

## ЛЕКЦИИ И ОБЗОРЫ / LECTURES AND REVIEWS

УДК 616-073.756.8

<http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2020-11-3-14-19>

© Силин А.Ю., Груздев И.С., Мещеряков А.И., Беркович Г.В., Морозов С.П., 2020 г.

**КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЬ-  
БАЗИРОВАННЫХ ИТЕРАТИВНЫХ РЕКОНСТРУКЦИЙ  
В КЛИНИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ**<sup>1,2</sup>А. Ю. Силин\*, <sup>3</sup>И. С. Груздев, <sup>2</sup>А. И. Мещеряков, <sup>4</sup>Г. В. Беркович, <sup>1</sup>С. П. Морозов<sup>1</sup>Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия<sup>2</sup>Клинический госпиталь на Яузе, Москва, Россия<sup>3</sup>Национальный медицинский исследовательский центр хирургии им. А. В. Вишневского, Москва, Россия<sup>4</sup>Национальный медицинский исследовательский центра им. В. А. Алмазова, Санкт-Петербург, Россия

В связи с широким внедрением КТ в клиническую практику вопрос о снижении дозы облучения остается одним из самых насущных. Одним из направлений снижения лучевой нагрузки является совершенствование алгоритмов реконструкции КТ-изображений. При использовании модельной интерактивной реконструкции изображения многократно обрабатываются для максимального устранения цифрового шума, что позволяет выполнять низкодозовые исследования без снижения качества визуализации. В обзоре литературы представлены возможности применения модельной итеративной реконструкции при КТ-исследовании различных органов и систем, в том числе при низкодозовых исследованиях с дозой облучения менее 1 мЗв, оценка качества выполненных исследований и визуализации патологии различных органов и систем. Наиболее востребованной новая методика является для скрининговых исследований, например, для НДКТ-скрининга рака легкого, и исследований, в которых требуется высокое разрешение, например, для КТ-коронарографии.

**Ключевые слова:** модельная итеративная реконструкция, доза облучения, низкодозная компьютерная томография, грудная клетка, КТ-коронарография

Контакт: Силин Антон Юрьевич, [silin@yamed.ru](mailto:silin@yamed.ru)

© Silin A.Yu., Gruzdev I.S., Berkovich G.V., Mescheryakov A.I., Morozov S.P., 2020

**POSSIBILITIES OF THE APPLICATION OF MODEL-BASED ITERATIVE  
RECONSTRUCTIONS IN CLINICAL PRACTICE: LITERATURE REVIEW**<sup>1,2</sup>Anton Yu. Silin\*, <sup>3</sup>Ivan S. Gruzdev, <sup>4</sup>Gleb V. Berkovich, <sup>2</sup>Andrey I. Mescheryakov, <sup>1</sup>Sergey P. Morozov<sup>1</sup>Research and Practical Clinical Center of Diagnostics and Telemedicine Technologies, Department of Health Care of Moscow, Moscow, Russia<sup>2</sup>Clinical Hospital on Jauza, Moscow, Russia<sup>3</sup>A. V. Vishnevsky National Medical Research Centre of Surgery, Moscow, Russia<sup>4</sup>Almazov National Medical Research Centre, St. Petersburg, Russia

Due to the widespread introduction of CT in clinical practice, the issue of reducing the radiation dose remains one of the most urgent. One of the ways to reduce radiation exposure is to improve the reconstruction algorithms of CT images. When using model interactive reconstruction, images are repeatedly processed to maximize the elimination of digital noise, which allows low-dose studies to be performed without compromising visual quality. The literature review presents the possibilities of applying model iterative reconstruction in CT studies of various organs and systems, including low-dose studies with a radiation exposure of less than 1 mSv, assessment the quality of studies and visualization of the pathology of various organs and systems. The most popular new technique is for screening studies, for example, for LDCT screening of lung cancer, and studies that require high resolution, for example, for CT-coronarography.

**Key words:** model iterative reconstruction, radiation dose, low dose computed tomography, chest, CT-coronarography

Contact: Silin Anton Yurievich, [silin@yamed.ru](mailto:silin@yamed.ru)

**Конфликт интересов:** авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Силин А.Ю., Груздев И.С., Мещеряков А.И., Беркович Г.В., Морозов С.П. Компьютерная томография с использованием модель-базированных итеративных реконструкций в клинической практике: обзор литературы // *Лучевая диагностика и терапия*. 2020. Т. 11, № 3. С. 14–19, <http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2020-11-3-14-19>.

**Conflict of interests:** the authors stated that there is no potential conflict of interests.

**For citation:** Silin A.Yu., Gruzdev I.S., Berkovich G.V., Mescheryakov A.I., Morozov S.P. Possibilities of the application of model-based iterative reconstructions in clinical practice: literature review // *Diagnostic radiology and radiotherapy*. 2020. Vol. 11, No. 3. P. 14–19, <http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2020-11-3-14-19>.

