

**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА РЕНТГЕНОГРАФИИ СТОП С НАГРУЗКОЙ
И МУЛЬТИСПИРАЛЬНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ
С НАГРУЗКОЙ У ПАЦИЕНТОВ С ПРИОБРЕТЕННЫМ
ПЛОСКОСТОПИЕМ ВЗРОСЛЫХ**

**Бобров Д. С. ORCID ID 0000-0002-1190-7498,
Лычагин А. В. ORCID ID 0000-0002-2202-8149,
Подлесная А. А. ORCID ID 0000-0002- 6694-0199,
Шнайдер М. ORCID ID 0009-0001-7133-1718,
Бабкова А. А. ORCID ID 0000-0003-4857-8621,
Явльева Р. Х. ORCID ID 0000-0001-8517-7216**

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова»,
Москва, Российская Федерация, e-mail: dr.podlesnaya@mail.ru*

Приобретенное плоскостопие взрослых является распространенной полиэтиологической патологией, традиционно оцениваемой по угловым параметрам на рентгенограммах с нагрузкой и изображениях мультиспиральной компьютерной томографии с нагрузкой. Статистически значимых различий между методами при оценке ключевых угловых параметров деформации не выявлено. Цель исследования – провести сравнительный анализ угловых параметров стопы, измеренных с помощью рентгенографии с нагрузкой и мультиспиральной компьютерной томографии с нагрузкой, у пациентов с приобретенным плоскостопием взрослых. В проспективное исследование включено 109 пациентов с приобретенным плоскостопием взрослых, обследовано 218 стоп. Всем участникам выполнены рентгенография стоп в прямой и боковой проекциях с нагрузкой и мультиспиральная компьютерная томография с нагрузкой. Оценивали угол вальгусного отклонения первого пальца, межплюсневый угол и угол продольного свода стопы. Статистический анализ выполняли с использованием критерия Уилкоксона для связанных выборок, анализа Бланда и Альтмана, внутриклассового коэффициента корреляции и линейной смешанной модели. Статистически значимых различий между значениями угла вальгусного отклонения первого пальца, межплюсневового угла и угла продольного свода, полученными двумя методами, не выявлено. Анализ согласованности показал минимальное систематическое смещение измерений и высокую воспроизводимость результатов. При оценке стандартных угловых параметров стопы у пациентов с плоскостопием не выявлено статистически значимых различий между рентгенографией с нагрузкой и мультиспиральной компьютерной томографией с нагрузкой. Вместе с тем мультиспиральная компьютерная томография с нагрузкой позволяет визуализировать трехмерные анатомические особенности деформации и точнее определять реперные точки, что повышает диагностическую информативность метода, однако значение этих преимуществ для хирургического планирования требует дальнейшего изучения.

Ключевые слова: приобретенное плоскостопие, рентгенография с нагрузкой, мультиспиральная компьютерная томография, угловые параметры стопы.

**COMPARISON OF WEIGHT-BEARING RADIOGRAPHY
AND WEIGHT-BEARING MULTISLICE COMPUTED TOMOGRAPHY
IN ADULT ACQUIRED FLATFOOT DEFORMITY**

**Bobrov D. S. ORCID ID 0000-0002-1190-7498,
Lychagin A. V. ORCID ID 0000-0002-2202-8149,
Podlesnaya A. A. ORCID ID 0000-0002-6694-0199,
Shnayder M. ORCID ID 0009-0001-7133-1718,
Babkova A. A. ORCID ID 0000-0003-4857-8621,
Yavlieva R. Kh. ORCID ID 0000-0001-8517-7216**

*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
“First Moscow State Medical University named after I. M. Sechenov”,
Moscow, Russian Federation, e-mail: dr.podlesnaya@mail.ru*

Adult acquired flatfoot is a common polyetiological disorder that is traditionally assessed using angular parameters on weight-bearing radiographs and weight-bearing multislice computed tomography images. No statistically significant differences between the two methods were found in the assessment of the key angular parameters of the deformity. Objective. To perform a comparative analysis of foot angular parameters measured using weight-bearing radiography and weight-bearing multislice computed tomography in patients with adult acquired flatfoot. This prospective study included 109 patients diagnosed with adult acquired flatfoot; a total of 218 feet were examined. All participants underwent weight-bearing radiography of the feet in anteroposterior and lateral projections, as well as weight-bearing multislice computed tomography. The angle of hallux valgus, the intermetatarsal angle, and the longitudinal arch angle of the foot were assessed. Statistical analysis was performed using the Wilcoxon signed-rank test for paired samples, Bland–Altman analysis, the intraclass correlation coefficient, and a linear mixed-effects model. No statistically significant differences were found between the values of the angle of hallux valgus, the intermetatarsal angle, and the longitudinal arch angle obtained using the two methods. Agreement analysis demonstrated minimal systematic measurement bias and high reproducibility of the results. In the assessment of standard angular foot parameters in patients with flatfoot, no statistically significant differences were found between weight-bearing radiography and weight-bearing multislice computed tomography. At the same time, weight-bearing multislice computed tomography enables visualization of the three-dimensional anatomical features of the deformity and allows more accurate identification of anatomical landmarks, thereby increasing the diagnostic informativeness of the method. However, the significance of these advantages for surgical planning requires further investigation.

Keywords: acquired flatfoot, weight-bearing radiography, multislice computed tomography, foot angular parameters.

Введение

Приобретенное плоскостопие проявляется как коллапс медиального продольного свода стопы, сопровождающийся прогрессирующей деформацией стопы и голеностопного сустава, актуальное, широко распространенное среди взрослого работоспособного населения заболевание, имеющее полиэтиологическое происхождение и сложное клиническое течение [1, 2].

