Material and Methods. Data were collected from brain ultrasound images of 89 full-term neonates (gestational age greater than 37 weeks), including 45 (51%) healthy neonates (control group) and 44 (49%) with diabetic fetopathy (study group). Data were extracted using specialized projections to display four locations:

1. Frontal lobe (F0 - scan at the level of the anterior sections of both frontal lobes): 45 healthy and 37 patients.
2. Parasagittal section in the choroid plexus area (S2 - scan in the parasagittal plane): 41 healthy and 40 patients.
3. Sagittal section in the corpus callosum area (S0 - scan in the midsagittal plane): 44 healthy and 40 patients.
4. Frontal section in the periventricular region (F4 - scanning in the area of the parietal and temporal lobes, as well as the cerebellum): 45 healthy and 44 patients.

Results. When conducting B-mode neurosonography, the same frequency of subependymal cysts and lateral ventricular dilation was observed in both groups (7% vs. 5%; $p = 0.53$), but intraventricular hemorrhages and periventricular edema were observed only in the main group (7% vs. 0%; $p < 0.05$). As a result of radiomics analysis of ultrasound images of the brain, radiomics predictors of texture changes in newborns with diabetic fetopathy were established in four localizations. Classification models were built and ROC analysis was performed. The best results were shown by Model 1 for the frontal lobe (accuracy – 0.71, AUC = 0.69) and Model 4 for the periventricular region (accuracy – 0.89, AUC = 0.85). The established textural changes in the brain of newborns with diabetic fetopathy manifest as follows: an uneven, chaotic distribution of echogenicity with multiple hyperechoic areas is observed in the frontal lobe. The periventricular zone exhibits a marked, diffuse increase in echogenicity, creating a homogenized effect on the image. Radiomics analysis of ultrasound images can reveal changes in brain texture that are not detectable with standard neurosonography.

Conclusions. Multiparametric analysis of ultrasound images using a radiomics approach demonstrated the ability to detect structural changes in the brain of newborns with diabetic fetopathy. The results confirm the effectiveness of radiomics analysis in identifying subtle neuroanatomical changes.

Keywords:	ultrasound diagnostics; gestational diabetes mellitus; radiomics; neurosonography; newborns.
Funding:	the study was carried out without financial support from grants, public, non-profit, commercial organizations and structures.
Compliance with ethical standards:	the study was approved by the Ethics Committee of Siberian State Medical University (protocol No. 10159 from 02.10.2025). Informed consent was obtained from each patient.
For citation:	Zimina N.D., Pleshkov M.O., Voshchenko A.O., Fomina S.V., Samoilova Yu.G., Kudlai D.A., Mitselya E.V., Tolmachev I.V. Radiomics in assessing neurosonographic changes in newborns with diabetic fetopathy: analysis of ultrasound images. Siberian Journal of Clinical and Experimental Medicine. 2025;40(4):140–149. https://doi.org/10.29001/2073-8552-2025-40-4-140-149

Введение

Диабетическая фетопатия – это совокупность заболеваний плодов и новорожденных, матери которых страдали сахарным диабетом, возникающая с 84-го дня внутриутробной жизни (с 12-й нед.) до начала родов. Она характеризуется полисистемным поражением, метаболическими и эндокринными дисфункциями. Диабетическая фетопатия представляет собой серьезную медицинскую и социальную проблему, связанную с повышенным риском неблагоприятных исходов для здоровья матери и ребенка. С каждым годом заболеваемость сахарным диабетом среди беременных женщин растет экспоненциально, что подчеркивает актуальность и важность исследования данной темы^{1,2} [1–5].

Нейросонография (НСГ) является одним из наиболее распространенных методов диагностики церебральных нарушений у детей раннего возраста. Этот неинвазивный, безопасный, доступный по стоимости метод широко применяется в большинстве медицинских учреждений. НСГ не требует специальной подготовки ребенка перед обследованием и анестезиологического сопровождения. Хотя НСГ относится к скрининговым методам диагностики, спектр выявляемых патологических церебральных изменений сопоставим с результатами, полученными с помощью верифицирующих методов, таких как магнитно-резонансная и компьютерная томография [6, 7].

Радиомика – это метод извлечения большого количества количественных признаков (также называемых радиомиксными показателями) из медицинских изображений с использованием специализированных математических алгоритмов. Радиомика помогает выявить характеристики изображения, преимущественно связанные с текстурой изображения, которые не видны невооруженным глазом. Таким образом, радиомика преобразует изображение в многомерные количественные данные, что позволяет многократно увеличить объем информации, извлекаемой из каждого медицинского изображения [8].

Процедура применения радиомики включает в себя несколько основных этапов: получение цифрового медицинского изображения, сегментацию области интереса, непосредственно извлечение радиомиксных показателей, отбор значимых радиомиксных показателей и, наконец, построение и валидацию классификационных моделей [9–13].

Цель исследования: исследовать возможности при-

менения радиомиксного анализа ультразвуковых изображений для выявления изменений головного мозга при диабетической фетопатии у новорожденных.

Материал и методы

Исследование было проведено ретроспективно на основании ультразвуковых снимков, зарегистрированных на аппарате Logiq e при плановом осмотре новорожденных, находившихся в ОГАУЗ «Областной перинатальный центр им. И.Д. Евтушенко» (Томск, Россия) в период с 15 января по 18 сентября 2025 г. Все законные представители пациентов подписали информированные согласия.

Характеристика пациентов

Данные собраны из снимков ультразвукового исследования (УЗИ) головного мозга при обследовании 89 доношенных новорожденных (срок гестации – более 37 нед.), среди которых 45 (51%) здоровых новорожденных (контрольная группа) и 44 (49%) новорожденных основной группы, страдающих диабетической фетопатией. Отбор данных для исследования проводился из УЗИ-снимков пациентов в специальных проекциях для отображения четырех локализаций. При этом каждая проекция соответствовала одной из следующих локализаций: лобная доля (данные взяты у 45 здоровых и 37 больных), сагиттальный срез в области сосудистого сплетения (данные взяты у 41 здорового и 40 больных), сагиттальный срез в области мозолистого тела (данные взяты у 44 здоровых и 40 больных) и фронтальный срез в перивентрикулярной области (данные взяты у 45 здоровых и 44 больных).

Критерии включения в основную группу: ребенок, рожденный от матери с гестационным сахарным диабетом, с подтвержденной гипогликемией при рождении, подписанное информированное согласие, полученное от родителей пациента до проведения каких-либо процедур, связанных с исследованием.

Критерии исключения из исследования: недоношенный ребенок (срок гестации – менее 37 нед.), отсутствие гестационного сахарного диабета, системные заболевания, острые воспалительные заболевания на момент включения в исследование.

