

Оценка точности асинхронной компьютерной денситометрии по данным фантомного моделирования

А. В. Петряйкин^{*1}, Л. А. Низовцова¹, К. А. Сергунова¹, Е. С. Ахмаг¹,
Д. С. Семенов¹, Ф. А. Петряйкин², В. А. Гомболевский¹, А. Е. Николаев¹,
Д. С. Кошурников³, Ю. И. Титова⁴, С. П. Морозов¹, А. В. Владзимирский¹

¹ ГБУЗ «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы»

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, факультет фундаментальной медицины

³ ГБУЗ «Госпиталь для ветеранов войн № 3 Департамента здравоохранения города Москвы»

⁴ НИИТОН ФГБОУ ВО СГМУ им. В. И. Разумовского Минздрава России

Accuracy of Asynchronous Quantitative Computed Tomography by Phantom Modelling

A. V. Petraikin^{*1}, L. A. Nisovtsova¹, K. A. Sergunova¹, E. S. Akhmad¹,
D. S. Semenov¹, F. A. Petryaykin², V. A. Gombolevisky¹, A. E. Nikolaev¹,
D. S. Koshurnikov³, Yu. I. Titova⁴, S. P. Morozov¹, A. V. Vladzimirsky¹

¹ State Budget-Funded Health Care Institution of the City of Moscow «Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of Moscow Healthcare Department»

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Fundamental Medicine

³ Hospital for war Veterans № 3

⁴ Scientific and Research Institute of Traumatology, Orthopedics and Neurosurgery of Saratov State Medical University named after V. I. Razumovsky

*** Петряйкин Алексей Владимирович**, кандидат медицинских наук, доцент, старший научный сотрудник отдела разработки средств контроля и технического мониторинга ГБУЗ «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы».
Адрес: 109029, г. Москва, Средняя Калитниковская ул., д. 28, стр. 1.
Тел.: +7 (495) 276-04-36. Электронная почта: alexeypetraikin@gmail.com
ORCID.org/0000-0003-1694-4682

Petraikin Alexey Vladimirovich, Ph. D. Med., Associate Professor, Senior Researcher of Technical Monitoring and QA Development, State Budget-Funded Health Care Institution of the City of Moscow «Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of Moscow HealthCare Department».
Address: 28-1, ul. Srednyaya Kalitnikovskaya, Moscow, 109029, Russia.
Phone number: +7 (495) 276-04-36. E-mail: alexeypetraikin@gmail.com
ORCID.org/0000-0003-1694-4682

Реферат

Подтверждение точности и воспроизводимости проводимых денситометрических исследований оценки минеральной плотности кости значимо для клинической практики. В рамках внедрения на базе нескольких московских медицинских организаций технологии асинхронной количественной компьютерной томографии (ККТ) проводится оценка ее эффективности, включающей исследование точности и воспроизводимости. Для выполнения исследования использовался антропоморфический фантом РСК ФК2, разработанный авторами. В 3 медицинских организациях проводилась оценка таких показателей точности, как относительная ошибка и воспроизводимость (коэффициент вариации). Продемонстрирована высокая воспроизводимость результатов оценки минеральной плотности кости методом асинхронной ККТ (0,06–0,86 %). Показано, что моделирование подкожно-жировой клетчатки приводит к занижению результатов ККТ. При использовании оптимального фильтра реконструкции относительная погрешность определялась в диапазоне от -3,9 до 4,3 %.

Ключевые слова: количественная компьютерная томография, остеопороз, диагностика, минеральная плотность кости, фантомное моделирование, оценка точности.

Abstract

It is important to confirm the accuracy and reproducibility of densitometric studies of the assessment of mineral density, therefore, as part of the introduction of asynchronous quantitative computed tomography (QCT) on the basis of several Moscow medical organizations, it is necessary to evaluate its effectiveness, including the study of accuracy and reproducibility. To perform these works, anthropomorphic phantoms are used. In this work, the phantom developed by the authors is used. Assessment of accuracy indicators was carried out in three medical organizations, the results were calculated relative error, coefficient of variation. High reproducibility of the results of evaluation of bone mineral density by the asynchronous QCT method (0,06–0,86 %) was demonstrated. It was shown that the simulation of subcutaneous fat leads to an underestimation of the results of QCT. When using the optimal reconstruction filter, the relative error was in the range from -3,9 to 4,3 %.

Key words: Quantitative Computed Tomography, Osteoporosis, Diagnosis, Bone Mineral Density, Phantom Modeling, Accuracy Assessment.

Актуальность

Остеопороз — хроническое системное заболевание скелета, характеризующееся низкой массой кости и ухудшением ее качества, что приводит к повышенной хрупкости костной ткани [4]. Лечение остеопороза и вызванных им низкоэнергетических переломов обременено большими экономическими затратами. Так, прямые медицинские и немедицинские затраты при ведении пациентов с остеопоротическими переломами в России могут достигать 25 млрд руб. за 1 год, в то время как доля затрат на противоостеопоротическое лечение составляет лишь 7 % от указанной суммы, а основную долю занимают затраты на

госпитализацию и социальное обеспечение [3]. Своевременная диагностика остеопороза по результатам денситометрии и оценка риска переломов по шкале FRAX, своевременное назначение лечения в соответствии с клиническими рекомендациями могли бы значительно улучшить эту ситуацию [2].

