



ISSN 1607-0763 (Print); ISSN 2408-9516 (Online)
<https://doi.org/10.24835/1607-0763-1359>

Радиомика фетальной магнитно-резонансной томографии при врожденной диафрагмальной грыже

© Сыркашев Е.М.^{1, 2*}, Буров А.А.¹, Подуровская Ю.Л.¹, Кадырбердиева Ф.З.¹, Икрянников Е.О.², Семенов Д.С.², Шарова Д.Е.², Васильев Ю.А.², Гус А.И.¹

¹ ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр акушерства, гинекологии и перинатологии имени академика В.И. Кулакова» Минздрава России; 117997 Москва, ул. Академика Опарина, д. 4, Российская Федерация

² ГБУЗ «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий ДЗ города Москвы»; 109029 Москва, Средняя Калитниковская ул., д. 28, стр. 1, Российская Федерация

Цель исследования: анализ возможностей радиомики в качестве источника дополнительной диагностической информации о структурной зрелости легких.

Материал и методы. В ретроспективное исследование включили 72 беременных: 35 с изолированной врожденной диафрагмальной грыжей плода (1-я группа, основная) и 37 без патологии легких плода (2-я группа, контрольная). Были получены фронтальные или кософронтальные T2ВИ (T2 FSE). Сегментация зон интереса на уровне легких плода проводилась вручную с использованием ИТК-Snar. С использованием rugadiomics было извлечено 107 радиомических признаков. Статистический анализ проводился с помощью пакета статистического анализа Statistica 10 (США) для выявления корреляции между значениями признаков и целевой переменной (наличие патологии легких при врожденной диафрагмальной грыже), а также для отображения различий в группах сравнения в зависимости от выявленных показателей.

Результаты. Были определены статистически значимые признаки для 2D- и 3D-сегментаций ($p < 0,05$). Для 2D- и 3D-сегментаций количество значимых признаков оказалось равно 14 и 73 соответственно. После исключения признаков, имеющих взаимные корреляции, их количество сократилось до 6 и 8 для одиночных срезов и 3D-изображений соответственно. Также были подсчитаны коэффициенты корреляции между признаками и наличием патологии легких. В случае использования 3D-изображений количество признаков, имеющих значимые коэффициенты корреляции ($r > 0,4$, $p < 0,05$), оказалось равно 20, в то время как для одиночных срезов данный показатель равен 3.

Заключение. Полученные данные позволяют сделать вывод о целесообразности применения текстурного анализа 3D-МРТ-изображений в качестве источника дополнительной диагностической информации о структурной зрелости легких.

Ключевые слова: фетальная МРТ, радиомика, акушерство и гинекология, текстурный анализ, врожденная диафрагмальная грыжа

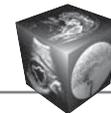
Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.

Для цитирования: Сыркашев Е.М., Буров А.А., Подуровская Ю.Л., Кадырбердиева Ф.З., Икрянников Е.О., Семенов Д.С., Шарова Д.Е., Васильев Ю.А., Гус А.И. Радиомика фетальной магнитно-резонансной томографии при врожденной диафрагмальной грыже. *Медицинская визуализация*. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1359>

Поступила в редакцию: 12.05.2023.

Принята к печати: 06.06.2023.

Опубликована online: 01.12.2023.



Radiomics of fetal magnetic resonance imaging in congenital diaphragmatic hernia

© Egor M. Syrkashev^{1, 2*}, Artem A. Burov¹, Yulia L. Podurovskaya¹,
Faina Z. Kadyrberdiyeva¹, Egor O. Ikryannikov², Dmitriy S. Semenov²,
Daria E. Sharova², Yuriy A. Vasilev², Aleksandr I. Gus¹

¹ Research Center for Obstetrics, Gynecology and Perinatology named by V.I. Kulakov of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation; 4, Akademika Oparina street, Moscow 117997, Russian Federation

² Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of Moscow Healthcare Department; 24, Petrovka str., Moscow 127051, Russian Federation

Objectives. Analysis of possibilities of radiomics as a source of additional diagnostic information about the structural maturity of the lungs

Materials and methods. A retrospective study included 72 pregnant women: 35 with congenital fetal diaphragmatic hernia (group 1) and 37 without fetal lung pathology (group 2). Frontal or co-frontal T2 images (T2 FSE) were obtained. Segmentation of regions of interest at the fetal lung level was performed manually with ITK-Snap. A total of 107 radiomic features were extracted using pyradiomics. The statistical analysis was performed using the STATISTICA 10 statistical analysis package (USA) to detect correlation between trait values and the target variable (presence of lung pathology in CDH), and to show differences in the comparison groups according to the detected parameters.

Results. Statistically significant features were identified for 2D and 3D segmentations ($p < 0.05$). For 2D and 3D segmentations, the number of significant features was 14 and 73, respectively. After exclusion of features with cross-correlations, their number decreased to 6 and 8 for single slices and 3D images, respectively. Correlation coefficients between the features and the presence of lung pathology were also calculated. In the case of 3D images, the number of features with significant correlation coefficients ($r > 0.4$, $p < 0.05$) equaled 20, while for single-slice images this number was 3.

Conclusion. The data obtained allow to conclude that it is reasonable to use texture analysis of the 3D MRI images as a source of additional diagnostic information concerning the structural maturity of the lungs.

Keywords: fetal MRI, radiomics, obstetrics and gynecology, texture analysis, congenital diaphragmatic hernia

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest. The study had no sponsorship.

For citation: Syrkashev E.M., Burov A.A., Podurovskaya Y.L., Kadyrberdiyeva F.Z., Ikryannikov E.O., Semenov D.S., Sharova D.E., Vasilev Y.A., Gus A.I. Radiomics of fetal magnetic resonance imaging in congenital diaphragmatic hernia. *Medical Visualization*. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1359>

Received: 12.05.2023.

Accepted for publication: 06.06.2023.

Published online: 01.12.2023.

Введение

Под термином “радиомика” принято понимать извлечение, анализ и интерпретацию множества количественных характеристик медицинских изображений [1, 2]. Данная методика включает в себя так называемый текстурный анализ, позволяющий проводить объективную оценку зоны интереса посредством выявления особенностей распределения и взаимодействия пикселей и вокселей на изображении [3]. К целям такого подхода относят определение визуально недоступных особенностей изображений, характеризующих конкретную область или ткань, а также построение количественных прогностических моделей различных клинических исходов [2]. Несмотря на то что первоначально текстурный анализ был использован в ди-

агностике и прогнозировании исходов онкологических заболеваний, в настоящее время данные подходы все чаще применяются в самых различных направлениях визуальной диагностики, в том числе антенатальной [4–8].