Приобретенное плоскостопие ранее связывали с дисфункцией сухожилия задней большеберцовой мышцы. У многих пациентов уже имеющееся плоскостопие может прогрессировать ввиду наличия ожирения. Связочные структуры голеностопного сустава играют роль в развитии деформации стопы. Дисфункция сухожилия задней большеберцовой мышцы является многофакторным процессом. Одной из наиболее распространенных причин приобретенного плоскостопия считается травматическое или дегенеративное повреждение сухожилия задней большеберцовой мышцы (ЗББМ) с возникновением недостаточности его функции. Эпизоды предыдущей травмы, ношение высоких каблуков, инъекции кортикостероидов, артрит, нервно-мышечные заболевания и сахарный диабет предрасполагают к развитию патологии [3, 4].

Ряд исследований описывали морфологические изменения при плоскостопии с использованием угловых параметров стопы, характеризующих вид и степень деформации, разработанных на основе полученных данных рентгенографии [5–7]. Эти параметры, включая пяточно-малоберцовое и таранно-малоберцовое расстояния, наклон пяточной кости, латеральный таранно-пяточный и таранно-пяточный углы, а также угол между таранной и пяточной костями, используются для оценки относительного пространственного смещения костей заднего отдела стопы и малоберцовой кости [8–10]. Первый плюснево-пяточный угол

(угол Гибба) и таранно-первый плюсневой угол (угол Мери) измеряются в передней части стопы для оценки относительного смещения в пространстве заднего отдела стопы и первой плюсневой кости [6]. Однако эти параметры, используемые в большинстве предыдущих исследований, применимы для двумерной (2D) или смоделированной рентгенографии с весовой нагрузкой и не в полной мере отражают трехмерную (3D) морфологию плоскостопия в условиях нагрузки стоя из-за перекрытия костей, проекционных положений, методологических различий и вращения конечностей [5, 11, 12].

Точная оценка угловых показателей деформации стопы имеет решающее значение для планирования лечения и прогноза. Современным перспективным методом лучевой диагностики области голеностопного сустава и стопы ввиду возможности создания осевого давления на обе стопы является методика функционального исследования – мультиспиральная компьютерная томография (МСКТ) с нагрузкой, разработанная в 2016 г. на базе Российско-японского научно-образовательного центра визуализации Первого МГМУ им. И. М. Сеченова [13].

Проведенный в рамках исследования анализ данных опубликованных ранее исследований, посвященных сравнительной характеристике рентгенографии и МСКТ с нагрузкой, выявил ряд закономерностей и перспектив применения МСКТ с нагрузкой в диагностике приобретенного плоскостопия. Так, было доказано, что МСКТ с нагрузкой может обеспечить функциональное обследование в горизонтальном положении стопы, которое напрямую отражает работу последней в состоянии стоя и показывает наличие морфологических изменений в костно-суставной системе [14]. Исследование А. Barg показало, что рентгенограмма с нагрузкой подвержена техническим ошибкам, таким как ротационное смещение, что приводит к неточным измерениям патологических деформаций [15]. М. Kido и соавт. сообщили о различиях в положении таранной, ладьевидной и пяточной костей на данных МСКТ по сравнению с данными КТ без нагрузки [16]. М. S. Conti и S. J. Ellis предположили, что МСКТ может лучше показать истинную ориентацию костей и суставов во время нагрузки по сравнению со стандартной КТ (без нагрузки) [14]. Broos M. et al. на основе эксперимента предположили, что между 2D и 3D измерениями (рентгенография и МСКТ с нагрузкой) существует небольшая качественная разница, хотя и с имеющимися количественными различиями. Однако вариации в 3D параметрах, как правило, были менее выраженными, чем в 2D параметрах. Это позволило авторам сделать вывод о том, что результаты МСКТ с нагрузкой измерений являются более точными [17].

В исследовании А. С. Беляева и соавт. было выявлено отсутствие статистически значимых различий между показателями средних величин отдельных угловых измерений (угла продольного свода, угла наклона пяточной кости) в двух группах (рентгенография и

МСКТ с нагрузкой). Базируясь на результатах проведенного исследования, авторы рекомендуют МСКТ с нагрузкой в качестве достоверной методики с целью оценки угловых показателей стопы и дальнейшего определения степени ее деформации [18]. Данное исследование отличается большей выборкой (109 пациентов, 218 стоп), в котором применены: Bland – Altman анализ, расчет внутриклассового коэффициента корреляции (ICC) и учет кластеризации стоп с помощью смешанных моделей.

Цель исследования – провести сравнительный анализ угловых параметров стопы, измеренных с помощью рентгенографии с нагрузкой и мультиспиральной компьютерной томографии (МСКТ) с нагрузкой, у пациентов с приобретенным плоскостопием взрослых.

Материал и методы исследования

В проспективное исследование включено 109 пациентов (218 стоп) с диагнозом приобретенного плоскостопия взрослых. Среди них 71 женщина (65,1 %) и 38 мужчин (34,9 %). Средний возраст составил $48,3 \pm 11,2$ года (диапазон 22–71 год). Средний индекс массы тела (ИМТ) – $29,7 \pm 4,5$ кг/м². Деформация была двусторонней у 109 пациентов (100 %). Стадирование проводили по классификации Johnson & Strom в модификации Myerson: II стадия – 74 пациента (67,9 %), III стадия – 28 (25,7 %), IV стадия – 7 (6,4 %). Сопутствующий hallux valgus (угол HVA >15 градуса) выявлен в 156 стопах (71,6 %).