Регистрация результатов

УЗИ головного мозга выполнено на приборе экспертного класса Logiq e (США) с педиатрическим конвексным

¹ «Алгоритмы специализированной медицинской помощи больным сахарным диабетом». Под ред. Дедова И.И., Шестаковой М.В., Майорова А.Ю. Сахарный диабет. 2021;24(1S):1–148. <https://doi.org/10.14341/DM20211S>

² Association A.D. 14. Management of diabetes in pregnancy: standards of medical care in diabetes-2021. A.D. Association. Diabetes Care. 2021;44(Suppl_1):S200–S210.

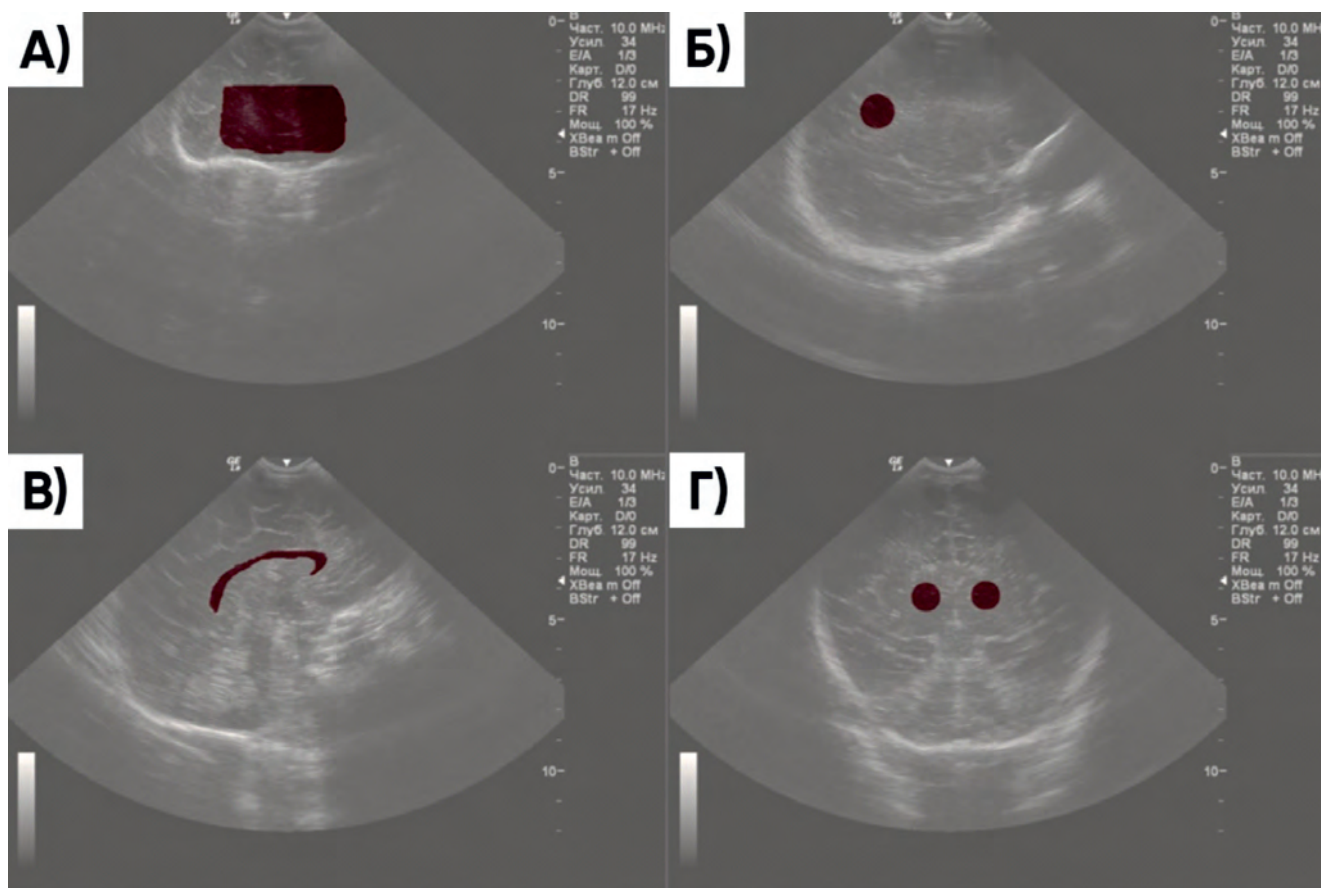


Рис. 1. Ультразвуковое изображение с сегментированными областями головного мозга новорожденного. Выделенная коричневым область представляет собой область интереса, в которой рассчитываются радиомиксные показатели

Примечание: А – лобная доля (F0-сканирование на уровне передних отделов обеих лобных долей); Б – парасагиттальный срез в области сосудистого сплетения (S2-сканирование в парасагиттальной плоскости головы); В – сагиттальный срез в области мозолистого тела (S0-сканирование в срединно-сагиттальной плоскости головы); Г – фронтальный срез в перивентрикулярной области (F4-сканирование в области теменной, височной долей и мозжечка).

Fig. 1. Ultrasound image with segmented regions of the neonatal brain. The area highlighted in brown represents the region of interest for calculating radiomics parameters

Note: A – frontal lobe (F0 scan at the level of the anterior portions of both frontal lobes); B – parasagittal section in the region of the choroid plexus (S2 scan in the parasagittal plane of the head); C – sagittal section in the region of the corpus callosum (S0 scan in the midsagittal plane of the head); C – Sagittal section in the region of the corpus callosum (S0 scan in the midsagittal plane of the head);

высокочастотным датчиком 10 МГц. Отбор данных для исследования проводился из УЗИ-снимков пациентов в следующих проекциях:

- лобная доля (F0-сканирование на уровне передних отделов обеих лобных долей), данные взяты у 45 здоровых и 37 больных;
- сагиттальный срез в области сосудистого сплетения (S2-сканирование в парасагиттальной плоскости головы), данные взяты у 41 здорового и 40 больных;
- сагиттальный срез в области мозолистого тела (S0-сканирование в срединно-сагиттальной плоскости головы), данные взяты у 44 здоровых и 40 больных;
- фронтальный срез в перивентрикулярной области (F4-сканирование в области теменной, височной долей и мозжечка), данные взяты у 45 здоровых и 44 больных.

Сегментация производилась на каждом полученном ультразвуковом изображении (рис. 1).

Извлечение радиомиксных показателей, статистический анализ данных, построение моделей и их анализ выполнены в Visual Studio 2022 при помощи Python 3.9. Для извлечения радиомиксных показателей использован пакет PyRadiomics. Оригинальные ультразвуковые изображения представляют собой трехканальные (цвет-

ные) изображения, но поскольку физически УЗИ не несет в себе цветовой информации, перед извлечением радиомиксных признаков ультразвуковые изображения были приведены к одноканальному виду (черно-белому) при помощи преобразования RGB2BW из библиотеки OpenCV, а также обработаны алгоритмом CLAHE [14] для повышения контрастности.

