СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИЗМЕРЕНИЙ ВРАЧА-РЕНТГЕНОЛОГА И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ ЦИФРОВОЙ РЕНТГЕНОМЕТРИИ КОКСАРТРОЗА: ШИРИНА СУСТАВНОЙ ЩЕЛИ И ПЛОТНОСТЬ КОСТИ

Автор: Рашидова Гулрухсорбегим Саидкамол кизи, магистрант по специальности «Медицинская радиология», Ургенчский государственный медицинский институт.

Научный руководитель: Айтимова Гульсанам Юсуповна, PhD, старший преподаватель, Ургенчский государственный медицинский институт.

Аннотация. В статье проводится сравнительный анализ рентгенометрических измерений, выполненных врачом-рентгенологом и системой искусственного интеллекта (ИИ) на цифровых рентгенограммах тазобедренных суставов у пациентов с коксартрозом. Оценивались два количественных показателя — минимальная ширина суставной щели и рентгеновская плотность субхондральной костной ткани. Согласованность измерений определялась с помощью коэффициента внутриклассовой корреляции и анализа Бланда–Альтмана. Показано, что ИИ обеспечивает высокую согласованность с врачом при измерении ширины суставной щели и хорошую — при оценке плотности кости, а также более высокую воспроизводимость и сокращение времени анализа. Обоснованы условия применения ИИ в качестве «второго читателя» под контролем рентгенолога.

Ключевые слова: коксартроз, цифровая рентгенометрия, искусственный интеллект, ширина суставной щели, рентгеновская плотность кости, согласованность измерений, анализ Бланда–Альтмана.

Введение. Остеоартроз тазобедренного сустава (коксартроз) является одной из ведущих причин хронической боли, ограничения подвижности и

инвалидизации у лиц старше 45 лет. По данным отечественных эпидемиологических исследований, остеоартроз является наиболее распространённым заболеванием суставов, а коксартроз отличается неуклонным прогрессированием и высокой частотой утраты трудоспособности [8, 9]. Основным методом его диагностики и оценки прогрессирования остаётся стандартная рентгенография, а ключевыми количественными признаками — сужение суставной щели и изменения субхондральной костной ткани.

Ручные измерения врача-рентгенолога зависят от его опыта, качества снимка и выбора точек измерения, что обусловливает внутри- и межэкспертную вариабельность. Алгоритмы ИИ на основе сверточных нейронных сетей позволяют автоматически сегментировать суставные поверхности и рассчитывать рентгенометрические параметры. Однако внедрение таких систем в клиническую практику требует оценки согласованности их результатов с измерениями специалиста. Цель исследования — провести сравнительный анализ измерений ширины суставной щели и рентгеновской плотности кости, выполненных врачом-рентгенологом и системой ИИ, на цифровых рентгенограммах тазобедренных суставов при коксартрозе.

Обзор литературы. Классическая рентгенологическая оценка остеоартроза основана на шкале J.H.Kellgren и J.S.Lawrence, в которой стадия определяется по сужению суставной щели, остеофитам, субхондральному склерозу и деформации суставных поверхностей [1]. R.D.Altman и G.E.Gold предложили атлас отдельных рентгенологических признаков, позволяющий оценивать каждый признак раздельно и тем самым повысить воспроизводимость оценки [2].

В отечественной рентгенологии широко применяется классификация Н.С.Косинской, выделяющая три стадии дегенеративно-дистрофического поражения суставов в зависимости от степени сужения суставной щели,

выраженности остеофитов и субхондрального склероза [10]. Методические основы рентгенометрии суставов и оценки рентгеновской плотности костной ткани изложены в руководстве Л.Д.Линденбратена и И.П.Королюка [11]. Л.И.Алексеева и соавторы подчёркивают, что рентгенография остаётся основным методом подтверждения диагноза и контроля прогрессирования остеоартрита, а сужение суставной щели — его ключевым рентгенологическим признаком [9].

Для автоматического анализа медицинских изображений широко используется архитектура U-Net, предложенная O.Ronneberger и соавторами для сегментации биомедицинских изображений [5]. A.Tiulpin и соавторы показали, что глубокая сверточная нейронная сеть способна автоматически определять стадию остеоартроза коленного сустава по Kellgren–Lawrence на обычных рентгенограммах [6]. C.E.von Schacky и соавторы разработали многозадачную модель глубокого обучения для оценки отдельных признаков остеоартроза тазобедренного сустава, точность которой оказалась сопоставимой с оценкой рентгенологов [7].

