

ISSN 1607-0763 (Print); ISSN 2408-9516 (Online)  
<https://doi.org/10.24835/1607-0763-1257>

## Применение алгоритма искусственного интеллекта для оценки минеральной плотности тел позвонков по данным компьютерной томографии

© Артюкова З.Р.<sup>1</sup>, Кудрявцев Н.Д.<sup>1</sup>, Петряйкин А.В.<sup>1\*</sup>, Абуладзе Л.Р.<sup>1</sup>,  
Сморчкова А.К.<sup>1</sup>, Ахмад Е.С.<sup>1</sup>, Семенов Д.С.<sup>1</sup>, Беляев М.Г.<sup>2</sup>, Белая Ж.Е.<sup>3</sup>,  
Владимирский А.В.<sup>1,4</sup>, Васильев Ю.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ГБУЗ “Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы”; 127051 Москва, ул. Петровка, д. 24, стр. 1, Российская Федерация

<sup>2</sup> ООО “АЙРА Лабс”, 121205 Москва, территория Инновационного центра Сколково, Большой бульвар, д. 30, стр. 1, Российская Федерация

<sup>3</sup> ФГБУ “НМИЦ эндокринологии” Минздрава России; 117292 Москва, ул. Дмитрия Ульянова, д. 11, Российская Федерация

<sup>4</sup> ФГАОУ ВО “Первый МГМУ имени И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет)”; 119991 Москва, ул. Трубецкая, д. 8, стр. 2, Российская Федерация

**Цель исследования:** разработать методику автоматизированной оценки объемной минеральной плотности кости (МПК) тел позвонков с помощью алгоритма искусственного интеллекта (ИИ) и метода фантомного моделирования.

**Материал и методы.** Для оценки эффективности алгоритма ИИ, проводящего измерение МПК тел позвонков по данным КТ органов грудной клетки (ОГК), подготовлен набор данных: 100 пациентов старше 50 лет и отношением с/без компрессионных переломов (КП) 48/52. Из них у 83 алгоритмом ИИ и экспертами была измерена рентгеновская плотность (РП) тел позвонков на уровне  $Th_{x1}-L_{III}$  (205 позвонков). Для перевода РП (НУ) в МПК применялась разработанная ранее методика ККТ ФК (Количественная компьютерная томография фантом калиевый) с построением калибровочных прямых для 7 64-срезовых КТ-сканеров. После проведения калибровки были выполнены и обработаны алгоритмом ИИ компьютерные томограммы ОГК 1853 пациентов, соотношение мужчин и женщин составило 718/1135.

**Результаты.** В ходе оценки эффективности алгоритма ИИ получено хорошее соответствие при сравнении измерений МПК по данным экспертов и алгоритма ИИ. Коэффициент детерминации составил  $R^2=0,945$  для отдельных позвонков ( $Th_{x1}-L_{III}$ ) и  $0,943$  для пациентов ( $p=0,000$ ). При разделении пациентов из тестовой выборки на группы с/без КП по данным РП были получены сходные показатели ROC AUC для экспертной разметки  $0,880$  и по данным алгоритма ИИ  $0,875$ . При калибровке КТ-сканеров с помощью фантома, содержащего образцы МПК на основе гидрофосфата калия, получена усредненная формула зависимости  $МПК = 0,77 \cdot НУ - 1,343$ . С учетом критериев American College Radiology для остеопороза граничное значение  $МПК < 80$  мг/мл составило  $105,6$  НУ, для остеопении  $МПК < 120$  мг/мл –  $157,6$  НУ. При оппортунистическом определении МПК у пациентов старше 50 лет по данным алгоритма ИИ было установлено, что остеопороз выявлен у  $31,72\%$  женщин и  $18,66\%$  мужчин.

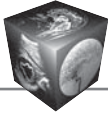
**Заключение.** Продемонстрирована хорошая сопоставимость результатов определения РП тел позвонков по данным морфометрического алгоритма ИИ и при экспертной разметке. Предложена методика и продемонстрирована эффективность оппортунистического определения МПК тел позвонков по данным КТ с помощью алгоритма ИИ и использования фантомного моделирования.

**Ключевые слова:** минеральная плотность кости, искусственный интеллект, количественная компьютерная томография, остеопороз, КТ-денситометрия

**Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.**

**Для цитирования:** Артюкова З.Р., Кудрявцев Н.Д., Петряйкин А.В., Абуладзе Л.Р., Сморгчкова А.К., Ахмад Е.С., Семенов Д.С., Беляев М.Г., Белая Ж.Е., Владимирский А.В., Васильев Ю.А. Применение алгоритма искусственного интеллекта для оценки минеральной плотности тел позвонков по данным компьютерной томографии. *Медицинская визуализация*. 2023; 27 (2): 125–137. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1257>

Поступила в редакцию: 21.09.2022. Принята к печати: 22.12.2022. Опубликовано online: 15.05.2023.



# Using an artificial intelligence algorithm to assess the bone mineral density of the vertebral bodies based on computed tomography data

© Zlata R. Artyukova<sup>1</sup>, Nikita D. Kudryavtsev<sup>1</sup>, Alexey V. Petraikin<sup>1\*</sup>, Liya R. Abuladze<sup>1</sup>, Anastasia K. Smorchkova<sup>1</sup>, Ekaterina S. Akhmad<sup>1</sup>, Dmitry S. Semenov<sup>1</sup>, Mikhail G. Belyaev<sup>2</sup>, Zhanna E. Belaya<sup>3</sup>, Anton V. Vladzimirskyy<sup>1, 4</sup>, Yuri A. Vasiliev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of Moscow Health Care Department; 24, Petrovka str., Moscow 127051, Russian Federation

<sup>2</sup> IRA Labs, Inc., Skolkovo Institute of Science and Technology (Skoltech); 30-1, Bolshoy Boulevard, Moscow 121205, Russian Federation

<sup>3</sup> National Medical Research Center of Endocrinology of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation; 11b, Dmitry Ulyanov str., Moscow 117292, Russian Federation

<sup>4</sup> I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University); 8, bld. 2, Trubetskaya str., Moscow 119991, Russian Federation

**Goal:** To develop a method for automated assessment of the volumetric bone mineral density (BMD) of the vertebral bodies using an artificial intelligence (AI) algorithm and a phantom modeling method.

**Materials and methods.** Evaluation of the effectiveness of the AI algorithm designed to assess BMD of the vertebral bodies based on chest CT data. The test data set contains 100 patients aged over 50 y.o.; the ratio between the subjects with/without compression fractures (Cfr) is 48/52. The X-ray density (XRD) of vertebral bodies at T<sub>11</sub>–L<sub>3</sub> was measured by experts and the AI algorithm for 83 patients (205 vertebrae). We used a recently developed QCT PK (Quantitative Computed Tomography Phantom Kalium) method to convert XRD into BMD followed by building calibration lines for seven 64-slice CT scanners. Images were taken from 1853 patients and then processed by the AI algorithm after the calibration. The male to female ratio was 718/1135.

**Results.** The experts and the AI algorithm reached a strong agreement when comparing the measurements of the XRD. The coefficient of determination was  $R^2 = 0.945$  for individual vertebrae (T<sub>11</sub>–L<sub>3</sub>) and 0.943 for patients ( $p = 0.000$ ). Once the subjects from the test sample had been separated into groups with/without Cfr, the XRD data yielded similar ROC AUC values for both the experts – 0.880, and the AI algorithm – 0.875. When calibrating CT scanners using a phantom containing BMD samples made of potassium hydrogen phosphate, the following averaged dependence formula  $BMD = 0.77 \cdot HU - 1.343$  was obtained. Taking into account the American College Radiology criteria for osteoporosis, the cut-off value of BMD < 80 mg/ml was 105.6HU; for osteopenia BMD < 120 mg/ml was 157.6HU. During the opportunistic assessment of BMD in patients aged above 50 years using the AI algorithm, osteoporosis was detected in 31.72% of female and 18.66% of male subjects.

**Conclusions.** This paper demonstrates good comparability for the measurements of the vertebral bodies' XRD performed by the AI morphometric algorithm and the experts. We presented a method and demonstrated great effectiveness of opportunistic assessment of vertebral bodies' BMD based on computed tomography data using the AI algorithm and the phantom modeling.

**Keywords:** bone mineral density, artificial intelligence, quantitative computed tomography, osteoporosis, CT densitometry

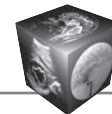
**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest. The study had no sponsorship.