Основные классы извлеченных радиомиксных показателей: firstorder, shape, glcm, glrlm, glszm, gldm, ngtdm [15]. Для выявления различных текстурных и структурных особенностей изображения использовались следующие восемь фильтров: Gradient, Exponential, LoG (Laplacian of Gaussian), Wavelet, LBP2D, Square, SquareRoot, Logarithm. Таким образом, из каждого снимка извлечено 1 395 радиомиксных показателей, являющихся потенциальными предикторами. В дальнейшем проведен отбор значимых предикторов для классификации снимков и построения прогностической модели. Получилось четыре набора данных с радиомиксными показателями у больных и здоровых пациентов в каждой из четырех локализаций.

Переменной отклика является статус пациента (наличие либо отсутствие диабетической фетопатии) – бинарный категориальный признак.

Статистическая обработка данных выполнена при помощи библиотеки SciPy. Значения каждого радиомиксного предиктора сравнивались с целью выявления статистически значимых различий между группами нормы и патологии.

Проверка на нормальность распределения радиомиксных показателей в каждой из двух сравниваемых выборок выполнялась с помощью критерия Шапиро – Уилка. На основании результатов этой проверки для сравнения групп применялся *t*-критерий Стьюдента (для нормально распределенных показателей) или *U*-критерий Манна – Уитни (для показателей с отклонением от нормальности). Показатели со статистически значимыми различиями в группах были отобраны для дальнейшего анализа. Для исключения мультиколлинеарности выполнена фильтрация коррелированных признаков (порог корреляции Спирмена $|\eta| < 0,7$) с приоритизацией по уровню значимости. Для визуализации отобранных показателей построены диаграммы размаха и визуализировано *t*-SNE (*t*-distributed Stochastic Neighbor Embedding) при эффективном количестве ближайших соседей, равном 50.

Библиотека *scikit-learn* была использована для построения классификационных моделей. Для обучения моделей данные разделены на две выборки: обучающая – 80% ($n = 71$), тестовая – 20% ($n = 18$). При разбиении данных сохранена стратификация по целевому признаку для обеспечения репрезентативности. Обучающая и тестовая выборки стандартизированы с помощью *StandardScaler* (центрирование на среднее, масштабирование на стандартное отклонение). В качестве классификационных моделей выбраны деревья решений с автоматическим подбором наилучших гиперпараметров: максимальная глубина дерева, минимальное количество наблюдений, необходимое для разделения внутреннего узла, минимальное количество образцов в листовом узле и функция для измерения качества разделения. Построено четыре модели классификации – по одной для каждой из локализаций на ультрасонограммах.

Модели оценивались по метрикам на тестовой выборке, важности признаков (на основе среднего уменьшения неопределенности), а также устойчивости предсказаний с повторной стратифицированной пятикратной кросс-валидацией, среднему значению AUC и его стандартному отклонению. Такой подход обеспечивает баланс между точностью прогнозирования и устойчивостью моделей к малым размерам выборок в данном исследовании.

Результаты

При УЗИ в серошкальном режиме наблюдалась одинаковая частота субэпендимальных кист и дилатации боковых желудочков в обеих группах (7 против 5%; $p = 0,53$), однако внутривентрикулярные кровоизлияния и перивентрикулярный отек наблюдались только в основной группе (7 против 0%; $p < 0,05$).

В результате анализа были отобраны радиомиксные предикторы, продемонстрировавшие статистически значимые различия между группами больных и здоровых в каждой из четырех исследуемых локализаций (табл. 1).

На основе отобранных выше значимых радиомиксных признаков разработаны классификационные модели, прогнозирующие принадлежность пациентов к группе больных или здоровых. Модель 1 построена на радиомиксных признаках, отобранных из изображений лобной

доли; модель 2 – из признаков на сагиттальном срезе в области сосудистого сплетения; модель 3 – из показателей на сагиттальном срезе в области мозолистого тела; модель 4 – из предикторов на фронтальном срезе в перивентрикулярной области (рис. 2).

В дополнение к тому, что для визуализации методом *t*-SNE необходимы минимум две выборки разных признаков, модель 2 построена на одной независимой переменной, для визуальной оценки разделимости классов в локализации сосудистого сплетения использованы отобранный предиктор для построения модели (*log-sigma-5-0-mm-3D_glrIm_RunEntropy*) и вторая по статистической значимости переменная (*log-sigma-5-0-mm-3D_glcm_lmc1*). Для визуализации разделимости классов в других локализациях использованы исключительно те радиомиксные предикторы, которые были выбраны для построения моделей. Результаты визуализации методом *t*-SNE кластерной структуры радиомиксных предикторов, отобранных для построения моделей, при разных локализациях представлены на рисунке 3.

На основе визуальной оценки разделимости групп сделан вывод: во всех локализациях, за исключением сагиттального среза в области сосудистого сплетения, наблюдается умеренное разделение классов.

Работа каждой из моделей проверена на тестовых выборках. Результаты обучения и тестирования моделей представлены в таблице 2.

Модель 1 для лобной доли демонстрирует дисбаланс между чувствительностью (0,50) и специфичностью (0,88) при общей точности 0,71. ROC-AUC на тестовой выборке составил 0,69. Значительное расхождение между кросс-валидационным ($0,77 \pm 0,11$) и тестовым ROC-AUC (0,69), а также большая разница между обучающим и тестовым ROC-AUC указывают на переобучение модели. Классификационная способность модели оценивается как умеренная.

Модель 2 для сосудистого сплетения показывает обратный дисбаланс: чувствительность 0,75 при специфичности 0,56 и общей точности 0,65. Тестовый ROC-AUC равен 0,64, что близко к случайному угадыванию. Существенное несоответствие между результатами кросс-валидации ($AUC 0,59 \pm 0,18$), а также обучающим и тестовым ROC-AUC свидетельствует о переобучении и нестабильности модели. Качество классификации неудовлетворительное.

Модель 3 для мозолистого тела демонстрирует низкую чувствительность (0,50) при умеренной специфичности (0,78) и общей точности 0,65. Тестовый ROC-AUC равен 0,71, что указывает на ограниченную разделительную способность. Кросс-валидационный AUC равен $0,81 \pm 0,05$, что выше тестового. Вероятнее всего, данная модель переобучена и недостаточно надежна для классификации.