Критерии включения: возраст 18–75 лет, подтвержденный диагноз приобретенного плоскостопия взрослых II–IV стадии, наличие двух методов инструментальной диагностики: рентгенография с нагрузкой и МСКТ с нагрузкой.

Критерии исключения: ранее перенесенные операции на стопе, травмы в анамнезе с нарушением анатомии костей, ревматоидный артрит, нейропатии, сопутствующие патологии, исключающие способность провести исследования.

Всем участникам выполнены два диагностических исследования: рентгенография стоп в прямой и боковой проекциях с нагрузкой (рис. 1, А), а также МСКТ стоп с нагрузкой (рис. 1, В, 2). Оценивались ключевые угловые параметры, характеризующие степень деформации: угол вальгусного отклонения первого пальца (hallux valgus angle, HVA), межплюсневый угол (intermetatarsal angle, IMA) и угол продольного свода стопы.

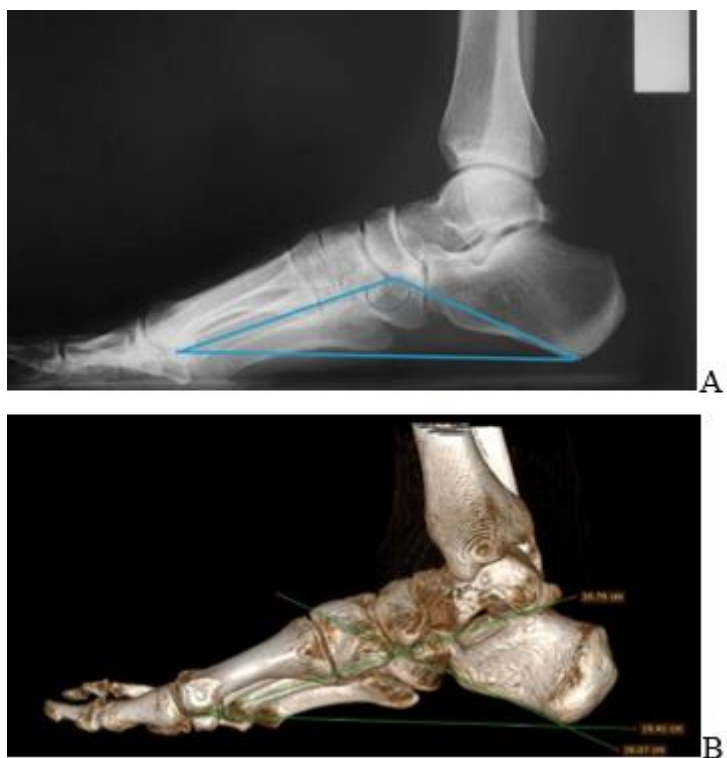


Рис. 1. Измерение угла свода стопы. А – Рентгенограмма стопы в боковой проекции. В – МСКТ стопы с нагрузкой. Сагиттальная проекция.

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

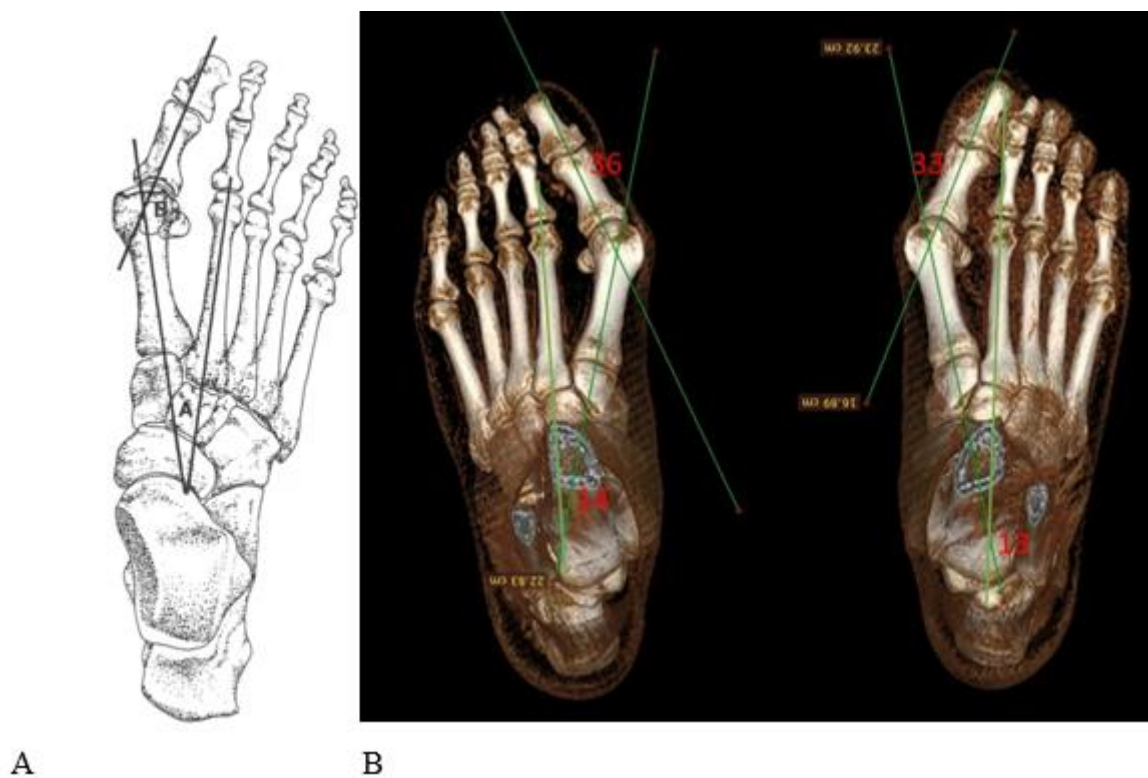




Рис. 2. Схема измерения углов вальгусного отклонения первого пальца стопы и рассчитанные углы между первой и второй плюсневыми костями. Прямая проекция.