Фетальная магнитная-резонансная томография (МРТ) является важным дополнительным диагностическим методом в оценке особенностей развития плода [9, 10]. Поданным Международного общества по применению ультразвука в акушерстве и гинекологии (International Society of Ultrasound in Obstetrics and Gynecology, ISUOG), показанием к выполнению МРТ является подтверждение результатов ультразвукового исследования (УЗИ) либо получение важной дополнительной информации [11]. Среди наиболее частых причин



проведения МРТ можно выделить аномалии развития головного мозга, дефекты нервной трубки, врожденную диафрагмальную грыжу, а также различные пороки легких [12]. Своевременное выполнение МРТ играет основополагающую роль в планировании возможных исходов беременности и необходимости проведения как дополнительных методов интенсивной терапии в родильном зале, так и на этапе предоперационной подготовки [13, 14].

Большинство структурных изменений легких могут быть обнаружены при рутинной эхографии на сроке 18–20 нед беременности [15]. При этом в некоторых случаях даже в руках опытных специалистов прецизионная ультразвуковая диагностика может быть затруднена, в особенности при маловодии, избыточной массе тела беременной или на более поздних сроках гестации. В подобных наблюдениях для подтверждения диагноза либо получения дополнительной информации требуется выполнение МРТ. К преимуществам данного метода можно отнести большее поле обзора и высокий контраст от мягких тканей, в то время как влияние на качество изображений конституции беременной, положения плода или количества околоплодных вод значительно менее выражено. Кроме того, с использованием стандартизированных протоколов сканирования, согласно рекомендациям ISUOG, данные МРТ плода вполне соответствуют требованиям для проведения текстурного анализа [12]. Объективный количественный анализ изображений с использованием радиомики в совокупности с традиционной визуальной оценкой изображений потенциально позволит улучшить не только точность и качество диагностики, но и прогнозирование исходов различных заболеваний, включая аномалии развития легочной ткани, которые зачастую требуют проведения дополнительных мероприятий в родильном зале (например, потребность в проведении экстракорпоральной мембранной оксигенации или искусственной вентиляции легких) [16].

На сегодняшний день в отечественной и иностранной литературе отсутствуют данные о различиях между показателями текстурного анализа легких плода в норме и при врожденной диафрагмальной грыже. В связи с этим представляется крайне актуальным изучение возможностей радиомики в антенатальной диагностике аномалий развития легочной ткани.

Материал и методы

В ретроспективное исследование было включено 72 беременных: 35 с изолированной врожденной диафрагмальной грыжей плода (1-я груп-

па, основная) и 37 без патологии легких плода (2-я группа, контрольная). Всем была выполнена МРТ. 2-ю группу составили пациентки, патология плода которых не затрагивает состояние легких (аномалии развития головного мозга ($n = 25$), дефекты нервной трубки ($n = 7$), образования брюшной полости ($n = 2$), аномалии тел позвонков ($n = 3$)). Для анализа были отобраны Т2ВИ во фронтальной или кософронтальной плоскости. Исследования исключали при отсутствии результатов УЗИ (для определения точного срока гестации в неделях и днях), наличии значительных артефактов в зоне интереса на фоне активных движений плода или дыхательных движений матери.

Все исследования были проведены на томографе Toshiba Excelart Vantage с индукцией магнитного поля 1,5 Тл без использования седативных или контрастных препаратов. Фронтальные или кософронтальные Т2ВИ были получены с использованием импульсной последовательности Т2 FSE (fast spin echo) со следующими параметрами: TR – 7500–11520 мс, TE – 91–174 мс, поле обзора – 270 × 400–409 × 399 мм, матрица – 256 × 256–320 × 320, толщина среза – 3–4 мм, SAR ≤ 2 Вт/кг. Параметры сканирования были идентичны у всех пациентов.

Зоны интереса выделялись вручную на уровне легких плода после предобработки исследований, включающей анонимизацию и архивирование Т2ВИ во фронтальной или кософронтальной проекции с использованием открытого программного обеспечения Itk-Snap [17]. При врожденной диафрагмальной грыже сегментация проводилась на уровне контралатерального легкого по отношению к стороне дефекта (рис. 1).

Данные МРТ и соответствующие сегментации легких экспортировались в формате nifti. Текстурный анализ включал следующие показатели: признаки первого рода, описывающие распределение интенсивности пикселей (для 2D) и вокселей (для 3D) в выделенной области, размерные признаки, а также признаки, характеризующие текстуру изображений (данные признаки описывают взаимное расположение пикселей и вокселей с различными интенсивностями сигнала). Радиомические признаки извлекались с помощью программного обеспечения Pyradiomics с использованием Python 3.7.1. Нормализация изображений проводилась со следующими параметрами: `normalize = True`, `normalize Scale=100`, `binwidth = 5`, `voxel Array Shift = 300`, `resampled Pixel Spacing = [0.78, 0.78, 5]`. Текстурный анализ проводили с получением различных признаков следующих классов: First Order ($n = 18$), Shape ($n = 14$), Grey Level Co-occurrence Matrix (GLCM, $n = 24$), Grey Level Size

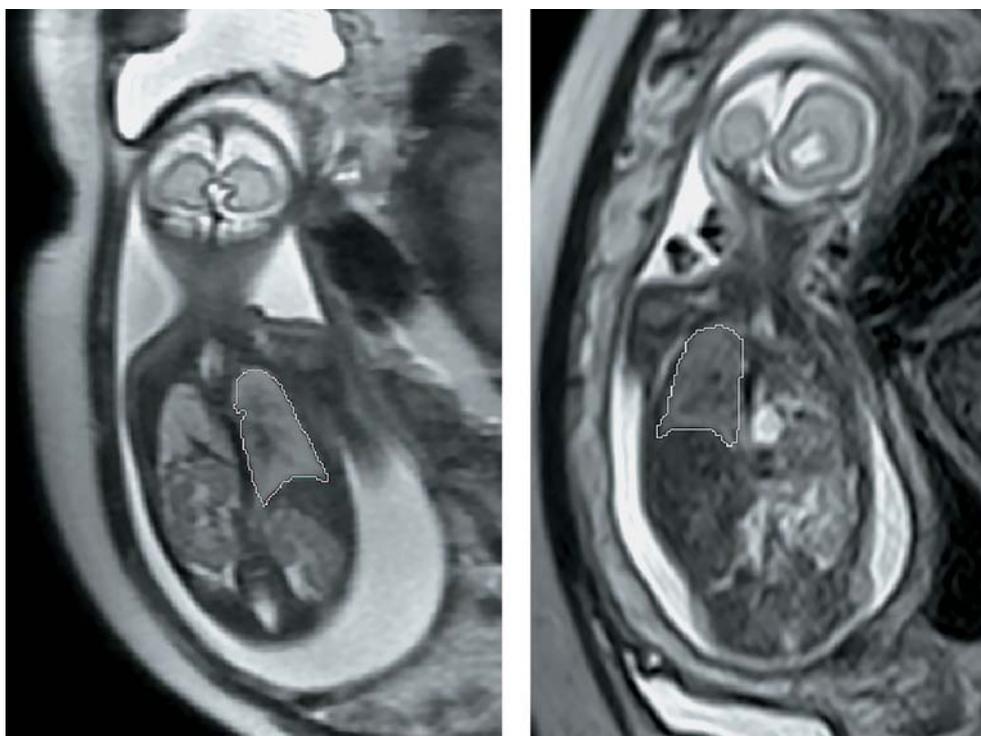
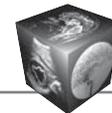


Рис. 1. Пример сегментации зон интереса на Т2ВИ на уровне легких плода во фронтальной и кософронтальной проекциях у разных пациентов.