**For citation:** Artyukova Z.R., Kudryavtsev N.D., Petraikin A.V., Abuladze L.R., Smorchkova A.K., Akhmad E.S., Semenov D.S., Belyaev M.G., Belaya Zh.E., Vladzimirskyy A.V., Vasiliev Yu.A. Using an artificial intelligence algorithm to assess the bone mineral density of the vertebral bodies based on computed tomography data. *Medical Visualization*. 2023; 27 (2): 125–137. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1257>

**Received:** 21.09.2022.

**Accepted for publication:** 22.12.2022.

**Published online:** 15.05.2023.



## Введение

Проявлением остеопороза (ОП), как метаболического заболевания, является нарушение прочности костной ткани и, как следствие, возникновение патологических переломов, в том числе компрессионных переломов (КП) тел позвонков. В качестве количественного параметра, применяемого для оценки механической прочности кости, рассматривается минеральная плотность кости (МПК) [1]. Асинхронная количественная компьютерная томография (ККТ) является передовым методом определения МПК, ее преимущество – определение МПК без сканирования калибровочного фантома с пациентом (фантом сканируется отдельно (асинхронно) один раз в месяц) [2–4]. Возможности метода – определение МПК в метаболически активном трабекулярном слое тела позвонков, что делает возможным диагностику ОП, оценку возрастных изменений МПК, терапевтической эффективности противоостеопоротических препаратов [3, 4]. Немаловажное преимущество – возможность оппортунистических исследований (по данным КТ-исследований, выполненных с другими целями). Несмотря на очевидные плюсы данной методики, имеются ограничения, связанные с необходимостью проводить регулярные калибровки томографа, необходимость приобретения специального программного обеспечения для анализа результата и формирования заключения, а также дополнительные временные затраты [2–4]. Привлекательно определение МПК тел позвонков с помощью автоматизированных алгоритмов искусственного интеллекта (ИИ). Разработаны модели для изолированного определения НУ с диагностикой ОП по определенным граничным значениям, так и алгоритмы, определяющие МПК после асинхронной калибровки [5–11].

Следует отметить, что разработаны алгоритмы ИИ, изолированно определяющие КП по данным КТ-сканирования с целью оппортунистического скрининга ОП [12–14]. Однако обоснованность определения МПК с целью оппортунистического скрининга ОП по данным КТ обусловлена большим количеством состояний сниженной МПК (28,99% женщин и 13,53% мужчин старше 50 лет) по сравнению с встречаемостью КП для данной возрастной группы (7% для мужчин и женщин) [15, 16].

Таким образом, организация оппортунистического скрининга ОП с использованием алгоритмов ИИ, которые выполняют автоматический анализ КТ-изображений на наличие КП и измеряют МПК тел позвонков, является перспективным направлением. При этом для измерения МПК необходимо выполнять периодическую калибровку КТ-сканеров. Для данных целей используются фанто-

мы, содержащие образцы с минеральной плотностью [2]. В данном исследовании применялся разработанный ранее фантом на основе образцов, содержащих гидрофосфат калия [17].

**Цель исследования:** разработать методику автоматизированной оценки объемной МПК тел позвонков с помощью алгоритма ИИ и метода фантомного моделирования.

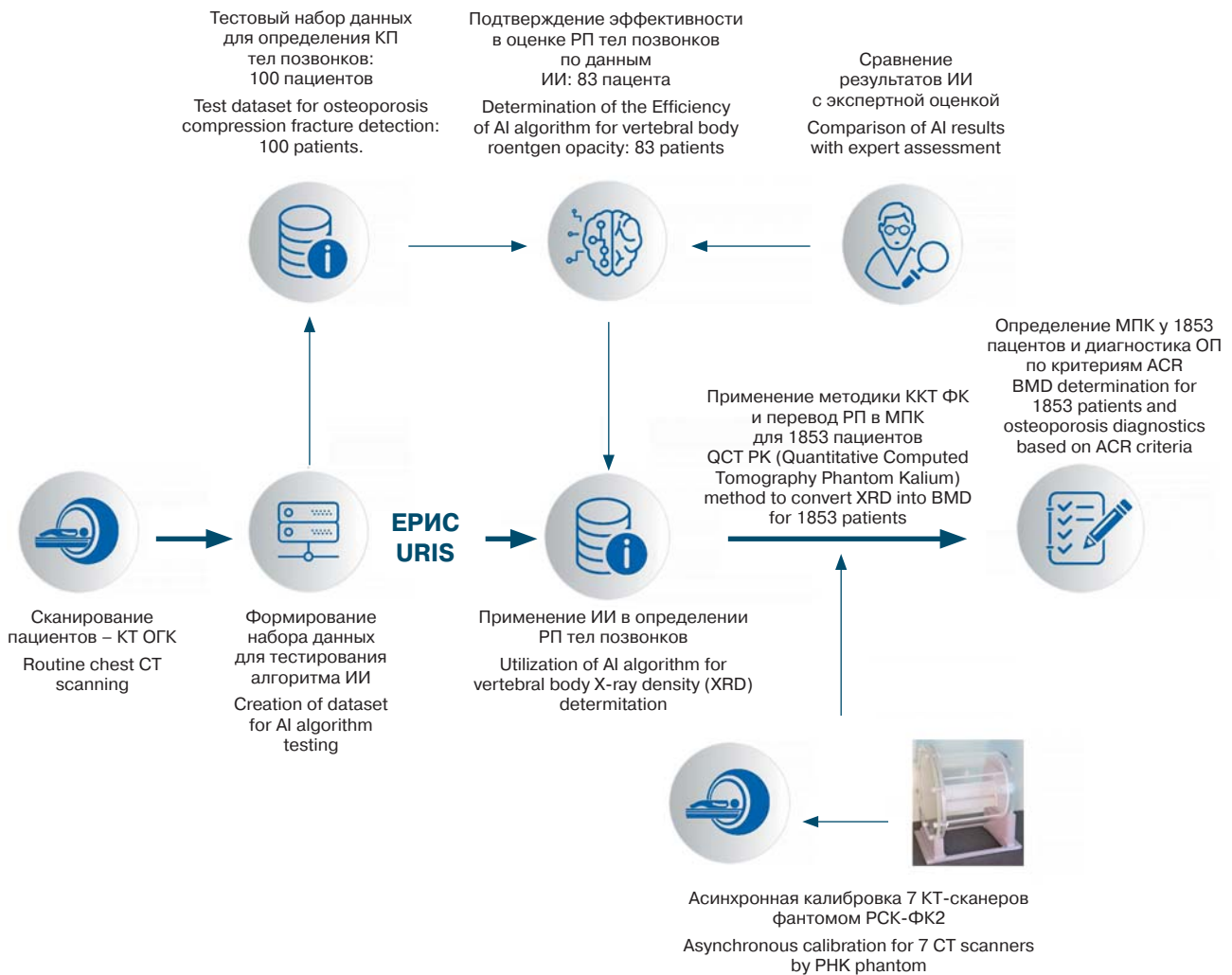
## Материал и методы

### 1. Общее описание исследования

С 2020 г. проводится “эксперимент по использованию инновационных технологий в области компьютерного зрения для анализа медицинских изображений и дальнейшего применения в системе здравоохранения города Москвы” ([URL://mosmed.ai](http://mosmed.ai)). За 2 года в эксперименте приняли участие 52 сервиса от 17 компаний, которыми были проанализировано 6,4 млн исследований. В рамках данного эксперимента в 2021 г. введено направление “Остеопороз” [18]. Для оценки эффективности алгоритмов ИИ, а также для допуска их к участию в данном эксперименте с целью обработки клинических КТ-изображений была разработана методология тестирования сервисов ИИ по данному направлению [19]. Клинической задачей являлось определение наличия, локализации тел позвонков с деформацией более 25%, а также их дифференцировка по степени выраженности деформации согласно классификации, предложенной Н.К. Genant [1, 20]. Дополнительно выявляется снижение МПК тел позвонков ( $Th_{XI}-L_{III}$ ) и диагностика ОП в соответствии с критериями International Society for Clinical Densitometry (ISCD 2020) и American College of Radiology 2018 revision (ACR 2018) и [4, 21].

Сформирован и представлен дизайн исследования (рис. 1). Высокая эффективность алгоритма ИИ для определения рентгеновской плотности (РП) тел позвонков была подтверждена для 83 пациентов из набора данных (100 пациентов), подготовленного для определения точности автоматического определения КП.

Количественные измерения МПК по КТ-изображениям требуют выполнения асинхронной калибровки. Для этого использовалась методология на основе применения фантома РСК-ФК2 (Разработка средств контроля – фантом калиевый) [22]. После калибровки 7 сканеров расчет МПК выполнялся по данным автоматического измерения НУ алгоритмом ИИ, а диагностика ОП выполнялась по критериям ACR (МПК тел позвонков менее 80 мг/мл). Были проанализированы результаты 1 мес работы алгоритма ИИ в режиме оппортунистического скрининга по данным КТ органов грудной клетки (ОГК).