А. Схематичное изображение (на схеме:

А – угол вальгусного отклонения первого пальца,

В – межплюсневый угол). В – изображение МСКТ с нагрузкой.

С – рассчитанные углы на рентгенограмме с нагрузкой.

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Все пациенты подписали информированное согласие на участие в исследовании и обработку обезличенных персональных данных.

Статистический анализ проводился с использованием программного пакета Statistica 10.0 (StatSoft Inc., USA) и R (версия 4.2). Количественные переменные проверены на нормальность распределения с помощью критерия Шапиро – Уилка. Для сравнения угловых параметров, измеренных двумя методами (рентгенография с нагрузкой и МСКТ с нагрузкой), использовали критерий Уилкоксона для связанных выборок, так как распределение разностей отличалось от нормального. Для оценки степени согласия между двумя методами дополнительно проведен Bland – Altman анализ с расчетом средней разности (bias) и 95 % пределов согласия (95 % LoA), а также рассчитан внутриклассовый коэффициент корреляции (ICC) с использованием двухфакторной модели абсолютного согласия. Для учета того, что две стопы одного пациента не являются независимыми наблюдениями, применена линейная смешанная модель с фиксированным фактором метода измерения и случайным эффектом для пациента. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты исследования и их обсуждение

Для каждого из показателей были изучены результаты распределения значений угловых показателей, полученные двумя методами (МСКТ с нагрузкой и рентгенографии с нагрузкой). Данные о характеристиках различий в измерениях, полученных с использованием двух различных диагностических методов исследования, представлены в табл. 1.

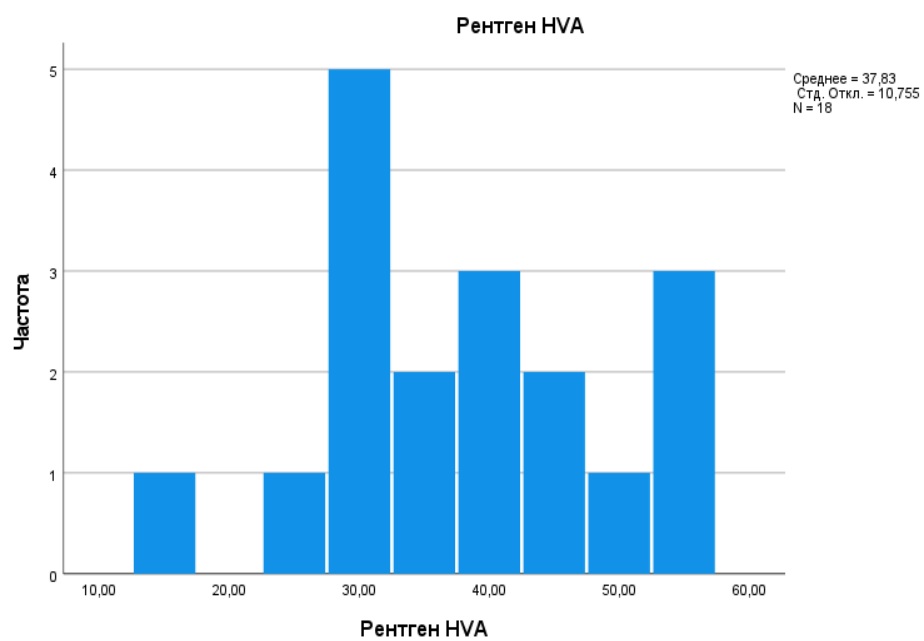
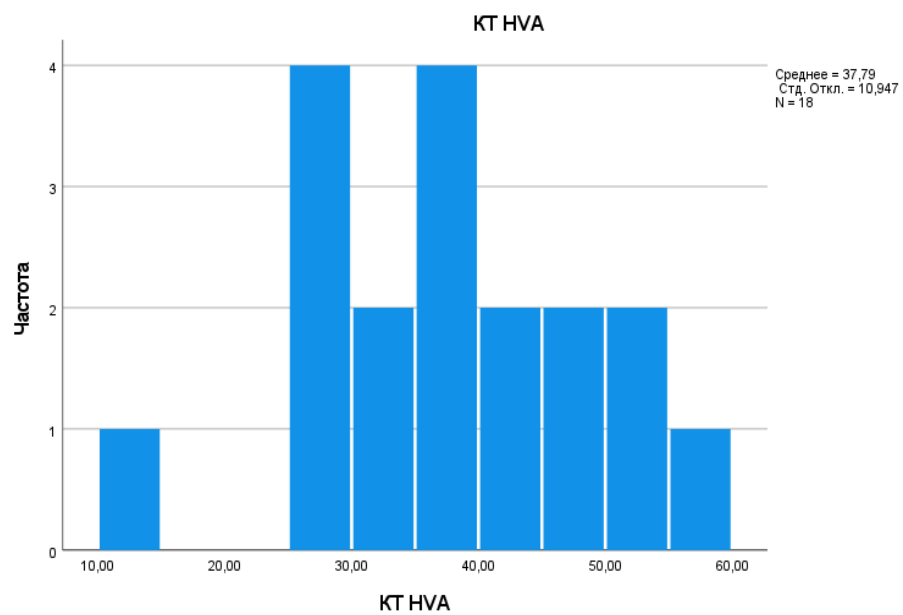
Таблица 1