**Введение.** Появление метода компьютерной томографии стало революцией в лучевой диагностике. С момента появления первого компьютерного томографа в 1970-х гг. число КТ-исследований неуклонно возрастает, как увеличивается и доза облучения. Например, в 2006 г. население США получило в 7 раз бóльшую дозу от медицинского облучения по сравнению с 1980 г., и более половины составило облучение от КТ [1, с. 293]. Результаты исследований о наличии связи компьютерной томографии и возникновения онкологических заболеваний неоднозначны, однако имеются публикации, сообщающие о более высоком риске развития опухолей у пациентов, прошедших КТ-исследование [2, с. 388].

На сегодняшний день снижение лучевой нагрузки при КТ-исследованиях — одна из ключевых задач медицинской радиологии. Главным инструментом снижения лучевой нагрузки стало усовершенствование алгоритмов реконструкции КТ-изображений. Внедренные в практику в конце 2000-х гг. итеративные реконструкции второго поколения, или гибридные, сменившие ранее применяемый алгоритм обратного проецирования взвешенных фильтрованных проекций (*filtered back projection* — FBP), позволили снизить дозу облучения на 30–40%. С 2012 г. производители компьютерных томографов начали предлагать алгоритмы итеративных реконструкций третьего поколения, или модельные итеративные реконструкции (МИР).

Итеративная реконструкция многократно обрабатывает полученные данные, в результате чего получается изображение, лишённое цифрового шума, максимально соответствующее реальному объекту. Это открывает возможности для снижения лучевой нагрузки без снижения качества исследования [3, с. W384]. Данный алгоритм реконструкции позволяет достигнуть снижения дозы до 40% при сравнении с предыдущими поколениями реконструкции и до 90% по сравнению с FBP [4, с. 3138; 5, с. 360; 6, с. 109]. Для решения задачи МИР разные производители компьютерных томографов используют разные алгоритмы и соответственно разные коммерческие решения. Аббревиатура коммерческих продуктов МИР являются у Philips — IMR, Siemens — ADMIRE, GE — MBIR и у Toshiba — FIRST. В зависимости от производителя и используемого оборудования время реконструкции составляет от нескольких минут [7, с. 1246], до одного часа и более [5, с. 360].

В исследованиях, направленных на оценку исследуемых структур при использовании МИР, в большинстве случаев было отмечено повышение выявляемости патологии врачами-рентгенологами [8, с. 2].

Применение МИР при КТ головного мозга улучшает выявление изменений низкой плотности в паренхиме головного мозга как на фантоме, так и у реальных пациентов [9, с. 884], и улучшает чувствительность в выявлении симптома гиперденной артерии, как раннего признака инсульта головного мозга [10, с. 1273]. Использование МИР позволяет выполнять низкодозные исследования околоушных желез [11, с. 957].

Применение МИР повышает качество визуализации костных структур, в том числе при низкой дозе облучения, как на фантомах, так и на пациентах [12, с. 153]. При использовании технологии МИР улучшается визуализация переломов при низкодозовом КТ поясничного отдела позвоночника [13, с. 216]. Применение МИР позволяет значительно уменьшить артефакты от металлических структур и улучшить визуализацию мягких тканей, окружающих имплант [14, с. 971].

При КТ-ангиографии реконструкция изображений с помощью МИР улучшает визуализацию как крупных, так и мелких сосудов [15, с. 1283], улучшает визуализацию стенки сосудов [16, с. 161] и клапанов сердца, в том числе имплантированных [17, с. 773], повышает выявляемость легочной эмболии [18, с. e016716].

При обследовании органов брюшной полости и малого таза МИР обеспечивает лучшую визуализацию мелких структур [19, с. 927] и сохраняет чувствительность метода при уменьшении лучевой нагрузки, позволяя снижать ее практически в два раза [20, с. 1715]. Использование МИР повышает выявляемость изменений в печени [21, с. 859] и почках [22, с. 133], в том числе низкоконтрастных. При диагностике мочекаменной болезни применение МИР позволяет выявить конкременты почек более 3 мм и все камни мочеточников даже при лучевой нагрузке менее 1 мЗв [23, с. 3137]. При виртуальной колоноскопии отмечается повышение чувствительности при использовании IMR по сравнению с FBP до 12% как при стандартной, так и при пониженной дозе облучения [24, с. e1883].

**КТ органов грудной клетки.** Широкое внедрение в практику КТ-скрининга рака легкого, а также большое количество заболеваний, при которых показана КТ органов грудной клетки, объясняет высокую потребность в этом исследовании, но вместе с тем формирует необходимость снижения лучевой нагрузки на популяцию.

Благодаря наименьшей чувствительности к шуму [25, с. 147], МИР позволяют применять новые субмиллизертовые протоколы сканирования с сохранением или даже улучшением диагностического

качества. В опубликованных данных исследователи при использовании ультранизкодозовых протоколов менее 1 мЗв и применении модельных итеративных реконструкций [7, с. 1246, 26, с. 20170658] отмечали лучшую выявляемость солидных очагов по сравнению с предыдущими методами реконструкций. При УНДКТ со средней дозой облучения 0,67 мЗв использование МИР обеспечивает выявление большего количества солидных очагов [26, с. 20170658], особенно диаметром менее 4 мм, что важно для тактики ведения очагов, выявленных в ходе повторного (round) скрининга, и более четкое изображение контуров очагов по сравнению с ФВР [27, с. 1197]. А. Padole и соавт. [28, с. 20160625] при лучевой нагрузке 0,4 мЗв смогли выявить 97% необычных очагов, обнаруженных на стандартной КТ органов грудной клетки, при этом все невыявленные очаги были размером до 4 мм. В исследовании Z. Miao и соавт. [26, с. 20170658] при ультранизкодозовом протоколе менее 1 мЗв только при использовании МИР было достигнуто диагностическое качество изображения как легочных структур, так и средостения, при одновременном увеличении количества выявленных солидных очагов. Это может классифицировать МИР как технологию, не только снижающую лучевую нагрузку, но и повышающую диагностическое качество.

