РАЗРАБОТКА И КЛИНИЧЕСКАЯ АПРОБАЦИЯ ИИ-СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ КОСТНОГО ВОЗРАСТА У ДЕТЕЙ В УЗБЕКИСТАНЕ

Каланходжаева Ш.Б.[1], Алимова Н.У.[2], Акбаров М.Х.[3]

[1] Учебный центр, Республиканский специализированный научно-практический медицинский центр эндокринологии им. акад. Е.Х. Туракулова, Ташкент, Узбекистан

[2] Лаборатория детской эндокринологии, Республиканский специализированный научно-практический медицинский центр эндокринологии им. акад. Е.Х. Туракулова, Ташкент, Узбекистан

[3] Учебный центр, Республиканский специализированный научно-практический медицинский центр эндокринологии им. акад. Е.Х. Туракулова, Ташкент, Узбекистан

Аннотация

Определение костного возраста (КВ) — один из важнейших диагностических инструментов в педиатрии, позволяющий выявлять расхождение между хронологическим и биологическим возрастом ребёнка. Точная и своевременная оценка КВ определяет выбор заместительной гормональной терапии, её дозирование и прогноз конечного роста; систематическая ошибка в 6–12 месяцев способна существенно исказить картину динамики лечения. Данные о КВ важны также в ортопедии — при планировании корсетотерапии и хирургического лечения идиопатического сколиоза, эпифизиодеза при разнице длины конечностей — и в общей педиатрии для раннего выявления хронических заболеваний, влияющих на рост.

«Золотым стандартом» остаётся рентгенография кисти с оценкой по атласу Гроулиха–Пайла (G&P) либо по методу Таннера–Уайтхауса (TW2/TW3). Оба метода трудоёмки, субъективны и опираются на референсные выборки, нерелевантные современной, в том числе узбекской, популяции. Зарубежные коммерческие системы автоматической оценки КВ (BoneXpert, VUNO Med-BoneAge, Gleamer BoneAge) демонстрируют высокую точность, однако их применение в Узбекистане ограничено высокой стоимостью лицензий, зависимостью от иностранной инфраструктуры обработки данных, несоответствием требованиям локализации персональных данных и отсутствием адаптации к местным протоколам укладки пациента.

Цель исследования

Разработать и клинически апробировать отечественную автоматизированную систему определения костного возраста у детей на основе глубокого обучения, адаптированную к узбекской популяции и условиям локальных лечебных учреждений.

Материалы и методы

Исследование — ретроспективное, многоцентровое, выполнено на базе Республиканского специализированного научно-практического медицинского центра эндокринологии им. акад. Е.Х. Туракулова (Ташкент). Обучающая выборка сформирована из двух источников: международного анонимизированного набора RSNA Pediatric Bone Age Challenge (12 810 рентгенограмм кисти детей 0–19 лет) и 350 верифицированных клинических снимков отделения лучевой диагностики Центра, для каждого из которых КВ был задан в виде диапазона (min–max).

Разработано автономное настольное приложение (Python 3.11, PyQt 5.15.11), не требующее сетевого или облачного подключения. Обработка изображения проходит четыре этапа: 1) детекция области кисти сетью YOLOv8n (среднее время 9,8 мс); 2) регрессия костного возраста на основе EfficientNet-B0 с учётом пола пациента (среднее время 12,2 мс); 3) дообучение модели на 350 локальных клинических изображениях с использованием специальной функции потерь, учитывающей интервальный характер разметки; 4) визуализация результата и формирование структурированного медицинского заключения.

Результаты

Таблица 1. Сравнение методов оценки костного возраста

Критерий	**Метод G&P**	**Метод TW3**	**Разработанная ИИ-система**
Время оценки	3–5 мин	10–20 мин	≈ 22 мс
Межэкспертная вариабельность (MAE)	12–18 мес.	~12 мес.	5,6–6,1 мес.
Адаптация к узбекской популяции	Нет	Частично	Да (дообучение на локальных данных)
Автоматизация	Нет	Нет	Полная
Воспроизводимость	Низкая	Средняя	Высокая (детерминированная)

Дообучение модели на локальных клинических данных значимо снизило ошибку по сравнению с предобучением на международном наборе RSNA (см. табл. 2).

