

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОГРЕССИРОВАНИЯ ИДИОПАТИЧЕСКОГО СКОЛИОЗА У ДЕТЕЙ И ПОДРОСТКОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Белова А.Н.¹, Галова Е.А.¹, Воробьева О.В.¹

¹ФГБОУ ВО "Приволжский исследовательский медицинский университет (ПИМУ)"

Министерства здравоохранения Российской Федерации

Нижегород

e-mail: olgyshka1@yandex.ru

АННОТАЦИЯ. В нарративном обзоре дается краткое представление о понятии «искусственный интеллект» и таких методах ИИ, как машинное обучение и его компоненты (искусственные нейронные сети и глубокое обучение) в контексте задачи изучения прогноза при ИС. Рассмотрены разработанные к настоящему времени модели прогнозирования, основанные на результатах рутинного ортопедического осмотра, данных радиологической визуализации позвоночника и данных исследований, не предполагающих радиационную нагрузку на пациента, в частности – поверхностной топографии позвоночника. Представлены ограничения, связанные с широким внедрением прогностических моделей в рутинную клиническую практику. Сделан вывод о высоком потенциале моделей машинного обучения в прогнозировании прогрессирования ИС и о необходимости формирования больших массивов стандартизированных данных, интегрирующих клиничко-демографические и визуализационные показатели с приоритетным использованием метода поверхностной топографии позвоночника.

Ключевые слова: идиопатический сколиоз, прогнозирование, прогрессирование, дети, подростки, искусственный интеллект, машинное обучение

Belova A.N., Galova E.A., Vorobyova O.V.

Predicting the progression of idiopathic scoliosis in children and adolescents using artificial intelligence

ABSTRACT. This narrative review provides a brief overview of "artificial intelligence" the concept and AI methods such as machine learning and its components (artificial neural networks and deep learning) in the context of idiopathic scoliosis (IS) prediction. Currently developed prediction models based on the results of routine orthopedic examinations, radiological imaging spine data and non-radiological imaging data, such as surface spine topography, are discussed. The review also highlights the limitations associated with the widespread implementation of predictive models in routine clinical practice. Conclusion is made that machine learning models have a high potential for predicting the IS progression, but it is necessary to create large datasets of standardized data that integrate clinical, demographic, and imaging indicators, with a focus on using the surface topography spine method.

Keywords: *idiopathic scoliosis, prediction, progression, children, adolescents, artificial intelligence, machine learning*

Идиопатический сколиоз (ИС) детей и подростков – это трехмерная деформация позвоночника, которая характеризуется боковым искривлением позвоночника во фронтальной плоскости, нарушением физиологических изгибов позвоночника в сагиттальной плоскости и ротацией позвонков в аксиальной плоскости [2, 49, 71].

При ИС искривление во фронтальной плоскости составляет $>10^\circ$ [34]. ИС относится к самой распространенной ортопедической патологии детского возраста, при этом прогрессирование заболевания приводит к проблемам со стороны самых различных органов и систем организма [1, 9, 18, 21]. Тактика ведения пациента зависит от степени выраженности ИС: у детей со стадией биологической зрелости скелета 0-2 по классификации Риссер и при дуге менее 25° рекомендуют наблюдательную тактику; при искривлении от 25 до 40 градусов рекомендуют ортопедические корсеты и бандажи, а при сколиозе более $45-50^\circ$ – хирургическое вмешательство [44,75].

Как правило, первоначально пациенты, которые впервые обращаются к врачу, имеют легкую или умеренную степень сколиоза. Но врачу уже при первом обращении пациента важно иметь представления о возможной скорости прогрессирования сколиоза и риске значительного ухудшения в пубертатном периоде [13, 46]. Знание прогноза позволяет принимать решение по поводу тактики ведения пациентов (частота мониторинга выраженности искривления позвоночника, предполагаемые вмешательства) [38, 64]. Международная ассоциация консервативного лечения идиопатического сколиоза (International Scientific Society on Scoliosis Orthopaedic and Rehabilitation Treatment, или SOSORT) рекомендует оценивать вероятность прогрессирования сколиоза при величине дуги более 20 градусов по Коббу для определения тактики лечения детей разных возрастных групп [44]. Искусственный интеллект (ИИ) открывает новые возможности в выявлении факторов, способствующих прогрессированию ИС, и в построении прогностических моделей.

Объект исследования – идиопатический сколиоз у детей и подростков.