В России масштабная проверка систем ИИ в лучевой диагностике проводится в рамках Московского эксперимента по применению технологий компьютерного зрения. В монографии под редакцией Ю.А.Васильева и А.В.Владзимирского обобщены результаты его первого этапа и показано, что точность алгоритмов в реальной клинической практике зависит от качества исходных изображений и требует постоянного мониторинга [12]. С.П.Морозов и соавторы разработали методику клинических испытаний программного обеспечения на основе интеллектуальных технологий, предусматривающую сопоставление результатов алгоритма с заключением врача-рентгенолога как эталоном [13]. Именно такой подход положен в основу настоящего исследования.

Для сравнения двух методов измерения рекомендуется не ограничиваться коэффициентом корреляции, а применять анализ согласия по J.M.Bland и D.G.Altman [3], а также коэффициент внутриклассовой корреляции с интерпретацией по T.K.Koo и M.Y.Li [4]. Анализ показывает, что большинство работ посвящено автоматической классификации стадий, тогда как количественное сравнение отдельных рентгенометрических параметров — ширины суставной щели и плотности кости — с измерениями врача изучено недостаточно.

Методология исследования. Ретроспективно проанализированы цифровые рентгенограммы тазобедренных суставов в прямой передне-задней проекции 120 пациентов (240 суставов) в возрасте 45–78 лет с коксартрозом I–IV стадии по Kellgren–Lawrence. Снимки получены в стандартизированном положении (ротация стоп внутрь на 15–20°, фокусное расстояние 110 см).

Ширина суставной щели (ШСЩ) измерялась в латеральной, верхней (центральной) и медиальной точках с определением минимального значения (мм). Рентгеновская плотность кости оценивалась в зонах интереса (ROI) субхондральной части головки бедренной кости и крыши вертлужной впадины в условных единицах шкалы серого (у.е.) с калибровкой по эталонному клину. Врач-рентгенолог со стажем более 10 лет выполнял измерения вручную в DICOM-просмотрщике дважды с интервалом 2 недели. Система ИИ на основе сверточной нейронной сети архитектуры U-Net выполняла автоматическую сегментацию и расчёт тех же параметров.

Согласованность оценивалась с помощью коэффициента внутриклассовой корреляции (ICC), коэффициента корреляции Пирсона (r) и анализа Бланда–Альтмана (систематическое смещение и 95% пределы согласия). Различия считались статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение. Сравнение средних значений и показателей согласованности измерений врача и ИИ представлено в таблице 1.

Таблица 1

Согласованность измерений врача-рентгенолога и ИИ

Показатель	Врач (M ± SD)	ИИ (M ± SD)	ICC (95% ДИ)	Смещение (95% пределы согласия)
Минимальная ШСЩ, мм	2,41 ± 1,12	2,36 ± 1,09	0,94 (0,92–0,96)	+0,05 (−0,38…+0,48)
Плотность головки бедренной кости, у.е.	142,6 ± 18,4	139,8 ± 17,1	0,83 (0,78–0,87)	+2,8 (−16,2…+21,8)
Плотность крыши вертлужной впадины, у.е.	151,3 ± 20,2	148,9 ± 19,6	0,81 (0,76–0,85)	+2,4 (−19,1…+23,9)

Как видно из таблицы 1, по ШСЩ получена высокая согласованность, а статистически значимого систематического различия не выявлено ($p = 0,18$). Наибольшие расхождения отмечены при IV стадии (ШСЩ менее 1 мм), а также при выраженных краевых остеофитах и кистовидной перестройке, когда границы суставных поверхностей определяются неоднозначно. Это согласуется с данными о том, что точность автоматической оценки снижается при выраженных деструктивных изменениях [7].

Согласованность по плотности кости оказалась ниже. ИИ давал несколько меньшие значения в зонах субхондрального склероза, что связано с различием в выборе границ ROI: врач ориентируется на визуально наиболее плотный участок, тогда как алгоритм использует стандартизированную зону фиксированного размера. Следовательно, для этого показателя решающее значение имеют единые правила размещения ROI и калибровка изображения.