В решении вопроса расширения денситометрических исследований асинхронная количественная компьютерная томография (ККТ) получает большие перспективы при внедрении оппортунистического скрининга [8], т. е. получении информации о минеральной плотности кости по результатам КТ-сканирования,

выполненного с другими целями [6]. Согласно данным единого радиологического информационного сервиса (ЕРИС) от 2018 г., в год выполняется более 61 800 КТ-исследований органов грудной клетки, брюшной полости и таза, доступных для проведения оппортунистического скрининга.

Было показано, что введение контрастного вещества несущественно изменяет измеренную проекционную минеральную плотность кости (МПК), это расширяет категорию пациентов, доступных оппортунистическому скринингу [15]. Перспективно выполнение оценки минеральной плотности и механической прочности по данным ПЭТ/КТ-исследований у пациентов с раком предстательной железы, которым проводится андроген-депривационная терапия, имеющая в качестве побочного эффекта снижение МПК [13].

Как было указано ранее, важным для врачей-клиницистов является подтверждение точности и воспроизводимости проводимых исследований оценки минеральной плотности кости как двухэнергетической рентгеновской абсорбциометрии (ДРА), так и ККТ [1, 5, 6, 14]. Для рутинной ДРА — методики с минимальной лучевой нагрузкой — показатели воспроизводимости рекомендуется определять как на фантомах, так и при оценке сканирования пациентов (30 пациентов при повторном сканировании или 15 — при трехкратном сканировании, после чего рассчитывается 95 %-ный доверительный интервал — LSC — least significant change) [16]. При выполнении ККТ повторное и тем более трехкратное исследование пациента неприемлемо ввиду высокой лучевой нагрузки, поэтому большое значение уделяется применению фантомов [4].

На базе нескольких московских медицинских организаций проводилась оценка эффективности асинхронной ККТ, включающая исследование точности и воспроизводимости результатов.

Цель: оценка показателей точности асинхронной ККТ с использованием разработанного фантома с установленными метрологическими характеристиками.

Материалы и методы

Для выполнения работ, посвященных определению точности данного направления денситометрических исследований, разработан ряд моделей фантомов, в частности, антропоморфный фантом ESP (European spine phantom) и др. [11]. Фантомы позволяют не только оценивать работы отдельных сканеров, но и изучать факторы, влияющие на точность проводимых измерений, например, при имитации ПЖК [12]. Ранее была продемонстрирована работа фантома РСК-ФК1, включающего модели объемной МПК позвоночника в широком диапазоне [6]. Модификация данного фантома позволяет проводить анализ точности денситометрических исследований как для рутинной ДРА, так и для КТ-денситометрических исследований.

Настоящее исследование выполнено с использованием разработанного фантома РСК-ФК2 (рис. 1, а), который имитирует поясничный отдел позвоночника с включением веществ со значениями минеральной концентрации в диапазоне от 50 до 200 мг/мл [6, 7]. Проводились исследования с имитированием подкожно-жировой клетчатки (ПЖК), которое осуществляется благодаря парафиновой накладке (рис. 1, б, в).

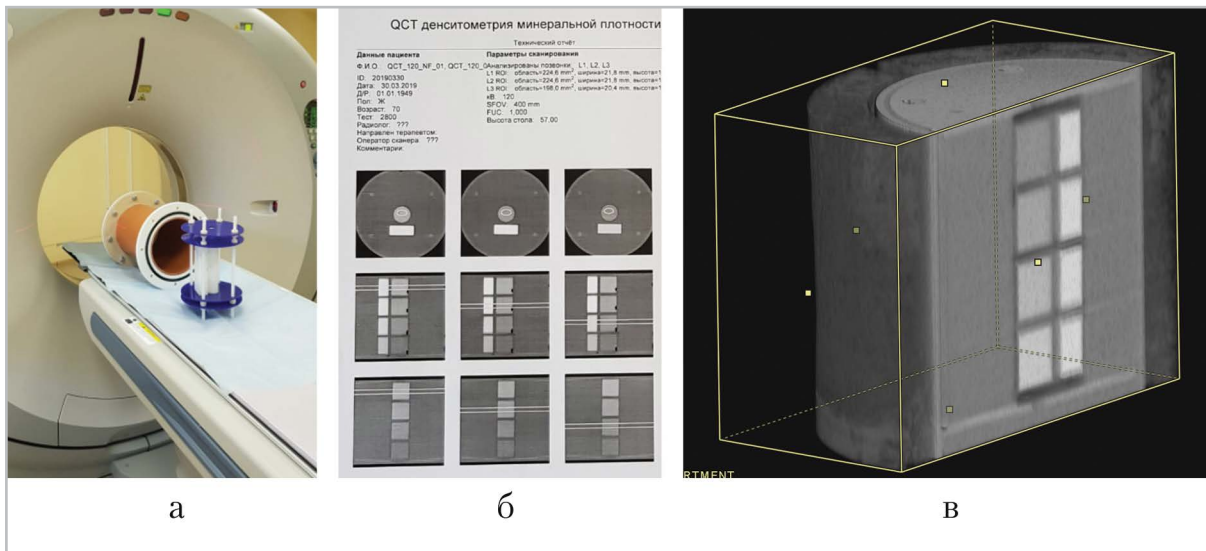


Рис. 1. Фантом РСК-ФК2 при сканировании методом асинхронной КТ-денситометрии: *а* — фантом в разобранном виде на столе сканирования в КТ; *б* — технический отчет в ходе обработки в программе QST; *в* — 3D-реконструкция фантома по данным КТ-сканирования с парафиновой накладкой, имитирующей ПЖК

Для проведения сравнительных испытаний были выбраны 3 медицинские организации, условно обозначенные как клиники А, Б, В. Для получения данных о минеральной плотности кости по данным КТ-сканирования (асинхронная ККТ) применялся программно-аппаратный комплекс QST PRO™ с асинхронным калибровочным модулем. Исследование проводилось на 64-срезовых компьютерных томографах одного производителя с параметрами сканирования, применяемыми в клинической практике, согласно рекомендациям производителя: напряжение 120 кВ, область сканирования 400 мм, толщина среза 3 мм, фильтр ядра свертки FC17 в клиниках А и В, FC08 в клинике Б.