Цель исследования: обзор современного состояния знаний, касающихся возможностей прогнозирования прогрессирования идиопатического сколиоза у детей и подростков на основе использования искусственного интеллекта.

Метод исследования.

Критический анализ данных литературы с обобщением имеющихся в настоящее время результатов оригинальных исследований по вопросу возможностей прогнозирования прогрессирования идиопатического сколиоза у детей и подростков на основе использования искусственного интеллекта. Для поиска и отбора необходимых источников были использованы электронно-библиотечные системы: отечественные (Elibrary, Российская медицина, Консультант врача, Букап, РГБ, ЭБ ПИМУ) и зарубежные (PubMed, Springer). Для поиска патентов использованы: отечественные базы данных ФИПС, INVENTORUS и зарубежная база данных Questel Orbit. В результате проведенного анализа 110 источников литературы проведен обзор современного состояния знаний о возможностях прогнозирования прогрессирования идиопатического сколиоза (ИС) у детей и подростков на основе использования искусственного интеллекта (ИИ).

Общие представления о факторах, влияющих на прогрессирование идиопатического сколиоза

ИС может развиваться в любое время в детстве и в подростковом возрасте, но чаще проявляется в периоды скачков роста, первый из которых приходится на сроки от 6 до 24 месяцев, затем в возрасте 5-8 лет, и, наконец, в период полового созревания (11-14 лет) [44, 48]. Под прогрессированием сколиоза обычно понимают увеличение угла Кобба между двумя последовательными визитами наблюдения пациента не менее чем на 5 – 10° [16, 22, 24, 27, 35, 47, 61, 63]. Некоторые специалисты считают пороговым значением для прогрессирования или отсутствия прогрессирования увеличение угла Кобба на 25 ° от начала заболевания до зрелости скелета [72, 73].

Прогрессирование искривления позвоночника определяется результатом взаимодействия множества факторов (генетическая предрасположенность, возраст, пол, зрелость скелета, биомеханика и морфология позвоночника, образ жизни) [1, 5, 12, 27, 35, 38, 45, 66]. Полагают, что патогенетический механизм прогрессирования ИС связан с асимметричной нагрузкой на пластинки роста тел позвонков вследствие первоначально возникшей кривизны позвоночника; асимметричное давление приводит к разным темпам энхондральной оссификации и к замедлению роста в зоне нагрузки (закон Гютера-Фолькмана), что усугубляет боковую деформацию позвоночника и вызывает аксиальную ротацию позвонков [35].

Наиболее быстро ИС прогрессирует в начале полового созревания [26, 77]. Согласно шкале Таннер, которая оценивает половое созревание [39], этот период соответствует стадиям S2 и P2у девочек, T2 и P2 у мальчиков. Пубертатный скачок начинается с ускоренного продольного роста конечностей, и лишь затем начинается продольный рост осевого скелета, это период наиболее выраженного прогрессирования ИС [43]. Приблизительно спустя две трети временного периода пубертатного ростового скачка у девочек наступает менархе, что свидетельствует о прохождении пика роста, с постепенным снижением риска прогрессирования сколиоза. После завершения роста позвоночника вероятность прогрессирования сколиоза значительно снижается [33]. В более позднем возрасте прогрессирование ИС может происходить в результате деформаций и разрушения позвонков, что наблюдается, в том числе, при сколиозе, превышающем 30-50° [43]. При ИС менее 30° искривление часто остается стабильным, хотя возможны и неблагоприятные варианты течения с отсроченным риском ротационных вывихов позвонков [43].

При оценке риска прогрессирования ИС учитывают степени зрелости костного скелета, которую косвенно оценивают по шкалам Риссер и Сандерс. Напомним, что шкала Риссер (J.C. Risser) — это шкала для определения ростковой активности позвоночника путем оценки по рентгенограмме выраженности оссификации апофизов гребней крыльев подвздошных костей, где 0 означает полное отсутствие окостенения, а 5 — полное сращение подвздошного гребня, указывающее на окончание периода роста костей [51, 52]. Шкала Сандерс (Sanders maturity system, или SMS) оценивает зрелость скелета по рентгенограммам левой кисти, анализируя степень окостенения фаланг, пястных костей и лучевой кости [14, 54]