Fig. 1. Example of ROI segmentation on T2WI at the fetal lung in frontal and co-frontal projections in different patients.

Zone Matrix (GLSZM, $n = 16$), Grey Level Run Length Matrix (GLRLM, $n = 16$), Grey Level Dependence Matrix (GLDM, $n = 14$), Neighbouring Gray Tone Difference Matrix (NGTDM, $n = 5$). Полный список текстурных признаков представлен в табл. 1.

Признаки первого порядка (энергетические и энтропийные признаки, признаки, основанные на начальных и центральных моментах величин и т.д.) описывают распределение интенсивности пикселей и вокселей в области, ограниченной зоной интереса. Признаки более высоких порядков подразделяются на несколько групп (GLCM, GLRLM, GLSZM, NGTDM, GLDM) и являются более сложными показателями, описывающими отношения между пикселями. GLCM (Gray-Level Co-occurrence Matrix) – матрица смежности представляет собой оценку плотности распределения вероятностей второго порядка, полученную по изображению в предположении, что плотность вероятности зависит лишь от расположения двух пикселей. GLRLM (Gray-Level Run-Length Matrix) – матрица длин серых уровней, которая отражает распределение длин серий по различным направлениям в изображении. GLSZM (Gray-Level Size Zone Matrix) – матрица зон размеров уровней серого, которая отражает распределение разме-

ров зон по уровням серого в изображении. NGTDM (Neighborhood Gray-Tone Difference Matrix) – матрица различий тонов серого со смежными пикселями (для 2D) и вокселями (для 3D); количественно определяет разницу между значением серого и средним значением серого смежных пикселей и вокселей. GLDM (Gray-Level Dependence Matrix) – матрица зависимости уровня серого, которая отражает, сколько раз пара пикселей или вокселей с заданными значениями яркости встречается в изображении, учитывая расстояние между ними. Также существуют признаки, характеризующие размеры выделенной зоны. В совокупности было проанализировано 107 текстурных признаков, извлеченных из 72 сегментаций.

Статистический анализ проводился с помощью пакета статистического анализа Statistica 10 (США) для выявления корреляции между значениями признаков и целевой переменной (наличие патологии легких при врожденной диафрагмальной грыже), а также для отображения различий в группах сравнения в зависимости от выявленных показателей. Отбор признаков для разделения пациентов на группы проводился в несколько этапов. На первом этапе исключили часть признаков, на основании которых различия между группами



Таблица 1. Список проанализированных текстурных признаков
Table 1. List of analyzed textural features

Класс Class	Признаки Features	Класс Class	Признаки Features
firstorder	10Percentile	glszm	SumEntropy
	90Percentile		SumSquares
	Energy		GrayLevelNonUniformity
	Entropy		GrayLevelNonUniformityNormalized
	InterquartileRange		GrayLevelVariance
	Kurtosis		HighGrayLevelZoneEmphasis
	Maximum		LargeAreaEmphasis
	MeanAbsoluteDeviation		LargeAreaHighGrayLevelEmphasis
	Mean		LargeAreaLowGrayLevelEmphasis
	Median		LowGrayLevelZoneEmphasis
	Minimum		SizeZoneNonUniformity
	Range		SizeZoneNonUniformityNormalized
	RobustMeanAbsoluteDeviation		SmallAreaEmphasis
	RootMeanSquared		SmallAreaHighGrayLevelEmphasis
	Skewness		SmallAreaLowGrayLevelEmphasis
	TotalEnergy		ZoneEntropy
	Uniformity		ZonePercentage
Variance	ZoneVariance		
shape	Elongation	glrlm	GrayLevelNonUniformity
	Flatness		GrayLevelNonUniformityNormalized
	LeastAxisLength		GrayLevelVariance
	MajorAxisLength		HighGrayLevelRunEmphasis
	Maximum2DDiameterColumn		LongRunEmphasis
	Maximum2DDiameterRow		LongRunHighGrayLevelEmphasis
	Maximum2DDiameterSlice		LongRunLowGrayLevelEmphasis
	Maximum3DDiameter		LowGrayLevelRunEmphasis
	MeshVolume		RunEntropy
	MinorAxisLength		RunLengthNonUniformity
	Sphericity		RunLengthNonUniformityNormalized
	SurfaceArea		RunPercentage
	SurfaceVolumeRatio		RunVariance
VoxelVolume	ShortRunEmphasis		
glcm	Autocorrelation	ngtdm	ShortRunHighGrayLevelEmphasis
	ClusterProminence		ShortRunLowGrayLevelEmphasis
	ClusterShade		Busyness
	ClusterTendency	gldm	Coarseness
	Contrast		Complexity
	Correlation		Contrast
	DifferenceAverage		Strength
	DifferenceEntropy		DependenceEntropy
	DifferenceVariance		DependenceNonUniformity
	Id		DependenceNonUniformityNormalized
	Idm	DependenceVariance	
	Idmn	GrayLevelNonUniformity	
	Idn	GrayLevelVariance	
	Imc1	HighGrayLevelEmphasis	
	Imc2	LargeDependenceEmphasis	
	InverseVariance	LargeDependenceHighGrayLevelEmphasis	
	JointAverage	LargeDependenceLowGrayLevelEmphasis	
	JointEnergy	LowGrayLevelEmphasis	
	JointEntropy	SmallDependenceEmphasis	
	MCC	SmallDependenceHighGrayLevelEmphasis	
MaximumProbability	SmallDependenceLowGrayLevelEmphasis		
SumAverage			