Модель 4 для перивентрикулярной области показывает высокие значения метрик: чувствительность – 1,00; специфичность – 0,78; общая точность – 0,89. Тестовый ROC-AUC (0,85) демонстрирует хорошую разделительную способность. Небольшое расхождение с кросс-валидационным AUC ($0,65 \pm 0,08$) может быть связано с особенностями разбиения выборки, но отсутствие значительного разрыва между обучающим и тестовым ROC-AUC, вероятнее всего, свидетельствует об отсутствии переобучения. Таким образом, данная модель демон-

Таблица 1. Радиомиксные признаки, использованные для построения классификационных моделей по данным из различных локализаций

Table 1. Radiomics signs used to construct classification models based on data from various locations

Модель	Локализация	Значимые радиомиксные признаки
1	Лобная доля	1. square glcm ClusterProminence 2. wavelet-HH glszm ZoneVariance 3. squareroot_gldm DependenceEntropy 4. log-sigma-2-0-mm-3D glszm SmallAreaHighGrayLevelEmphasis
2	Сосудистое сплетение	1. log-sigma-5-0-mm-3D_glrIm RunEntropy
3	Мозолистое тело	1. log-sigma-5-0-mm-3D glszm GrayLevelVariance 2. square glrIm ShortRunEmphasis 3. wavelet-HL LargeDependenceHighGrayLevelEmphasis gldm
4	Перивентрикулярная область	1. log-sigma-4-0-mm-3D ngtdm Strength 2. wavelet-HH ngtdm Contrast 3. log-sigma-2-0-mm-3D glszm LargeAreaHighGrayLevelEmphasis

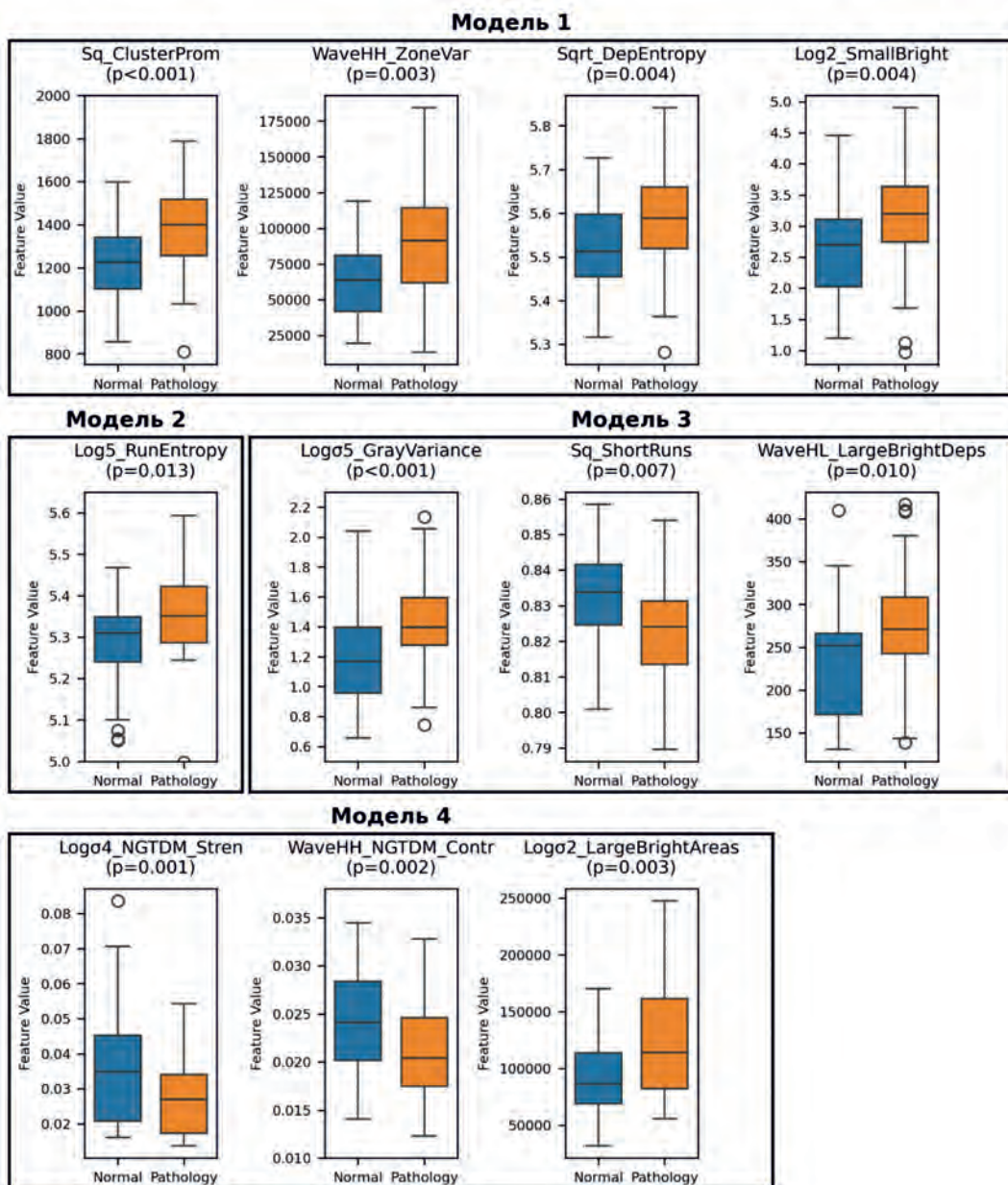


Рис. 2. Диаграммы размаха радиомиксных параметров в группах моделей 1–4
Fig. 2. Group boxplot of radiomic parameters of models 1–4