По результатам сканирования были рассчитаны следующие показатели точности для позвонка с *i*-м значением МПК: относительная ошибка (*i*, %) и воспроизводимость — коэффициент вариации (CV_i , %), согласно методикам

[7, 9]. Для клиники Б были также оценены долговременные показатели по результатам сканирования через 70 и 160 дней наблюдения. Рассчитывался показатель LSC, который характеризует наименьшее значимое изменение МПК, определенное с 95 %-ной надежностью, который можно оценить как $1,96 \times \sqrt{2} \times CV = 2,8 \times CV$ [9].

Результаты и их обсуждение

Проанализированы показатели точности оценки МПК для интервала до 200 мг/мл, соответствующего физиологическому диапазону МПК губчатого вещества в позвонках. Результаты сканирования фантома РСК-ФК2 для клиники Б представлены на рис. 2. Визуализируется хорошее совпадение кривой с «идеальной калибровкой» для варианта сканирования с моделированием ПЖК (толстая линия), а при удалении парафиновых накладок происходит завышение результатов измерения (тонкая линия).

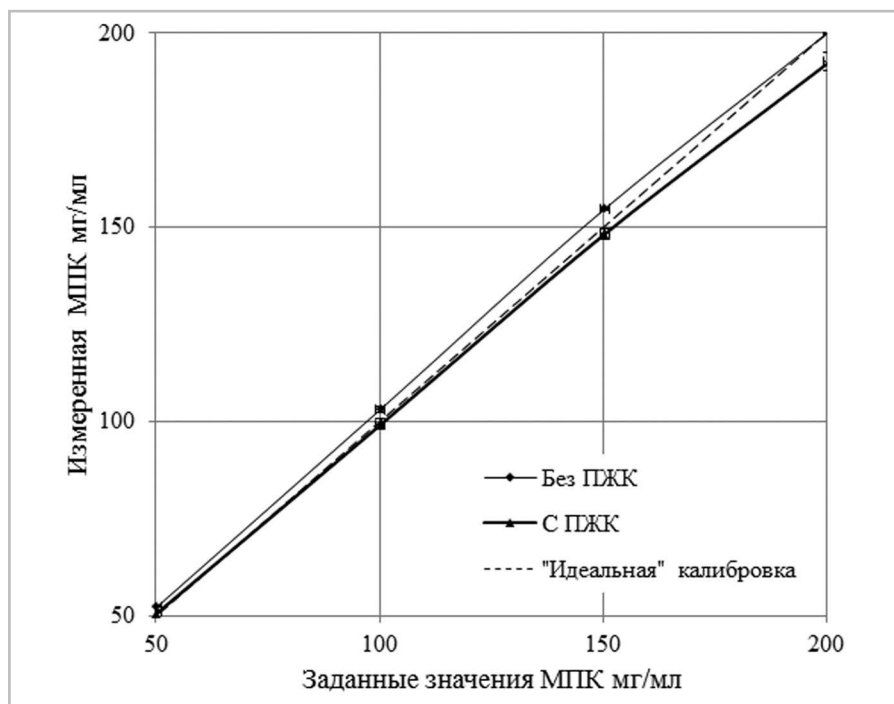


Рис. 2. Результаты определения МПК методом асинхронной ККТ с использованием фантома РСК-ФК2 в клинике Б, без ПЖК (тонкая линия) и с ПЖК (толстая линия)

Это можно объяснить тем, что при отсутствии ПЖК снижается эффект усиления жесткости луча (beam hardening), спектр излучения рентгеновской трубки смещается в более «мягкую» область, что приводит к повышению коэффициента поглощения (единицы Хаунсфилда, HU) и некоторому «завышению» измеряемой минеральной плотности. При этом происходит закономерное снижение CV, поскольку уменьшается шум на изображении, выраженный в виде среднего квадратического отклонения (СКО). Относительная ошибка и воспроизводимость представлены в табл. 1.

Результаты сравнения данных, полученных на 3 томографах, в отношении влияния моделирования ПЖК представлены на рис. 3. Данные представлены в виде разницы относительной ошибки, полученной без и с моделированием ПЖК.

Во всех случаях регистрировалось повышение МПК без имитации ПЖК в интервале от 50 = 3,57 % для клиники Б до 50 = 8,26 % для клиники В. При проведении ДРА при тех же условиях наблюдалось не завышение, а занижение МПК, при этом разброс разности относительной ошибки составляет 4,2–13,9 % [7]. Различие в поведении кривых при сравнении 3 клиник можно предварительно связать с применением различных фильтров реконструкции.