Важная прогностическая роль принадлежит показателям биомеханики позвоночника. Так, риск прогрессирования в начале полового созревания при сколиозе 10 градусов составляет всего 20%, при сколиозе 20 градусов и 30 градусов – соответственно 60% и 90% [11]. К завершению полового созревания (при достижении не менее II степени по Риссеру) риск прогрессирования деформации значительно снижается, до 2% при сколиозе 10°, 20% при сколиозе 20° и 30% при сколиозе 30°; прогноз в отношении прогрессирования ИС более благоприятен для мальчиков [7]. Было высказано предположение, что грудной кифоз в сочетании с аксиальной ротацией позвоночника при ИС носит скорее компенсаторный характер и не способствует прогрессированию искривления

во фронтальной плоскости [52]. На вероятность прогрессирование сколиоза может влиять положение таза, играющего важную роль в определении сагиттального баланса позвоночника [55], Немаловажную роль играет также мышечная активность [43].

Систематический обзор 28 исследований (8255 пациентов) позволил идентифицировать наиболее важные клинико-демографические и рентгенологические критерии, указывающие при первом обращении пациента на высокий риск прогрессирования искривления позвоночника [34]. К таким признакам относятся: возраст <13 лет, семейный анамнез, скорость роста (7 – 8 см/год и более), минеральная плотность костной ткани по данным количественной КТ <110 мг/см³, начальная величина угла Кобба >25 градусов, локализация искривления (грудная ординарная или двойная дуга), зрелость скелета по шкале Риссера <1 или по шкале Сандерса <5 [34].

Опубликованы данные о роли генетической предрасположенности к прогрессированию ИС [66], был даже разработан прогностический тест, основанный на выявлении полиморфизма определенных генов (ScoliScore) [74], однако надежность этого теста остается пока неопределенной [53].

На протяжении уже многих лет разрабатываются способы прогнозирования вероятности прогрессирования ИС. В качестве возможных детерминант повышенного риска прогрессирования сколиоза предложены такие факторы, как отягощенный семейный анамнез, дефект соединительной ткани (гипермобильность суставов, проявления со стороны кожи), сглаживание физиологического грудного кифоза, скачок роста, ротация туловища более 10° [44]. Одним из наиболее доступных в клинике методов является метод Лонштейна и Карлсона, разработанный в 1984 году; согласно этому методу, вероятность прогрессирования искривления позвоночника в процессе роста рассчитывается на основе начального угла Кобба, оценке по шкале Риссера и возраста пациента. Этот метод удобно применять в реальной клинической практике для своевременного принятия мер по коррекции терапии ИС, однако его точность, ввиду широкого диапазона нормативных значений у здоровых детей, относительно невысокая [44].

Появление искусственного интеллекта дает потенциальную возможность усовершенствовать методы прогнозирования течения ИС за счёт интеграции более широкого спектра данных, включая данные визуализации и клинические параметры, и постоянного обновления моделей прогнозирования с учётом новых данных пациентов [38,73].

Общие представления об искусственном интеллекте

Термином «искусственный интеллект» (ИИ) обозначают технологии, позволяющие анализировать большие массивы данных и решать задачи, которые обычно связаны с человеческим интеллектом (распознавание закономерностей, классификация признаков, прогнозирование, построение гипотез [20, 30, 40, 41, 60, 67]. ИИ представляет собой «зонтичный» термин, поскольку охватывает широкий спектр технологий [15, 20, 67]. «Слабый», или «прикладной» ИИ предназначен для выполнения конкретной задачи и не имеет возможностей саморазвития, тогда как «сильный» ИИ способен имитировать свойства естественного интеллекта человека – такие, как способность к восприятию, обучению, концептуализации, распознаванию проблем, разработке решений, планированию, общению [10, 15, 20, 67]. ИИ способен анализировать большие массивы данных со значительно большей точностью и скоростью, чем мозг человека, поэтому перспективы использования ИИ в медицине связывают с решением задач диагностики, прогнозирования, выбора терапии [20, 30, 67]. В отношении ИС перспективы применения ИИ связывают с выполнением автоматического анализа рентгенограмм, с диагностикой ИС и классификацией типов искривления позвоночника, прогнозированием прогрессирования сколиоза.

В исследованиях, которые касаются медицинских аспектов, наиболее часто применяют такие методы ИИ, как машинное обучение и его компоненты – искусственные нейронные сети и глубокое обучение [16, 20, 35, 59, 61, 63].

