

Первый опыт применения магнитно-резонансной томографии в визуализации легких у детей с муковисцидозом: возможности и перспективы

Р.И.Мустафин¹ ✉, О.В.Кустова¹, О.И.Симонова¹⁻³, А.В.Аникин¹

¹ Федеральное государственное автономное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр здоровья детей» Министерства здравоохранения Российской Федерации: 119991, Россия, Москва, Ломоносовский пр-т, 2, стр. 1

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М.Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет): 119991, Россия, Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2

³ Государственное бюджетное учреждение здравоохранения города Москвы «Морозовская детская городская клиническая больница Департамента здравоохранения города Москвы»: 119049, Россия, Москва, 4-й Добрынинский переулок, 1 / 9

Резюме

Муковисцидоз (МВ) — наследственное заболевание, ассоциированное с системной недостаточностью экзокринных желез. В 95 % случаев отмечается прогрессирующее поражение легочной ткани, при котором требуется динамический врачебный контроль. Основными методами визуализации являются рентгенография (РГ) и компьютерная томография (КТ). Оба метода связаны с ионизирующим излучением. Согласно клиническим рекомендациям, РГ-исследование органов грудной клетки (ОГК) проводится не чаще 1 раза в 2 года. Однако с учетом высокого риска развития воспалительных процессов у детей с МВ частота проведения лучевых исследований может значительно возрастать. Поиск альтернативных методов без ионизирующего излучения крайне востребован для детей с МВ. Одним из таких методов является магнитно-резонансная томография (МРТ). **Целью** исследования явилось изучение возможностей МРТ для визуализации легочной ткани у детей с МВ. **Материалы и методы.** В исследование включены пациенты ($n = 12$) в возрасте 7–18 лет со впервые выявленным и ранее установленным диагнозом МВ. У всех детей выполнены КТ и МРТ ОГК. **Результаты.** При проведении КТ ОГК у всех детей (100 %) выявлен комплекс изменений, характерных для больных МВ, — признаки хронического бронхита, распространенные мешотчатые и цилиндрические бронхоэктазы различной локализации, участки пневмофиброза, инфильтративные изменения легочной ткани. При МРТ наиболее эффективно (100 %) выявляются участки пневмофиброза (уплотнение легочной ткани), скопление экссудата в просвете бронхоэктазов, а также инфильтративные изменения. В отличие от КТ, меньшая эффективность МРТ показана при оценке бронхитических изменений с утолщением стенок бронхов без наличия экссудата (83 %). Низкая эффективность МРТ отмечается при визуализации бронхоэктазов со свободным просветом (без признаков мукостаза). **Заключение.** РГ и КТ остаются основными методами для визуализации легочной паренхимы у детей с МВ. Однако с учетом отсутствия ионизирующего излучения, развития метода и появления новых последовательностей МРТ может эффективно использоваться для динамического наблюдения и контроля над состоянием легких у больных МВ вместо РГ и КТ, что позволит снизить получаемую дозу облучения.

Ключевые слова: муковисцидоз, бронхоэктазы, пневмофиброз, компьютерная томография, магнитно-резонансная томография, эффективная доза, дети.

Конфликт интересов. Конфликт интересов авторами не заявлен.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Этическая экспертиза. У пациентов, данные которых использованы в приведенных клинических наблюдениях, получено письменное добровольное информированное согласие.

© Мустафин Р.И. и соавт., 2024

Для цитирования: Мустафин Р.И., Кустова О.В., Симонова О.И., Аникин А.В. Первый опыт применения магнитно-резонансной томографии в визуализации легких у детей с муковисцидозом: возможности и перспективы. *Пульмонология*. 2024; 34 (2): 271–276. DOI: 10.18093/0869-0189-2024-34-2-271-276

The first experience of using magnetic resonance tomography for lung imaging in children with cystic fibrosis: opportunities and prospects

Rinat I. Mustafin¹ ✉, Olga V. Kustova¹, Olga I. Simonova¹⁻³, Anatoly V. Anikin¹

¹ Federal State Autonomous Institution “National Medical Research Center for Children’s Health” of the Ministry of Health of the Russian Federation: Lomonosovskiy prosp. 2, build. 1, Moscow, 119991, Russia

² Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education I.M.Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University): ul. Trubetskaya 8, build. 2, Moscow, 119991, Russia

³ State Budgetary Healthcare Institution “Morozov Children’s City Clinical Hospital of the Moscow Health Department”: 4th Dobryninskiy per. 1/9, Moscow, 119049, Russia