Для оценки долговременной стабильности сканирования фантома в клинике Б производились трижды в течение 6 мес, один раз в 2 мес. Результаты представлены на рис. 4. Оценен коэффициент вариации CV для 3 значений и показаны наибольшая по абсолютной величине относительная погрешность, достаточно высокая временная стабильность сканера. Коэффициент вариации

Воспроизводимость и точность измерения объемной МПК по данным асинхронной ККТ, полученных методом фантомного моделирования в клиниках А, Б, В, сканирование без/с моделированием ПЖК

Заданные значения МПК, мг/мл	Воспроизводимость CV, %			Точность, относительная погрешность, %		
	Без моделирования подкожно-жировой клетчатки					
	Клиника					
	А	Б	В	А	Б	В
50	0,59	0,16	0,28	10,77	4,51	4,94
100	0,28	0,38	0,13	5,54	3,04	1,79
150	0,18	0,17	0,06	3,21	2,94	0,61
200	0,18	0,14	0,06	0,41	-0,14	-2,09
Среднее	0,31	0,21	0,13	4,98	2,66	2,36
С моделированием подкожно-жировой клетчатки						
50	0,46	0,86	0,77	4,05	0,94	-3,33
100	0,54	0,70	0,43	0,35	-0,96	-4,61
150	0,16	0,45	0,27	-1,72	-1,32	-4,86
200	0,11	0,62	0,28	-4,49	-3,92	-7,18
Среднее	0,32	0,66	0,44	2,65	1,78	4,99

Примечание: при подсчете средних значений точности учитывался модуль величины.

и относительная погрешность сопоставимы с результатами для отдельных измерений МПК.

Воспроизводимость для денситометрических исследований является важным показателем [16]. В ходе выполненных исследований были получены данные о воспроизводимости полученных результатов для 3 сканеров (табл.). При исследовании без моделирования ПЖК воспроизводимость была наименьшей CV150,200 = 0,06 % в клинике В, а наибольшая CV50 = 0,59 % в клинике А. С имитированием ПЖК воспроизводимость несколько ухудшилась, так как увеличились все средние показатели по позвонкам. Наименьшая CV200 = 0,11 % в клинике А, а наибольшая CV50 = 0,86 % в клинике Б. Таким образом,

определенный в данной работе показатель воспроизводимости находится в интервале 0,06–0,86 % с тенденцией к увеличению при моделировании ПЖК (вероятно, за счет снижения отношения сигнал/шум и увеличения СКО).

Для позвонка со значением МПК 100 мг/мл получено среднее значение CV100 = 0,26 % по 3 сканерам при сканировании без ПЖК. Эта величина сопоставима с литературными данными для позвонка с аналогичной плотностью CV = 0,2 % [14]. Однако при моделировании ПЖК, по нашим данным, средний показатель CV100 = 0,55 %, что, как было отмечено выше, связано с уменьшением отношения сигнал/шум и более высокими значениями СКО. Вместе с тем при сканировании

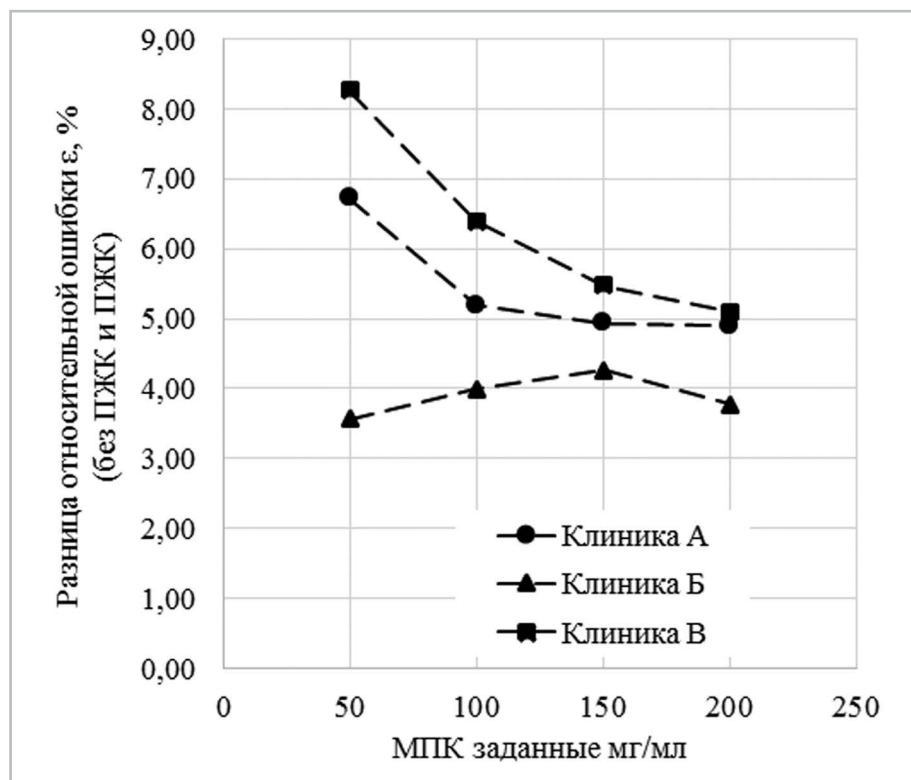


Рис. 3. Оценка влияния моделирования подкожно-жировой клетчатки на точность измерения МПК. Сравнение результатов в 3 клиниках – А, Б, В

фантома РСК-ФК2 при проведении рутинной ДРА показатель воспроизводимости значительно хуже: с моделированием ПЖК и без находится в интервале $CV = 0,51\% - 3,24\%$ [7], а при исследовании пациентов наблюдается $CV = 1,3\% - 1,7\%$ [10].

Наихудшим результатом является $CV = 0,86\%$ (см. табл.), соответствующий $LSC = 2,4\%$, что сопоставимо с результатами, опубликованными в 2007 г., где LSC для МПК определен в интервале $3,3-6,6\%$ [9]. Следует отметить, что в программе QCT PRO определена другая, более широкая (в 10 раз) полоса достоверных изменений МПК – 15 мг/мл, что соответствует значениям $LSC_{50} = 30\%$ и $LSC_{200} = 7,5\%$. Данный показатель является аналогом параметра LSC для ДРА [16]. Иначе говоря, если МПК

по данным ККТ изменилась в пределах ± 7 мг/мл, эти изменения не являются достоверными.