**Рис. 1.** Дизайн исследования. ЕРИС – Единый радиологический информационный сервис; ИИ – искусственный интеллект; ККТ ФК – количественная компьютерная томография фантом калиевый; КП – компрессионные переломы; КТ ОГК – компьютерная томография органов грудной клетки; МПК – минеральная плотность кости; ОП – остеопороз; РП – рентгеновская плотность; РСК-ФК2 – разработка средств контроля – фантом калиевый; АСР – American College of Radiology.

**Fig. 1.** Study design. URIS – Unified Radiological Information Service; ACR – American College of Radiology; AI – artificial intelligence; BMD – bone mineral density; Cfr – compression fractures; Chest CT – computed tomography of the chest; OP – osteoporosis; PHK – Phantom Kalium; QCT PK – Quantitative Computed Tomography Phantom Kalium; XRD – X-ray density.

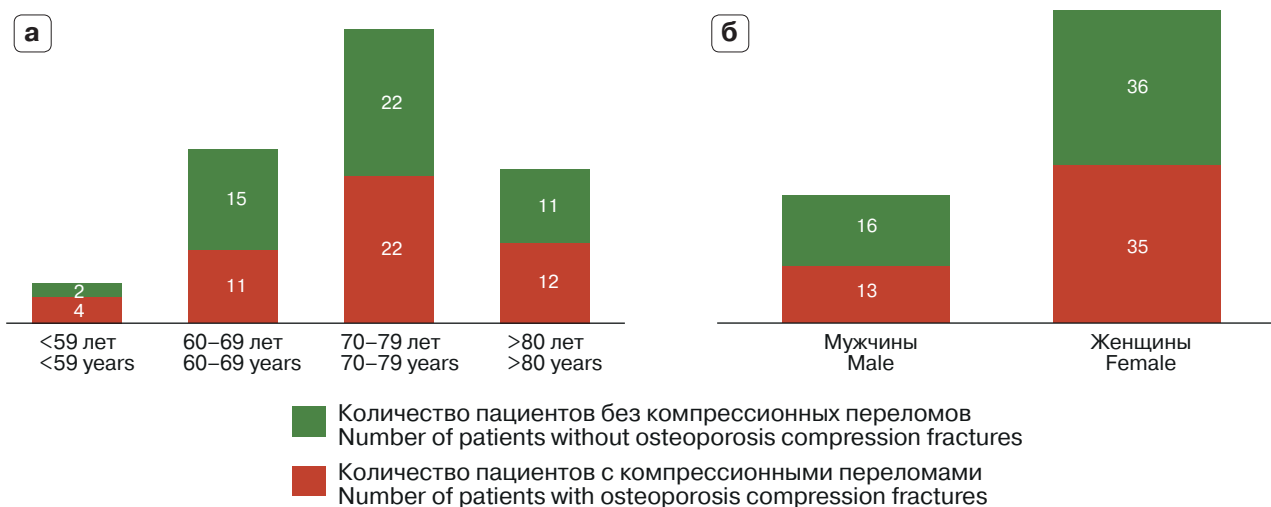
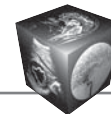
## 2. Формирование наборов данных для тестирования алгоритма ИИ

Используя данные из Единого радиологического информационного сервиса (ЕРИС), группой экспертов были отобраны и анонимизированы исследования компьютерных томограмм ОГК для формирования тестового набора данных. Экспертная группа состояла из 4 врачей-рентгенологов, валидация проводилась 2 экспертами с опытом работы более 10 лет [23].

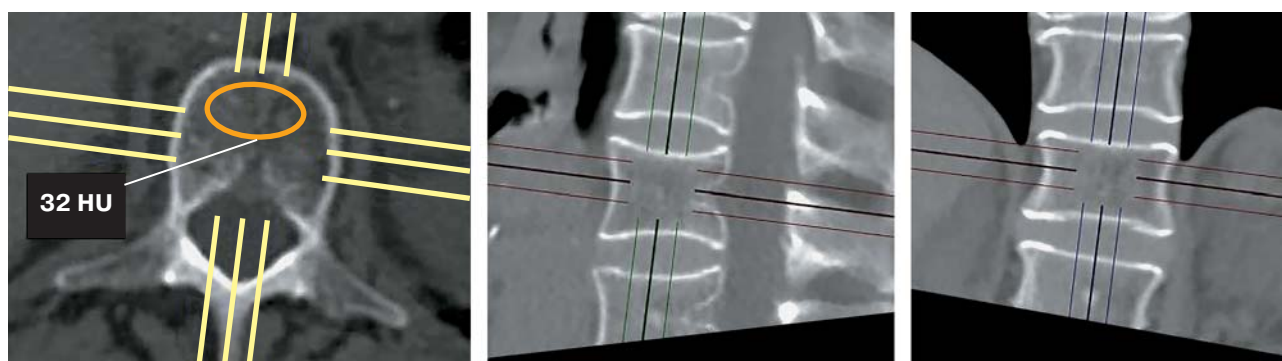
Критерием включения являлось: пациенты старше 50 лет, мужчины и женщины, у которых бы-

ла выполнена КТ ОГК с толщиной среза не менее 2 мм, фильтром реконструкции для мягких тканей. Экспертами определялось наличие или отсутствие КП с деформацией тел позвонков более 25%, а также проводилась оценка РП костной ткани позвонков в единицах НУ. В тестовый набор данных вошло 100 исследований пациентов, из них 48 имели КП и 52 были без КП. Подбор пациентов происходил таким образом, чтобы при возрастном распределении и при распределении по полу отношение пациентов с и без КП составляло примерно 1 : 1 (рис. 2).





**Рис. 2.** Распределение пациентов с и без компрессионных переломов относительно возраста (а) и пола (б).  
**Fig. 2.** Distribution of patients with and without compression fractures, by age (a) and gender (b).



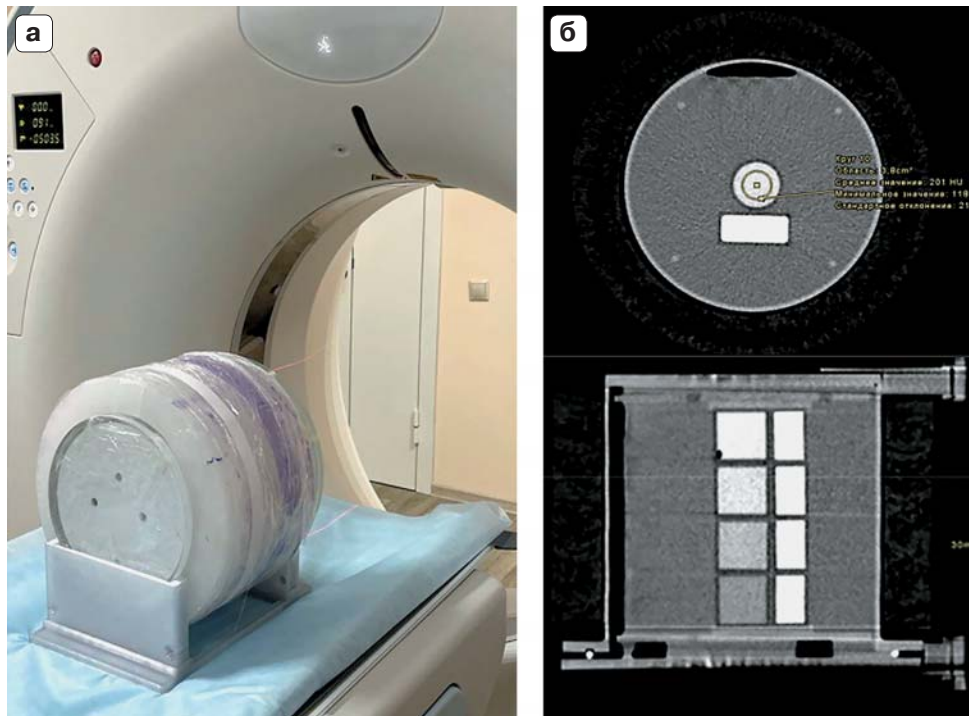
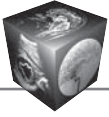
**Рис. 3.** Пример измерения рентгеновской плотности тела позвонка ( $L_1$ ) экспертной группой.  
**Fig. 3.** Example to measure the X-ray density (XRD) of vertebra ( $L_1$ ) by the experts.

С целью тестирования функции определения РП алгоритмом ИИ было проведено измерение HU по исследованиям, включенным в набор данных. Были исключены пациенты с металлоконструкциями и метастазами, не проводились измерения единиц HU для позвонков с КП. Окончательная выборка составила 83 пациента (205 позвонков): 57 женщин и 26 мужчин. В область интереса (ROI) вошли позвонки:  $Th_{XII}$  (96%);  $Th_{XIII}$  (87%);  $L_1$  (59%);  $L_{II}$  (23%);  $L_{III}$  (4%). Измерение РП для тел позвонков проводилось экспертами в единицах HU по реконструированным аксиальным срезам толщиной 10 мм, ROI тела позвонка – максимальная площадь губчатого слоя без захвата позвоночной вены, а также каудальной и краниальной замыкательной пластины (рис. 3) [3, 22]. Согласно рекомендациям ISCD 2020, измерения наиболее корректны для тел позвонков  $L_1$  и  $L_{II}$ , однако с учетом вышеотмеченной встречаемости позвонков на компьютер-

ных томограммах ОГК измерения проводились с усреднением для диапазона  $Th_{XII}$ – $L_{III}$  на уровне пациентов и отдельно для данных сегментов на уровне позвонков [4]. Алгоритм ИИ проводил автоматические измерения в сагиттальной плоскости. Затем результаты были сопоставлены.