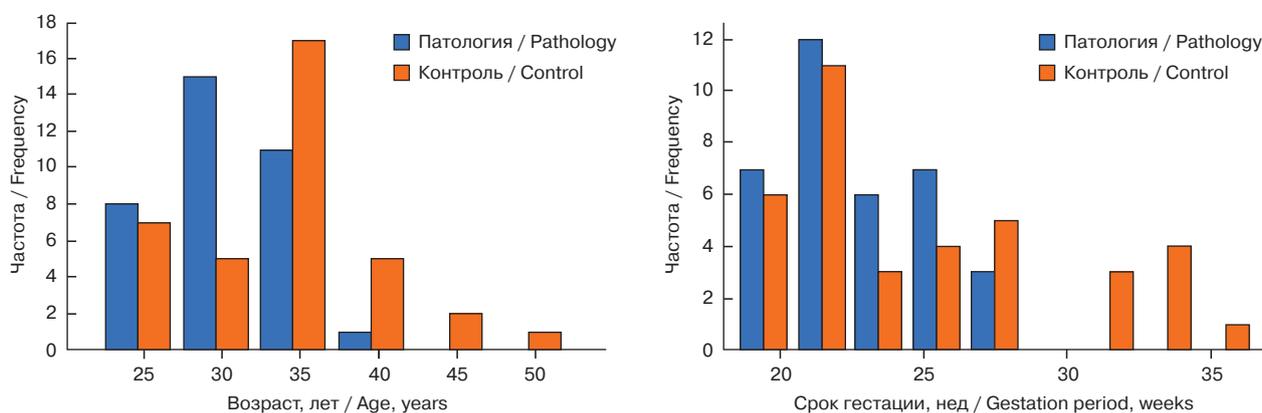
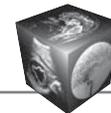


Рис. 2. Распределение беременных по возрасту и сроку гестации на момент проведения МРТ.

Fig. 2. Pregnant women distribution by age and age of gestation at moment of MRI scan.

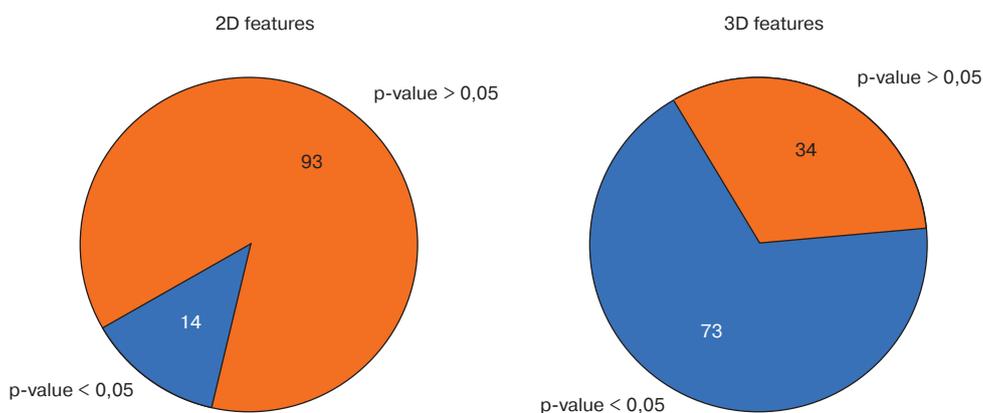


Рис. 3. Количество статистически значимых и незначимых признаков для 2D- и 3D-сегментации (U-критерий Манна–Уитни).

Fig. 3. Number of statistically significant and non-significant features for 2D and 3D segmentation (Mann–Whitney U-test).

не были статистически значимыми ($p > 0,05$, U-критерий Манна–Уитни). Далее устраняли признаки, имеющие взаимные корреляции (коэффициент корреляции Спирмена, $r > 0,7$). Для исключения признаков с наибольшим количеством взаимных связей был использован алгоритм Брона–Кербоша [17]. Выбор в пользу удаления того или иного признака проводился на основании среднего значения взаимной информации (mutual information, MI).

Результаты

Медиана возраста пациенток на момент проведения МРТ в основной группе ($n = 35$) составила 29 (27–34) лет, в контрольной ($n = 37$) – 34 (30–36) года ($p = 0,014$). Срок беременности на момент выполнения МРТ в основной группе составил 22 (20,57–27,0) нед, в группе контроля – 23 (20,78–

27,71) нед. Статистически значимых различий по срокам гестации на момент выполнения МРТ не наблюдалось ($p = 0,176$). Распределение беременных по возрасту и сроку гестации представлено на рис. 2. Отмечалось преобладание плодов с мужским полом (60%, $n = 21$).

Среди признаков текстурного анализа выявили статистически значимые различия в группах сравнения во всех классах (shape, first order, ngtm, gldm, glcm, glszm, glrlm). Наибольшее количество параметров, на основании которых группы считали различными (U-критерий Манна–Уитни, $p < 0,05$), обнаружили по данным, извлеченным из трехмерной сегментации изображений (рис. 3).

Кроме того, признаки, рассчитанные на основании трехмерных данных, имели более высокий коэффициент корреляции с целевой переменной (1-й или 2-й группы) (рис. 4).