При оценке относительной погрешности наиболее значимые различия в сторону завышения результатов МПК (10,7%) относительно заданной величины показаны для клиники А. Наиболее близкие значения к заданным показаны для клиники Б при сканировании с моделированием ПЖК: $\varepsilon = 0,94-3,9\%$. Средняя относительная ошибка для результатов ККТ 3 клиник была 3,2% без моделирования ПЖК и 3,1% с ПЖК. Наименьшие показатели были продемонстрированы для клиники Б, где ранее выявлено наименьшее влияние добавления ПЖК на результаты измерения. Подобный диапазон значений относительной погрешности (1,4–6,7%)

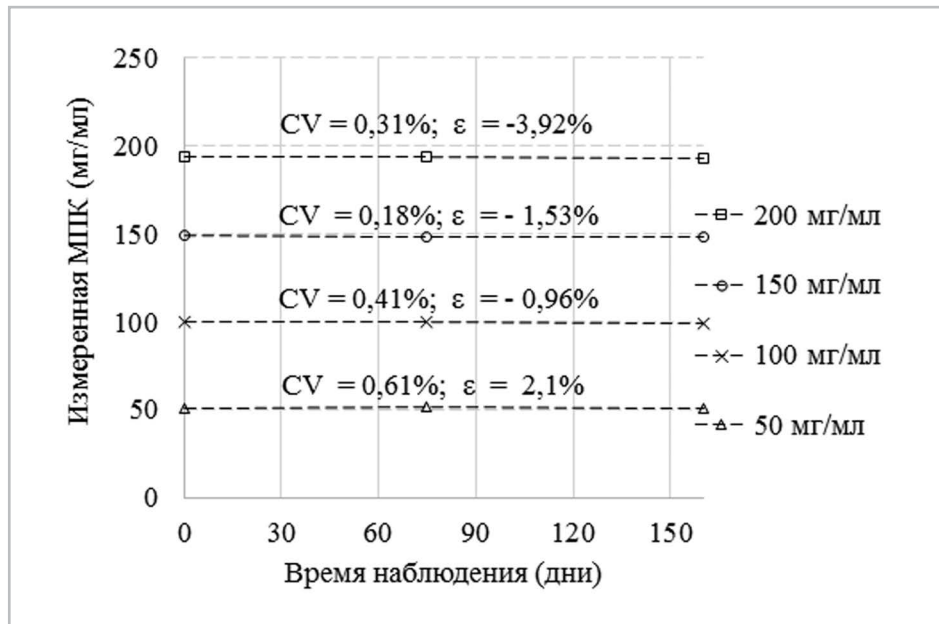


Рис. 4. Оценка долговременной стабильности измерения объемной МПК по данным асинхронной ККТ в клинике Б

был показан при выполнении асинхронной ККТ для фантома ESP [14].

Заключение

С помощью разработанного фантома РСК-ФК2 продемонстрирована высокая воспроизводимость результатов асинхронной ККТ: от 0,06 до 0,86 %. Показано, что моделирование подкожно-жировой клетчатки приводит к занижению результатов ККТ. При использовании оптимального фильтра реконструкции относительная погрешность была в диапазоне от -3,9 до 4,3 %, что соответствует данным литературы.

Список литературы

1. Аврунин А. С., Павлычев А. А., Карагодина М. П., Шубняков И. И. Хронобиологические характеристики колебаний ошибки воспроизводимости метода двухэнергетической абсорбциометрии при определении проекционной мине-

ральной плотности в зонах Груена // Медицинская визуализация. 2016. № 4. С. 100–108.

2. Дедов И.И., Мельниченко Г. А., Белая Ж. Е., Рожинская Л. Я. Министерство здравоохранения РФ. Клинические рекомендации. Остеопороз. МКБ-10: M80.0/M81.0/M82.1. Российская ассоциация Эндокринологов. 2016. 104 с.
3. Добровольская О. В., Торощова Н. В., Лесняк О. М. Экономические аспекты осложненного остеопороза: стоимость лечения в течение первого года после перелома // Современная ревматология. 2016. № 3. С. 29–34.
4. Лесняк О. М., Баранова И. А., Белова К. Ю. и др. Остеопороз в Российской Федерации: эпидемиология, медико-социальные и экономические аспекты проблемы (обзор литературы) // Травматология и ортопедия России. 2018. Т. 24. № 1. С. 155–168.
5. Новиков В. Е., Скрипникова И. А., Мурашко Л. М., Абирова Э. С. Двухэнер-