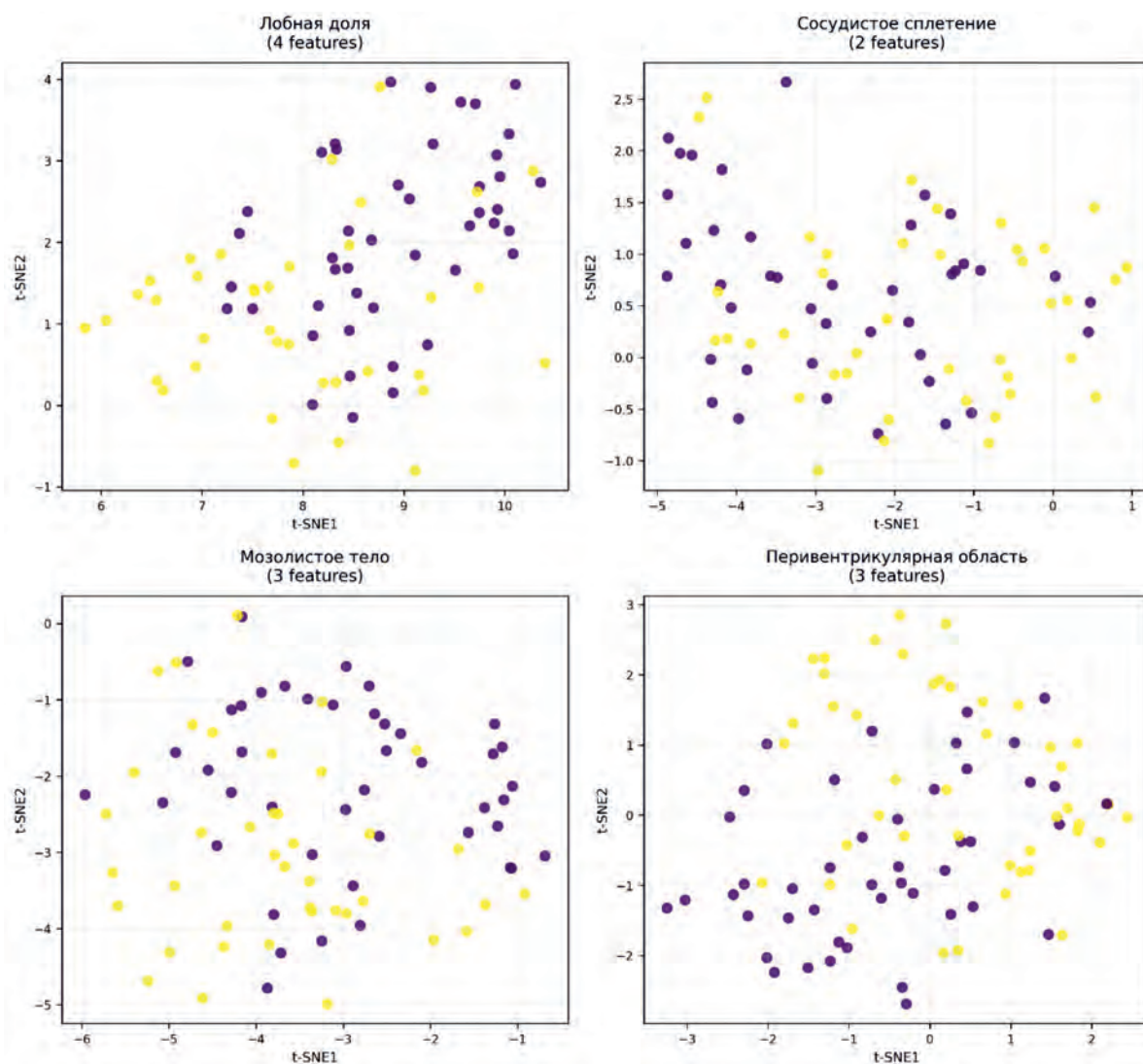


Рис. 3. Проекция многомерного пространства радиомиксных предикторов групп норма и патология на плоскость методом t-SNE (perplexity = 50)
Fig. 3. t-SNE projection of the multidimensional radiomics predictor space for normal and pathology groups (perplexity = 50)

Таблица 2. Ключевые метрики четырех построенных моделей для классификации пациентов по радиомиксным признакам (Se – чувствительность, Sp – специфичность, Accuracy – точность, Test ROC-AUC – качество на тестовой выборке, CV ROC-AUC – качество при кросс-валидации)

Table 2. Key metrics of 4 constructed models for classifying patients based on radiomics features (Se – sensitivity, Sp – specificity, Accuracy – точность, Test ROC-AUC – качество на тестовой выборке, CV ROC-AUC – качество при кросс-валидации)

№ модели	Se	Sp	Accuracy	Test ROC-AUC	CV ROC-AUC
1	0,50	0,88	0,71	0,69	0,77 ± 0,11
2	0,75	0,56	0,65	0,64	0,59 ± 0,18
3	0,50	0,78	0,65	0,71	0,81 ± 0,05
4	1,00	0,78	0,89	0,85	0,65 ± 0,08

стрирует наиболее сбалансированное и устойчивое качество классификации среди всех построенных моделей (рис. 4).

Обсуждение

На сегодняшний день основным признаком нарушения постнатального периода у новорожденных, родившихся от матерей с гестационным сахарным диабетом, можно считать функциональные расстройства, характеризующиеся синдромом угнетения центральной нервной системы (ЦНС). Ожидаемым последствием данных неврологических расстройств является их сохранение и в более поздние сроки жизни. Перинатальное поражение

ЦНС выступает в качестве основы для формирования отдаленных психоневрологических расстройств. Именно синдром угнетения ЦНС стал ключевым фактором, способствующим необходимости перевода новорожденных на второй этап выхаживания. Неврологические отклонения представляют собой основную патологию раннего неонатального периода у детей, появившихся на свет от матерей с гестационным сахарным диабетом. Синдром угнетения ЦНС, выявленный уже в родильном зале, в конечном итоге влияет на уровень здоровья младенцев, детей и подростков [16, 17].

Модели, разработанные для изображений лобной доли (модель 1) и фронтального среза (модель 4) в перивентрикулярной области, показали хорошее качество