Тем не менее опубликованы данные о затрудненной визуализации участков эмфизематозного вздутия и мелких очагов по типу матового стекла при низкодозовых КТ органов грудной клетки. S. W. Lee и соавт. смогли выявить только 60% участков пониженной плотности в паренхиме легких, при этом наиболее проблемной зоной визуализации были верхушки легких [29, с. 817]. Y. H. Ju и соавт. [30, с. 553] при дозе облучения 0,4 мЗв отмечали возможность выявления очагов по типу матового стекла, но рекомендовали динамический КТ-контроль со стандартной дозой для дифференциального диагноза.

Последние литературные данные за 2018 год показывают более точное волюметрическое измерение эмфиземы и площади бронхиальной стенки при использовании МИР [31, с. A2491], с наиболее точной сопоставимостью результатов между низкодозовыми и стандартными протоколами.

Остаются не определены минимальные уровни лучевой нагрузки, при которых возможна качественная оценка всей легочной патологии у пациентов с ИМТ > 25 кг/м<sup>2</sup>.

**Прочие клинические ситуации.** Использование МИР при высокоразрешающей КТ грудной клетки для диагностики интерстициальных заболеваний легких позволяет добиться снижения цифрового шума изображения до 60% без потери диагностического качества изображения и визуализации мелких анатомических структур [32, с. 243].

C. Yap и соавт. [33, с. 285] опубликовали данные о сохранении диагностического качества изображе-

ния УНДКТ со средней лучевой нагрузкой в 0,3 мЗв и МИР при обследовании пациентов с грибковой инфекцией легких по сравнению с НДКТ с лучевой нагрузкой 0,7 мЗв и использованием итеративных реконструкций второго поколения. Визуализация всех признаков инвазивной грибковой инфекции легких была аналогичной НДКТ, за исключением halo-признака (участки изменения по типу матового стекла вокруг узелкового образования). Визуализация этого признака ухудшалась вследствие умеренного blurring-эффекта, однако это не приводило к статистически значимой разнице в диагностике.

Низкодозовые протоколы совместно с МИР позволяют проводить мониторинг онкологических пациентов с сохранением хорошей визуализации контуров образований, несмотря на снижение лучевой нагрузки [34, с. 2279].

E. Hu-Wang и соавт. применяли УНДКТ органов грудной клетки с лучевой нагрузкой, эквивалентной рентгенографии органов грудной клетки (0,14 мЗв) у 105 пациентов с диагностированным лимфангиолойомиоматозом для расчета кистозного индекса (Cyst Score) — процента замещения легочной ткани воздушными кистами. Различия в кистозном индексе при референсной КТ с дозой облучения 3,4 мЗв и УНДКТ составили 1,1%, при этом отмечалась превосходная корреляция между результатами. Таким образом, ультранизкодозовая КТ эквивалентна КТ со стандартной дозой облучения при расчете кистозного индекса у пациентов с лимфангиолойомиоматозом [35, с. 528].

**Применение МИР при КТ-коронарографии.** Использование МИР при КТ-коронарографии позволяет снизить шумность изображения на 80% и более, а также повысить соотношение контраст-шум при снижении лучевой нагрузки на пациента в среднем на 80% от стандартной [36, с. 805]. Отмечаются снижение внутрисосудистого шума на 86–88%, лучшее отграничение обызвествлений, лучшая визуализация мелких коронарных артерий и более высокая диагностическая уверенность в наличии или отсутствии стенозов по сравнению с ФВР-изображениями в условиях снижения дозы облучения на 80% ниже, чем при стандартном исследовании [36, с. 805]. При использовании низкодозовых протоколов применение МИР по сравнению с реконструкциями предыдущих поколений увеличивает количество доступных для анализа сегментов коронарных артерий [37, с. 1408]. При этом также отмечается лучшая визуализация сердечных структур, таких как миокард и клапаны сердца [17, с. 773].

Использование МИР при КТ-коронарографии является крайне перспективным решением на пути дальнейшего снижения дозы и повышения качества изображения.

**Кальциевый индекс.** В последнее время используются две методики измерения кальциевого индекса: по шкале Агатстона и порядковый кальциевый индекс (ordinary Ca-scoring). Данные методики

хорошо коррелируют между собой, надежно оценивают распространенность атеросклеротического поражения и обеспечивают необходимой информацией для стратификации риска сердечно-сосудистых заболеваний [38, с. 813].