- гетическая рентгеновская абсорбциометрия в клинических исследованиях и реальной практике // Остеопороз и остеопатии. 2014. № 1. С. 39–42.
6. *Петрайкин А. В., Сергунова К. А., Петрайкин Ф. А. и др.* Рентгеновская денситометрия, вопросы стандартизации (обзор литературы и экспериментальные данные) // Радиология – практика. 2018. Т. 67. № 1. С. 50–62.
 7. *Петрайкин А. В., Смолярчук М. Я., Петрайкин Ф. А. и др.* Оценка точности денситометрических исследований. Применение фантома РСК-ФК2 // Травматология и ортопедия России. 2019. Т. 25. № 3. С. 124–134.
 8. *Brown J. K., Timm W., Bodeen G. et al.* Asynchronously calibrated quantitative bone densitometry // J. Clin. Densitom. 2017. V. 20. № 2. P. 216–225.
 9. *Engelke K., Adams J. E., Armbrecht G. et al.* Clinical use of quantitative computed tomography and peripheral quantitative computed tomography in the management of osteoporosis in adults. The 2007 ISCD official positions // J. Clin. Densitom. 2008. V. 11. № 1. P. 123–162.
 10. *Engelke K., Lang T., Khosla S. et al.* Clinical use of quantitative computed tomography (QCT) of the hip in the management of osteoporosis in adults: The 2015 ISCD official positions. Part I // J. Clin. Densitom. 2015. V. 18. № 3. P. 338–358.
 11. *Kalender W. A., Felsenberg D., Genant H. K. et al.* The European spine phantom – a tool for standardization and quality control in spinal bone mineral measurements by DXA and QCT // Eur. J. Radiol. 1995. V. 20. № 2. P. 83–92.
 12. *Laugerette A., Schwaiger B. J., Brown K. et al.* DXA-equivalent quantification of bone mineral density using dual-layer spectral CT scout scans // Eur. Radiol. 2019. № 1. P. 1–11.
 13. *Schwaiger B. J., Kopperdahl D. L., Nardo L. et al.* Vertebral and femoral bone mineral density and bone strength in prostate cancer patients assessed in phantomless PET/CT examinations // Bone. 2017. № 101. P. 62.
 14. *Wang L., Su Yu., Wang Q. et al.* Validation of asynchronous quantitative bone densitometry of the spine: Accuracy, short-term reproducibility, and a comparison with conventional quantitative computed tomography // Nature. Scientific Reports. 2017. № 7. P. 6284. DOI:10.1038/s41598-017-06608-y.
 15. *Ziemlewicz T. J., Maciejewski A., Binkley N. et al.* Direct comparison of unenhanced and contrast-enhanced CT for opportunistic proximal femur bone mineral density measurement: Implications for osteoporosis screening // Am. J. Roentgenol. 2016. V. 206. № 4. P. 694–698.
 16. Precision Assessment & Calculator FAQs – International Society for Clinical Densitometry (ISCD). URL: <https://www.iscd.org/resources/faqs/precision-assessment/>.

References

1. *Avrunin A. S., Pavlychev A. A., Karagodina M. P., Shoubniakov I. I.* Chronobiological characteristics of the projection-mineral density repeatability error oscillations determined by DEXA method in Gruen regions. Medical Visualization 2016. No. 4. P. 100-108 (in Russian).
2. *Dedov I. I., Melnichenko G. A., Belaya Zh. E., Rozhinskaya L. Ya.* Ministry of Health of the Russian Federation. Clinical recommendations Osteoporosis. ICD 10: M80.0 / M81.0 / M82.1. Russian Association of Endocrinologists. 2016. 104 p. (in Russian).
3. *Dobrovolskaya O. V., Toroptsova N. V., Lesnyak O. M.* Economic aspects of com-

- plicated osteoporosis: The cost of treatment in the first year after fracture. *Modern Rheumatology Journal*. 2016. V. 10. No. 3. P. 29–34 (in Russian).
4. *Lesnyak O. M., Baranova I. A., Belova K. et al.* Osteoporosis in Russian Federation: epidemiology, socio-medical and economical aspects (review). *Traumatology and Orthopaedics of Russia*. 2018. V. 24. No. 1. P. 155–168 (in Russian).
 5. *Novikov V. E., Skripnikova I. A., Murashko L. M., Abirova Je. S.* Dual energy x-ray absorptiometry in clinical studies and practice. *Osteoporosis and Osteopathy*. 2014. No. 1. P. 39–42 (in Russian).
 6. *Petraikin A. V., Sergunova K. A., Petryaykin F. A. et al.* X-ray Densitometry, Standardization – Literature Review and Experimental Data. *Radiology – practice*. 2018. V. 67. No. 1. P. 50–62 (in Russian).
 7. *Petraikin A. V., Smolyarchuk M. J., Petryaykin F. A. et al.* Assessment of the densitometric study accuracy. Application of RSK PK2 phantom. *Traumatology and orthopaedics of Russia*. 2019. V. 25. No. 3. P. 124–134 (in Russian).
 8. *Brown J. K., Timm W., Bodeen G. et al.* Asynchronously calibrated quantitative bone densitometry. *J. Clin. Densitom.* 2017. V. 20. No. 2. P. 216–225.
 9. *Engelke K., Adams J. E., Armbrecht G. et al.* Clinical use of quantitative computed tomography and peripheral quantitative computed tomography in the management of osteoporosis in adults. The 2007 ISCD Official Positions. *J. Clin. Densitom.* 2008. V. 11. No. 1. P. 123–162.
 10. *Engelke K., Lang T., Khosla S. et al.* Clinical use of quantitative computed tomography (QCT) of the hip in the management of osteoporosis in adults. The 2015 ISCD Official Positions-Part I. *J. Clin. Densitom.* 2015. V. 18. No. 3. P. 338–358.
 11. *Kalender W. A., Felsenberg D., Genant H. K. et al.* The European Spine Phantom – a tool for standardization and quality control in spinal bone mineral measurements by DXA and QCT. *Eur. J. Radiol.* 1995. V. 20. No. 2. P. 83–92.
 12. *Laugerette A., Schwaiger B.J., Brown K. et al.* DXA-equivalent quantification of bone mineral density using dual-layer spectral CT scout scans. *Eur. Radiol.* 2019. No. 1. P. 1–11.
 13. *Schwaiger B.J., Kopperdahl D. L., Nardo L. et al.* Vertebral and femoral bone mineral density and bone strength in prostate cancer patients assessed in phantomless PET/CT examinations. *Bone*. 2017. No. 101. P. 62.
 14. *Wang L., Su Y., Wang Q. et al.* Validation of asynchronous quantitative bone densitometry of the spine: Accuracy, short-term reproducibility, and a comparison with conventional quantitative computed tomography. *Nature. Scientific Reports*. 2017. No. 7. P. 6284. DOI: 10.1038/s41598-017-06608-y.
 15. *Ziemlewicz T. J., Maciejewski A., Binkley N. et al.* Direct comparison of unenhanced and contrast-enhanced CT for opportunistic proximal femur bone mineral density measurement: Implications for osteoporosis screening. *Am. J. Roentgenol.* 2016. V. 206. No. 4. P. 694–698.
 16. Precision Assessment & Calculator FAQs – International Society for Clinical Densitometry (ISCD). URL: <https://www.iscd.org/resources/faqs/precision-assessment/>.