### 3. Фантом РСК-ФК2 и методика ККТ

Для автоматической оценки МПК по HU необходима асинхронная калибровка КТ-сканеров [4, 21]. Для калибровки применялся фантом РСК-ФК2 (рис. 4) [17]. Фантом представляет собой полый цилиндр диаметром 20 см из полиметилметакрилата, заполненного водой. В центре по оси расположены полые герметичные цилиндры и параллелепипеды из сверхвысокомолекулярного полиэтилена, которые имитируют тела “позвонков”, которые заполнены раствором гидрофосфата калия ( $K_2HPO_4$ ) с моделированием объемной МПК:



**Рис. 4.** Изображение фантома РСК-ФК2. **а** – внешний вид фантома при КТ; **б** – КТ-изображения фантома в аксиальной и сагиттальной проекциях.

**Fig. 4.** Phantom Kalium. **a** – exterior of the phantom during CT imaging; **b** – a CT image of the phantom in axial and sagittal planes.

50, 100, 150, 200 мг/мл. В конструкцию фантома входят также две парафиновые накладки с толщиной 38 мм, имитирующие жировую ткань. Калибровка была выполнена непосредственно перед исследованием. После пересчета HU в МПК оценка производилась в соответствии с критериями ACR 2018: распределение по группам “остеопороз” (МПК < 80 мг/мл), “остеопения” ( $80 \leq \text{МПК} \leq 120$  мг/мл), “норма” (МПК > 120 мг/мл). Методика определения объемной МПК с помощью данного фантома обозначена как ККТ ФК (Количественная компьютерная томография фантом калиевый) и представлена ранее [22].

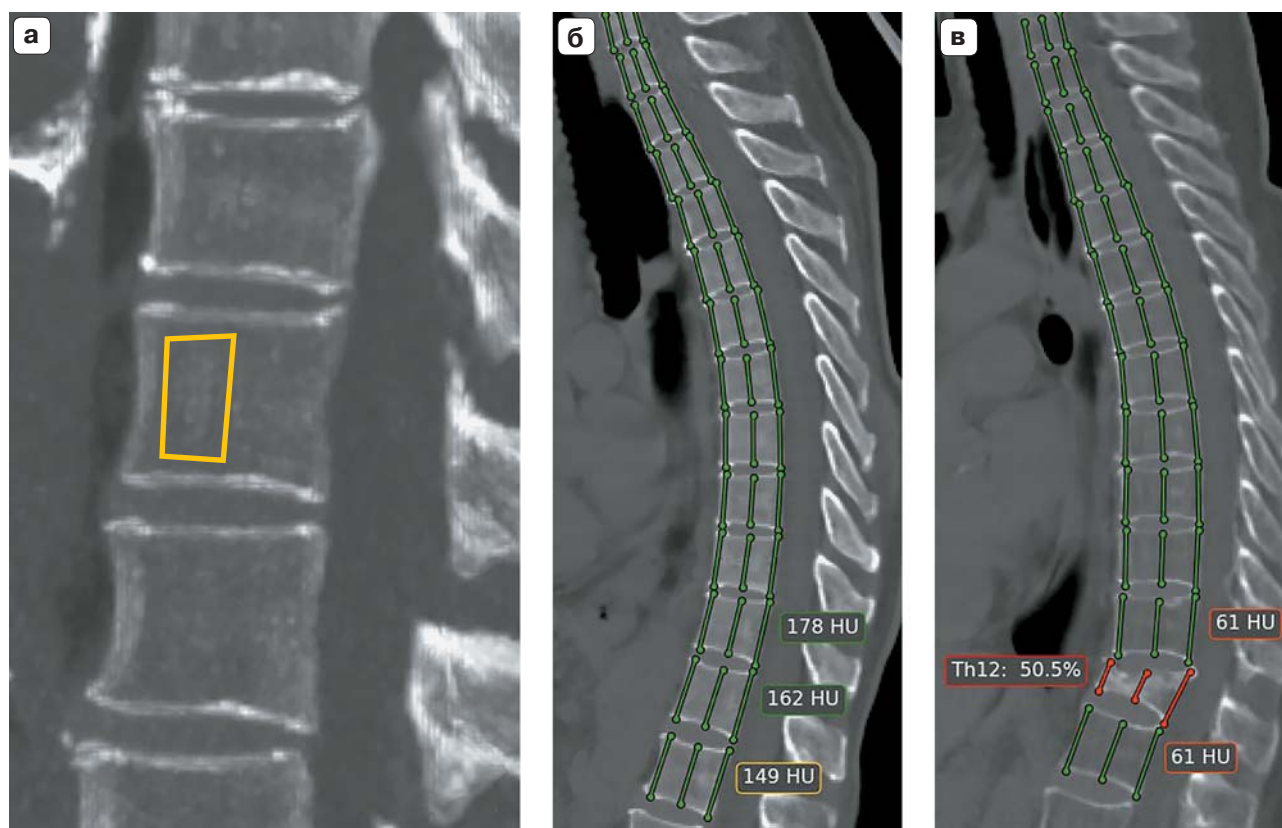
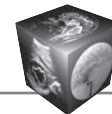
#### 4. КТ-сканирование

Данные были получены для 7 КТ-сканеров Canon Aquilion 64, размещенных в разных медицинских организациях: 4 – в стационарах, 3 – в поликлиниках. КТ-исследования выполнялись в стандартном режиме сканирования ОГК: 120 кВ; ток задавался автоматически, Sure Exposure 3D (80–500 мА, стандартное отклонение шума = 10 HU); толщина срезов 1,0 мм; питч 0,828; фильтры реконструкции для мягких тканей с коррекцией эффекта усиления жесткости рентгеновского пучка (FC08), фильтр для визуализации паренхи-

мы легких. Алгоритмы итеративной реконструкции не использовались. Для обработки алгоритмом ИИ использовалась серия с фильтром FC08.

#### 5. Принцип работы алгоритма ИИ и его применение в оценке РП

Для автоматической оценки использовался алгоритм ИИ Genant-IRA, разработанный российской компанией Айра Лабс. Алгоритм основан на сверточных нейронных сетях (convolutional neuronal networks – CNN) [14]. На первом этапе работы алгоритма происходило нахождение центров тел позвонков и “выпрямление” позвоночника. Для идентификации позвоночного столба на 3D-изображениях использовался подход, основанный на soft-argmax. После этого формировалось 2D-изображение – реконструированный сагиттальный срез толщиной 1 см в виде криволинейной реконструкции вдоль позвоночного столба для компенсации сколиотической деформации. На втором этапе проводился морфометрический анализ тел позвонков. Алгоритм автоматически детектировал тела позвонков на срезе, используя архитектуру YOLOv3. Затем находил 6 точек тела позвонка, которые соответствовали вентральному, срединному и дорсальному размеру тел



**Рис. 5.** Результаты обработки алгоритмом искусственного интеллекта компьютерных томограмм ОГК: реконструированные сагиттальные срезы. **а** – определение алгоритмом области интереса для измерения РП одного позвонка; **б** – пациентка 64 лет без компрессионной деформации тел позвонков более 25%; МПК соответствует норме: среднее значение 124 мг/мл (РП > 150 HU); **в** – пациентка 66 лет, компрессионная деформация тела Th<sub>XII</sub>-позвонка более 40%, Genant 2; МПК соответствует остеопорозу: среднее значение 46 мг/мл (РП < 100 HU).

**Fig. 5.** Chest CT images processed by the AI (artificial intelligence) algorithm: reconstructed sagittal slices. **a** – the algorithm determined the region of interest to measure the X-ray density (XRD) of a single vertebra; **б** – a female patient, 64 years old, the loss of height of the vertebral bodies is less than 25%; bone mineral density (BMD) is normal: mean value is 124 mg/ml (XRD > 150 HU); **в** – a female patient, 66 years old, loss of height of the Th<sub>XII</sub> vertebral body is over 40%, Genant 2; BMD corresponds to osteoporosis: mean value is 46 mg/ml (XRD < 100 HU).

позвонков. После этого производился расчет степени компрессионной деформации по классификации Genant, где Genant 1 – деформация до 25%; Genant 2 – деформация 25–40%; Genant 3 – деформация от 40% [14, 20, 24]. Степень деформации отмечена: красным – выраженная (более 40%), оранжевым – умеренная (от 25 до 40%), зеленым – слабая или без деформации (менее 25%) (рис. 5б,в).