Показатели воспроизводимости и затрат времени приведены в таблице 2.

Таблица 2

Воспроизводимость и время анализа

Показатель	Врач-рентгенолог	ИИ
Повторяемость ШСЩ, ICC	0,91	0,99
Повторяемость плотности кости, ICC	0,85	0,99
Среднее время анализа одного снимка	5,2 мин	менее 20 с

Таблица 2 показывает, что ИИ обеспечивает практически полную воспроизводимость и сокращает время анализа более чем в 15 раз. Это особенно важно при динамическом наблюдении, когда изменение ШСЩ за год может составлять доли миллиметра и сопоставимо с вариабельностью ручных измерений. Вместе с тем высокая повторяемость не означает правильности: алгоритм воспроизводит и собственные систематические ошибки, поэтому результаты ИИ при IV стадии требуют обязательной проверки врачом.

Заключение. Автоматическое измерение ширины суставной щели с помощью ИИ обладает высокой согласованностью с измерениями врача-рентгенолога (ICC 0,94) и может применяться для количественной оценки коксартроза I–III стадии. Согласованность по рентгеновской плотности кости ниже (ICC 0,81–0,83) и зависит от стандартизации зон интереса и калибровки изображения. ИИ обеспечивает более высокую воспроизводимость и значительно сокращает время анализа, однако при IV стадии и выраженных деструктивных изменениях его результаты требуют верификации. Оптимальной представляется модель «ИИ как второй читатель» под контролем рентгенолога.

В дальнейшем планируется проверить полученные результаты на выборке из нескольких медицинских учреждений и сопоставить рентгенометрическую

плотность кости с данными денситометрии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kellgren J.H., Lawrence J.S. «Radiological assessment of osteo-arthrosis» // Annals of the Rheumatic Diseases. – 1957. – Vol. 16, No. 4. – P. 494–502.
2. Altman R.D., Gold G.E. «Atlas of individual radiographic features in osteoarthritis, revised» // Osteoarthritis and Cartilage. – 2007. – Vol. 15, Suppl. A. – P. A1–A56.
3. Bland J.M., Altman D.G. «Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement» // The Lancet. – 1986. – Vol. 1, No. 8476. – P. 307–310.
4. Koo T.K., Li M.Y. «A guideline of selecting and reporting intraclass correlation coefficients for reliability research» // Journal of Chiropractic Medicine. – 2016. – Vol. 15, No. 2. – P. 155–163.
5. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. «U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation» // MICCAI 2015. Lecture Notes in Computer Science. – 2015. – Vol. 9351. – P. 234–241.
6. Tiulpin A., Thevenot J., Rahtu E., Lehenkari P., Saarakkala S. «Automatic knee osteoarthritis diagnosis from plain radiographs: a deep learning-based approach» // Scientific Reports. – 2018. – Vol. 8. – Article 1727.
7. von Schacky C.E., Sohn J.H., Liu F. et al. «Development and validation of a multitask deep learning model for severity grading of hip osteoarthritis features on radiographs» // Radiology. – 2020. – Vol. 295, No. 1. – P. 136–145.
8. Беневоленская Л.И., Бржезовский М.М. Эпидемиология ревматических болезней. – М.: Медицина, 1988.
9. Алексеева Л.И., Таскина Е.А., Кашеварова Н.Г. «Остеоартрит: эпидемиология, классификация, факторы риска и прогрессирования, клиника, диагностика, лечение» // Современная ревматология. – 2019. – Т. 13,

№ 2. – С. 9–21.

10. Косинская Н.С. Дегенеративно-дистрофические поражения костно-суставного аппарата. – Л.: Медгиз, 1961. – 196 с.
11. Линденбратен Л.Д., Королюк И.П. Медицинская радиология (основы лучевой диагностики и лучевой терапии). – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Медицина, 2000. – 672 с.
12. Компьютерное зрение в лучевой диагностике: первый этап Московского эксперимента / под ред. Ю.А.Васильева, А.В.Владзимирского. – М.: Издательские решения, 2022.
13. Морозов С.П., Владзимирский А.В., Кляшторный В.Г. и др. Клинические испытания программного обеспечения на основе интеллектуальных технологий (лучевая диагностика): методические рекомендации. – М.: ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», 2019.