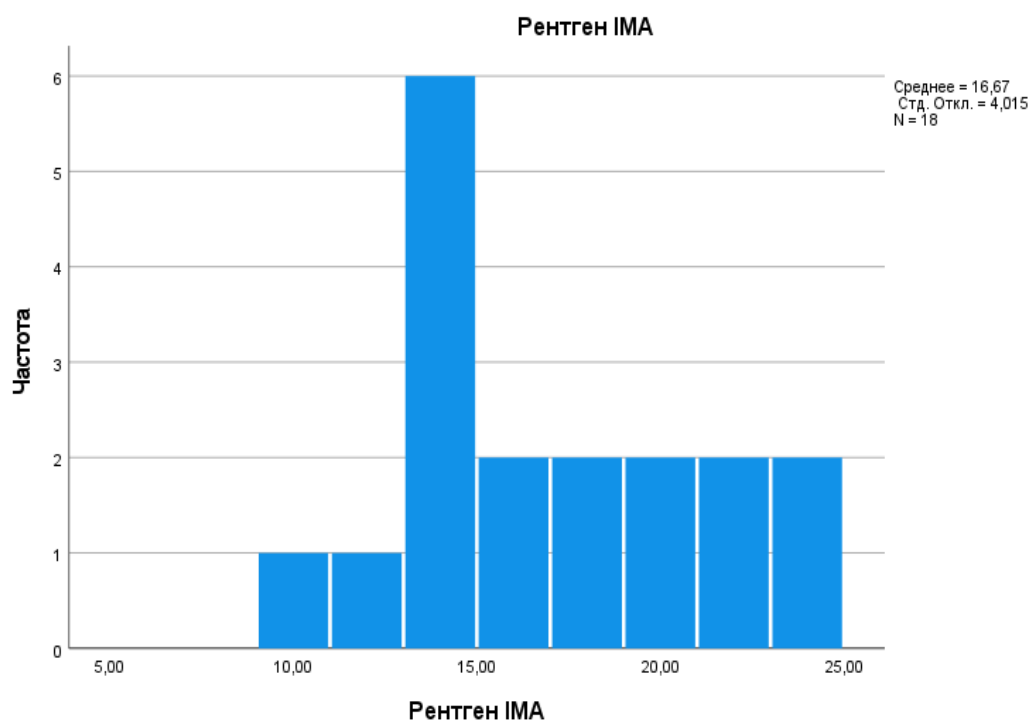
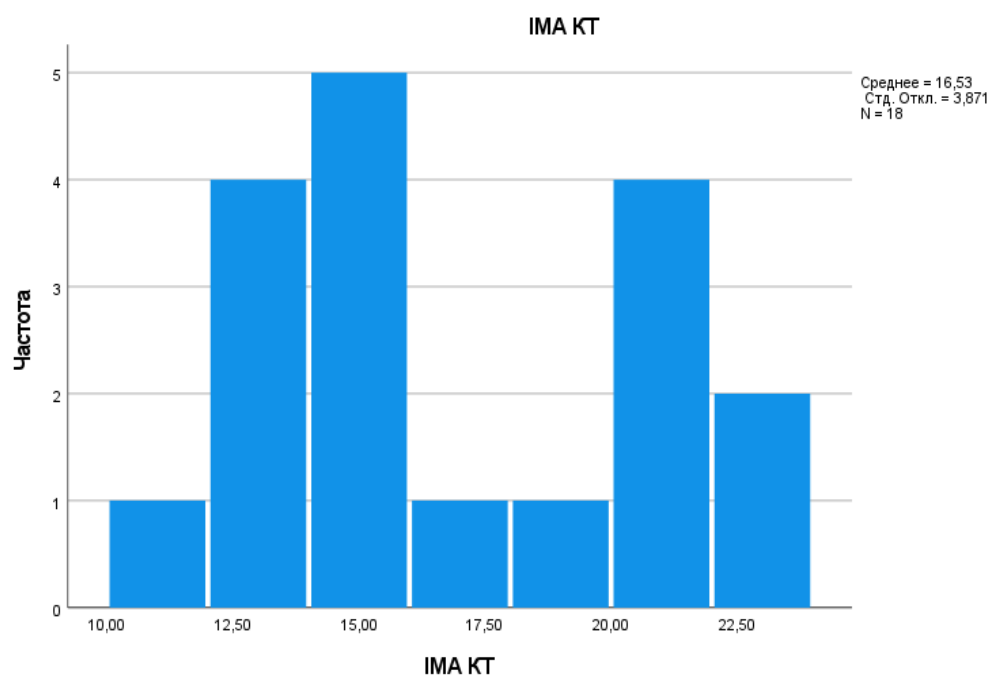
Описательные статистики показателей
в выборках МСКТ с нагрузкой и рентгенографии с нагрузкой

Показатель	Минимум	Максимум	Среднее	СКО	Медиана	Процентили	
						25	75
МСКТ НВА	14,70	55,00	37,79	10,94	37,2	29,40	47,25
Рентген НВА	15,00	54,00	37,83	10,75	37,50	29,75	47,25
МСКТ IMA	10,00	23,00	16,52	3,87	15,15	13,15	20,25
Рентген IMA	10,00	23,00	16,66	4,01	15,00	14,00	20,25
МСКТ свод стопы	137,00	154,50	144,23	4,94	142,65	141,00	147,00
Рентген свод стопы	137,00	154,00	144,55	4,94	143,00	141,75	148,00
Примечание: СКО – стандартное отклонение среднего							

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования

Для всех исследованных в работе показателей были построены гистограммы и ящичные диаграммы распределения признаков (рис. 3 и 4).