Применение технологии МИР при измерении кальциевого индекса позволяет значительно снизить шумность изображения, а также обеспечить наилучшую воспроизводимость и стабильность получаемых результатов [39, с. 295].

Однако при использовании МИР для расчета кальциевого индекса на фантоме в исследовании S. Oda и соавт. были получены меньшие значения кальциевого индекса, чем при других методах реконструкции [39, с. 295]. Эти же авторы наблюдали уменьшение числовых значений кальциевого индекса при обследовании пациентов. Более того, по данным исследования B. Szilveszter и соавт. снижение значений кальциевого индекса может приводить к реклассификации в 2,4% случаев и, таким образом, к недооценке риска развития сердечно-сосудистых событий [40, с. 153].

Возможно, полученные результаты анализа кальциевого индекса связаны с лишением изображений цифрового шума и лучшим отграничением структур бляшки. Однако для окончательных выводов необходимы дальнейшие исследования с большой выборкой пациентов и более глубоким анализом данных.

Применение порядкового кальциевого индекса возможно и при НДКТ с сохранением высокой корреляции со шкалой Агатстона [41, с. 799]. В то же время исследований, посвященных расчету порядкового кальциевого индекса при использовании технологии МИР, на момент подготовки материала нами не найдено.

**КТ сердца.** По сравнению с КТ-коронарографией опубликовано значительно меньшее количество статей, посвященных другим задачам при выполнении КТ сердца.

В 2014 г. S. Oda и соавт. [42, с. 104] изучали возможность выполнения КТ сердца при сниженной до 20% дозе облучения и применении МИР (IMR). При количественном анализе полученных изображений исследователи получили меньшие значения шума, большие значения соотношения контраст-шум при использовании МИР и сниженной на 80% дозе облучения по сравнению с FBP-реконструкцией и стандартной дозой. S. Oda и соавт. пришли к выводу, что использование технологии МИР (IMR) позволяет улучшать качество изображений КТ сердца даже при значительно сниженной лучевой нагрузке.

R. W. Van Hamersvelt и соавт. [43, с. 148] определяли допустимый уровень минимальной лучевой нагрузки при наличии технологии МИР, при котором оценка обызвествлений грудной аорты и аортального клапана все еще выполняема. Показательно, что при дозе, сниженной на 75% (0,48 мЗв), не было различий между числовыми значениями кальциевых масс при МИР по сравнению с референсом. Таким обра-

зом, наличие технологии МИР позволяет проводить оценку обызвествлений грудной аорты и аортального клапана при субмиллизвертовой лучевой нагрузке.

D. Sucha и соавт. оценивали влияние технологии МИР на артефакты от протезированного клапана сердца на антропоморфных фантомах [44, с. 785]. Применение технологии МИР позволяет уменьшить количество лучистых артефактов вследствие beam-hardening, повысить соотношения сигнал-шум и контраст-шум даже при сниженных дозах. Все это позволяет лучше оценивать состояние окружающих клапан анатомических структур.

G. Pontone сравнивали эффективность радиочастотной абляции у пациентов с предоперационной КТ со стандартной дозой и итеративными реконструкциями второго поколения (ASIR) и субмиллизвертовой КТ и МИР (MBIR). При снижении лучевой нагрузки практически на 90% (с 6,17 до 0,41 мЗв) и реконструкции МИР исследователи получили более высокие значения соотношений контраст-шум и сигнал-шум, более низкие значения шумности изображения. При анализе данных 300 пациентов ими не было выявлено статистически значимой разницы частоты рецидива аритмий [45, с. 805].

**Заключение.** Большинство исследований, опубликованных в электронной англоязычной базе медицинских публикаций, посвящены применению МИР при клинических ситуациях, когда необходима четкая визуализация мелких структур, например, при КТ-коронарографии, КТ-скрининге рака легкого и КТ-ангиографии. Увеличивается количество статей, посвященных и другим областям исследования. В российском индексе научного цитирования присутствует только одна статья отечественных авторов.

Таблица

**Распределение количества статей по областям применения**

Table

**Distribution of the number of articles by areas of application**

Область исследования	Количество статей	
	абс. число	% от общего количества
Голова и шея	18	11
КТ-коронарография	24	14,7
Органы брюшной полости	45	27,6
Органы грудной клетки	35	21,5
Опорно-двигательный аппарат	6	3,7
Сердце	8	4,9
Ангиография	18	11
Без определенной области исследования (фантомы, трупы, препараты)	9	5,6
Итого	163	100

Учитывая большое количество научных работ по оценке отдельных примеров легочной патологии,

представляется перспективным изучение возможностей применения МИР при КТ органов грудной клетки в условиях первичного звена здравоохранения, что может не только повысить диагностическое качество исследований, но и существенно оптимизировать лучевую нагрузку на популяцию. Остаются неизвестными пороговые значения лучевой нагрузки в зависимости от массы тела пациента для выявления не только легочных очагов, но и другой патологии, которая встречается в условиях первичного звена здравоохранения.

В целом анализ данных литературы показывает следующее распределение работ по областям сканирования (таблица).