Машинное обучение (МО) относится к одному из подмножеств ИИ. МО включает разработку алгоритмов и статистических моделей, которые направлены на решение конкретных задач: выявление взаимосвязей в больших выборках данных, распознавание прогностических паттернов заболевания, принятие решений по поводу тактики ведения пациента [37]. С помощью алгоритмов МО ИИ получает возможность использования обработанных данных для самообучения, при этом дополнительное программирование не требуется [15]. Обучающие модели МО, в зависимости от цели исследования, могут быть разных типов: контролируемые, неконтролируемые, полуконтролируемые, с подкреплением [37].

Контролируемое МО (МО «с учителем») предполагает использование наборов размеченных данных: показатели «на выходе» отображены на основе имеющихся знаний, т.е. они известны исследователю, а компьютерная программа сопоставляет входные и выходные данные

и таким образом обучается. В частности, контролируемое обучение используется для решения задачи классификации признаков, для прогнозирования течения заболевания [4, 23]. Частные алгоритмы контролируемого МО, выбор которых диктуется целью исследования, включают метод К-ближайших соседей (k-NN), метод случайного леса (в том числе, градиентный бустинг деревьев решений), логистическую регрессию, метод опорных векторов и другие [4, 23, 24, 27, 42, 64]. Так, например, метод случайного леса был применен для прогнозирования изменений угла Кобба у подростков с ИС: для определения наиболее важных прогностических признаков и оптимизации прогностической модели был использован метод последовательного обратного флотирования отбора (sequential backward floating selection, или SBFS, англ.) [4]. В другом исследовании для обучения прогностической модели и выделения независимых прогностических компонентов авторы применяли метод независимого компонентного анализа [23]. Контролируемое МО позволяет создавать предиктивные модели для оценки будущих изменений формы позвоночника на основе его исходного состояния, отображать морфологические изменения позвоночника в последовательных временных интервалах [35].

Важным преимуществом контролируемого МО является их «прозрачность» (понимание того, как модель достигла конкретных прогнозов) благодаря четким принципам выбора соседей и признаков, используемых для классификации [62, 64]. Так, деревья решений разделяют данные на основе определенных условий или пороговых значений признаков, причем каждый «узел» представляет собой легко интерпретируемое правило решения (например, «Угол Кобба > 25 градусов?») [27]. Настраиваемый алгоритм k-NN превосходно справился с уникальными характеристиками прогрессирования и тяжести ИС, используя специфические признаки анализа топографии спины [24].

Неконтролируемое МО (МО «без учителя») основано на том, что компьютерная программа самостоятельно изучает и учится группировать неразмеченные и неструктурированные данные. Для такого рода алгоритмов МО требуется большой массив немаркированных обучающих данных, на основании которых машина обучается находить базовую структуру, извлекать признаки и шаблоны. Алгоритмы неконтролируемого МО применяют при необходимости выявить связи между переменными, сформировать кластеры (сгруппировать неразмеченные данные исходя из их сходств и различий), снизить размерность, т.е.

сократить объем исходных данных до управляемого при сохранении их целостности. Неконтролируемые методы МО включают априорные алгоритмы, анализ главных компонент, сингулярное разложение, метод k -средних и иерархическая кластеризация [15]. При *полуконтролируемом* МО вводятся небольшие объемы размеченных данных, дополняющие массив данных, которые не имеют меток; обучившись выявлению связей в структурированных данных, компьютерная программа приступает к обработке массива неразмеченных показателей.

Искусственные нейронные сети (ИНС) относятся к алгоритмам МО, имитирующим биологические нейронные сети в головном мозге: связанные между собой узлы («искусственные нейроны»), которые передают сигналы, группируются в слои, наподобие строения коры головного мозга [29, 36, 57, 65]. Использование топологий ИНС лежит в основе *глубокого обучения* (ГО) – такого вида МО, при котором процессы обучения и принятия решений происходят по аналогии с работой человеческого мозга [59, 61, 72]. При этом обрабатываются очень большие массивы разрозненных данных, выполняется взаимодействие нескольких слоев сети с извлечением все более и более высокоуровневых выходных данных [63]. Разновидностями ИНС являются сверточные нейронные цепи (convolutional neural networks, англ., или CNNs, англ.) [63]. Однако при использовании классических CNNs возникают сложности со структурированием данных, касающихся топографии позвоночника [35]. Эти проблемы помогает решать использование метода диффузионно-сверточных нейронных цепей (diffusion convolutional neural network, или DCNN, англ) [6]. Метод DCNN, позволяющий повысить эффективность прогнозирования при одновременном снижении сложности предварительной обработки данных, применяют при анализе рентгеновских снимков позвоночника [73]. Алгоритмы глубокого обучения на основе сверточных нейронных цепей обладают высоким потенциалом для выявления закономерностей, связанных с прогрессирующим искривлением позвоночника; при этом успех прогнозирования зависит от количества и качества обучающих данных [35]. Точность прогностической модели, основанной на DCNN, может критически снижаться при исключении из нее ключевых клинико-демографических параметров, таких, как пол, возраст, скорость роста, маркеры зрелости скелета [63].