Abstract

Cystic fibrosis (CF) is a hereditary disease associated with systemic failure of the exocrine glands. In 95% of the cases, progressive damage to the lung tissue occurs that requires follow-up. The main imaging methods are radiography and computed tomography (CT). Both methods involve ionizing radiation. According to clinical guidelines, a chest X-ray is performed no more than once every 2 years. However, given the high risk of developing inflammatory processes in children with CF, the frequency of radiological examinations may increase significantly. The search for alternative methods without ionizing radiation is in great demand among children with CF. One of these methods is magnetic resonance imaging (MRI). **The aim** was to explore the capabilities of MRI for imaging lung tissue in children with CF. **Methods.** The study included 12 patients aged 7 to 18 years with newly diagnosed and previously diagnosed CF. All children underwent CT and MRI of the chest. **Results.** In all children (100%), chest CT revealed a complex of changes typical of CF: signs of chronic bronchitis, widespread saccular and cylindrical bronchiectasis of various localizations, areas of pulmonary fibrosis, infiltrative changes in the lung tissue. Chest MRI is most effective (100%) in identifying areas of pulmonary fibrosis (thickening of the lung tissue), accumulation of exudate in the lumen of bronchiectasis, and infiltrative changes. In contrast to CT, MRI is less effective in the assessment of bronchitis changes with thickening of the bronchial walls without exudate (83%). A low efficiency of MRI is observed in the visualization of bronchiectasis with a free lumen (without signs of mucostasis). **Conclusion.** Radiography and computed tomography remain the main methods for lung imaging in children with CF. However, taking into account the absence of ionizing radiation, the development of the method and the emergence of new sequences, chest MRI can be used effectively for follow-up instead of radiography and CT, reducing the radiation dose received.

Key words: cystic fibrosis, bronchiectasis, pulmonary fibrosis, computed tomography, magnetic resonance tomography, effective dose, children.

Conflict of interest. The authors declare absence of a conflict of interests.

Funding. There was no sponsorship or financial support for the study.

Ethical expertise. Written voluntary informed consent was obtained from the patients whose data was used in the presented clinical cases.

© Mustafin R.I. et al., 2024

For citation: Mustafin R.I., Kustova O.V., Simonova O.I., Anikin A.V. The first experience of using magnetic resonance tomography for lung imaging in children with cystic fibrosis: opportunities and prospects. *Pul'monologiya*. 2024; 34 (2): 271–276 (in Russian). DOI: 10.18093/0869-0189-2024-34-2-271-276

Муковисцидоз (МВ) (кистозный фиброз) – наследственное заболевание, ассоциированное с системной недостаточностью экзокринных желез [1].

Прогрессирующее поражение легочной ткани при МВ встречается в большинстве случаев, при этом требуется динамический врачебный контроль. Основными методами визуализации легких в традиционной практике являются рентгенография (РГ) и компьютерная томография (КТ) [2], по данным которых возможно выявить признаки поражения легочной ткани в виде деформации легочного рисунка, пневмофиброза, перибронхиальной инфильтрации, консолидации и ателектазов, бронхоэктазов и булл, а также определить признаки бронхиальной обструкции – локальные участки вздутия легочной ткани, увеличение ретро-стернального пространства, уплощение диафрагмы. Метод КТ с учетом возможности послойной визуализации в значительной степени превосходит рутинную РГ в локализации и детализации спектра поражений легочной ткани [3].

Согласно клиническим рекомендациям Министерства здравоохранения Российской Федерации (2021) по ведению пациентов с кистозным фиброзом, РГ-исследование должно проводиться не чаще 1 раза в 2 года [4]. Однако на практике с учетом высокого риска развития воспалительных процессов у детей данной группы частота проведения лучевых методов исследования может значительно возрастать. При этом для получения полезной диагностической информации пределы доз лучевой нагрузки для пациентов не лимитированы [5, 6].

Эффективная доза (ЭД) облучения – это расчетная величина, отражающая меру ущерба для здоровья человека от отдаленных эффектов в результате общего или местного облучения [7]. При КТ органов грудной клетки (ОГК) ЭД составляет в среднем от 1,5 до 3,5 миллизиверт (мЗв) и значительно пре-

вышает таковую при РГ (0,01–0,05 мЗв), что может соотноситься как 100 : 1. При этом не следует впадать в крайности радиофобии, поскольку дозы до 100 мЗв расцениваются как «очень малые». Для «малых» и «очень малых» доз возможны лишь стохастические (вероятностные) отдаленные побочные эффекты [7]. Следует также указать, что средняя годовая лучевая нагрузка от естественного фона излучения составляет порядка 4,5–5 мЗв. Таким образом, однократная КТ ОГК приближается к годовой дозе естественного фона ионизирующего излучения.