Общим выводом проанализированных работ является возможность применения МИР для значительного снижения лучевой нагрузки без потери качества изображений. Опыт использования МИР не ограничивается рутинными исследованиями, однако во всех случаях показывает превосходящую или равную диагностическую ценность, что может стать новым значительным этапом развития лучевой диагностики.

## ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

- Schauer D.A., Otha W. National Council on Radiation Protection and Measurements report shows substantial medical exposure increase // *Radiology*. 2009. Vol. 253, No. 2. P. 293–296. doi: 10.1148/radiol.2532090494.
- De Gonzalez A.B., Salotti J.A., McHugh K., Little M.P., Harbron R.W., Lee C., Ntowe E., Braganza M.Z., Parker L., Rajaraman P., Stiller, C., Stewart D.R., Craft A.W., Pearce M.S. Relationship between paediatric CT scans and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: assessment of the impact of underlying conditions // *British journal of cancer*. 2016. Vol. 114, No. 4. P. 388–394. doi: 10.1038/bjc.2015.415.
- Padole A., Ali Khawaja R.D., Kalra M.K., Singh S. CT radiation dose and iterative reconstruction techniques // *American journal of roentgenology*. 2015. Vol. 204, No. 4. P. W384–W392. doi: 10.2214/AJR.14.13241.
- Debray M.P., Dauriat G., Khalil A., Leygnac S., Tubiana S., Grandjean A., Schouman-Claeys E., Laissy J., Ou, P. Diagnostic accuracy of low-mA chest CT reconstructed with Model Based Iterative Reconstruction in the detection of early pleuro-pulmonary complications following a lung transplantation // *European radiology*. 2016. Vol. 26, No. 9. P. 3138–3146. doi: 10.1007/s00330-015-4126-0.
- Neroladaki A., Botsikas D., Boudabbous S., Becker C. D., Montet X. Computed tomography of the chest with model-based iterative reconstruction using a radiation exposure similar to chest X-ray examination: preliminary observations // *European radiology*. 2013. Vol. 23, No. 2. P. 360–366. doi: 10.1007/s00330-012-2627-7.
- Беркович Г.В. Оценка параметров качества КТ-изображений, полученных с использованием различных поколений алгоритмов реконструкций // Лучевая диагностика и терапия. 2017. № 3. С. 109–110. [Berkovich G.V. Estimating of CT image quality with different generations of image reconstructions // *Diagnostic radiology and radiotherapy*. 2017. No. 3. P. 109–110 (In Russ.)].
- De Margerie-Mellon C., de Bazelaire C., Montlahuc C., Lambert J., Martineau A., Coulon P., de Kerviler E., Beigelman C. Reducing radiation dose at chest CT: comparison among model-based type iterative reconstruction, hybrid iterative reconstruction, and filtered back projection // *Academic radiology*. 2016. Vol. 23, No. 10. P. 1246–1254. doi: 10.1016/j.acra.2016.05.019.
- Khawaja R.D.A., Singh S., Blake M., Harisinghani M., Choy G., Karosmangulu A., Padole A., Do S., Brown K., Thompson R., Morton T. Ultra-low dose abdominal MDCT: using a knowledge-based Iterative Model Reconstruction technique for substantial dose reduction in a prospective clinical study // *European journal of radiology*. 2015. Vol. 84, No. 1. P. 2–10. doi: 10.1016/j.ejrad.2014.09.022.
- Iyama Y., Nakaura T., Oda S., Kidoh M., Utsunomiya D., Yoshida M., Yuki H., Hirata K., Funama Y., Harada K., Awai K., Hirai T., Yamashita Y. Iterative reconstruction designed for brain CT: a correlative study with filtered back projection for the diagnosis of acute ischemic stroke // *Journal of computer assisted tomography*. 2017. Vol. 41, No. 6. P. 884–890. doi: 10.1097/RCT.0000000000000626.
- Lombardi S., Riva L., Patassini M., Remida P., Capraro C., Canonico F., Franzesi C.T., Ippolito D. «Hyperdense artery sign” in early ischemic stroke: diagnostic value of model-based reconstruction approach in comparison with standard hybrid iterative reconstruction algorithm // *Neuroradiology*. 2018. Vol. 60, No. 12. P. 1273–1280. doi: 10.1007/s00234-018-2092-3.
- Park C.J., Kim K.W., Lee H.J., Kim M.J., Kim J. Contrast-Enhanced CT with Knowledge-Based Iterative Model Reconstruction for the Evaluation of Parotid Gland Tumors: A Feasibility Study // *Korean journal of radiology*. 2018. Vol. 19, No. 5. P. 957–964. doi: 10.3348/kjr.2018.19.5.957.