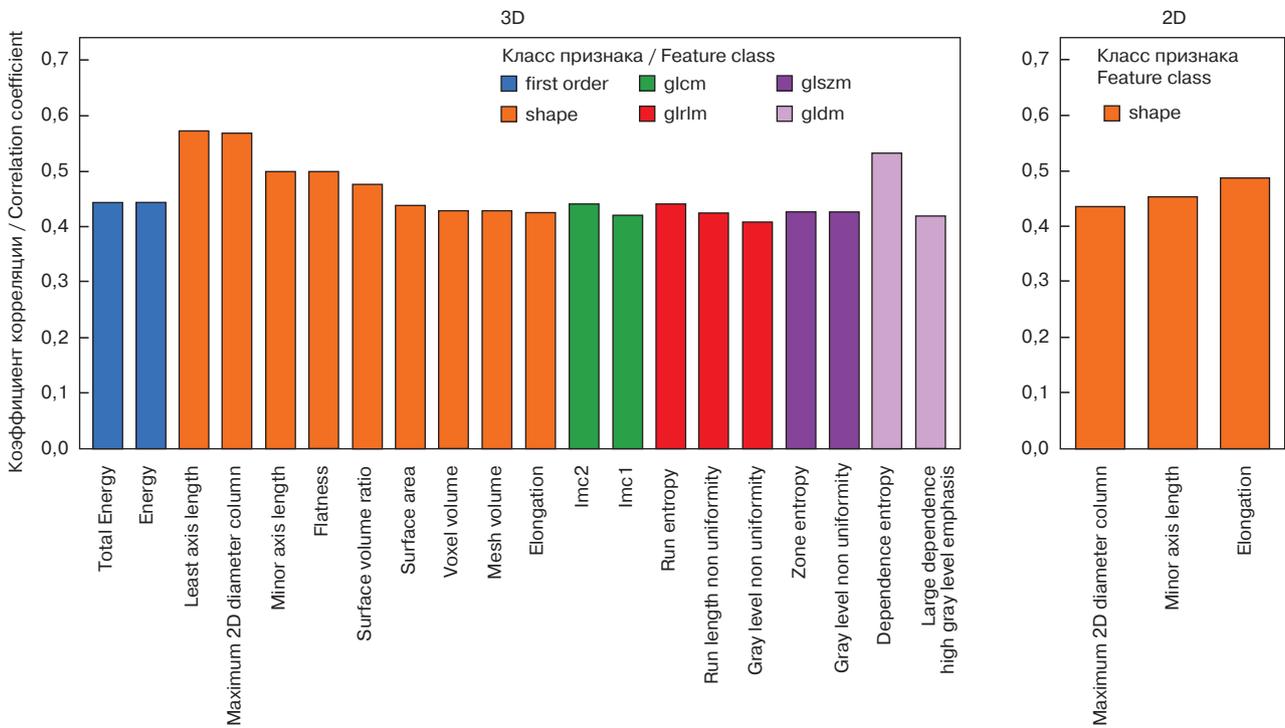


Рис. 4. Коэффициенты корреляции признаков с целевой переменной ($p < 0,05$, $r > 0,4$).
Fig. 4. The correlation coefficients of features with the target variables ($p < 0.05$, $r > 0.4$).

После устранения мультиколлинеарности (высокой взаимной корреляции) количество признаков сократилось до 6 для данных, полученных в ходе анализа одиночных срезов (2D) и до 8 для данных, полученных в ходе анализа 3D-изображений (табл. 2). При этом среднее значение MI (mutual information) для 2D-признаков составило 0,11, в то время как для 3D-признаков данный по-

казатель оказался равен 0,15. Результаты отбора признаков представлены на рис. 5.

Таким образом, основные классы текстурных признаков (в том числе процент от общего количества), по которым мы можем разделить пациентов в зависимости от наличия или отсутствия легочной гипоплазии, это:

- First order (6%),

Таблица 2. Признаки различных классов после устранения мультиколлинеарности для данных, полученных в ходе анализа одиночных срезов (2D) и трехмерных изображений (3D)

Table 2. Signs of different classes after elimination of multicollinearity for data from analysis of single slices (2D) and three-dimensional images (3D)

Класс признаков Class of features	2D-сегментация 2D-segmentation	3D-сегментация 3D-segmentation
First order	90 Percentile	Maximum
Shape	Elongation	Flatness
	Maximum 2D Diameter Column	Least Axis Length
GLCM	–	Imc1
GLSZM	–	–
GLRLM	Run Length Non Uniformity	Gray Level Non Uniformity Normalized
NGTDM	Coarseness	Busyness
GLDM	Small Dependence Low Gray Level Emphasis	Dependence Non Uniformity Normalized
	–	Large Dependence High Gray Level Emphasis

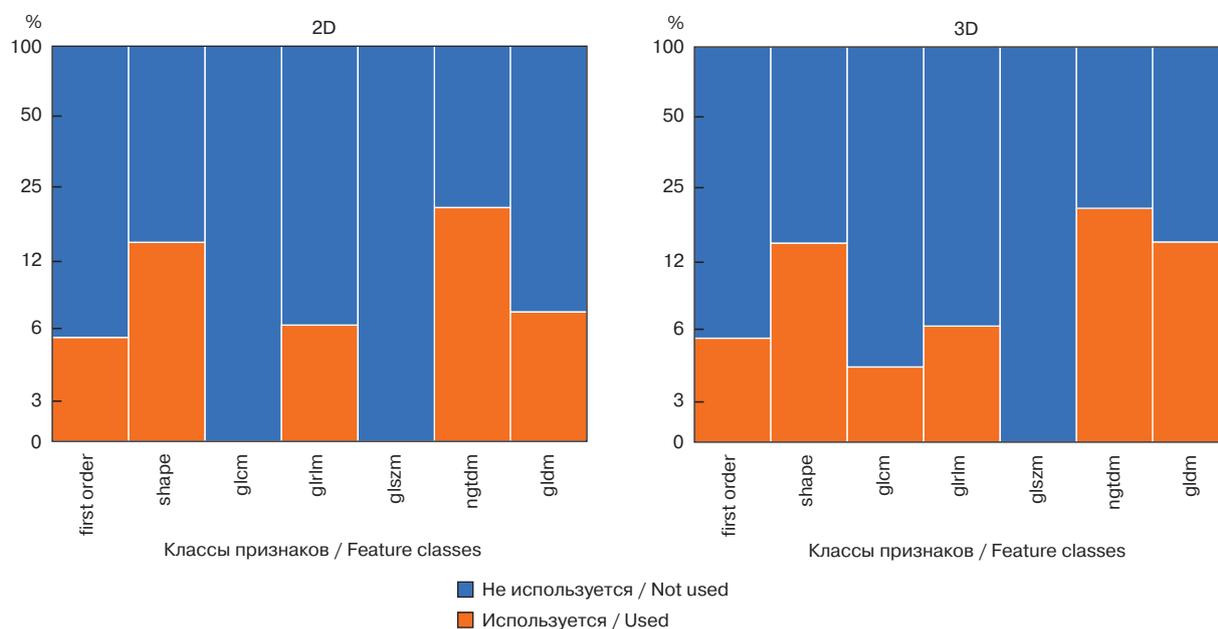


Рис. 5. Процентное соотношение отброшенных и использующихся признаков после устранения мультиколлинеарности ($p < 0,05$, $r > 0,4$).

Fig. 5. Percent of rejected and used features after elimination of multicollinearity ($p < 0.05$, $r > 0.4$).

- Shape (14%),
- GLCM (4%),
- GLRLM (6%),
- NGTDM (20%),
- GLDM (14%).

При этом, исключая признаки, характеризующие форму и размеры (Shape) интересующей зоны (легкое), количество последних сокращается до 4% и 6% от общего количества анализируемых признаков для 2D- и 3D-изображений соответственно.

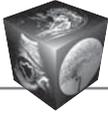
Обсуждение

Процессы созревания легких относятся к одним из наиболее важных факторов, определяющих прогноз в постнатальном периоде среди недоношенных детей или новорожденных с врожденными пороками развития. В большинстве случаев гипоплазия легких проявляется сразу после рождения в виде дыхательной недостаточности и ассоциированной легочной гипертензии и зачастую является непосредственной причиной гибели ребенка [18]. Поэтому своевременное определение степени гипоплазии легких плода, ее градация на летальные и нелетальные формы является основополагающим критерием полноценного антенатального обследования.