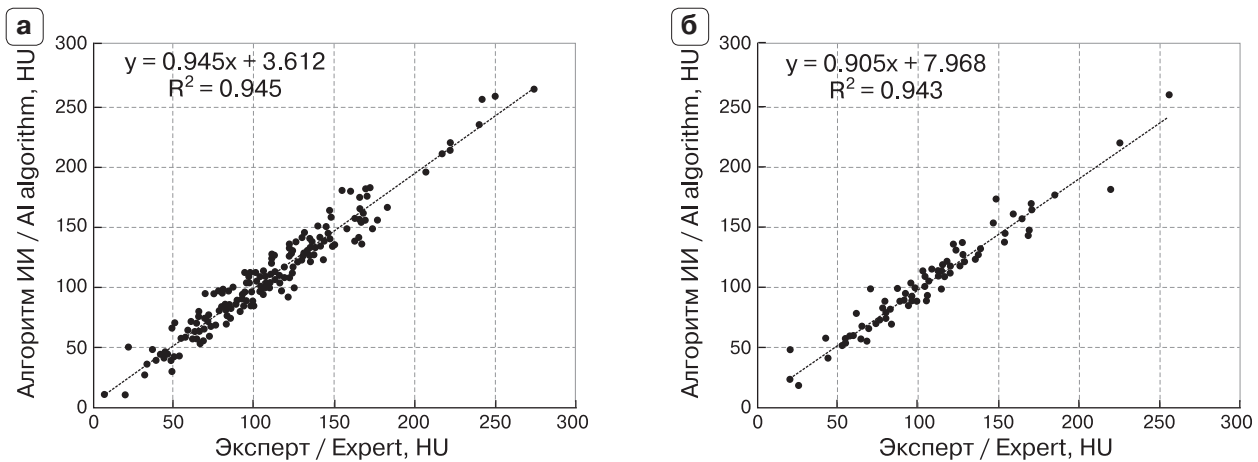
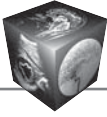
Автоматическое измерение РП губчатого вещества алгоритмом ИИ проводится без захвата замыкательных пластинок и кортикального слоя в вентральном отделе тел позвонков на уровне Th<sub>XI</sub>–L<sub>III</sub>. Алгоритм устанавливает ROI толщиной 1 см в виде трапеции на сагиттальном реконструированном срезе толщиной 1 см (рис. 5а) на расстоянии граней трапеции на 3 мм от кортикально-

го слоя. Измерение не проводится для позвонков с деформацией более 25%.

Полученные данные работы алгоритма ИИ передаются в ЕРИС как отдельная серия анализируемого пациента в виде изображения и текста в формате DICOM SR. Платформа ЕРИС представлена на основе Agfa Healthcare Enterprise Imaging, IMPAX Agility 8.1.2 SP5.6.

### 6. Контингент пациентов

После проведения асинхронной калибровки на 7 КТ-сканерах в течение месяца было выполнено определение МПК у пациентов в оппортунистическом режиме при проведении КТ ОГК. Число пациентов старше 50 лет составило 1910. Были исключены: 31 (1,6%) пациент из-за ошибок передачи данных, 17 (0,8%) вследствие артефактов движе-



**Рис. 6.** Сопоставление оценки рентгеновской плотности тел позвонков в единицах HU с помощью сервиса искусственного интеллекта и экспертной разметки на уровне позвонков (а) и на уровне пациентов (б).

**Fig. 6.** Assessments of X-ray density of the vertebral bodies in HU performed by the artificial intelligence service and the experts both at the vertebral (a) and patient (б) levels.

ния, 9 (0,3%) из-за ошибки обработки алгоритмом. В окончательный анализ включено 1853 пациента, средний возраст составил 66,3 года со стандартным отклонением  $\pm 10,8$  года. Соотношение мужчин и женщин составило 718/1135.

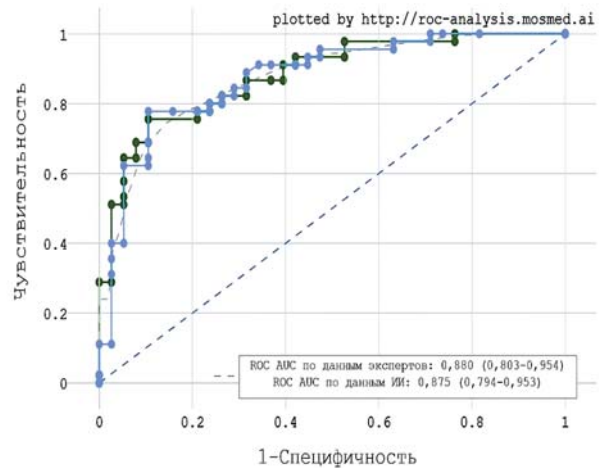
Уровень значимости принят  $p = 0,05$ .

## Результаты

При выполнении исследования была оценена эффективность алгоритма ИИ по определению РП в сравнении с экспертной разметкой и проведена калибровка КТ-сканеров с целью автоматизированной оценки плотности костной ткани. Показан высокий коэффициент детерминации при сравнении РП между измерениями алгоритмом ИИ и при экспертной разметке  $R^2 = 0,945$  ( $p = 0,000$ ) на уровне позвонков ( $Th_{XI}-L_{III}$ ) (рис. 6а) и  $0,943$  ( $p = 0,000$ ) на уровне пациентов (рис. 6б). Вместе с тем отмечается небольшое завышение измерений, выполненных экспертами на 2,4 HU (средне-квадратичное отклонение (СКО) 10,37; 95% доверительный интервал (ДИ) 1,41) для отдельных позвонков и на 2,2 HU (СКО 10,51; 95% ДИ 2,26) для пациентов. Методом парного t-критерия Стьюдента показано, что данные различия достоверны на уровне принятого уровня значимости для позвонков ( $p = 0,001$ ) и недостоверны для пациентов ( $p = 0,053$ ). Исследование установило, что средние показатели РП достоверно ( $p = 0,000$  по данным t-критерия Стьюдента) выше в группе пациентов без КП при экспертной разметке 132,0 HU (СКО 40,10; 95% ДИ 12,27) по сравнению с группой пациентов с переломами 79,6 HU (СКО 28,49; 95% ДИ 8,94). При разделении пациентов на группы с/без переломов показатель ROC AUC для РП

тел позвонков в единицах HU по данным экспертной разметки составил 0,880 (95% ДИ 0,075), а для алгоритма ИИ 0,875 (95% ДИ 0,0795) (рис. 7), ход кривых совпадал по форме с перекрытием доверительных интервалов.

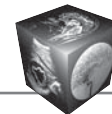
По данным калибровки 7 КТ-сканеров с фантомом РСК-ФК2, выполненной в 5 медицинских ор-



**Рис. 7.** Сопоставление ROC-кривых, полученных при определении HU тел позвонков (сравнены средние по  $Th_{XI}-L_{III}$ ) с/без компрессионных переломов: зеленая кривая – экспертный анализ, синяя кривая – алгоритм искусственного интеллекта.

**Fig. 7.** ROC-curves obtained by determining HU of the vertebral bodies (averages for  $Th_{XI}-L_{III}$  are compared) with/without compression fractures: green curve – expert analysis, blue curve – artificial intelligence algorithm. Horizontal line: 1-Specificity, vertical line – Sensitivity. ROC AUC according to expert 0.880 (0.803–0.954) s. ROC AUC according to AI 0.875 (0.794–0.953).





ганизациях, были получены достаточно сопоставимые результаты калибровочных зависимостей, учитывая идентичность типов 64-срезовых сканеров и режимов исследований. Калибровочная прямая со средним значением коэффициента угла наклона и коэффициентом смещения угла для всех компьютерных томографов имела вид (на примере одного из сканеров):  $МПК = 0,77 \cdot NU - 1,343$ . СКО для коэффициента угла наклона составило 0,005 (95% ДИ: [0,767; 0,774]), а для коэффициента смещения СКО – 1,137 (95% ДИ: [-2,18; -0,501]). Эти калибровки могут быть использованы как ориентировочные для данных типов 64-срезовых сканеров. Для данной работы расчеты выполнялись для каждого сканера отдельно. При использовании калибровочных коэффициентов были рассчитаны значения РП в единицах НУ, соответствующие граничным значения МПК для ОП (80 мг/мл), что составило 105,6 НУ (95% ДИ: [104,9; 106,4]), и для остеопении (120 мг/мл), что составило 157,6 (95%: [155,6; 159,3]).