- Iyama Y., Nakaura T., Iyama A., Kidoh M., Katahira K., Oda S., Utsunomiya D., Yamashita Y. Feasibility of iterative model reconstruction for unenhanced lumbar CT // *Radiology*. 2017. Vol. 284, No. 1. P. 153–160. doi: 10.1148/radiol.2017161966.
- Lee S.H., Yun S.J., Jo H.H., Song J.G. Diagnosis of lumbar spinal fractures in emergency department: low-dose versus standard-dose CT using model-based iterative reconstruction // *Clinical imaging*. 2018. Vol. 50. P. 216–222. doi: 10.1016/j.clinimag.2018.04.007.
- Wellenberg R. H., Boomsma M. F., van Osch J. A., Vlassenbroek A., Milles J., Edens M. A., Streekstra G.J., Slump C.H., Maas, M. Computed tomography imaging of a hip prosthesis using iterative model-based reconstruction and orthopaedic metal artefact reduction: a quantitative analysis // *Journal of computer assisted tomography*. 2016. Vol. 40, No. 6. P. 971–978. doi: 10.1097/RCT.0000000000000449.
- Oda S., Yoshimura A., Honda K., Iyama Y., Katahira K., Nakaura T., Utsunomiya D., Funama Y., Yuki H., Kidoh M., Hirata K., Taguchi N., Tokuyasu S., Yamashita Y. CT angiography in patients with peripheral arterial disease: Effect of small focal spot imaging and iterative model reconstruction on the image quality // *Academic radiology*. 2016. Vol. 23, No. 10. P. 1283–1289. doi: 10.1097/RCT.0000000000000449.
- Yokomachi K., Tatsugami F., Higaki T., Kume S., Sakamoto S., Okazaki T., Kurisu K., Nakamura Y., Baba Y., Lida M., Awai K. Neointimal formation after carotid artery stenting: phantom and clinical evaluation of model-based iterative reconstruction (MBIR) // *European radiology*. 2019. Vol. 29, No. 1. P. 161–167. doi: 10.1007/s00330-018-5598-5.
- Minhas A., Patel S., Kazerooni E. A., Conte A. H., LaBounty, T. M. Iterative reconstruction results in larger computed tomography measurements of iliofemoral artery diameter in patients referred for transcatheter aortic valve replacement // *Journal of computer assisted tomography*. 2016. Vol. 40, No. 5. P. 773–776. doi: 10.1097/RCT.0000000000000421.
- Sauter A., Koehler T., Fingerle A.A., Brendel B., Richter V., Rasper M., Rummeny E.J., Noel P.B., Münzel D. Ultra low dose CT pulmonary angiography with iterative reconstruction // *PLoS One*. 2016. Vol. 11, No. 9. e0162716. doi: 10.1371/journal.pone.0162716.
- Millon D., Vlassenbroek A., Van Maanen A.G., Cambier S.E., Coche E.E. Low contrast detectability and spatial resolution with model-based iterative reconstructions of MDCT images: a phantom and cadaveric study // *European radiology*. 2017. Vol. 27, No. 3. P. 927–937. doi: 10.1007/s00330-016-4444-x.
- Nakamoto A., Kim T., Hori M., Onishi H., Tsuboyama T., Sakane M., Tomiyama N. Clinical evaluation of image quality and radiation dose reduction in upper abdominal computed tomography using model-based iterative reconstruction; comparison with filtered back projection and adaptive statistical iterative reconstruction // *European journal of radiology*. 2015. Vol. 84, No. 9. P. 1715–1723. doi: 10.1016/j.ejrad.2015.05.027.
- Yoon J.H., Lee J.M., Yu M.H., Baek J.H., Jeon J.H., Hur B.Y., Choi B.I. Comparison of iterative model-based reconstruction versus conventional filtered back projection and hybrid iterative reconstruction techniques: Lesion conspicuity and influence of body size in anthropomorphic liver phantoms // *Journal of computer assisted tomography*. 2014. Vol. 38, No. 6. P. 859–868. doi: 10.1097/RCT.0000000000000145.
- Tan T.J., Lau K.K., Jackson D., Ardley N., Borasu A. Efficacy of model-based iterative reconstruction technique in non-enhanced CT of the renal tracts for ureteric calculi // *Emergency radiology*. 2017. Vol. 24, No. 2. P. 133–138. doi: 10.1007/s10140-016-1454-6.
- Park S.B., Kim Y.S., Lee J.B., Park H.J. Knowledge-based iterative model reconstruction (IMR) algorithm in ultralow-dose CT for evaluation of urolithiasis: evaluation of radiation dose reduction, image quality, and diagnostic performance // *Abdominal imaging*. 2015. Vol. 40, No. 8. P. 3137–3146. doi: 10.1007/s00261-015-0504-y.
- Lambert L., Ourednick P., Briza J., Giepmans W., Jahoda J., Hruska L., Danes J. Sub-millisievert ultralow-dose CT colonography with iterative model reconstruction technique // *Peer J*. 2016. Vol. 4. e1883. doi: 10.7717/peerj.1883.