Еще одной разновидностью ИНС является капсульная нейронная сеть (*capsule neural network*, или CapsNet, англ), предназначенная для распознавания изображений, в том числе, рентгенограмм позвоночника

[35]. В отличие от сверточных цепей, CapsNet позволяют распознавать сложные пространственные иерархические отношения (ротация и торсия позвонков), выделять наиболее важные аспекты изображения [72]. Интеграция двухмерных рентгеновских изображений с клиническими данными расширяет прогностические возможности моделей, основанных на CapsNet [16].

В прогностических моделях ИС используют также такие варианты ИНС, как рекуррентная нейронная сеть (recurrent neural network, или RNN, англ.), расширяющая возможность отслеживания изменений сколиоза во времени, и сверточная цепь с механизмами внимания (convolutional neural networks with attention mechanisms, англ), улучшающая способность модели распознавать приоритетные показатели изображений. [35, 37, 57].

Основным недостатком моделей, построенных с помощью ИНС, является эффект «черного ящика»: клиницистам, независимо от конкретной области применения ИИ, сложно принять результаты работы модели, поскольку недостаточно информации, каким образом модель принимает решения и строит прогноз.

Разработка модели прогнозирования прогрессирования ИС на базе МО включает в себя несколько этапов [35]: сбор данных у пациентов с подтвержденным диагнозом ИС, форматирование этих данных для последующего анализа; извлечение из базы данных релевантных признаков; выбор метода модели, обучение модели, валидация и тестирование модели на предмет правильности прогноза; продолжающийся сбор данных и доработка модели для повышения точности прогноза.

Способы оценки эффективности прогностических моделей

Для оценки эффективности прогностических моделей и точности прогноз прогрессирования ИС наиболее часто используют ROC-кривые, показатель среднеквадратичной ошибки (Root Mean Square Error, или RMSE, англ.), показатель точности прогноза [35]. ROC-кривая (Receiver Operating Characteristic Curve, или Кривая операционных характеристик приемника) – это график, демонстрирующий взаимосвязь между чувствительностью и специфичностью модели; идеальная модель имеет высокую чувствительность и низкий уровень ложноположительных срабатываний. Показатель площади под ROC-кривой (AUC) обычно находится в диапазоне от 0,5 до 1, где 0,5 указывает на случайное угадывание, а 1 — на идеальную модель. RMSE чаще применяют для оценки точности прогнозирования регрессионных моделей. Разница между

фактическим и прогнозируемым значениями возводится в квадрат, затем суммируется, усредняется, и из нее извлекается квадратный корень. Чем ниже этот показатель, тем ниже ошибка и тем выше эффективность прогнозирования. Точность прогноза рассчитывается как отношение правильно предсказанных результатов к общему количеству проанализированных результатов.

Примеры прогностических моделей, основанных на алгоритмах искусственного интеллекта и касающихся прогнозирования прогрессирования идиопатического сколиоза у детей и подростков

Прогностические модели, оценивающие вероятность прогрессирования ИС у детей и подростков, обычно включают клинико-демографические показатели, данные ортопедического осмотра, параметры рентгенограмм и иных методов визуализации позвоночника [37, 46, 64].

Модели, основанные на результатах рутинного ортопедического осмотра

Для клиницистов важно иметь прогностический инструмент, основанный на тех показателях, измерение которых не требует инвазивных либо дорогостоящих вмешательств. Анализируемые клинико-демографические данные могут быть категориальными (пол, пользование ортезом) и количественными (возраст, рост в положениях сидя и стоя, масса тела, биомеханические показатели). Интересны исследования, выявлявшие факторы риска ИС на основе параметров, полученных в ходе базовых медицинских осмотров детей и подростков и с использованием различных методов машинного обучения на наличие ИС [37, 64]. Так, В.Уан и коллеги провели обследование 884 детей и подростков со сколиозом (угол Кобба $\geq 10^\circ$) и 895 детей без сколиоза. Испытуемые проходили визуальный осмотр и рутинные измерения с помощью курвиметра, сколиометра и теста Адамса на наклон вперед. Прогностическая модель строилась на основе метода логистической регрессии и проверялась с помощью ROC-кривых. Биомеханическими предикторами риска развития ИС оказались следующие показатели: угол ротации грудного отдела, угол ротации грудопоясничного отдела, угол ротации поясничного отдела, наклон лопатки, разница высоты плеч, вогнутость поясницы и наклон таза; чувствительность и специфичность модели составляли 82-83% [64].