Существует несколько крупных исследований по многолетнему наблюдению за детьми после применения КТ [8, 9]. По результатам одного из последних исследований (2023) подтвердилось небольшое, но достоверное повышение случаев развития лейкоза и различных опухолей у детей с наличием КТ-исследований в анамнезе по сравнению с контрольной группой детей, у которых КТ не проводилось [10]. Обнаружено, что при проведении у ребенка 2–3 КТ-исследований более чем в 2 раза повышается риск внутричерепной опухоли; ≥ 4 КТ-исследований у детей в возрасте до 18 лет приводили к 9-кратному увеличению риска внутричерепных опухолей и значительному повышению риска неходжкинской лимфомы и лейкемии. При этом однократное применение КТ-исследования у детей не сопровождалось повышенным риском развития рака.

Таким образом, поиски альтернативных методик без ионизирующего излучения крайне востребованы для детей с МВ. Одним из таких методов является магнитно-резонансная томография (МРТ). До недавнего времени МРТ использовалась в очень немногих мировых центрах для изучения функции легких (перфузии, дыхательной механики, легочной вентиляции) в качестве аналога однофотонной эмиссионной КТ-методики радионуклидного исследования [11, 12]. Структурные изображения неизменной легочной

ткани по данным МРТ с учетом большой воздушности и малого содержания протонов водорода на обычных T1- и T2-взвешенных изображениях выглядят как практически темные участки (с наличием стенок крупных бронхов). Однако патологические процессы, связанные с уплотнением легочной ткани, скоплением слизи и жидкости, визуализируются на МРТ [13]. С развитием новых магнитно-резонансных последовательностей за последнее десятилетие визуализация легочной ткани значительно улучшилась [14]. Особенно полезными для оценки легких стали супербыстрые последовательности T2 (SSFSE). Сбор данных занимает короткое время (10–15 с) и такие возможности есть в арсенале практически каждого магнитно-резонансного аппарата с напряженностью магнитного поля 1,5–3 Тл.

J.C. Woods *et al.* проведено исследование новых ультракоротких (*ultrashort time echo* – UTE) последовательностей, разработанных в последние годы, позволяющих получить изображение, аналогичное качеству низкодозной КТ с пространственным разрешением до 1 мм [15]. Показаны возможности новых (UTE) последовательностей, где изображения МРТ (правый ряд) близки по характеристикам к изображениям КТ (левый ряд) (рис. 1). Однако в настоящее время указанные последовательности не имеют широкого распространения и связаны с вопросами новейшего апгрейда оборудования.

Проведено пилотное исследование возможностей МРТ для визуализации легочной ткани у детей с МВ по сравнению с данными КТ.

Материалы и методы

В рамках госпитализации в отделение пульмонологии Федерального государственного автономного

учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр здоровья детей» Министерства здравоохранения Российской Федерации пациентам ($n = 12$: 5 мальчиков, 7 девочек; возраст – 7–18 лет) с диагнозом МВ, легочно-кишечная форма, в отделе лучевой диагностики выполнена МРТ ОГК. Среднетяжелое течение заболевания отмечено у 8 (67 %) детей, тяжелое – у 4 (33 %). У всех пациентов подтвержден генотип, типичный для МВ. Предварительно у всех детей выполнялась КТ ОГК. Как КТ-, так и МРТ-исследования проводились без медикаментозного сна, при задержке дыхания на вдохе.

КТ проводилась на томографе GE *Discovery 750HD* (*General Electric Company*, США), толщина среза – 2,5 мм с последующей реконструкцией до 0,6 мм, в двух режимах (WL:-410, WW:1995 и WL:30, WW:400). МРТ проводилась на томографе *Signa Explorer 1,5 Tl* (*General Electric Company*, США). Выполнялись последовательности T1 LAVA (толщина среза – 4 мм, аксиальная и коронарная проекции), T2 Fat Sat и T2 SS FSE (толщина среза – 4 мм; интервал – 1 мм; в аксиальной и коронарной проекциях).

Результаты

При проведении КТ ОГК у всех детей (100 %) выявлен комплекс изменений, характерных для больных МВ, – признаки хронического бронхита, распространенные мешотчатые и цилиндрические бронхоэктазы различной локализации, участки пневмофиброза, инфильтративные изменения легочной ткани.