25. Mehta D., Thompson R., Morton T., Dhanantwari A., Shefer E. Iterative model reconstruction: simultaneously lowered computed tomography radiation dose and improved image quality // *Med. Phys. Int. J.* 2013. Vol. 2, No. 1. P. 147–155.
26. Zhang M., Qi W., Sun Y., Jiang Y., Liu X., Hong N. Screening for lung cancer using sub-millisievert chest CT with iterative reconstruction algorithm: image quality and nodule detectability // *The British journal of radiology.* 2018. Vol. 91, No. 1090. P. 20170658. doi: 10.1259/bjr.20170658.
27. Kim Y., Kim Y.K., Lee B.E., Lee S.J., Ryu Y.J., Lee J.H., Chang J.H. Ultra-low-dose CT of the thorax using iterative reconstruction: evaluation of image quality and radiation dose reduction // *American journal of roentgenology.* 2015. Vol. 204, No. 6. P. 1197–1202. doi: 10.2214/AJR.14.13629.
28. Padole A., Digumarthy S., Flores E., Madan R., Mishra S., Sharma A., Kalra M.K. Assessment of chest CT at CTDIvol less than 1 mGy with iterative reconstruction techniques // *The British journal of radiology.* 2017. Vol. 90, No. 1071. P. 20160625. doi: 10.1259/bjr.20160625.
29. Lee S.W., Kim Y., Shim S.S., Lee J.K., Lee S.J., Ryu Y.J., Chang J.H. Image quality assessment of ultra low-dose chest CT using sinogram-affirmed iterative reconstruction // *European radiology.* 2014. Vol. 24, No. 4. P. 817–826. doi: 10.1007/s00330-013-3090-9.
30. Ju Y.H., Lee G., Lee J.W., Hong S.B., Suh Y.J., Jeong Y.J. Ultra-low-dose lung screening CT with model-based iterative reconstruction: an assessment of image quality and lesion conspicuity // *Acta Radiologica.* 2018. Vol. 59, No. 5. P. 553–559. doi: 10.1177/0284185117726099.
31. Sloan C.M., Sieren J.C., Newell Jr J.D., Sieren J., Shirik M., Vidal C., Hogue S., DeStefano F., Hammond E., Hoffman E.A. Comparison Of Low And Ultra-Low Dose Computed Tomography Protocols Through Quantitative Lung Airway Assessment. In A79. LUNG IMAGING: CT AND BEYOND // *American thoracic society.* 2016. P. A2491-A2491.
32. Katsura M., Sato J., Akahane M., Mise Y., Sumida K., Abe O. Effects of pure and hybrid iterative reconstruction algorithms on high-resolution computed tomography in the evaluation of interstitial lung disease // *European journal of radiology.* 2017. Vol. 93 P. 243–251. doi: 10.1016/j.ejrad.2017.06.003.
33. Yan C., Xu J., Liang C., Wei Q., Wu Y., Xiong W., Xu Y. Radiation dose reduction by using CT with iterative model reconstruction in patients with pulmonary invasive fungal infection // *Radiology.* 2018. Vol. 288(1). P. 285–292. doi: 10.1148/radiol.2018172107.
34. Morimoto L.N., Kamaya A., Boulay-Coletta I., Fleischmann D., Molvin L., Tian L., Fisher G., Wang J., Willmann J.K. Reduced dose CT with model-based iterative reconstruction compared to standard dose CT of the chest, abdomen, and pelvis in oncology patients: intra-individual comparison study on image quality and lesion conspicuity // *Abdominal radiology.* 2017. Vol. 42, No. 9. P. 2279–2288. doi: 10.1007/s00261-017-1140-5.
35. Hu-Wang E., Schuzer J.L., Rollison S., Leifer E.S., Steveson C., Gopalakrishnan V., Yao J., Machado T., Jones A.M., Julien-Williams P., Moss J., Chen M.Y. Chest CT scan at radiation dose of a posteroanterior and lateral chest radiograph series: a proof of principle in lymphangioleiomyomatosis // *Chest.* 2019. Vol. 155, No. 3. P. 528–533. doi: 10.1016/j.chest.2018.09.007.
36. Halpern E.J., Gingold E.L., White H., Read K. Evaluation of coronary artery image quality with knowledge-based iterative model reconstruction // *Academic radiology.* 2014. Vol. 21, No. 6. P. 805–811. doi: 10.1016/j.acra.2014.02.017.
37. Oda S., Weissman G., Vembar M., Weigold W.G. Iterative model reconstruction: improved image quality of low-tube-voltage prospective ECG-gated coronary CT angiography images at 256-slice CT // *European journal of radiology.* 2014. Vol. 83, No. 8. P. 1408–1415. doi: 10.1016/j.ejrad.2014.04.027.
38. Blair K.J., Allison M.A., Morgan C., Wassel C.L., Rifkin D.E., Wright C.M., Criqui M.H., Ix J.H. Comparison of ordinal versus Agatston coronary calcification scoring for cardiovascular disease mortality in community-living individuals // *The international journal of cardiovascular imaging.* 2014. Vol. 30, No. 4. P. 813–818. doi: 10.1007/s10554-014-0392-1.
39. Oda S., Utsunomiya D., Nakaura T., Funama Y., Yuki H., Kidoh M., Hirata K., Taguchi N., Honda K., Takaoka H., Iyama Y., Katahira K., Noda K., Oshima S., Tokuyasu S., Yamashita Y. The influence of iterative reconstruction on coronary artery calcium scoring — phantom and clinical studies // *Academic radiology.* 2017. Vol. 24, No. 3. P. 295–301. doi: 10.1016/j.acra.2016.11.003.
40. Szilveszter B., Elzomor H., Károlyi M., Kolossváry M., Raaijmakers R., Benke K., Celeng C., Bartykowszki A., Bagyura Z., Lux A., Merkely B., Maurovich-Horvat P. The effect of iterative model reconstruction on coronary artery calcium quantification // *The international journal of cardiovascular imaging.* 2016. Vol. 32, No. 1. P. 153–160. doi: 10.1007/s10554-015-0740-9.
41. Htwe Y., Cham M.D., Henschke C.I., Hecht H., Shemesh J., Liang M., Tang W., Jirapatnakul A., Yip R., Yankelevitz D.F. Coronary artery calcification on low-dose computed tomography: comparison of Agatston and Ordinal Scores // *Clinical imaging.* 2017. Vol. 39, No. 5. P. 799–802. doi: 10.1016/j.clinimag.2015.04.006.
42. Oda S., Utsunomiya D., Funama Y., Katahira K., Honda K., Tokuyasu S., Vembar M., Yuki H., Noda K., Oshima S., Yamashita Y. A knowledge-based iterative model reconstruction algorithm: can super-low-dose cardiac CT be applicable in clinical settings? // *Academic radiology.* 2014. Vol. 21, No. 1. P. 104–110. doi: 10.1016/j.acra.2013.10.002.
43. Van Hamersvelt R.W., den Harder A.M., Willeminck M.J., Schilham A.M., Lammers J.W.J., Nathoe H.M., Budde R., Leiner T., de Jong P.A. Aortic valve and thoracic aortic calcification measurements: how low can we go in radiation dose? // *Journal of computer assisted tomography.* 2017. Vol. 41, No. 1. P. 148–155. doi: 10.1097/RCT.0000000000000477.
44. Suchá D., Willeminck M.J., de Jong P.A., Schilham A.M., Leiner T., Symersky P., Budde R.P. The impact of a new model-based iterative reconstruction algorithm on prosthetic heart valve related artifacts at reduced radiation dose MDCT // *The international journal of cardiovascular imaging.* 2014. Vol. 30, No. 4. P. 785–793. doi: 10.1007/s10554-014-0379-y.
45. Pontone G., Andreini D., Petulla M., Annoni A., Guaricci A. I., Innocenti E., Russo E., Guglielmo M., Mushtaq S., Baggiano A., Beltrama V., Fusini L., Sergurini C., Conte E., Fomenti A., Fassini G., Riva S., Tondo C., Agostoni P., Bartorelli A.L., Pepi M. Left atrium and pulmonary vein imaging using sub-millisievert cardiac computed tomography: Impact on radiofrequency catheter ablation cumulative radiation exposure and outcome in atrial fibrillation patients // *International journal of cardiology.* 2017. Vol. 228. P. 805–811. doi: 10.1016/j.ijcard.2016.11.203.