При оппортунистическом определении МПК у пациентов старше 50 лет по данным алгоритма ИИ было определено, что средние показатели МПК у женщин составили 95,52 мг/мл (СКО 34,52; 95% ДИ 2,01), у мужчин – 105,29 мг/мл (СКО 29,88; 95% ДИ 2,19); различия средних показателей достоверны ( $p = 0,000$ , по данным  $t$ -критерия Стьюдента). Распределения пациентов по группам: остеопороз/osteопения/норма составили для женщин: 360/244/531, или 31,72%/21,50%/46,78%, для мужчин 134/203/381, или 18,66%/28,27%/53,06%.

## Обсуждение

В ходе работы показана хорошая сопоставимость результатов определения РП тел позвонков по данным морфометрического алгоритма ИИ и при экспертной разметке. Для тестовой выборки (83 пациента) коэффициенты детерминации составили  $R^2 = 0,945$  для измерения РП отдельных позвонков (см. рис. 6а) и  $R^2 = 0,943$  для пациентов (см. рис. 6б). Несколько меньшие коэффициенты детерминации  $R^2 = 0,80$  для экспертного и автоматического определения РП для  $L_1$  позвонка отмечены в работе [9].

Нами показано, что при экспертной разметке происходит завышение РП тел позвонков по сравнению с измерением с помощью алгоритма ИИ в среднем на 2,4 НУ для отдельных позвонков и на 2,2 НУ для пациентов. Это можно объяснить тем, что эксперты проводили измерения в аксиальной плоскости параллельно замыкательным пластинкам в срединных отделах позвонка, алгоритм же проводил измерения на сагиттальном срезе.

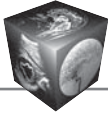
Повышение плотности в центральной части тела позвонка обусловлено анатомическими особенностями. Ранее отмечено подобное достоверное завышение на 3,6 НУ при измерении РП тел позвонков  $L_1$  в аксиальной проекции по сравнению с сагиттальной по данным экспертной разметки, в другом исследовании было показано повышение на 5 НУ [9, 25].

При разделении пациентов тестовой выборки на группы с/без КП по данным РП получена хорошая сопоставимость форм ROC-кривых и показателя ROC AUC для экспертной разметки 0,880; для алгоритма 0,875 с перекрытием 95% ДИ как для ROC-кривых, так и для ROC AUC (см. рис. 7). Эти данные хорошо сопоставимы с результатами: ROC AUC 0,885 для автоматического определения МПК и 0,894 для экспертного, а также соответствуют ROC AUC 0,88 для аналогичной задачи с применением МПК и текстурного анализа тел позвонков [10, 11].

Определение РП в НУ позволяет диагностировать состояние ОП, однако данные о граничных значениях неоднозначные. Примененный нами алгоритм ИИ имеет границы 150 НУ для определения остеопении и 100 НУ для диагностики ОП, в то время как проведенные расчеты на основе фантомного моделирования демонстрируют значения 157,6 НУ для остеопении и 105,6 НУ для ОП. Другими авторами приводятся данные о диагностике ОП с 90% чувствительностью для порога 160 НУ и 90% специфичностью для порога 110 НУ, в другой публикации проводятся соответствующие верхний 160 НУ и нижний 73 НУ [5, 26].

Более универсален подход, основанный на калибровке сканеров с помощью фантома с образцами МПК, при этом состояния ОП и остеопении были определены в соответствии с критериями ACR 2018 [21]. В нашем исследовании была использована разработанная ранее методика асинхронной ККТ ФК для перевода НУ в МПК с использованием фантома РСК ФК 2 [17, 22]. Были выполнены калибровки 7 сканеров и получены соответствующие линейные зависимости между данными величинами.

Хорошее соответствие результатов определения РП тел позвонков в НУ по данным экспертов и алгоритма ИИ, наличие асинхронной калибровки сканеров позволили выполнить автоматическое определение МПК при сканировании компьютерных томограмм ОГК у пациентов оппортунистически с помощью алгоритма ИИ. Состояние ОП у 1853 пациентов старше 50 было определено у 31,72% женщин и 18,66% мужчин. Эти данные несколько превышают показатели, полученных методом асинхронной ККТ (28,99% женщин



и 13,53% мужчин старше 50 лет), а также соответствуют распространенности ОП по данным двух-энергетической рентгеновской абсорбциометрии у женщин 30,3% [16, 27].

### Заключение

Продемонстрирована хорошая сопоставимость результатов определения рентгеновской плотности тел позвонков по данным морфометрического алгоритма ИИ и при экспертной разметке. Предложена методика оппортунистического определения минеральной плотности тел позвонков по данным КТ с помощью алгоритма искусственного интеллекта и проведения асинхронной калибровки КТ-сканеров с использованием ранее разработанного фантома РСК-ФК2.

**Данная статья подготовлена авторским коллективом в рамках НИОКР “Разработка и создание аппаратно-программного комплекса для оппортунистического скрининга остеопороза” (№ ЕГИСУ: 123031400007-7).**

### Участие авторов

Артюкова З.Р. – сбор и обработка данных, подготовка, создание опубликованной работы.

Кудрявцев Н.Д. – сбор и обработка данных, проведение исследования.

Петрайкин А.В. – анализ и интерпретация полученных данных, статистическая обработка данных.

Абуладзе Л.Р. – сбор и обработка данных, обзор публикаций по теме статьи.

Сморчкова А.К. – проведение исследования, подготовка, создание опубликованной работы.

Ахмад Е.С. – обзор публикаций по теме статьи.

Семенов Д.С. – подготовка и редактирование текста.

Беляев М.Г. – подготовка и редактирование текста, статистическая обработка данных.

Белая Ж.Е. – участие в научном дизайне, концепция и дизайн исследования.

Владимирский А.В. – написание текста, подготовка и редактирование текста.

Васильев Ю.А. – участие в научном дизайне, утверждение окончательного варианта статьи.

### Authors' participation

Artyukova Z.R. – collection and analysis of data preparation and creation of the published work.

Kudryavtsev N.D. – collection and analysis of data, conducting research, analysis and interpretation of the obtained data.

Petraikin A.V. – analysis and interpretation of the obtained data, statistical analysis.

Abuladze L.R. – collection and analysis of data, review of publications.

Smorchkova A.K. – conducting research, preparation and creation of the published work.

Akhmad E.S. – review of publications.

Semenov D.S. – text preparation and editing.

Belyaev M.G. – text preparation and editing, statistical analysis.

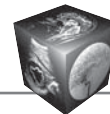
Belaya Zh.E. – participation in scientific design, concept and design of the study.

Vladimirsky A.V. – writing text, text preparation and editing.

Vasiliev Yu.A. – participation in scientific design, approval of the final version of the article.

### Список литературы

1. Белая Ж.Е., Белова К.Ю., Бирюкова Е.В. и др. Федеральные клинические рекомендации по диагностике, лечению и профилактике остеопороза. Федеральные клинические рекомендации по диагностике, лечению и профилактике остеопороза. *Остеопороз и остеопатии*. 2021; 24 (2): 4–47. <https://doi.org/10.14341/osteo12930>
2. Brown J.K., Timm W., Bodeen G. et al. Asynchronously Calibrated Quantitative Bone Densitometry. *J. Clin. Densitom.* 2017; 20 (2): 216–225. <https://doi.org/10.1016/j.jocd.2015.11.001>
3. Петрайкин А.В., Скрипникова И.А. Количественная компьютерная томография, современные данные. Обзор. *Медицинская визуализация*. 2021; 25 (4): 134–146. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1049>
4. 2019 ISCD Official Positions – Adult – International Society for Clinical Densitometry. Available at <https://iscd.org/wp-content/uploads/2021/09/2019-Official-Positions-Adult-1.pdf> Accessed August 20, 2022
5. Alacreu E., Moratal D., Arana E. Opportunistic screening for osteoporosis by routine CT in Southern Europe. *Osteoporos. Int.* 2017; 28 (3): 983–990. <https://doi.org/10.1007/s00198-016-3804-3>
6. Jang S., Graffy P.M., Ziemlewicz T. J. et al. Opportunistic osteoporosis screening at routine abdominal and Thoracic CT: Normative L1 trabecular attenuation values in more than 20 000 adults. *Radiology*. 2019; 291 (2): 360–367. <https://doi.org/10.1148/radiol.2019181648>
7. Savage R.H., van Assen M., Martin S.S. et al. Utilizing Artificial Intelligence to Determine Bone Mineral Density Via Chest Computed Tomography. *J. Thorac. Imaging*. 2020; 35 (1): S35–S39. <https://doi.org/10.1097/RTI.0000000000000484>
8. Tang C. Zhang, W., Li, H. et al. CNN-based qualitative detection of bone mineral density via diagnostic CT slices for osteoporosis screening. *Osteoporos. Int.* 2021; 32: 971–979. <https://doi.org/10.1007/s00198-020-05673-w>
9. Pickhardt P.J., Lee S.J., Liu J. et al. Population-based opportunistic osteoporosis screening: Validation of a fully automated CT tool for assessing longitudinal BMD changes. *Br. J. Radiol.* 2019; 92 (1094): 20180726. <https://doi.org/10.1259/bjr.20180726>
10. Löffler M.T., Jacob A., Scharf A. et al. Automatic opportunistic osteoporosis screening in routine CT: improved prediction of patients with prevalent vertebral fractures compared to DXA. *Eur. Radiol.* 2021; 31: 6069–6077. <https://doi.org/10.1007/s00330-020-07655-2>