К наиболее распространенным критериям оценки зрелости ткани легких можно отнести измерение интенсивности сигнала на T2ВИ и опре-

деление объема легких [19–23]. При этом визуальная оценка интенсивности сигнала представляется субъективной, а использование нормализации (в виде отношения интенсивностей сигнала) на печень, мышцы или цереброспинальную жидкость демонстрируют неоднозначные данные [13, 19, 21–24]. Объемные характеристики легких являются широко используемым признаком их нормального развития и предиктора легочной гипоплазии и, соответственно, дыхательной недостаточности; в то же время единая точка зрения о целесообразности применения данного критерия в качестве предиктора легочной гипертензии отсутствует [13, 25–28]. Рядом авторов предлагалось определение измеряемого коэффициента диффузии (ИКД) на диффузионно-взвешенных изображениях (ДВИ), другими – анализ внутривоксельного некогерентного движения (Intra-voxel incoherent motion, IVIM), T2* картирования, однако используемые методики также демонстрировали неоднозначные результаты [29–35]. Последние наряду с объемными характеристиками отражают необходимость разработки иных количественных критериев оценки структурной зрелости легких плода.

Потенциально текстурный анализ позволит улучшить диагностику различных аномалий развития путем извлечения количественных признаков из томограмм. Полученные результаты демонстрируют, что использование единичных изображений (2D) в радиомике нецелесообразно: признаки,



извлеченные путем анализа трехмерных данных, обладают более статистически значимой информацией относительно разделения групп пациентов по наличию или отсутствию патологии. После устранения мультиколлинеарности количество признаков сократилось до 6 и 8 для 2D- и 3D-изображений соответственно (5,7 и 7,5% от исходного количества признаков для 2D и 3D). Данное наблюдение согласуется с ранее опубликованными работами [8, 36]. Также можно отметить, что корреляции между признаками и целевой переменной выше в случае использования 3D-изображений: лишь 3 признака, полученных в ходе анализа изображений с одним срезом, показали корреляцию $r > 0,4$, в то время как для 3D-изображений таких признаков оказалось 20 (2,8% и 18,7% от исходного количества признаков для 2D- и 3D-изображений соответственно).

Проведенное исследование имеет ряд особенностей. Во-первых, относительно небольшое количество пациентов в группах сравнения. При этом общая выборка составила большее количество пациентов относительно ранее опубликованных работ по данной тематике [8, 36]. Во-вторых, ввиду ретроспективного дизайна исследования мы не проводили измерение надежности теста путем проведения повторного анализа на той же выборке с использованием других плоскостей сканирования, например аксиальной. Тем не менее, по данным ряда авторов, коэффициент внутривыводной корреляции (intra-class correlation coefficient, ICC) при текстурном анализе легких плода (по данным МРТ), полученных во фронтальной и аксиальной проекциях, составил 0,79 (IQR 0,15, 0,2–1), что демонстрирует достаточно высокую надежность и воспроизводимость метода [36]. В-третьих, в рамках проведенного исследования мы не выяснили потенциал радиомического анализа Т1ВИ или ДВИ (ИКД).

Заключение

Таким образом, представленные данные позволяют использовать текстурный анализ в качестве источника дополнительной диагностической информации о структурной зрелости легких. При наборе большего количества пациентов в исследуемых группах радиомический анализ легких плода по данным МРТ потенциально позволит разработать новые предикторы исходов (наряду с объемными характеристиками легких) при врожденной диафрагмальной грыже, которые будут основаны на прогнозировании дыхательной недостаточности и ассоциированной легочной гипертензии.

Источник финансирования и конфликт интересов

Данная статья подготовлена авторским коллективом в рамках научно-исследовательской работы «Научное обеспечение стандартизации, безопасности и качества магнитно-резонансной томографии» (№ ЕГИСУ: № 123031500007-6).

Source of financing and conflict of interest

This paper was prepared by a group of authors as a part of the research and development effort titled “Research program to further the standardization, safety and quality of magnetic resonance imaging”, (USIS No. 123031500007-6).

Участие авторов

Сыркашев Е.М. – написание текста, подготовка и редактирование текста.

Буров А.А. – написание текста, подготовка и редактирование текста.

Подуровская Ю.Л. – ответственность за целостность всех частей статьи.

Кадырбердиева Ф.З. – сбор и обработка данных.

Икрянников Е.О. – статистическая обработка данных.

Семенов Д.С. – анализ и интерпретация полученных данных.

Шарова Д.Е. – обзор публикаций по теме статьи.

Васильев Ю.А. – концепция и дизайн исследования, утверждение окончательного варианта статьи.

Гус А.И. – концепция и дизайн исследования, утверждение окончательного варианта статьи.

Authors' participation

Syrkashev E.M. – writing text, text preparation and editing.

Burov A.A. – writing text, text preparation and editing.

Podurovskaya Y.L. – responsibility for the integrity of all parts of the article.

Kadyrberdieva F.Z. – collection and analysis of data.

Ikryannikov E.O. – statistical analysis.

Semenov D.S. – analysis and interpretation of the obtained data.

Sharova D.E. – review of publications.

Vasiliev Y.A. – concept and design of the study, approval of the final version of the article.

Gus A.I. – concept and design of the study, approval of the final version of the article.

Список литературы [References]

1. Lambin P., Rios-Velazquez E., Leijenaar R. et al. Radiomics: extracting more information from medical images using advanced feature analysis. *Eur. J. Cancer*. 2012; 48 (4): 441–446. <http://doi.org/10.1016/j.ejca.2011.11.036>
2. Kumar V., Gu Y., Basu S. et al. Radiomics: the process and the challenges. *Magn. Reson. Imaging*. 2012; 30 (9): 1234–1248. <http://doi.org/10.1016/j.mri.2012.06.010>
3. Mirestean C.C., Pagute O., Buzea C. et al. Radiomic Machine Learning and Texture Analysis - New Horizons for Head and Neck Oncology. *Maedica (Bucur)*. 2019; 14 (2): 126–130. <http://doi.org/10.26574/maedica.2019.14.2.126>