При МРТ наиболее эффективно (100 %) выявляются участки пневмофиброза (уплотнение легочной ткани), скопление экссудата в просвете бронхоэктазов, а также инфильтративные изменения. Меньшая эффективность МРТ, в отличие от КТ, показана при

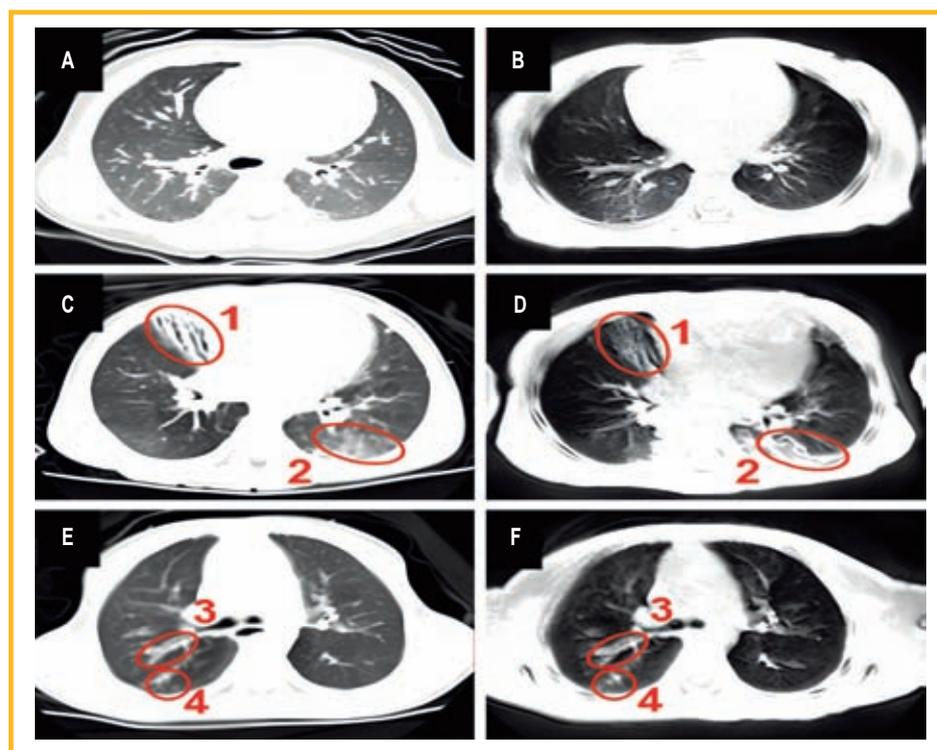


Рис. 1. Сравнение компьютерно-томографических и радиальных UTE-последовательностей по результатам магнитно-резонансной томографии у здорового пациента и больных муковисцидозом:

1 – бронхоэктазы; 2 – уплотнение по типу «матового стекла»; 3 – утолщение стенок бронхов; 4 – заполнение просвета бронха слизью [15]

Примечание: UTE (*ultrashort time echo*) – ультракороткие последовательности.

Figure 1. Comparison of computed tomography images and radial UTE sequence-based magnetic resonance images in a healthy patient and patients with cystic fibrosis: 1 – bronchiectasis; 2 – “ground glass” type compaction; 3 – thickening of the bronchial walls; 4 – filling of the bronchial lumen with mucus [15]

оценке бронхитических изменений с утолщением стенок бронхов без наличия экссудата (83 %). Низкая эффективность МРТ отмечается в визуализации бронхоэктазов со свободным просветом (без признаков мукостаза).

В качестве иллюстрации представлено клиническое наблюдение, по результатам которого продемонстрирована возможность проведения динамического контроля над состоянием легочной паренхимы при помощи МРТ, позволяющей снизить лучевую нагрузку.

Клиническое наблюдение

Пациентка А. 17 лет. Диагноз МВ установлен в возрасте 7 мес. на основании клинической картины (кашель, плохая прибавка массы тела, выраженная стеаторея, положительный потовый тест (хлориды пота – 102 ммоль / л)) и молекулярно-генетического исследования (генотип с.54-5940_273+10250del /с.2052dup). В клинику впервые поступила в 11 лет с жалобами на влажный кашель, субфебрильную лихорадку, повышенную утомляемость и нарушение дыхания. По данным КТ ОГК выявлены признаки хронического обструктивного бронхита, диффузный пневмофиброз, распространенные цилиндрические бронхоэктазы обоих легких, пневмоническая инфильтрация S3 левого легкого. При КТ околоносовых пазух отмечены признаки двустороннего хронического полисинусита. На фоне комплексной базисной терапии наступила стабилизация

состояния. Обострения бронхолегочного процесса стали реже – за год с 5–6 эпизодов снизились до 2–3. В дальнейшем госпитализация в пульмонологическое отделение происходила в плановом порядке – 1 раз в 6 мес. За 7 лет наблюдения у пациентки по показаниям проведены следующие лучевые исследования:

- 7 РГ кистей рук (динамика отставания костного возраста);
- 7 денситометрических исследований (динамика сниженной минеральной плотности костной ткани);
- 1 ирригография с ирригоскопией (выявлена долихо-сигма, трансверзоптоз с опущением селезеночного угла ободочной кишки);
- 7 КТ ОГК и придаточных пазух носа (оценка динамики патологического процесса).