Поступила в редакцию/Received by the Editor: 27.07.2020 г.

#### Авторский вклад в подготовку статьи:

Вклад в концепцию и план исследования — А.Ю.Силин, А.И.Мещеряков, С.П.Морозов. Вклад в сбор данных — А.Ю.Силин, И.С.Груздев, А.И.Мещеряков. Вклад в анализ данных и выводы — А.Ю.Силин, И.С.Груздев, Г.В.Беркович, С.П.Морозов. Вклад в подготовку рукописи — А.Ю.Силин, И.С.Груздев, Г.В.Беркович.

#### Сведения об авторах:

**Силин Антон Юрьевич** — врач-рентгенолог высшей квалификационной категории, руководитель отделения лучевой диагностики ООО «Клинический госпиталь на Яузе»; 111033, Москва, ул. Волоколаевская, д. 15, к. 1; младший научный сотрудник Государственного бюджетного учреждения здравоохранения «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы»; 125368, Москва, ул. Средняя Калитниковская, д. 28, стр. 1; e-mail: silin@yamed.ru; orcid.org/0000-0003-4952-2347, SPIN-код: 4411-8745;

**Груздев Иван Сергеевич** — аспирант Федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр хирургии им. А.В.Вишневского» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 117997, Москва, ул. Большая Серпуховская, д. 27; e-mail: gruzdev\_van@mail.ru; orcid.org/0000-0003-0781-9898, SPIN-код 3350-0832;

**Беркович Глеб Владимирович** — заведующий кабинетом рентгеновской компьютерной томографии федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центра им. В.А.Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 197341, Санкт-Петербург, ул. Аккуратова, д. 2; e-mail: glebberkovich@gmail.com; orcid.org/0000-0002-7077-7320, SPIN-код 5151-5162;

**Мещеряков Андрей Иванович** — врач-рентгенолог ООО «Клинический госпиталь на Яузе»; 111033, Москва, ул. Волоколаевская, д. 15, к. 1; e-mail: aim.radiologist@gmail.com; orcid.org/0000-0002-6609-0614, SPIN-код: 6119-7999;

**Морозов Сергей Павлович** — доктор медицинских наук, профессор, директор государственного бюджетного учреждения здравоохранения «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы»; 125368, Москва, ул. Средняя Калитниковская, д. 28, стр. 1; e-mail: nrcmr@zdrav.mos.ru, orcid.org/0000-0001-6545-6170, SPIN-код 8542-1720.