4. Говорукина В.Г., Семенов С.С., Гележе П.Б., Диденко В.В., Морозов С.П., Андрейченко А.Е. Роль маммографии в радиомике рака молочной железы. *Digital Diagnostics*. 2021; 2 (2): 185–199. <http://doi.org/10.17816/DD70479>
- Govorukhina V.G., Semenov S.S., Gelezhe P.B. et al. The role of mammography in breast cancer radiomics. *Digital Diagnostics*. 2021; 2 (2): 185–199. <http://doi.org/10.17816/DD70479> (In Russian)
5. Bae S., Choi Y.S., Ahn S.S. et al. Radiomic MRI Phenotyping of Glioblastoma: Improving Survival Prediction. *Radiology*. 2018; 289 (3): 797–806. <http://doi.org/10.1148/radiol.2018180200>
6. Coroller T.P., Agrawal V., Huynh E. et al. Radiomic-Based Pathological Response Prediction from Primary Tumors and Lymph Nodes in NSCLC. *J. Thorac. Oncol.* 2017; 12 (3): 467–476. <http://doi.org/10.1016/j.jtho.2016.11.2226>
7. Du Y., Fang Z., Jiao J. et al. Application of ultrasound-based radiomics technology in fetal-lung-texture analysis in pregnancies complicated by gestational diabetes and/or pre-eclampsia. *Ultrasound Obstet Gynecol.* 2021; 57 (5): 804–812. <http://doi.org/10.1002/uog.22037>
8. Watzenboeck M.L., Heidinger B.H., Rainer J. et al. Reproducibility of 2D versus 3D radiomics for quantitative assessment of fetal lung development: a retrospective fetal MRI study. *Insights. Imaging*. 2023; 14 (1): 31. <http://doi.org/10.1186/s13244-023-01376-y>
9. Heinzerling N., Wagner A. Fetal Diagnosis and Therapy: A Reference Handbook for Pediatric Surgeons. *Fetal Diagn. Ther.* 2013.
10. Jokhi R.P., Whitby E.H. Magnetic resonance imaging of the fetus. *Dev. Med. Child Neurol.* 53 (1): 18–28. <http://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2010.03813.x>
11. Prayer D., Malinge G., De Cotte L. et al.; ISUOG Clinical Standards Committee. ISUOG Practice Guidelines (updated): performance of fetal magnetic resonance imaging. *Ultrasound Obstet Gynecol.* 2023; 61 (2): 278–287. <http://doi.org/10.1002/uog.26129>
12. Prayer D., Malinge G., Brugger P.C. et al. ISUOG Practice Guidelines: performance of fetal magnetic resonance imaging. *Ultrasound Obstet. Gynecol.* 2017; 49 (5): 671–680. <http://doi.org/10.1002/uog.17412>
13. Düttemeyer V., Cordier A.G., Cannie M.M. et al. Prenatal prediction of postnatal survival in fetuses with congenital diaphragmatic hernia using MRI: lung volume measurement, signal intensity ratio, and effect of experience. *J. Matern. Fetal Neonatal Med.* 2022; 35 (6): 1036–1044. <http://doi.org/10.1080/14767058.2020.1740982>
14. Сыркашев Е.М., Солопова А.Е., Быченко В.Г., Буров А.А., Подуровская Ю.Л., Гус А.И. Антенатальная биометрия легких при врожденной диафрагмальной грыже по данным МРТ. *REJR.* 2020; 10 (4): 169–178. <http://doi.org/10.21569/2222-7415-2020-10-4-169-178>
- Syrkashev E.M., Solopova A.E., Bychenko V.G. et al. Fetal pulmonary biometry in congenital diaphragmal hernia using MRI. *REJR.* 2020; 10 (4): 169–178. <http://doi.org/10.21569/2222-7415-2020-10-4-169-178> (In Russian)
15. Farrugia M.K., Raza S.A., Gould S., Lakhoo K. Congenital lung lesions: classification and concordance of radiological appearance and surgical pathology. *Pediatr. Surg. Int.* 2008; 24 (9): 987–991. <http://doi.org/10.1007/s00383-008-2201-1>
16. Zani A., Chung W.K., Deprest J. et al. Congenital diaphragmatic hernia. *Nat. Rev. Dis. Primers.* 2022; 8 (1): 37. <http://doi.org/10.1038/s41572-022-00362-w>
17. Yushkevich P.A., Gao Y., Gerig G. ITK-SNAP: An interactive tool for semi-automatic segmentation of multi-modality biomedical images. *2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Orlando, FL, USA.* 2016; 3342–3345. <http://doi.org/10.1109/EMBC.2016.7591443>
18. Shchegolev A.I., Tumanova U.N. Pulmonary hypoplasia: causes and pathological finding. *Int. J. Appl. Fundam. Res.* 2017; 4: 101–153.
19. Ogawa R., Kido T., Nakamura M. et al. Magnetic resonance assessment of fetal lung maturity: comparison between signal intensity and volume measurement. *Jpn. J. Radiol.* 2018; 36 (7): 444–449. <http://doi.org/10.1007/s11604-018-0745-0>
20. Keller T.M., Rake A., Michel S.C. et al. MR assessment of fetal lung development using lung volumes and signal intensities. *Eur. Radiol.* 2004; 14 (6): 984–989. <http://doi.org/10.1007/s00330-004-2256-x>
21. Oka Y., Rahman M., Sasakura C. et al. Prenatal diagnosis of fetal respiratory function: evaluation of fetal lung maturity using lung-to-liver signal intensity ratio at magnetic resonance imaging. *Prenat. Diagn.* 2014; 34 (13): 1289–1294. <http://doi.org/10.1002/pd.4469>
22. Moshiri M., Mannelli L., Richardson M.L. et al. Fetal lung maturity assessment with MRI fetal lung-to-liver signal-intensity ratio. *Am. J. Roentgenol.* 2013; 201 (6): 1386–1390. <http://doi.org/10.2214/AJR.12.9679>
23. Mills M., Winter T.C., Kennedy A.M., Woodward P.J. Determination of fetal lung maturity using magnetic resonance imaging signal intensity measurements. *Ultrasound Q.* 2014; 30 (1): 61–67. <http://doi.org/10.1097/RUQ.0000000000000054>
24. Yamoto M., Iwazaki T., Takeuchi K. et al. The fetal lung-to-liver signal intensity ratio on magnetic resonance imaging as a predictor of outcomes from isolated congenital diaphragmatic hernia. *Pediatr. Surg. Int.* 2018; 34 (2): 161–168. <http://doi.org/10.1007/s00383-017-4184-2>
25. Cordier A.G., Russo F.M., Deprest J., Benachi A. Prenatal diagnosis, imaging, and prognosis in Congenital Diaphragmatic Hernia. *Semin. Perinatol.* 2020; 44 (1): 51163. <http://doi.org/10.1053/j.semperi.2019.07.002>
26. Madenci A.L., Church J.T., Gajarski R.J. et al. Pulmonary Hypertension in Patients with Congenital Diaphragmatic Hernia: Does Lung Size Matter? *Eur. J. Pediatr. Surg.* 2018; 28 (6): 508–514. <http://doi.org/10.1055/s-0037-1607291>
27. Basurto D., Russo F.M., Papastefanou I. et al. Pulmonary hypertension in congenital diaphragmatic hernia: Antenatal prediction and impact on neonatal mortality. *Prenat. Diagn.* 2022; 42 (10): 1303–1311. <http://doi.org/10.1002/pd.6207>
28. Petroze R.T., Caminsky N.G., Trebichavsky J. et al. Prenatal prediction of survival in congenital diaphragmatic hernia: An audit of postnatal outcomes. *J. Pediatr. Surg.* 2019; 54 (5): 925–931. <http://doi.org/10.1016/j.jpedsurg.2019.01.021>
29. Moore R.J., Strachan B., Tyler D.J. et al. In vivo diffusion measurements as an indication of fetal lung maturation using echo planar imaging at 0.5T. *Magn. Reson. Med.*