Ретроспективный анализ данных 1732 детей и подростков с ИС и без ИС, выполнений с применением искусственных нейронных сетей, также подтвердил, что к факторам риска прогрессирования ИС относятся

угол поворота поясничного отдела, наклон лопатки, разница в высоте плеч, вогнутость поясничного отдела и наклон таза [37]. В исследовании канадских ученых также показана возможность прогнозирования конечного угла Кобба к моменту зрелости скелета или непосредственно перед операцией с использованием линейной модели, использовавшей в качестве предикторов трёхмерные параметры позвоночника и клинические параметры [42]. Эти исследования демонстрируют, что оценка риска развития и прогрессирования ИС возможна на основе рутинного скрининга сколиоза и алгоритма машинного обучения, такие модели могут обладать высокой диагностической эффективностью и служить помощником при принятии решений и мониторинге ИС [37, 64].

Модели, основанные на данных радиологической визуализации позвоночника

Результаты измерения углов и расстояний, проводимых вручную, могут значительно различаться в зависимости от уровня подготовки и опыта врача, что не может не сказаться на точности прогнозирования. Более объективные данные могут быть получены при анализе рентгенограмм, компьютерной томографии (КТ) или магнитно-резонансной томографии (МРТ) позвоночника.

Двухмерная рентгенография позвоночника (переднезадняя и боковая проекции) дает возможность количественно оценить показатели искривления позвоночника в двух плоскостях (угол Кобба, исходные углы поясничного лордоза и грудного кифоза), а также косвенно судить о степени зрелости костной ткани (по шкалам Риссера и SMS). Так, L. Dolan и коллеги по данным 115 ранее нелеченых пациентов в возрасте 9-16 лет с ИС разработали математическую модель для предсказания прогрессирования сколиоза до угла 45 градусов либо до хирургического вмешательства. Модель была разработана на основе алгоритма логистической регрессии, предикторами были угол Кобба, тип искривления и стадия зрелости скелета по шкале SMS. Авторы продемонстрировали высокую надежность и предсказательную валидность модели, позволяющую при исходной оценке ребенка или подростка определить степень риска дальнейшего прогрессирования сколиоза [17].

Как правило, в прогностических моделях рентгенологические признаки комбинируются с клинико-демографическими. Так, K.Chu и коллеги разработали модель прогнозирования ИС у подростков с использованием глубокого обучения и CapsNet [16]. Входными данными для обучения системы служили пол, возраст, масса тела, рост в положениях

стоя и сидя размах рук, показатели зрелости костной ткани, зарегистрированные при первом обращении пациента, и показатели выполненных в двух проекциях рентгенограмм. Выходными данными являлся показатель прогрессирования сколиоза. Предсказательная валидность модели составила 82% [16].

На основе МО разрабатываются новые интеллектуальные системы для автоматической диагностики сколиоза по фронтальным рентгенограммам позвоночника [3]. Новые перспективы открывают также современные технологии трехмерной (3D) реконструкции медицинских изображений в подробные 3D-визуализации, которые используют специализированное компьютерное программное обеспечение для преобразования традиционных двухмерных (2D) медицинских изображений, таких как рентгеновские снимки, КТ и МРТ [19, 23]. Поскольку ИС представляет собой трехмерную деформацию позвоночника, изображения в 3D режиме могут стать источником информации для более точного прогноза относительно прогрессирования сколиоза [42, 61, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74]. При этом современные технологии МО позволяют исследовать трёхмерные модели позвоночника, полученные на основе ретроспективных бипланарных рентгеновских снимков [23]. Систематический обзор 31 публикации, выполненный исследователями из Китая, показал, что предикторами прогрессирования ИС при анализе 3D изображений являются два показателя: торсионный индекс и угол ротации апикального позвонка (позвонка в вершинной части сколиотической дуги) вокруг его продольной оси. Торсионный индекс $> 3.4^\circ$ и апикальная ротация позвонков $> 5.8^\circ$ при исходном осмотре свидетельствуют о том, что в последующем будет происходить увеличение дуги сколиоза. Интересно, что угол Кобба оказался слабым предиктором прогрессирования в тех случаях, когда его значение при первоначальном исследовании было менее 25 градусов [71].