Таблица 2. Средняя абсолютная ошибка (MAE) до и после дообучения модели

Этап	**MAE (валидация), мес.**	**MAE (обучение), мес.**	**Примечание**

Предобучение (RSNA)	7,9	9,3	мальчики 7,7 / девочки 7,2
Дообучение (локальные данные)	5,8	7,5	мальчики 6,1 / девочки 5,6

Разработанная система превосходит традиционный метод G&P более чем на 60 % по точности: типичная ошибка ручной оценки составляет 12–18 месяцев, тогда как ошибка ИИ-системы — 5,6–6,1 месяца. По уровню точности система сопоставима с консенсусом группы опытных экспертов-рентгенологов (межэкспертная вариабельность ~12 месяцев), устраняя субъективный фактор и зависимость от опыта отдельного специалиста. По сравнению с лучшими алгоритмами конкурса RSNA (4,5–5,2 месяца MAE) разработанная система показывает несколько более высокую ошибку, что объясняется существенно большей неоднородностью реальных клинических данных Узбекистана (нестандартная укладка, разнородное оборудование, артефакты изображения) по сравнению со стандартизированными наборами данных конкурса; тем не менее достигнутая точность (MAE < 6 месяцев) достаточна для клинического применения. Полное время обработки одного изображения — около 22 мс, что в тысячи раз быстрее ручных методов G&P и TW3.

Обсуждение

В детской эндокринологии, где повторная оценка КВ проводится каждые 6–12 месяцев для контроля терапии гормоном роста, детерминированный характер работы ИИ-системы исключает влияние усталости и межэкспертной вариабельности, обеспечивая сопоставимость результатов в динамике. В ортопедической практике мгновенное получение КВ на приёме позволяет врачу обсуждать тактику лечения сколиоза с семьёй пациента без ожидания заключения рентгенолога, а в отделениях лучевой диагностики — перераспределять нагрузку, освобождая специалистов для сложных и нетипичных случаев.

Ограничения исследования связаны с преобладанием в обучающей выборке данных американской популяции, что может вносить систематическое смещение при оценке детей других этнических групп; необходимы дальнейшие проспективные клинические испытания с оценкой влияния системы на реальные клинические исходы, а также изучение возможного снижения диагностических навыков врачей при длительном использовании автоматизированных заключений.

Заключение

Разработана и клинически апробирована первая отечественная автоматизированная система определения костного возраста у детей на основе

глубокого обучения, планируемая к регистрации в Узбекистане. Основные результаты:

- точность (MAE ~5,6–6,1 мес.) более чем на 60 % превышает точность ручного метода Гроулиха–Пайла и приближается к уровню консенсуса нескольких экспертов;
- скорость обработки (≈ 22 мс) на несколько порядков ниже времени рутинного ручного анализа;
- адаптация к узбекской популяции достигнута за счёт дообучения на 350 верифицированных клинических изображениях отделения лучевой диагностики Центра;
- система полностью автономна и работает как настольное приложение без сетевого или облачного подключения, что упрощает её внедрение в медицинских учреждениях.

Внедрение технологии в рамках цифровой трансформации здравоохранения Ташкента и регионов Узбекистана позволит стандартизировать диагностический, лечебный и мониторинговый процесс в биометрии, снизить нагрузку на службу лучевой диагностики и повысить качество специализированной помощи детям с эндокринной и ортопедической патологией. Дальнейшая работа будет направлена на расширение отечественной обучающей выборки, проведение проспективных клинических испытаний и мультимодальное расширение системы за счёт использования дополнительных анатомических областей и клинических данных.