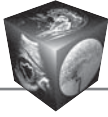


11. Valentinič A., Trebeschi S., Kaesmacher J. et al. Opportunistic osteoporosis screening in multi-detector CT images via local classification of textures. *Osteoporos. Int.* 2019; 30: 1275–1285. <https://doi.org/10.1007/s00198-019-04910-1>
12. Bar A., Wolf L., Amitai O. B. et al. Compression fractures detection on CT. *Medical Imaging 2017: Computer-Aided Diagnosis*. SPIE, 2017; 10134: 1013440. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.01671>
13. Tomita N., Cheung Y.Y., Hassanpour S. Deep neural networks for automatic detection of osteoporotic vertebral fractures on CT scans. *Comput. Biol. Med.* 2018; 98: 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2018.05.011>
14. Zakharov A., Pisol M., Bukharaev A. et al. Interpretable vertebral fracture quantification via anchor-free landmarks localization. *Med. Image Analysis*. 2023; 83: 102646. <https://doi.org/10.1016/j.media.2022.102646>
15. Лесняк О.М., Норой Л. Аудит состояния проблемы остеопороза в странах Восточной Европы и Центральной Азии 2010. 2011. Available at [https://www.osteoporosis.foundation/sites/iosbonehealth/files/201906/2010\\_Eastern\\_European\\_Central\\_Asian\\_Audit\\_Russian.pdf](https://www.osteoporosis.foundation/sites/iosbonehealth/files/201906/2010_Eastern_European_Central_Asian_Audit_Russian.pdf) Accessed August 20, 2022
16. Cheng X., Zhao K., Zha X. et al. Opportunistic Screening Using Low-Dose CT and the Prevalence of Osteoporosis in China: A Nationwide, Multicenter Study. *J. Bone Miner. Res.* 2021; 36 (3): 427–435. <https://doi.org/10.1002/jbmr.4187>
17. Петрайкин А.В., Смолярчук М.Я., Петрайкин Ф.А. и др. Оценка точности денситометрических исследований. Применение фантома РСК ФК2. *Травматология и ортопедия России*. 2019; 25 (3): 124–134. <https://doi.org/10.21823/2311-2905-2019-25-3-124-134>
18. Морозов С. П., Владимировский А.В., Ледихова Н.В. и др. Московский эксперимент по применению компьютерного зрения в лучевой диагностике: вовлеченность врачей-рентгенологов. *Врач и информационные технологии*. 2020; 4, 14–23. <https://doi.org/10.37690/1811-0193-2020-4-14-23>
19. Andreychenko A.E., Logunova T.A., Gombolevskiy V.A. et al. A methodology for selection and quality control of the radiological computer vision deployment at the megalopolis scale. *medRxiv*. 2022: 2022.02.12.22270663. <https://doi.org/10.1101/2022.02.12.22270663>
20. Genant H.K., Wu C. Y., Kujjket C.V. al. Vertebral fracture assessment using a semiquantitative technique. *J. Bone Miner.* 1993; 8 (9): 1137–1148. <https://doi.org/10.1002/jbmr.5650080915>
21. The American College of Radiology. ACR–SPR–SSR Practice Parameter for the Performance of Musculoskeletal Quantitative Computed Tomography (Qct). Published 2018. <https://www.acr.org/-/media/ACR/Files/Practice-Parameters/QCT.pdf> Accessed August 20, 2022
22. Петрайкин А.В., Сморгачева А.К., Кудрявцев Н.Д. и др. Сравнение двух методик асинхронной КТ-денситометрии. *Медицинская визуализация*. 2020; 24 (4): 108–118. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-2020-4-108-118>
23. Павлов Н.А., Андрейченко А.Е., Владимировский А.В. и т.д. Эталонные медицинские датасеты (MosMedData) для независимой внешней оценки алгоритмов на основе искусственного интеллекта в диагностике. *Digital Diagnostics*. 2021; 2 (1): 49–65. <https://doi.org/10.17816/DD60635>
24. Петрайкин А.В., Белая Ж.Е., Киселева А.Н. и др. Технология искусственного интеллекта для распознавания компрессионных переломов позвонков с помощью модели морфометрического анализа, основанной на сверточных нейронных сетях. *Проблемы эндокринологии*. 2020; 66 (5): 48–60. <https://doi.org/10.14341/probl12605>
25. Lee S.J., Binkley N., Lubner M.G. et al. Opportunistic screening for osteoporosis using the sagittal reconstruction from routine abdominal CT for combined assessment of vertebral fractures and density. *Osteoporos Int.* 2016; 27: 1131–1136. <https://doi.org/10.1007/s00198-015-3318-4>
26. Pickhardt P.J., Pooler B. D., Lauder T. et al. Opportunistic screening for osteoporosis using abdominal computed tomography scans obtained for other indications. *Ann. Intern. Med.* 2013; 158 (8): 588–595. <https://doi.org/10.7326/0003-4819-158-8-201304160-00003>
27. Kanis J.A. Assessment of fracture risk and its application to screening for postmenopausal osteoporosis: Synopsis of a WHO report. *Osteoporos. Int.* 1994; 6 (4): 368–381. <https://doi.org/10.1007/BF01622200>

## References

1. Belaya Z.E., Belova K.Yu., Biryukova E.V. et al. Federal clinical guidelines for diagnosis, treatment and prevention of osteoporosis. *Osteoporosis and Bone Diseases*. 2021; 24 (2): 4–47. <https://doi.org/10.14341/osteo12930> (In Russian)
2. Brown J.K., Timm W., Bodeen G. et al. Asynchronously Calibrated Quantitative Bone Densitometry. *J. Clin. Densitom.* 2017; 20 (2): 216–225. <https://doi.org/10.1016/j.jocd.2015.11.001>
3. Petraikin A.V., Skripnikova I.A. Quantitative Computed Tomography, modern data. Review. *Medical Visualization*. 2021; 25 (4): 134–146. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1049> (In Russian)
4. 2019 ISCD Official Positions – Adult – International Society for Clinical Densitometry. Available at <https://iscd.org/wp-content/uploads/2021/09/2019-Official-Positions-Adult-1.pdf> Accessed August 20, 2022
5. Alacreu E., Moratal D., Arana E. Opportunistic screening for osteoporosis by routine CT in Southern Europe. *Osteoporos. Int.* 2017; 28 (3): 983–990. <https://doi.org/10.1007/s00198-016-3804-3>
6. Jang S., Graffy P.M., Ziemlewicz T. J. et al. Opportunistic osteoporosis screening at routine abdominal and Thoracic CT: Normative L1 trabecular attenuation values in more than 20 000 adults. *Radiology*. 2019; 291 (2): 360–367. <https://doi.org/10.1148/radiol.2019181648>
7. Savage R.H., van Assen M., Martin S.S. et al. Utilizing Artificial Intelligence to Determine Bone Mineral Density Via Chest Computed Tomography. *J. Thorac. Imaging*. 2020; 35 (1): S35–S39. <https://doi.org/10.1097/RTI.0000000000000484>
8. Tang C. Zhang, W., Li, H. et al. CNN-based qualitative detection of bone mineral density via diagnostic CT slices for osteoporosis screening. *Osteoporos. Int.* 2021; 32: 971–979. <https://doi.org/10.1007/s00198-020-05673-w>
9. Pickhardt P.J., Lee S.J., Liu J. et al. Population-based opportunistic osteoporosis screening: Validation of a fully automated CT tool for assessing longitudinal BMD changes. *Br. J. Radiol.* 2019; 92 (1094): 20180726. <https://doi.org/10.1259/bjr.20180726>