Радиографические исследования остаются «клиническим золотым стандартом» при исследовании детей и подростков со сколиозом [16, 63, 72, 73]. Однако следует учитывать, что повторное воздействие ионизирующего излучения связано с повышенным риском развития онкологических заболеваний, что требует использования в целях прогнозирования нерадиоактивных методов оценки [56].

Модели, основанные на результатах визуализации позвоночника без лучевой нагрузки

Применяемые для оценки ИС методы визуализации, которые не предполагают использование радиации, могут быть прямыми (магнитно-ре-

зонансная томография, или МРТ, и ультразвуковое исследование, или УЗИ) и косвенными (поверхностная топография позвоночника, или ПТП) [8, 31]. Согласно систематическому обзору и мета-анализу ионизирующих методов мониторинга сколиоза, наиболее высокую корреляцию с рентгенологическими показателями продемонстрировала МРТ, выполняемая в положении пациента стоя, и УЗИ позвоночника [8]. Однако широкое клиническое применение МРТ и УЗИ позвоночника остается ограниченным из-за значительной стоимости, ограниченной доступности и длительной продолжительности исследования [8]. Наиболее перспективной альтернативой ионизирующим методам представляется ПТП, надежность и валидность которой также подтверждена отдельными исследованиями, систематическими обзорами и мета-анализом, за исключением случаев с высокими индексами массы тела или с выраженными искривлениями позвоночника) [8, 25, 32]. Подход к использованию топографии позвоночника для оценки сколиоза получил название “back-shape-to-spine” («от формы спины к позвоночнику») [28]. Бесконтактный метод ПТП использует оптические технологии для получения реконструированных 3D-изображений позвоночника, позволяет собирать данные в режиме реального времени, является значительно менее затратным в сравнении с другими методами визуализации; к настоящему времени разработано достаточно большое число программно-аппаратных комплексов для ПТП, основанных на передовых технологиях визуализации [58]. Так, система DIERS Formetric 4D использует проекцию световой сетки и маркеры, наклеиваемые на тело человека; испытуемый медленно идет по беговой дорожке, при этом выполняется анализ набора из большого числа формметрических параметров [47]. Методики 3D-лазерного сканирования с использованием комплекса VIVID 910 предполагают, что пациент неподвижно стоит, маркеры не используются, выполняется захват изображения со всех сторон туловища с последующей обработкой данных и созданием комплексной 3D-модели позвоночника. [22, 76]. Разработаны методы, которые предполагают использование смартфонов для фотографирования спины и воссозданием изображения позвоночника [62]. В российской клинической практике широко используется отечественная система компьютерной оптической топографии позвоночника.

Прогресс в исследованиях, основанных на ПТП, прошёл путь от базовых определений прогрессирования/отсутствия прогрессирования сколиоза до прогнозирования прогрессирования угла Кобба у пациен-

тов с прогрессирующим заболеванием на основе МО [22, 47, 50, 62]. Так, на основе глубокого обучения была разработана прогностическая модель, которая анализирует фотографию спины, полученную с помощью смартфона; анализ данных 2158 пациентов, показал, что эта модель имела аналогичную или улучшенную чувствительность и отрицательные прогностические значения при оценке тяжести ИС и риска прогрессирования в сравнении с мнением экспертов-ортопедов [62]. Чувствительность и специфичность еще одной модели, использовавшей данные ПТП и алгоритм контролируемого МО для прогнозирования прогрессирования искривления позвоночника у подростков с ИС, составила 73% и 44% соответственно, отрицательная и положительная прогностическая ценность оказались равными 83% и 30% соответственно, точность 51% [22]. Другой пользовательский алгоритм классификации ИС по данным ПТП, также разработанный на основе контролируемого МО, позволил предсказывать прогрессирование кривой сколиоза с точностью 93% (чувствительность = 83%; специфичность = 95%) [24].

Применение ПТП в целях прогнозирования обеспечивает безлучевой метод последующего наблюдения за пациентами, особенно в лёгких случаях, потенциально снижая дозу облучения на 31% [22] и 74% [24] соответственно. Однако разработанные прогностические модели основаны на отдельных изображениях ПТП и небольшом количестве клинических параметров; кроме того, ПТП косвенно отражает состояние скелета, поэтому такие факторы, как масса тела и мышечный дисбаланс, также могут влиять на результаты прогнозирования [22, 76].