Суммарная лучевая нагрузка, полученная за весь период наблюдения (ЭД), составила 38,5 мЗв (4,8 мЗв за 1 год).

В рамках последней госпитализации при проведении МРТ легких достоверно визуализировался фиброателектаз верхней доли правого легкого с наличием бронхоэктазов и утолщением стенок крупных бронхов (белая стрелка на рис. 2: А, В – КТ; С, D – МРТ). Однако единичные бронхоэктазы с умеренно утолщенными стенками бронхов в левом легком на МРТ-изображениях достоверно не определялись (белые кружки на рис. 2). Несмотря на факт негативной визуализации бронхоэктазов с помощью МРТ, с уверенностью можно сделать вывод об отсутствии отрицательной динамики процесса в легких по сравнению с предыдущими данными КТ (см. рис. 2).

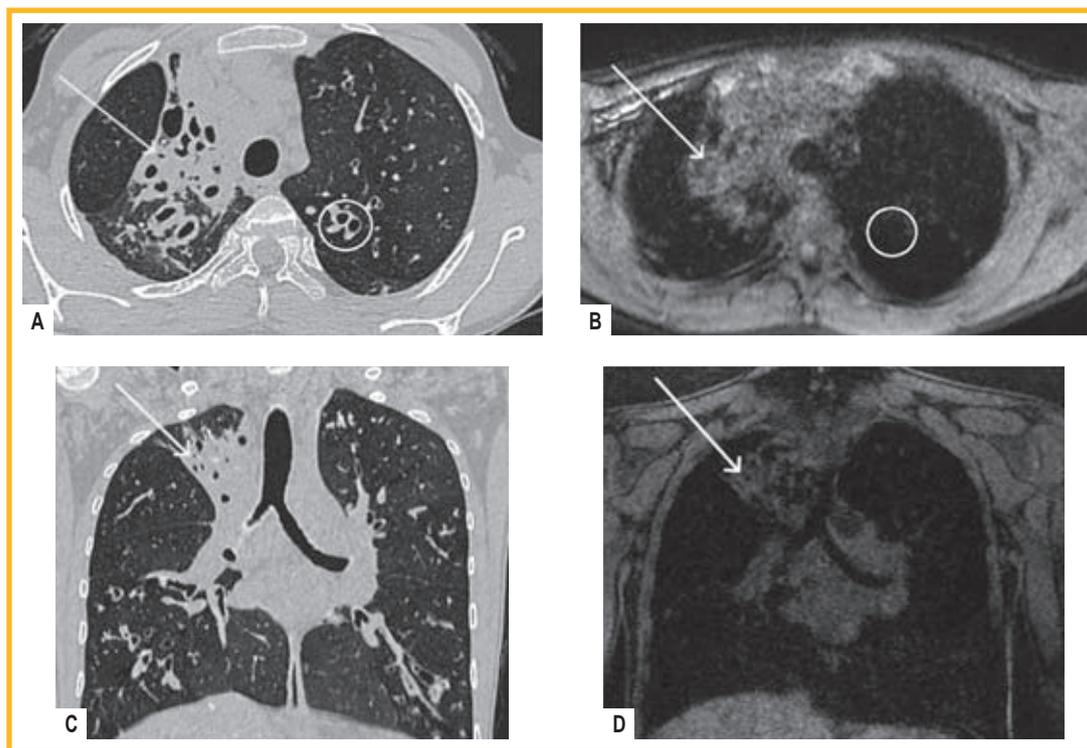


Рис. 2. Томограммы пациентки А. 17 лет: А – компьютерная томография, аксиальный срез; В – магнитно-резонансная томография, аксиальный срез (LAVA); С – компьютерная томография, коронарный срез; D – магнитно-резонансная томография, коронарный срез (LAVA). Белые стрелки – объемное уменьшение верхней доли правого легкого с субтотальной фиброзной консолидацией легочной ткани, в толще которой прослеживаются резко деформированные, расширенные и сближенные между собой просветы бронхов. Белые кружки – цилиндрические бронхоэктазы с уплотненными и утолщенными стенками без визуальных признаков наличия мукостаза