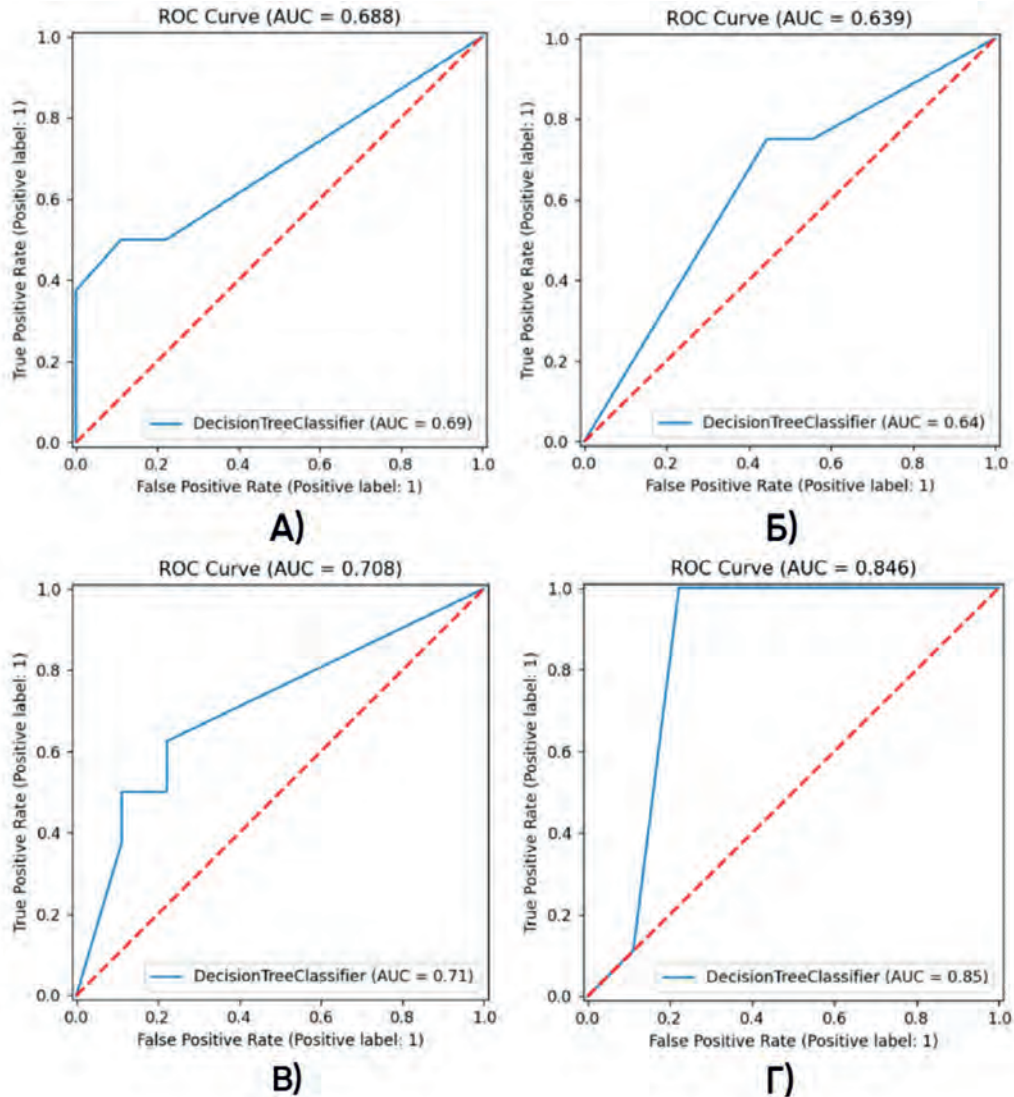


Рис. 4. ROC-кривые построенных классификационных моделей: А – модель 1; Б – модель 2; В – модель 3; Г – модель 4
 Fig. 4. ROC curves for the constructed classification models: А – Model 1; Б – Model 2; В – Model 3; Г – Model 4

классификации текстурных изменений головного мозга у новорожденных с диабетической фетопатией в сравнении со здоровыми, поэтому они были выбраны для интерпретации и дальнейшей валидации.

Анализ предикторов модели 1 (локализация – лобная доля) подтвердил их высокую информативность. Предикторы `square_gldm_Cluster Prominence`, `wavelet_HH_glszm_ZoneVariance`, `squareroot_gldm_Dependence Entropy` демонстрируют разнородную неравномерную текстуру ткани лобной доли с множественными мелкими яркими участками у группы с фетопатией в сравнении с группой здоровых. Это соответствует ультразвуковым признакам неравномерных диффузных изменений тканей с преобладанием мелких участков повышенной эхогенности.

В Модели 4 (локализация – перивентрикулярная область) выделяются другие важные предикторы. Предикторы `log-sigma-4-0-mm-3D_ngtdm_Strength`, `wavelet_HH_ngtdm_Contrast`, `log-sigma-2-0-mm-3D_glszm_LargeAreaHighGrayLevelEmphasis` указывают на более выраженные изменения ткани мозга новорожденных с диабетической фетопатией, включающие гомогенизацию изображения за счет более однородной текстуры

ткани с преобладанием ярких участков, а также снижение разницы в яркости рядом расположенных пикселей. Перечисленные изменения соответствуют выраженному диффузному повышению эхогенности тканей мозга при УЗИ пациентов с диабетической фетопатией. Зарегистрированное повышение эхогенности исследуемых тканей, неравномерное в лобной доле и более выраженное в перивентрикулярных зонах, является неблагоприятным патогенетическим признаком, отражающим нейротоксическое влияние глюкозы с эпизодами гипергликемии на структуру головного мозга новорожденных. Проведенный радиомиксный анализ ультразвуковых изображений головного мозга новорожденных с диабетической фетопатией показал возможность выявлять текстурные изменения мозга, не видимые при стандартной НСГ.

Полученные в нашем исследовании результаты радиомиксного анализа согласуются с данными L.R. Sultan и соавт., разработавших комбинированную радиомиксную модель с использованием ультразвуковых изображений (AUC – 0,72, специфичность – 0,86) для оценки текстурных изменений базальных ганглиев и белого вещества у новорожденных, подвергшихся воздействию вируса иммунодефицита человека, но не инфицированных, в

сравнении со здоровыми новорожденными. Авторы обращают внимание на изменение гетерогенности, энтропии, неоднородности серого исследуемой ткани у пациентов с патологией и делают вывод о возможности использования данного подхода в клинической практике [18].

Таким образом, данное исследование подчеркивает значение использования различных текстурных характеристик для выявления патологий в неврологии, а также необходимость дальнейшего улучшения специфичности моделей для повышения точности диагностики.

Заключение

В проведенном исследовании головного мозга новорожденных с диабетической фетопатией в сравнении с контрольной группой НСГ в В-режиме не выявила значительных изменений, за исключением случаев внутрижелудочковых кровоизлияний и перивентрикулярного отека. Однако следует отметить, что указанные изменения наблюдались лишь в 7% случаев. Это подчеркивает необходимость не только идентифицировать указанные патологические изменения, но и исследовать другие потенциальные изменения в структурах головного мозга, которые могут быть не видны при стандартной визуализации. Такой подход позволит создать более полную картину структурных изменений мозга в данной группе новорожденных.

Радиомиксный анализ ультразвуковых изображений головного мозга определил неравномерные диффузные изменения лобных долей с преобладанием мелких участков повышенной эхогенности, а также более выраженное диффузное повышение эхогенности перивентрикулярных зон у пациентов с диабетической фетопатией в сравнении со здоровыми новорожденными.

Представленные в исследовании диагностические методы в будущем могут лечь в основу цифрового персонализированного подхода к ведению новорожденных, включающего не только оценку ультразвуковых изображений, но и клинично-демографические данные пациенток с гестационным сахарным диабетом и без него.

Ограничения нашего исследования связаны прежде всего с небольшим числом пациентов. В дальнейшем планируется расширение выборки, что позволит более точно оценить эффективность методов радиомики в диагностике и мониторинге нейросонографических изменений у новорожденных с диабетической фетопатией. Это также поможет выявить новые паттерны и характеристики ультразвуковых изображений, что может значительно улучшить исходы клинической практики и повысить качество ухода за данной группой пациентов.

Выводы

Оценка ультразвуковых изображений на основе радиомиксного анализа позволяет определять изменения структуры головного мозга у новорожденных с диабетической фетопатией. Представленный подход может быть использован в клинической практике в качестве неинвазивного инструмента диагностики изменений в головном мозге у новорожденных с диабетической фетопатией. Более того, данная модель может лечь в основу клинично-радиомиксной модели оценки изменений головного мозга, включающей не только свойства ультразвуковых изображений, но и клинично-демографические данные пациентов.