Сведения об авторах

Петрайкин Алексей Владимирович, кандидат медицинских наук, доцент, старший научный сотрудник отдела разработки средств контроля и технического мониторинга ГБУЗ «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы». Адрес: 109029, г. Москва, Средняя Калитниковская ул., д. 28, стр. 1. Тел.: +7 (495) 276-04-36. Электронная почта: alexeypetraikin@gmail.com ORCID.org/0000-0003-1694-4682

Petraikin Alexey Vladimirovich, Ph. D. Med., Associate Professor, Senior Researcher of Technical Monitoring and QA Development, State Budget-Funded Health Care Institution of the City of Moscow «Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of Moscow Healthcare Department». Address: 28-1, ul. Srednyaya Kalitnikovskaya, Moscow, 109029, Russia. Phone number: +7 (495) 276-04-36. E-mail: alexeypetraikin@gmail.com ORCID.org/0000-0003-1694-4682

Низовцова Людмила Арсеньевна, доктор медицинских наук, профессор, главный научный сотрудник ГБУЗ «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы». Адрес: 109029, г. Москва, Средняя Калитниковская ул., д. 28, стр. 1. Тел.: +7 (495) 670-74-80. Электронная почта: nizovzova@npcmr.ru ORCID.org/0000-0002-9614-4505

Nizovtseva Lyudmila Arsenyevna, M. D. Med., Professor, Chief Researcher, State Budget-Funded Health Care Institution of the City of Moscow «Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of Moscow Health Care Department». Address: 28-1, ul. Srednyaya Kalitnikovskaya, Moscow, 109029, Russia. Phone number: +7 (495) 670-74-80. E-mail: nizovzova@npcmr.ru ORCID.org/0000-0002-9614-4505

Сергунова Кристина Анатольевна, кандидат технических наук, руководитель отдела разработки средств контроля и технического мониторинга ГБУЗ «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы». Адрес: 109029, г. Москва, Средняя Калитниковская ул., д. 28, стр. 1. Тел.: +7 (905) 570-15-28. Электронная почта: sergunova@rpcmr.org.ru ORCID.org/0000-0002-9596-7278

Sergunova Kristina Anatol'evna, Ph. D. Med., Head of Technical Monitoring and QA Development Department, State Budget-Funded Health Care Institution of the City of Moscow «Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of Moscow Healthcare Department». Address: 28-1, ul. Srednyaya Kalitnikovskaya, Moscow, 109029, Russia. Phone number: +7 (905) 570-15-28. E-mail: sergunova@rpcmr.org.ru ORCID.org/0000-0002-9596-7278

Петрайкин Федор Алексеевич, ординатор факультета фундаментальной медицины Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Адрес: 119192, г. Москва, Ломоносовский пр., д. 27, корп. 1. Тел.: +7 (909) 934-32-66. Электронная почта: feda.petraykin@gmail.com ORCID.org/0000-0001-6923-3839

Petryaykin Fedor Alekseevich, Radiology Resident, Faculty of Fundamental Medicine, Lomonosov Moscow State University. Address: 27-1, Lomonosovsky prospekt, 119192, Moscow, Russia. Phone number: +7 (909) 934-32-66. E-mail: feda.petraykin@gmail.com ORCID.org/0000-0001-6923-3839

Ахмад Екатерина Сергеевна, научный сотрудник отдела разработки средств контроля и технического мониторинга ГБУЗ «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы». Адрес: 109029, г. Москва, Средняя Калитниковская ул., д. 28, стр. 1. Тел.: +7 (495) 276-04-36. Электронная почта: e.ahmad@npcmr.ru ORCID.org/0000-0002-8235-9361

Ahmad Ekaterina Sergeevna, Scientist Researcher of Technical Monitoring and QA Development, State Budget-Funded Health Care Institution of the City of Moscow «Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of Moscow Healthcare Department». Address: 28-1, ul. Srednyaya Kalitnikovskaya, Moscow, 109029, Russia. Phone number: +7 (495) 276-04-36. E-mail: e.ahmad@npcmr.ru ORCID.org/0000-0002-8235-9361

Семенов Дмитрий Сергеевич, научный сотрудник отдела разработки средств контроля и технического мониторинга ГБУЗ «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы». Адрес: 109029, г. Москва, Средняя Калитниковская ул., д. 28, стр. 1. Тел.: +7 (495) 276-04-36. Электронная почта: d.semenov@npcmr.ru ORCID.org/0000-0002-4293-2514

Semenov Dmitry Sergeevich, Scientist Researcher of Technical Monitoring and QA Development Department, State Budget-Funded Health Care Institution of the City of Moscow «Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of Moscow Healthcare Department». Address: 28-1, ul. Srednyaya Kalitnikovskaya, Moscow, 109029, Russia. Phone number: +7 (495) 276-04-36. E-mail: d.semenov@npcmr.ru ORCID.org/0000-0002-4293-2514

Гомболевский Виктор Александрович, кандидат медицинских наук, руководитель отдела развития качества радиологии, ГБУЗ «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы».