- 2001; 45 (2): 247–253. [http://doi.org/10.1002/1522-2594\(200102\)45:2<247::aid-mrm1033>3.0.co;2-m](http://doi.org/10.1002/1522-2594(200102)45:2<247::aid-mrm1033>3.0.co;2-m)
30. Balassy C., Kasprian G., Brugger P.C. et al. Diffusion-weighted MR imaging of the normal fetal lung. *Eur. Radiol.* 2008; 18 (4): 700–706. <http://doi.org/10.1007/s00330-007-0784-x>
31. Cannie M., Jani J., De Keyzer F. et al. Diffusion-weighted MRI in lungs of normal fetuses and those with congenital diaphragmatic hernia. *Ultrasound Obstet. Gynecol.* 2009; 34 (6): 678–686. <http://doi.org/10.1002/uog.7326>
32. Manganaro L., Perrone A., Sassi S. et al. Diffusion-weighted MR imaging and apparent diffusion coefficient of the normal fetal lung: preliminary experience. *Prenat. Diagn.* 2008 Aug;28(8):745–748. <http://doi.org/10.1002/pd.2041>
33. Afacan O., Gholipour A., Mulkern R.V. et al. Fetal lung apparent diffusion coefficient measurement using diffusion-weighted MRI at 3 Tesla: Correlation with gestational age. *J. Magn. Reson. Imaging.* 2016; 44 (6): 1650–1655. <http://doi.org/10.1002/jmri.25294>
34. Ercolani G., Capuani S., Antonelli A. et al. IntraVoxel Incoherent Motion (IVIM) MRI of fetal lung and kidney: Can the perfusion fraction be a marker of normal pulmonary and renal maturation? *Eur. J. Radiol.* 2021; 139: 109726. <http://doi.org/10.1016/j.ejrad.2021.109726>
35. Sethi S., Giza S.A., Goldberg E. et al. Quantification of 1.5T T1 and T2* Relaxation Times of Fetal Tissues in Uncomplicated Pregnancies. *J. Magn. Reson. Imaging.* 2021; 54 (1): 113–121. <http://doi.org/10.1002/jmri.27547>
36. Prayer F., Watzenböck M.L., Heidinger B.H. et al. Fetal MRI radiomics: non-invasive and reproducible quantification of human lung maturity. *Eur. Radiol.* 2023; 33 (6): 4205–4213. <http://doi.org/10.1007/s00330-022-09367-1>

Для корреспонденции*: Сыркашев Егор Михайлович – тел.: +7-915-107-52-28. E-mail: egorsrkshv@mail.ru

Сыркашев Егор Михайлович – канд. мед. наук, научный сотрудник ФГБУ “Научный центр акушерства, гинекологии и перинатологии имени академика В.И. Кулакова” Минздрава России; научный сотрудник ГБУЗ “Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий ДЗ города Москвы”, Москва. <https://orcid.org/0000-0003-4043-907X>

Буров Артем Александрович – канд. мед. наук, заведующий по клинической работе ФГБУ “Научный центр акушерства, гинекологии и перинатологии имени академика В.И. Кулакова” Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0001-7374-9803>

Подуровская Юлия Леонидовна – канд. мед. наук, заведующий отделением хирургии новорожденных ФГБУ “Научный центр акушерства, гинекологии и перинатологии имени академика В.И. Кулакова” Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-9928-6234>

Кадырбердиева Фаина Залимхановна – канд. мед. наук, научный сотрудник ФГБУ “Научный центр акушерства, гинекологии и перинатологии имени академика В.И. Кулакова” Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0009-0004-7787-3413>

Икрянников Егор Олегович – техник ГБУЗ “Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий ДЗ города Москвы”, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-1780-6903>

Семенов Дмитрий Сергеевич – начальник сектора ГБУЗ “Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий ДЗ города Москвы”, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-4293-2514>

Шарова Дарья Евгеньевна – руководитель отдела инновационных технологий ГБУЗ “Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий ДЗ города Москвы”, Москва. <https://orcid.org/0000-0001-5792-3912>

Васильев Юрий Александрович – канд. мед. наук, директор ГБУЗ “Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий ДЗ города Москвы”, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-0208-5218>

Гус Александр Иосифович – доктор мед. наук, главный научный сотрудник ФГБУ “Научный центр акушерства, гинекологии и перинатологии имени академика В.И. Кулакова” Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0003-1377-3128>

Contact*: Egor M. Syrkashev – phone: +7-915-107-52-28. E-mail: egorsrkshv@mail.ru

Egor M. Syrkashev – Cand. of Sci. (Med.), Researcher of the Research Center for Obstetrics, Gynecology and Perinatology named by V.I. Kulakov; Researcher of the Center for Diagnostics and Telemedicine of the Moscow Health Department, Moscow. <https://orcid.org/0000-0003-4043-907X>

Artem A. Burov – Cand. of Sci. (Med.), Chief Clinician of the “Research Center for Obstetrics, Gynecology and Perinatology” Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow. <https://orcid.org/0000-0001-7374-9803>

Yulia L. Podurovskaya – Cand. of Sci. (Med.), Head of the neonatal surgery department, Research Center for Obstetrics, Gynecology and Perinatology, Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-9928-6234>

Faina Z. Kadyrberdiyeva – Cand. of Sci. (Med.), Researcher of “Research Center for Obstetrics, Gynecology and Perinatology” Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow. <https://orcid.org/0009-0004-7787-3413>

Egor O. Ikryanikov – technician of Center for Diagnostics and Telemedicine of the Moscow Health Department, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-1780-6903>

Dmitriy S. Semenov – Head of sector of Center for Diagnostics and Telemedicine of the Moscow Health Department, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-4293-2514>

Daria E. Sharova – Head of innovative technologies department, Center for Diagnostics and Telemedicine of the Moscow Health Department, Moscow. <https://orcid.org/0000-0001-5792-3912>

Yuriy A. Vasilev – Cand. of Sci. (Med.), Director of Center for Diagnostics and Telemedicine of the Moscow Health Department, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-0208-5218>

Aleksandr I. Gus – Doct. of Sci. (Med.), Chief Researcher of Research Center for Obstetrics, Gynecology and Perinatology Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow. <https://orcid.org/0000-0003-1377-3128>