Литература / References

1. Дедов И.И., Шестакова М.В., Викулова О.К., Железнякова А.В., Исаков М.А., Сазонова Д.В., Мокрышева Н.Г. Сахарный диабет в Российской Федерации: динамика эпидемиологических показателей по данным Федерального регистра сахарного диабета за период 2010–2022 г. *Сахарный диабет*. 2023;26(2):104–123. <https://doi.org/10.14341/DM13035>
2. Dedov I.I., Shestakova M.V., Vikulova O.K., Zheleznyakova A.V., Isakov M.A., Sazonova D.V., Mokrysheva N.G. Diabetes mellitus in the Russian Federation: dynamics of epidemiological indicators according to the Federal Register of Diabetes Mellitus for the period 2010–2022. *Diabetes mellitus*. 2023;26(2):104–123. <https://doi.org/10.14341/DM13035>
3. Holt R.I.G., Flyvbjerg A. (eds.). Textbook of diabetes. Sixth edition. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell, 2024. ISBN: 978-1-119-69742-8.
4. Riddle M.C., Cefalu W.T., Evans P.H., Gerstein H.C., Nauck M.A., Oh W.K. et al. Consensus Report: Definition and Interpretation of Remission in Type 2 Diabetes. *Diabetes Care*. 2021;44(10):2438–2444. <https://doi.org/10.2337/dci21-0034>
5. Лебедева М.А. Особенности ведения беременности и родоразрешения при диабетической фетопатии: дис. ... канд. мед. наук : 14.01.01 / М.А. Лебедева. [Место защиты: ФГБОУ ВО «Московский государственный медикостоматологический университет имени А.И. Евдокимова»]. Москва, 2021:120. Lebedeva M.A. Features of pregnancy management and childbirth in diabetic fetopathy: dis. ... candidate of medical sciences: 14.01.01 / M.A. Lebedeva. [Place of protection: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Moscow State University of Medicine and Tomatology named after A.I. Evdokimov"]. Moscow, 2021:120.
6. Herath M.P., Beckett J.M., Hills A.P., Byrne N.M., Ahuja K.D.K. Gestational diabetes mellitus and infant adiposity at birth: A systematic review and meta-analysis of therapeutic interventions. *J. Clin. Med.* 2021;10(4):835. <https://doi.org/10.3390/jcm10040835>
7. Нуднов Н.В., Бит-Юнан Е.В., Шахвалиева Э.С., Борисов А.А., Султанова П.Н., Иванников М.Е. и др. Радиомика в дифференциальной диагностике очаговых поражений головного мозга: ретроспективное исследование. *Лучевая диагностика и терапия*. 2024;15(3):32–38. <https://doi.org/10.22328/2079-5343-2024-15-3-32-38>
8. Nudnov N.V., Bit-Yunan E.V., Shakhvalieva E.S., Borisov A.A., Sultanova P.N., Ivannikov M.E. et al. Radiomics in the differential diagnosis of focal brain lesions: a retrospective study. *Radiation diagnosis and therapy*. 2024;15(3):32–38. <https://doi.org/10.22328/2079-5343-2024-15-3-32-38>
9. Шухратбекова М.Х. Роль нейросонографии в диагностике задержки нервно-психического развития у детей раннего возраста. *Экономика и социум*. 2023;(10(113)):1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-neyrosonografii-v-diaagnostike-zaderzhki-nervno-psiicheskogo-razvitiya-u-detey-rannego-vozrasta> (14.09.2025).
10. Shukhratbekova M.Kh. The role of neurosonography in the diagnosis of neuropsychic developmental delay in early children. *Economy and Society*. 2023;(10 (113)):1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-neyrosonografii-v-diaagnostike-zaderzhki-nervno-psiicheskogo-razvitiya-u-detey-rannego-vozrasta> (09.14.2025).
11. Hatt M., Le Rest C.C., Tixier F., Badic B., Schick U., Visvikis D. Radiomics: Data are also images. *J. Nucl. Med.* 2019;60(Suppl. 2):38S–44S. <https://doi.org/10.2967/jnumed.118.220582>
12. Lambin P., Rios-Velazquez E., Leijenaar R., Carvalho S., van Stiphout R.G., Granton P. et al. Radiomics: Extracting more information from medical images using advanced feature analysis. *Eur. J. Cancer*. 2012;48(4):441–446. <https://doi.org/10.1016/j.ejca.2011.11.036>
13. Jiang H., Chen L., Zhao Y.J., Lin Z.Y., Yang H. Machine learning-based ultrasonics for predicting subacromial impingement syndrome stages. *J. Ultrasound Med.* 2022;41(9):2279–2285. <https://doi.org/10.1002/jum.15914>
14. Jia Y., Yang J., Zhu Y., Nie F., Wu H., Duan Y., Chen K. Ultrasound-based radiomics: current status, challenges and future opportunities. *Med. Ultrason.* 2022;24(4):451–460. <https://doi.org/10.1152/mu-3248>
15. McCague C., Ramlee S., Reinius M., Selby I., Hulse D., Piyatissa P. et al. Introduction to radiomics for a clinical audience. *Clin. Radiol.* 2023;78(2):83–98. <https://doi.org/10.1016/j.crad.2022.08.149>
16. Van Griethuysen J.J.M., Fedorov A., Parmar C., Hosny A., Aucoin N., Narayan V. et al. Computational radiomics system to decode the radiographic phenotype. *Cancer Research*. 2017;77(21):e104–e107. <https://doi.org/10.1158/0008-5472.CAN-17-0339>
17. Triantafyllou M., Vassalou E.E., Goulianou A.M., Tosounidis T.H., Marias K., Karantanas A.H. et al. The effect of ultrasound image pre-

processing on radiomics feature quality: A study on shoulder ultrasound. *J. Imaging Inform. Med.* 2025 Feb 6. Epub ahead of print. <https://doi.org/10.1007/s10278-025-01421-w>

15. Zwanenburg A., Vallières M., Abdalah M.A., Aerts H.J.W.L., Andrearczyk V., Apte A. et al. The image biomarker standardization initiative: Standardized quantitative radiomics for high-throughput image-based phenotyping. *Radiology*. 2020;295(2):328–338. <https://doi.org/10.1148/radiol.2020191145>
16. Араке́лян Г.А., Оразмура́дов А.А., Маяцкая Т.А., Бекбаева И.В., Котайш Г.А. Особенности новорожденных от матерей с гестационным сахарным диабетом и прегестационным ожирением. *Акушерство и гинекология: новости, мнения, обучение*. 2020;8(3). Прил.:24–29. <https://doi.org/10.24411/2303-9698-2020-13904>
Arakelian G.A., Orazmuradov A.A., Mayatskaya T.A., Bekbaeva I.V., Kotaysh G.A. Features of newborns from mothers with gestational diabetes mellitus and pregestational obesity. *Obstetrics and Gynecology: news, opinions, training*. 2020;8(3).Suppl.:24–29. <https://doi.org/10.24411/2303-9698-2020-13904>