Адрес: 109029, г. Москва, Средняя Калитниковская ул., д. 28, стр. 1.
Тел.: +7 (495) 276-04-36. Электронная почта: gombolevskiy@npcmr.ru
ORCID.org/0000-0003-1816-1315

Gombolevsky Viktor Aleksandrovich, M. D. Med., Ph. D. Med., Head of Department for Radiology Quality Enhancement, State Budget-Funded Health Care Institution of the City of Moscow «Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of Moscow Healthcare Department».

Address: 28-1, ul. Srednyaya Kalitnikovskaya, Moscow, 109029, Russia.
Phone number: +7 (495) 276-04-36. E-mail: gombolevskiy@npcmr.ru
ORCID.org/0000-0003-1816-1315

Николаев Александр Евгеньевич, младший научный сотрудник отдела развития качества радиологии, ГБУЗ «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы».

Адрес: 109029, г. Москва, Средняя Калитниковская ул., д. 28, стр. 1.
Тел.: +7 (495) 276-04-36. Электронная почта: a.e.nikolaev@yandex.ru
ORCID.org/0000-0001-5151-4579

Nikolaev Aleksandr Evgenievich, Junior Researcher of Department for Radiology Quality Enhancement, State Budget-Funded Health Care Institution of the City of Moscow «Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of Moscow Health Care Department».

Address: 28-1, ul. Srednyaya Kalitnikovskaya, Moscow, 109029, Russia.
Phone number: +7 (495) 276-04-36. E-mail: a.e.nikolaev@yandex.ru
ORCID.org/0000-0001-5151-4579

Кошурников Дмитрий Сергеевич, кандидат медицинских наук, заведующий отделением лучевой диагностики ГБУЗ «Госпиталь для ветеранов войн № 3 Департамента здравоохранения города Москвы».

Адрес: 129336, г. Москва, Стартовая ул., д. 4.
Тел.: +7 (499) 760-49-96. Электронная почта: koshurdmtr@rambler.ru
ORCID.org/0000-0002-7024-9560

Koshurnikov Dmitry Sergeevich, M. D. Med., Ph. D. Med., Head of Radiology Department, Hospital for war veterans № 3.

Address: 4, Startovaya str., Moscow, 129336, Russia.
Phone number: +7 (499) 760-49-96. E-mail: koshurdmtr@rambler.ru
ORCID.org/0000-0002-7024-9560

Титова Юлия Ивановна, врач-рентгенолог отделения лучевой диагностики НИИТОН ФГБОУ ВО СГМУ им. В.И. Разумовского Минздрава России.

Адрес: 410012, г. Саратов, Чернышевского ул., д. 148.
Тел.: +7 (845) 239-30-51. Электронная почта: titovajulia@yandex.ru
ORCID.org/0000-0001-5738-9780

Titova Yulia Ivanovna, Radiologist of Radiology Department, Scientific and Research Institute of Traumatology, Orthopedics and Neurosurgery of Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky.

Address: 148, Chernyshevsky str., Saratov, 410012, Russia.
Phone number: +7 (845) 239-30-51. E-mail: titovajulia@yandex.ru
ORCID.org/0000-0001-5738-9780

Владзимирский Антон Вячеславович, доктор медицинских наук, заместитель директора по научной работе ГБУЗ «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы».

Адрес: 109029, г. Москва, Средняя Калитниковская ул., д. 28, стр. 1.
Тел.: +7 (495) 276-04-36. Электронная почта: a.vladzimirsky@npcmr.ru
ORCID.org/0000-0002-2990-7736

Vladzimirsky Anton Vyacheslavovich, M. D. Med., Deputy Director for Science, State Budget-Funded Health Care Institution of the City of Moscow «Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of Moscow Healthcare Department».

Address: 28-1, ul. Srednyaya Kalitnikovskaya, Moscow, 109029, Russia.
Phone number: +7 (495) 276-04-36. E-mail: a.vladzimirsky@npcmr.ru
ORCID.org/0000-0002-2990-7736

Морозов Сергей Павлович, доктор медицинских наук, профессор, директор ГБУЗ «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы».

Адрес: 109029, г. Москва, Средняя Калитниковская ул., д. 28, стр. 1.
Тел.: +7 (495) 276-04-36. Электронная почта: npcmr@zdrav.mos.ru
ORCID.org/0000-0001-6545-6170

Morozov Sergey Pavlovich, M. D. Med., Professor, Director, State Budget-Funded Health Care Institution of the City of Moscow «Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of Moscow Healthcare Department».

Address: 28-1, ul. Srednyaya Kalitnikovskaya, Moscow, 109029, Russia.
Phone number: +7 (495) 276-04-36. E-mail: npcmr@zdrav.mos.ru
ORCID.org/0000-0001-6545-6170

Финансирование исследования и конфликт интересов.

Исследование не финансировалось какими-либо источниками. Авторы заявляют, что данная работа, ее тема, предмет и содержание не затрагивают конкурирующих интересов.