Figure 2. Tomograms of patient A., 17 years old: A, computed tomography, axial section; B, magnetic resonance imaging, axial slice (LAVA); C, computed tomography, coronal section; D, magnetic resonance imaging, coronal slice (LAVA). White arrows show volumetric reduction of the upper lobe of the right lung with subtotal fibrous consolidation of the lung tissue, in the thickness of which extensively deformed, dilated and close-to-close lumens of the bronchi can be found. White circles show cylindrical bronchiectasis with compacted and thickened walls without any visual signs of mucostasis

Обсуждение

Неодинаковая эффективность визуализации патологических процессов в легких на МРТ связана с физическими свойствами тканей, а именно – содержанием протонов водорода. При неизменной пневматизации легочной ткани магнитно-резонансный сигнал очень низкий в связи с малым количеством протонов водорода. При таких процессах, как уплотнение легочной ткани, скопление секрета и воспалительные инфильтративные изменения, значительно увеличивается количество протонов водорода, усиливаются магнитно-резонансный сигнал и эффективность визуализации. Наличие же бронхоэктазов без скопления экссудата, а также изолированное утолщение стенок бронхов практически не усиливают магнитно-резонансный сигнал, что затрудняет выявление данной патологии на МРТ.

Заключение

РГ и КТ ОГК остаются основными методами визуализации легочной паренхимы у детей с МВ. МРТ не является методом первичной диагностики патологии легких, поскольку обладает меньшей разрешающей способностью визуализации бронхоальвеолярной ткани, содержащей малое количество протонов водорода. Однако с учетом отсутствия ионизирующего излучения и развития метода с появлением новых последовательностей МРТ может эффективно использоваться для динамического наблюдения и контроля над состоянием легких вместо плановых РГ и КТ. При альтернативном применении следует ожидать снижения ЭД облучения и риска развития онкологии у детей в отдаленном будущем. Работа над изучением возможностей МРТ в визуализации легких у детей с МВ продолжается.

Литература

- De Boeck K. Cystic fibrosis in the year 2020: a disease with a new face. *Acta Paediatr.* 2020; 109 (5): 893–899. DOI: 10.1111/apa.15155.
- Кондратьева Е.И., Капранова Н.И., Каширская Н.Ю., ред. Национальный консенсус «Муковисцидоз: определение, диагностические критерии, терапия». 2-е изд. М.: Боргес; 2018. Доступно на: https://mukoviscidoz.org/doc/konsensus/2019/konsensus_2019.pdf
- Баранов А.А., Намазова-Баранова Л.С., Куцев С.И. и др. Современные подходы к ведению детей с муковисцидозом. *Педиатрическая фармакология.* 2022; 19 (2): 153–195. DOI: 10.15690/pf.v19i2.2417.
- Министерство здравоохранения Российской Федерации. Клинические рекомендации: Кистозный фиброз. 2021. Доступно на: https://cr.minzdrav.gov.ru/schema/372_2
- Министерство здравоохранения Российской Федерации. Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских аппаратов и проведению рентгенологических исследований. СанПиН 2.6.1.1192-03. 2003. Доступно на: <https://docs.cntd.ru/document/901854044>
- Государственные санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99). СП 2.6.1.799-99. 1999. Доступно на: <https://docs.cntd.ru/document/1200005919>
- Малаховский В.Н., Труфанов Г.Е., Рязанов В.В. Радиационная безопасность рентгенологических исследований: учебно-методическое пособие для врачей. СПб: ЭЛБИ-СПб; 2007.

- Pearce M.S., Salotti J.A., Little M.P. et al. Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: a retrospective cohort study. *Lancet.* 2012; 380 (9840): 499–505. DOI: 10.1016/S0140-6736(12)60815-0.
- Mathews J.D., Forsythe A.V., Brady Z. et al. Cancer risk in 680,000 people exposed to computed tomography scans in childhood or adolescence: data linkage study of 11 million Australians. *BMJ.* 2013; 346: f2360. DOI: 10.1136/bmj.f2360.
- Wang W.H., Sung C.Y., Wang S.C., Shao Y.J. Risks of leukemia, intracranial tumours and lymphomas in childhood and early adulthood after pediatric radiation exposure from computed tomograph. *CMAJ.* 2023; 195 (16): E575–583. DOI: 10.1503/cmaj.221303.
- Bauman G., Lutzen U., Ullrich M. et al. Pulmonary functional imaging: qualitative comparison of fourier decomposition MR Imaging with SPECT/CT in porcine lung. *Radiology.* 2011; 260 (2): 551–559. DOI: 10.1148/radiol.11102313.
- Bauman G., Scholz A., Rivoire J. et al. Lung ventilation- and perfusion-weighted Fourier decomposition magnetic resonance imaging: in vivo validation with hyperpolarized ³He and dynamic contrast-enhanced MRI. *Magn. Reson. Med.* 2013; 69 (1): 229–237. DOI: 10.1002/mrm.24236.
- Eichinger M., Heussel C.P., Kauczor H.U. et al. Computed tomography and magnetic resonance imaging in cystic fibrosis lung disease. *J. Magn. Reson. Imaging.* 2010; 32 (6): 1370–1378. DOI: 10.1002/jmri.22374.
- Leutz-Schmidt P., Eichinger M., Stahl M. et al. Ten years of chest MRI for patients with cystic fibrosis: Translation from the bench to clinical routine. *Radiologe.* 2019; 59 (Suppl. 1): 10–20. DOI: 10.1007/s00117-019-0553-2.
- Woods J.C., Wild J.M., Wielpütz M.O. et al. Current state of the art MRI for the longitudinal assessment of cystic fibrosis. *J. Magn. Reson. Imaging.* 2020; 52 (5): 1306–1320. DOI: 10.1002/jmri.27030.