Информация о вкладе авторов

Зими́на Н.Д., Плешков М.О., Во́щенко А.О., Фомина С.В. – написание статьи, сбор данных, анализ и интерпретация данных, оформление рукописи; Самойлова Ю.Г., Кудлай Д.А. – разработка концепции и дизайна публикации, проверка интеллектуального содержания, окончательное утверждение рукописи для публикации; Мицеля Е.В., Толмачев И.В. – проверка интеллектуального содержания.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах

Зими́на Наталья Даниловна, ассистент мультипрофильного аккредитационно-симуляционного центра, СибГМУ Минздрава России; врач ультразвуковой диагностики, Областной перинатальный центр им. И.Д. Евтушенко, Томск, Россия, e-mail: falloutger@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0005-9576-666X>.

Плешков Максим Олегович, младший научный сотрудник, руководитель отдела разработки медицинского программного обеспечения, научно-технологический центр «Цифровая медицина и киберфизика», СибГМУ Минздрава России, Томск, Россия, e-mail: maksim.o.pleshkov@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-4131-0115>.

Во́щенко Артур Олегович, лаборант-исследователь, отдел разработки медицинского программного обеспечения НТЦ «Цифровая медицина и киберфизика», СибГМУ Минздрава России, Томск, Россия, e-mail: arthurvoshchenko@mail.ru; <https://0009-0008-8733-130X>.

Фомина Светлана Викторовна, канд. мед. наук, доцент, заведующий отделением – врач ультразвуковой диагностики, СибГМУ Минздрава России, Томск, Россия, e-mail: stafom@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7517-3393>.

Самойлова Юлия Геннадьевна, д-р мед. наук, профессор, кафедра педиатрии с курсом эндокринологии, СибГМУ Минздрава России; директор института медицины и медицинских технологий, НГУ, Новосибирск, Россия, e-mail: samoilova_v@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2667-4842>.

Кудлай Дмитрий Анатольевич, д-р мед. наук, профессор, Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России, Москва, Россия, e-mail: kudlay_d_a@staff.sechenov.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1878-4467>.

Мицеля Елена Вадимовна, аспирант кафедры педиатрии с курсом эндокринологии, СибГМУ Минздрава России; врач-эндокринолог, Областной перинатальный центр им. И.Д. Евтушенко, Томск, Россия, e-mail: voelva@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1429-3604>.

Толмачев Иван Владиславович, канд. мед. наук, руководитель научно-технологического центра «Цифровая медицина и киберфизика», СибГМУ Минздрава России, Томск, Россия, e-mail: ivantolm@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2888-5539>.

17. Сахарова Е.С., Кешишян Е.С., Алямовская Г.А. Взаимосвязь результатов ультразвукового краниального исследования – нейросонографии – с исходами психомоторного развития детей, рожденных глубоко недоношенными. *Российский вестник перинатологии и педиатрии*. 2019;64(5):33–37. <https://doi.org/10.21508/1027-4065-2019-64-5-33-37>
Sakharova E.S., Keshishyan E.S., Alyamovskaya G.A. Relationship between the results of cranial ultrasound examination – neurosonography – and the outcomes of psychomotor development of children born extremely premature. *Russian Bulletin of Perinatology and Pediatrics*. 2019;64(5):33–37. <https://doi.org/10.21508/1027-4065-2019-64-5-33-37>
18. Sultan L.R., Ramirez-Suarez K.I., Schenkel S.R., Schaeubinger M.M., Cerron-Vela C., Kgole S.W. et al. Brain ultrasound radiomics identify textural differences in basal ganglia and white matter between full term newborns HIV-exposed uninfected and HIV-unexposed in Botswana. *Early Hum. Dev.* 2025;210:106368. <https://doi.org/10.1016/j.earhumdev.2025.106368>

Information on author contributions

Zimina N.D., Pleshkov M.O., Voshchenko A.O., and Fomina S.V. manuscript writing, data collection, data analysis and interpretation; Samoylova Yu.G., Kudlai D.A. conceptualization and design of the publication, critical revision of intellectual content, final approval of the manuscript for publication; Mitselya E.V. and Tolmachev I.V. critical revision of intellectual content.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Information about the authors

Natalya D. Zimina, Assistant, Multidisciplinary Accreditation and Simulation Center, SSMU; Ultrasound Diagnostics Physician, I.D. Yevtushenko Regional Perinatal Center, Tomsk, Russia, e-mail: falloutger@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0005-9576-666X>.

Maxim O. Pleshkov, Junior Research Scientist, Head of the Medical Software Development Department, Digital Medicine and Cyberphysics Research and Technology Center, SSMU, Tomsk, Russia, e-mail: maksim.o.pleshkov@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-4131-0115>.

Artur O. Voshchenko, Research Assistant, Medical Software Development Department, Scientific and Technical Center "Digital Medicine and Cyberphysics", SSMU, Tomsk, Russia, e-mail: arthurvoshchenko@mail.ru; <https://0009-0008-8733-130X>.

Svetlana V. Fomina, Cand. Sci. (Med.), Associate Professor, Head of Department – Ultrasound Diagnostics Physician, SSMU, Tomsk, Russia, e-mail: stafom@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7517-3393>.

Yulia G. Samoilova, Dr. Sci. (Med.), Professor, Department of Pediatrics with a Course in Endocrinology, SSMU, Tomsk, Russia; Director of the Institute of Medicine and Medical Technologies, Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia; e-mail: samoilova_v@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2667-4842>.

Dmitry A. Kudlai, Dr. Sci. (Med.), Professor, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow, Russia; e-mail: kudlay_d_a@staff.sechenov.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1878-4467>.

Elena V. Mitselya, Graduate Student, Department of Pediatrics with a Course in Endocrinology, SSMU; Endocrinologist, I.D. Yevtushenko Regional Perinatal Center, Tomsk, Russia, e-mail: voelva@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1429-3604>.

Ivan V. Tolmachev, Cand. Sci. (Med.), Head of the Digital Medicine and Cyberphysics Research and Technology Center, SSMU, Tomsk, Russia, e-mail: ivantolm@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2888-5539>.

Received 15.10.2025;
review received 17.11.2025;
accepted for publication 19.11.2025.

Поступила 15.10.2025;
рецензия получена 17.11.2025;
принята к публикации 19.11.2025.