10. Löffler M.T., Jacob A., Scharr A. et al. Automatic opportunistic osteoporosis screening in routine CT: improved prediction of patients with prevalent vertebral fractures compared to DXA. *Eur. Radiol.* 2021; 31: 6069–6077. <https://doi.org/10.1007/s00330-020-07655-2>
11. Valentinitich A., Trebeschi S., Kaesmacher J. et al. Opportunistic osteoporosis screening in multi-detector CT images via local classification of textures. *Osteoporos. Int.* 2019; 30: 1275–1285. <https://doi.org/10.1007/s00198-019-04910-1>
12. Bar A., Wolf L., Amitai O. B. et al. Compression fractures detection on CT. *Medical Imaging 2017: Computer-Aided Diagnosis*. SPIE, 2017; 10134: 1013440. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.01671>
13. Tomita N., Cheung Y.Y., Hassanpour S. Deep neural networks for automatic detection of osteoporotic vertebral fractures on CT scans. *Comput. Biol. Med.* 2018; 98: 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2018.05.011>
14. Zakharov A., Pisos M., Bukharaev A. et al. Interpretable vertebral fracture quantification via anchor-free landmarks localization. *Med. Image Analysis.* 2023; 83: 102646. <https://doi.org/10.1016/j.media.2022.102646>
15. Lesnyak O.M., Noroi L. The Eastern European & Central Asian Regional Audit Epidemiology, costs & burden of osteoporosis in 2010. 2011. (In Russian). Available at [https://www.osteoporosis.foundation/sites/IOBoneHealth/files/201906/2010\\_Eastern\\_European\\_Central\\_Asian\\_Audit\\_Russian.pdf](https://www.osteoporosis.foundation/sites/IOBoneHealth/files/201906/2010_Eastern_European_Central_Asian_Audit_Russian.pdf) Accessed August 20, 2022
16. Cheng X., Zhao K., Zha X. et al. Opportunistic Screening Using Low-Dose CT and the Prevalence of Osteoporosis in China: A Nationwide, Multicenter Study. *J. Bone Miner. Res.* 2021; 36 (3): 427–435. <https://doi.org/10.1002/jbmr.4187>
17. Petraikin A.V., Smoliarchuk M.Y., Petryaykin F.A., et al. Assessment the Accuracy of Densitometry Measurements Using DMA PP2 Phantom. *Traumatology and Orthopedics of Russia.* 2019; 25 (3): 124–134. <https://doi.org/10.21823/2311-2905-2019-25-3-124-134> (In Russian)
18. Morozov S.P., Vladzhymskiy A.V., Ledikhova N.V. et al. Moscow experiment on computer vision in radiology: involvement and participation of radiologists. *Information technologies for the Physician.* 2020; 4, 14–23. <https://doi.org/10.37690/1811-0193-2020-4-14-23> (In Russian)
19. Andreychenko A.E., Logunova T.A., Gombolevskiy V.A. et al. A methodology for selection and quality control of the radiological computer vision deployment at the megalopolis scale. *medRxiv.* 2022: 2022.02.12.22270663. <https://doi.org/10.1101/2022.02.12.22270663>
20. Genant H.K., Wu C. Y., Kijijet C.V. al. Vertebral fracture assessment using a semiquantitative technique. *J. Bone Miner.* 1993; 8 (9): 1137–1148. <https://doi.org/10.1002/jbmr.5650080915>
21. The American College of Radiology. ACR–SPR–SSR Practice Parameter for the Performance of Musculoskeletal Quantitative Computed Tomography (Qct). Published 2018. <https://www.acr.org/-/media/ACR/Files/Practice-Parameters/QCT.pdf> Accessed August 20, 2022
22. Petraikin A.V., Smorchkova A.K., Kudryavtsev N.D. et al. Comparison of two asynchronous QCT methods. *Medical Visualization.* 2020; 24 (4): 108–118. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-2020-4-108-118> (In Russian)
23. Pavlov N.A., Andreychenko A.E., Vladzhymskiy A.V. et al. Reference medical datasets (MosMedData) for independent external evaluation of algorithms based on artificial intelligence in diagnostics. *Digital Diagnostics.* 2021; 2 (1): 49–65. <https://doi.org/10.17816/DD60635> (In Russian)
24. Petraikin A.V., Belaya Z.E., Kiseleva A.N. et al. Artificial intelligence for diagnosis of vertebral compression fractures using a morphometric analysis model, based on convolutional neural networks. *Problems of Endocrinology.* 2020; 66 (5): 48–60. <https://doi.org/10.14341/probl12605> (In Russian)
25. Lee S.J., Binkley N., Lubner M.G. et al. Opportunistic screening for osteoporosis using the sagittal reconstruction from routine abdominal CT for combined assessment of vertebral fractures and density. *Osteoporos Int.* 2016; 27: 1131–1136. <https://doi.org/10.1007/s00198-015-3318-4>
26. Pickhardt P.J., Pooler B. D., Lauder T. et al. Opportunistic screening for osteoporosis using abdominal computed tomography scans obtained for other indications. *Ann. Intern. Med.* 2013; 158 (8): 588–595. <https://doi.org/10.7326/0003-4819-158-8-201304160-00003>
27. Kanis J.A. Assessment of fracture risk and its application to screening for postmenopausal osteoporosis: Synopsis of a WHO report. *Osteoporos. Int.* 1994; 6 (4): 368–381. <https://doi.org/10.1007/BF01622200>

**Для корреспонденции\***: Петряйкин Алексей Владимирович – 127051 Москва, ул. Петровка, д. 24, стр. 1. Тел.: +7-926-575-4602.  
E-mail: alexeypetraikin@gmail.com

**Артюкова Злата Романовна** – младший научный сотрудник отдела инновационных технологий ГБУЗ “Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий ДЗМ”, Москва. <https://orcid.org/0000-0003-2960-9787>

**Кудрявцев Никита Дмитриевич** – младший научный сотрудник отдела инновационных технологий ГБУЗ “Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий ДЗМ”, Москва. <https://orcid.org/0000-0003-4203-0630>

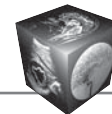
**Петряйкин Алексей Владимирович** – доктор мед. наук, доцент, главный научный сотрудник отдела инновационных технологий ГБУЗ “Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий ДЗМ”, Москва. <https://orcid.org/0000-0003-1694-4682>

**Абуладзе Лия Руслановна** – младший научный сотрудник отдела инновационных технологий ГБУЗ “Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий ДЗМ”, Москва. <https://orcid.org/0000-0001-6745-1672>

**Сморчкова Анастасия Кирилловна** – младший научный сотрудник отдела инновационных технологий ГБУЗ “Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий ДЗМ”, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-9766-3390>

**Ахмад Екатерина Сергеевна** – научный сотрудник отдела инновационных технологий ГБУЗ “Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий ДЗМ”, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-8235-9361>





**Семенов Дмитрий Сергеевич** – начальник сектора стандартизации и контроля качества отдела инновационных технологий ГБУЗ “Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий ДЗМ”, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-4293-2514>

**Беляев Михаил Геннадьевич** – канд. физ.-мат. наук, профессор, генеральный директор ООО “АЙРА Лабс”, Москва. <https://orcid.org/0000-0001-9906-6453>

**Белая Жанна Евгеньевна** – доктор мед. наук, главный научный сотрудник, заведующая отделением нейроэндокринологии и остеопатий ФГБУ “НМИЦ эндокринологии” Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-6674-6441>

**Владимирский Антон Вячеславович** – доктор мед. наук, заместитель директора по научной работе ГБУЗ “Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий ДЗМ; профессор кафедры информационных и интернет-технологий, ФГАОУ ВО “Первый МГМУ имени И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет)”, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-2990-7736>

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

**Contact\*:** Alexey V. Petraikin – 24/1, Petrovka str., Moscow 127051, Russian Federation. Phone: +7-926-575-4602.

E-mail: alexeypetraikin@gmail.com

**Zlata R. Artyukova** – Junior Researcher of the Department of Innovation Technology, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department, Moscow. <https://orcid.org/0000-0003-2960-9787>

**Nikita D. Kudryavtsev** – Junior Researcher of the Department of Innovation Technology, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department, Moscow. <https://orcid.org/0000-0003-4203-0630>

**Alexey V. Petraikin** – Doct. of Sci. (Med.), Associate Professor, Chief Researcher of the Department of Innovation Technology, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department, Moscow. <https://orcid.org/0000-0003-1694-4682>

**Liya R. Abuladze** – Junior Researcher of the Department of Innovation Technology, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department, Moscow. <https://orcid.org/0000-0001-6745-1672>

**Anastasia K. Smorchkova** – Junior Researcher of the Department of Innovation Technology, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-9766-3390>

**Ekaterina S. Akhmad** – Researcher of the Department of Innovation Technology, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-8235-9361>

**Dmitry S. Semenov** – Head of the Sector Standardization and Quality Control of the Department of Innovation Technology, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-4293-2514>

**Mikhail G. Belyaev** – Doct. of Sci. (Phys.-Math.), Professor, IRA Labs, Inc. CEO, Moscow. <https://orcid.org/0000-0001-9906-6453>

**Zhanna E. Belaya** – Doct. of Sci. (Med.), Chief Researcher, Head of Department of Neuroendocrinology and Bone Disease, The National Medical Research Centre for Endocrinology, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-6674-6441>

**Anton V. Vladzimirskyy** – Doct. of Sci. (Med.), Associate director of Science, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department; Professor at Information and Internet Technologies Chair, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University), Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-2990-7736>

**Yuri A. Vasiliev** – Cand. of Sci. (Med.), CEO, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-0208-5218>