Поступила: 11.01.24

Принята к печати: 23.03.24

References

- De Boeck K. Cystic fibrosis in the year 2020: a disease with a new face. *Acta Paediatr.* 2020; 109 (5): 893–899. DOI: 10.1111/apa.15155.
- Kondratyeva E.I., Kapranov N.I., Kashirskaia N.Yu., eds. [National consensus “Cystic fibrosis: definition, diagnostic criteria, therapy”]. 2nd Edn. Moscow: BORGES; 2018. Available at: https://mukoviscidoz.org/doc/konsensus/2019/konsensus_2019.pdf (in Russian).
- Baranov A.A., Namazova-Baranova L.S., Kutsev S.I. et al. [Modern approaches in management of children with cystic fibrosis]. *Pediatricheskaya farmakologiya.* 2022; 19 (2): 153–195. DOI: 10.15690/pf.v19i2.2417 (in Russian).
- Ministry of Health of the Russian Federation. [Guidelines: Cystic fibrosis]. 2021. Available at: https://cr.minzdrav.gov.ru/schema/372_2 (in Russian).
- Ministry of Health of the Russian Federation. [Hygienic requirements for the design and operation of X-ray machines and the conduct of X-ray examinations. SanPiN 2.6.1.1192-03]. 2003. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/901854044> (in Russian).
- State sanitary and epidemiological rules and regulations. [Basic sanitary rules for ensuring radiation safety (OSPORB-99). SP 2.6.1.799-99]. 1999. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200005919> (in Russian).
- Malakhovskiy V.N., Trufanov G.E., Ryzanov V.V. [Radiation safety of X-ray studies: manual]. St. Petersburg: ELBI-SPb; 2007 (in Russian).
- Pearce M.S., Salotti J.A., Little M.P. et al. Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: a retrospective cohort study. *Lancet.* 2012; 380 (9840): 499–505. DOI: 10.1016/S0140-6736(12)60815-0.
- Mathews J.D., Forsythe A.V., Brady Z. et al. Cancer risk in 680,000 people exposed to computed tomography scans in childhood or adolescence: data linkage study of 11 million Australians. *BMJ.* 2013; 346: f2360. DOI: 10.1136/bmj.f2360.
- Wang W.H., Sung C.Y., Wang S.C., Shao Y.J. Risks of leukemia, intracranial tumours and lymphomas in childhood and early adulthood after pediatric radiation exposure from computed tomograph. *CMAJ.* 2023; 195 (16): E575–583. DOI: 10.1503/cmaj.221303.

11. Bauman G., Lutzen U., Ullrich M. et al. Pulmonary functional imaging: qualitative comparison of fourier decomposition MR Imaging with SPECT/CT in porcine lung. *Radiology*. 2011; 260 (2): 551–559. DOI: 10.1148/radiol.11102313.
12. Bauman G., Scholz A., Rivoire J. et al. Lung ventilation- and perfusion-weighted Fourier decomposition magnetic resonance imaging: in vivo validation with hyperpolarized ^3He and dynamic contrast-enhanced MRI. *Magn. Reson. Med*. 2013; 69 (1): 229–237. DOI: 10.1002/mrm.24236.
13. Eichinger M., Heussel C.P., Kauczor H.U. et al. Computed tomography and magnetic resonance imaging in cystic fibrosis lung disease. *J. Magn. Reson. Imaging*. 2010; 32 (6): 1370–1378. DOI: 10.1002/jmri.22374.
14. Leutz-Schmidt P., Eichinger M., Stahl M. et al. Ten years of chest MRI for patients with cystic fibrosis: Translation from the bench to clinical routine. *Radiologe*. 2019; 59 (Suppl. 1): 10–20. DOI: 10.1007/s00117-019-0553-2.
15. Woods J.C., Wild J.M., Wielpütz M.O. et al. Current state of the art MRI for the longitudinal assessment of cystic fibrosis. *J. Magn. Reson. Imaging*. 2020; 52 (5): 1306–1320. DOI: 10.1002/jmri.27030.