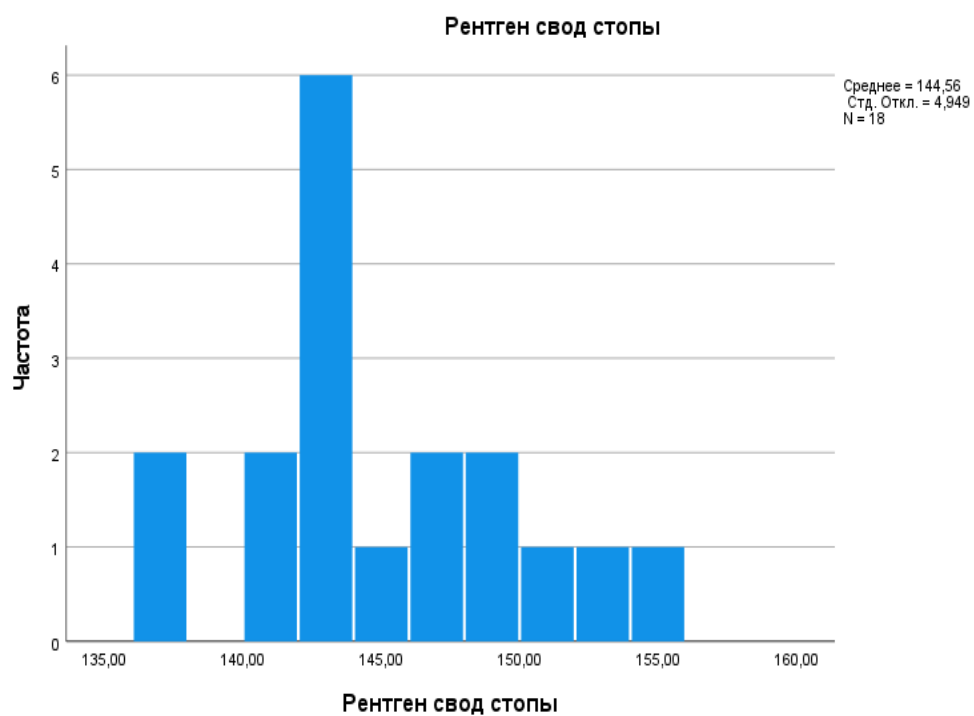
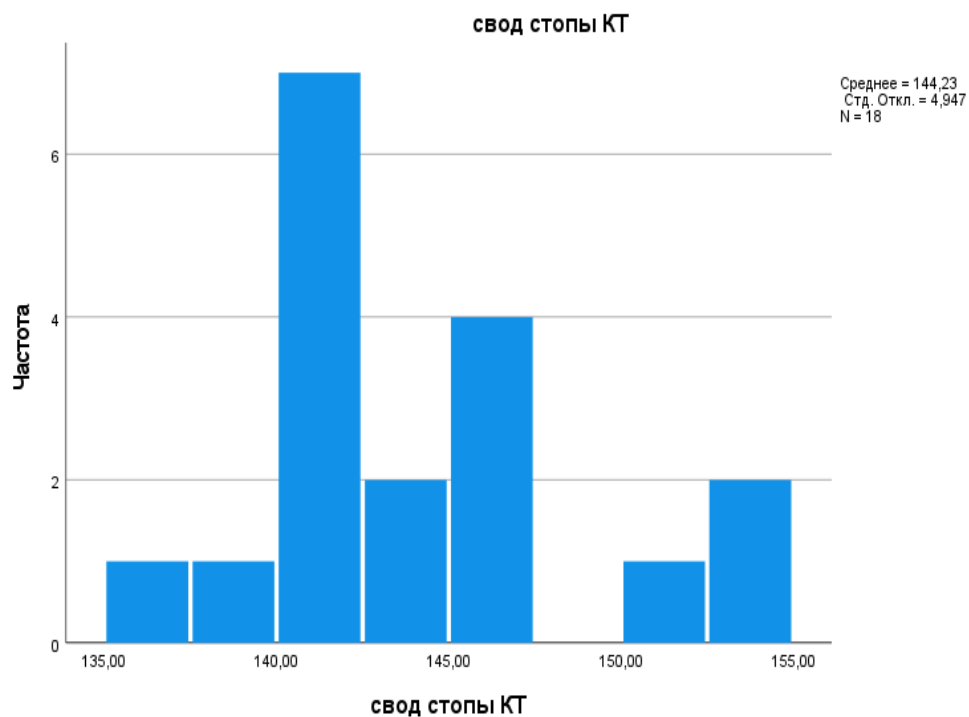


Рис. 3. Гистограммы показателей HVA, IMA, угла свода стопы в выборках МСКТ с нагрузкой и рентгенографии с нагрузкой.