Received: January 11, 2024

Accepted for publication: March 23, 2024

Информация об авторах / Authors Information

Мустафин Ринат Ислямович — врач-рентгенолог отделения компьютерной томографии отдела лучевой диагностики Федерального государственного автономного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр здоровья детей» Министерства здравоохранения Российской Федерации; тел.: (499) 134-13-62; e-mail: rinmust25@yandex.ru (ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3648-2884>)

Rinat I. Mustafin, Radiologist, Computed Tomography Department of the Radiology Department, Federal State Autonomous Institution “National Medical Research Center for Children’s Health” of the Ministry of Health of the Russian Federation; tel.: (499) 134-13-62; e-mail: rinmust25@yandex.ru (ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3648-2884>)

Кустова Ольга Владимировна — врач-рентгенолог Федерального государственного автономного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр здоровья детей» Министерства здравоохранения Российской Федерации; тел.: (499) 134-13-62; e-mail: kustova@nczd.ru (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6668-0761-119296>)

Olga V. Kustova, Radiologist, Federal State Autonomous Institution “National Medical Research Center for Children’s Health” of the Ministry of Health of the Russian Federation; tel.: (499) 134-13-62; e-mail: kustova@nczd.ru (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6668-0761-119296>)

Симонова Ольга Игоревна — д. м. н., врач-педиатр, заведующая пульмонологическим отделением Федерального государственного автономного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр здоровья детей» Министерства здравоохранения Российской Федерации; профессор кафедры педиатрии и ревматологии Клинического института детского здоровья имени Н.Ф.Филатова Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Первый Московский государственный медицинский университет имени

И.М.Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет); врач-педиатр медико-генетического отделения Государственного бюджетного учреждения здравоохранения города Москвы «Морозовская детская городская клиническая больница Департамента здравоохранения города Москвы»; тел.: (499) 134-93-31; e-mail: oisimonova@mail.ru (SPIN: 2241-9728; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2367-9920>)

Olga I. Simonova, Doctor of Medicine, Pediatrician, Head of the Pulmonology Department, Federal State Autonomous Institution “National Medical Research Center for Children’s Health” of the Ministry of Health of the Russian Federation; Professor, Department of Pediatrics and Rheumatology, N.F.Filatov Clinical Institute of Child Health, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education I.M.Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University); Pediatrician, Medical Genetics Department, State Budgetary Healthcare Institution “Morozov Children’s City Clinical Hospital of the Moscow Health Department”; tel.: (499) 134-93-31; e-mail: oisimonova@mail.ru (SPIN: 2241-9728; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2367-9920>)

Аникин Анатолий Владимирович — к. м. н., заведующий отделом лучевой диагностики Федерального государственного автономного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр здоровья детей» Министерства здравоохранения Российской Федерации; тел.: (499) 134-10-65; e-mail: anikacor@gmail.com (ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0362-6511>)

Anatoly V. Anikin, Candidate of Medicine, Head of the Radiology Department, Federal State Autonomous Institution “National Medical Research Center for Children’s Health” of the Ministry of Health of the Russian Federation; tel.: (499) 134-10-65; e-mail: anikacor@gmail.com (ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0362-6511>)

Участие авторов

Мустафин Р.И. — написание текста, дизайн статьи, сбор и обработка материала, обсуждение результатов

Кустова О.В. — сбор и обработка материала

Симонова О.И. — дизайн статьи, редактирование, обсуждение результатов

Аникин А.В. — написание текста, сбор и обработка материала, редактирование, обсуждение результатов

Все авторы внесли существенный вклад в проведение поисково-аналитической работы и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию до публикации, несут ответственность за целостность всех частей статьи.

Authors Contribution

Mustafin R.I. — text writing, study design, collection and processing of the material, discussion of the results

Kustova O.V. — collection and processing of the material

Simonova O.I. — study design, editing, discussion of the results

Anikin A.V. — text writing, collection and processing of the material, editing, discussion of the results

All authors made significant contributions to the search, analysis, and preparation of the article, read and approved the final version before publication, and are responsible for the integrity of all parts of the article.