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

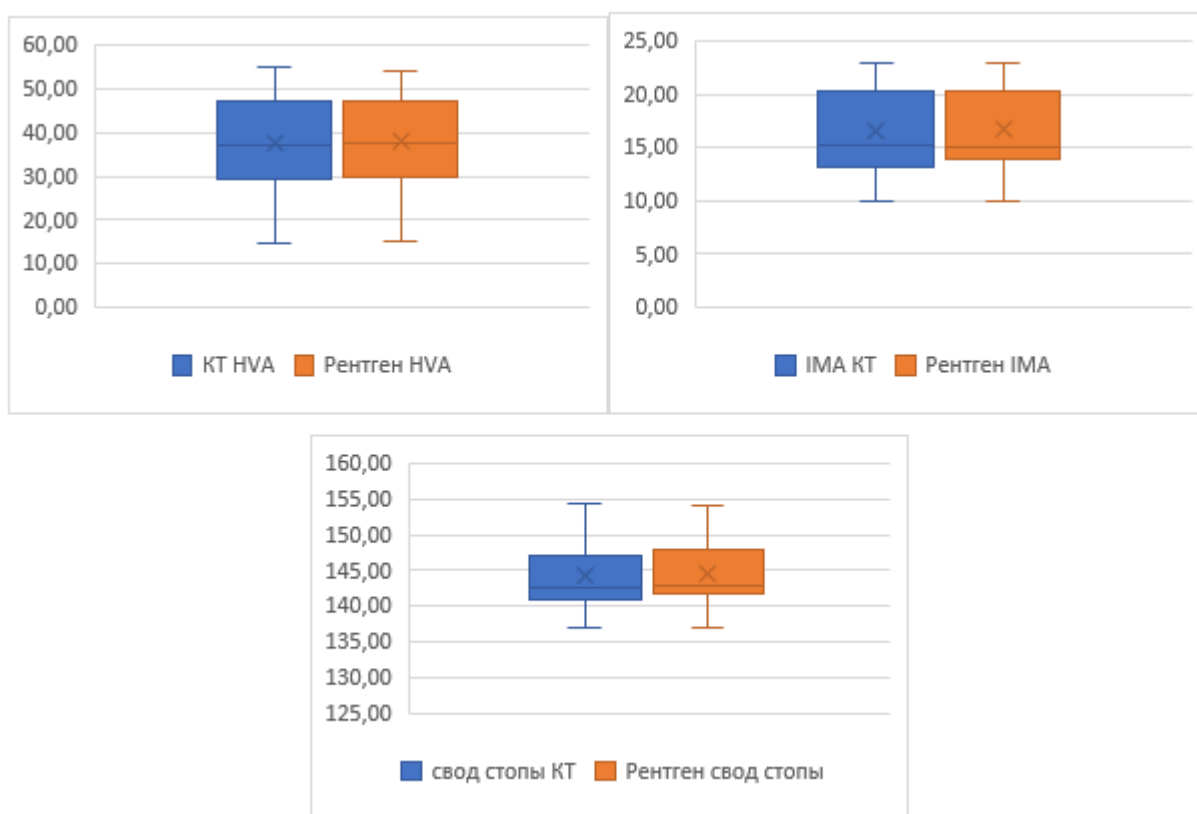


Рис. 4. Ящичные диаграммы показателей HVA, IMA, угла свода стопы в выборках МСКТ с нагрузкой и рентгенографии с нагрузкой.

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

При сравнении парных измерений с помощью критерия Уилкоксона для связанных выборок не выявлено статистически значимых различий между рентгенографией с нагрузкой и МСКТ с нагрузкой: для HVA $p = 0,68$, для IMA $p = 0,54$, для угла свода стопы $p = 0,29$.

Для оценки степени согласия между двумя методами на индивидуальном уровне проведен Bland – Altman анализ. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Bland – Altman анализ согласия между МСКТ с нагрузкой и рентгенографией с нагрузкой

Параметр	Средняя разность (bias) (градусы)	95 % пределы согласия (LoA) (градусы)
HVA	-0,2	от -2,8 до +2,4
IMA	-0,2	от -2,6 до +2,2
Угол свода	-0,3	от -3,8 до +3,2

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования. Bias – средняя разность (значение МСКТ минус значение рентгенографии); 95 % LoA – пределы согласия, рассчитанные как $\text{bias} \pm 1,96 \times \text{стандартное отклонение разностей}$. Отрицательный bias указывает на чуть более низкие значения при МСКТ по сравнению с рентгенографией.

Полученные узкие пределы согласия свидетельствуют о хорошей сопоставимости методов на уровне индивидуальных измерений. Аналогичные результаты ранее получены и рядом других исследователей [18, 19].

Заключение

Трехмерная природа деформации приобретенного плоскостопия у взрослых может быть сложной для характеристики с помощью рентгенограмм и КТ без нагрузки. Итоговые результаты настоящего исследования и данные, полученные ранее рядом авторов, свидетельствуют о том, что МСКТ с нагрузкой не показала статистически значимых отличий по качеству полученных данных оценки НВА, ИМА, угла свода стопы с рентгенографией с нагрузкой и имеет большее преимущество перед КТ без нагрузки, так как позволяет создать физиологические условия осевой нагрузки на нижние конечности пациента, выполняемые при рентгенологическом исследовании, а также полноценно использовать преимущества 3D-оценки стопы с помощью МСКТ с более точным позиционированием основных точек угловых параметров стопы.

Список литературы

1. Arain A., Harrington M. C., Rosenbaum A. J. Progressive Collapsing Foot Deformity // StatPearls Publishing. 2026. [Электронный ресурс]. URL: NCBI Bookshelf (дата обращения: 14.08.2026).
2. Mueller G., Frosch K. H., Barg A., et al. Impact of the medial displacement calcaneal osteotomy on foot biomechanics: a systematic literature review // Arch. Orthop. Trauma Surg. 2024. Vol. 144. P. 1955–1967. DOI: 10.1007/s00402-024-05267-9.
3. Malden S., Gillespie J., Hughes A., Gibson A. M., Farooq A., Martin A., Summerbell C., Reilly J. J. Obesity in young children and its relationship with diagnosis of asthma, vitamin D deficiency, iron deficiency, specific allergies and flat-footedness: A systematic review and meta-analysis // Obes. Rev. 2021. Vol. 22. Is. 3. P. e13129. DOI: 10.1111/obr.13129.
4. Бобров Д. С., Ченский А. Д., Слиняков Л. Ю., Якимов Л. А., Хурцилава Н. Д. Причины болевого синдрома у пациентов с приобретенным плоскостопием // Кафедра травматологии и ортопедии. 2015. № 2 (14). С. 8–11. EDN: UNACNL.
5. Bock P., Pittermann M., Chraim M., Rois S. The inter- and intraobserver reliability for the radiological parameters of flatfoot, before and after surgery // Bone Joint J. 2018. Vol. 100-B. Is. 5. P. 596–602. DOI: 10.1302/0301-620X.100B5.BJJ-2017-1279.
6. Серова Н. С., Беляев А. С., Бобров Д. С., Терновой К. С. Современная рентгенологическая диагностика приобретенного плоскостопия взрослых // Вестник

рентгенологии и радиологии. 2017. Т. 98 (5). С. 275–280. DOI: 10.20862/0042-4676-2017-98-5-275-280.

7. Lau B. C., Allahabadi S., Palanca A., Oji D. E. Understanding Radiographic Measurements Used in Foot and Ankle Surgery // J. Am. Acad. Orthop. Surg. 2022. Vol. 30. Is. 2. P. e139–e154. DOI: 10.5435/JAAOS-D-20-00189.

8. Flores D. V., Mejía Gómez C., Fernández Hernando M., Davis M. A., Pathria M. N. Adult Acquired Flatfoot Deformity: Anatomy, Biomechanics, Staging, and Imaging Findings // Radiographics. 2019. Vol. 39. Is. 5. P. 1437–1460. DOI: 10.1148/rg.2019190046.

9. Koca T. T., Göğebakan H., Koçyiğit B. F., Nacitarhan V., Yildir C. Z. Foot functions in ankylosing spondylitis // Clin. Rheumatol. 2019. Vol. 38. Is. 4. P. 1083–1088. DOI: 10.1007/s10067-018-4386-6.

10. Kang S., Charlton T. P., Thordarson D. B. Lateral column length in adult flatfoot deformity // Foot Ankle Int. 2013. Vol. 34. Is. 3. P. 392–397. DOI: 10.1177/1071100712465738.

11. Shakoор D., de Cesar Netto C., Thawait G. K., Ellis S. J., Richter M., Schon L. C., International Weight Bearing CT Society, Demehri S. Weight-bearing radiographs and cone-beam computed tomography examinations in adult acquired flatfoot deformity // Foot Ankle Surg. 2021. Vol. 27. Is. 2. P. 201–206. DOI: 10.1016/j.fas.2020.04.011.

12. Meyr A. J., Wagoner M. R. Descriptive Quantitative Analysis of Rearfoot Alignment Radiographic Parameters // J. Foot Ankle Surg. 2015. Vol. 54. Is. 5. P. 860–871. DOI: 10.1053/j.jfas.2015.02.011.

13. Терновой С. К., Серова Н. С., Беляев А. С., Бобров Д. С., Терновой К. С. Методика функциональной мультиспиральной компьютерной томографии в диагностике плоскостопия взрослых // REJR. 2017. Т. 7 (1). С. 94–100. DOI: 10.21569/2222-7415-2017-7-1-94-100.

14. Conti M. S., Ellis S. J. Weight-bearing CT Scans in Foot and Ankle Surgery // J. Am. Acad. Orthop. Surg. 2020. Vol. 28. Is. 14. P. e595–e603. DOI: 10.5435/JAAOS-D-19-00700.

15. Barg A., Amendola R. L., Henninger H. B., Kapron A. L., Saltzman C. L., Anderson A. E. Influence of Ankle Position and Radiographic Projection Angle on Measurement of Supramalleolar Alignment on the Anteroposterior and Hindfoot Alignment Views // Foot Ankle Int. 2015. Vol. 36. Is. 11. P. 1352–1361. DOI: 10.1177/1071100715591091.

16. Kido M., Ikoma K., Imai K., Tokunaga D., Inoue N., Kubo T. Load response of the medial longitudinal arch in patients with flatfoot deformity: in vivo 3D study // Clin. Biomech. 2013. Vol. 28. Is. 5. P. 568–573. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2013.04.004.

17. Broos M., Berardo S., Dobbe J. G. G., Maas M., Streekstra G. J., Wellenberg R. H. H. Geometric 3D analyses of the foot and ankle using weight-bearing and non weight-bearing cone-

beam CT images: The new standard? // Eur. J. Radiol. 2021. Vol. 138. P. 109674. DOI: 10.1016/j.ejrad.2021.109674.

18. Беляев А. С., Серова Н. С., Бобров Д. С. Рентгенография стопы с нагрузкой и фМСКТ стопы с нагрузкой: сравнительный анализ стандартных угловых показателей у пациентов с приобретенным плоскостопием взрослых // Диагностическая и интервенционная радиология. 2019. Т. 13 (3). С. 36–44. DOI: 10.25512/DIR.2019.13.3.05.

19. Серова Н. С., Беляев А. С., Бобров Д. С., Бабкова А. А., Карев А. С. Роль функциональной МСКТ с нагрузкой в диагностике эластичной плосковальгусной деформации стопы // REJR. 2019. Т. 9 (2). С. 301–314. DOI: 10.21569/2222-7415-2019-9-2-301-314.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.