Методы машинного обучения стали использовать для оценки прогностической значимости тех факторов, которые ранее не принимались во внимание при ИС – например, морфометрических показателей головного мозга, микроархитектура костной ткани. Однако пока такие работы достаточно далеки от практического внедрения.

Ограничения использования прогностических моделей, основанных на искусственном интеллекте, в клинической практике

МО способно помогать клиницисту в предоставлении индивидуальных прогнозов, основанных на комплексном анализе уникальных характеристик каждого пациента [59]. При этом модели ИИ постоянно обновляются новыми данными, что со временем повышает их точность [27, 73]. Однако нельзя игнорировать ряд ограничений, которые в настоящее время препятствуют широкому использованию ИИ в прогнозировании исходов ИС у детей и подростков. Во-первых, для создания надежных

моделей МО требуется доступ к большим базам стандартизированных данных, на основе которых будет происходить обучение моделей. Эффективность этих моделей зависит от качества и полноты наборов данных, используемых для обучения, которые не всегда могут охватывать широкий спектр вариабельности, наблюдаемый в клинической практике [35]. Если обучающие данные не стандартизированы либо низкого качества, то нельзя рассчитывать на достоверный результат работы ИИ [60]. Кроме того, модели МО хорошо работают, как правило, лишь на тех массивах данных, на которых они проходили обучение, а в тех популяциях пациентов, которые отличаются по своим характеристикам от обучающей выборки, результаты работы алгоритмов МО могут быть непригодными. Так, исследования, касающиеся прогнозирования течения ИС преимущественно сосредоточены на конкретных подгруппах пациентов с определенной степенью искривления или стадией зрелости скелета; такой подход может ограничить экстраполяцию результатов на более широкое сообщество пациентов с ИС, что требует дальнейших исследований с более широким спектром профилей пациентов [35]. Кроме того, динамичный характер ИС и его прогрессирование с течением времени требуют длительных периодов наблюдения для точного понимания влияния различных методов лечения на результаты лечения и качество жизни пациентов; в то же время текущие исследования, касающиеся прогнозирования исходов ИС, как правило, не учитывают долгосрочные результаты. В медицине стандартизировать и сформировать очень большие базы надежных данных можно лишь путем тесного сотрудничества исследователей и врачей разных специальностей. При изучении ИС такие коллективы должны включать исследователей, ортопедов, радиологов, специалистов в области функциональной диагностики и биомеханики.

Во-вторых, ограничения связаны с возможным недоверием врачей к результатам работы прогностических моделей, построенных на основе ИИ, поскольку многие алгоритмы МО сложно объяснить и понять. При этом следует учитывать, что корреляции, выявляемые с помощью компьютерных программ, далеко не всегда означают наличие причинно-следственных связей [41]. Очень многие модели МО демонстрируют характеристики «черного ящика», что создает трудности при интерпретации прогнозов и потенциально препятствует их принятию и использованию медицинскими специалистами [35].

Наконец, существует также проблема конфиденциальности информации, которая используется в сфере ИИ [60].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Потенциал моделей машинного обучения в прогнозировании прогрессирования ИС не вызывает сомнений. Однако пока нет ни одной прогностической модели, выполненной с помощью ИИ, которую бы приняло для практической работы ортопедическое сообщество. Очевидно, что для точных прогнозов, выполненных с помощью ИИ, необходимо наличие больших массивов стандартизированных данных, интегрирующих клинико-демографические и визуализационные показатели. Среди методов визуализации, которые можно использовать многократно для мониторингования состояния позвоночника у детей и подростков с ИС, приоритет имеют те, которые не связаны с радиационной нагрузкой – например, метод поверхностной топографии позвоночника. Преодолеть ограничения и сделать технологии МО неотъемлемой частью клинического сопровождения детей и подростков с ИС возможно только на основе совместной работы врачебного сообщества, научных работников, математиков и программистов.

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, написании и редактировании нарративного обзора, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Информация о финансовой поддержке. Работа выполнена в рамках Госзадания 720000Ф.99.1. БН62АБ49000 «Многолетний мониторинг состояния опорно-двигательного аппарата у детей, занимающихся видом спорта (экспериментальная группа), и не занимающихся спортом детей (контрольная группа)».

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виндерлих М.Е., Щеколова Н.Б. Прогнозирование прогрессирования сколиоза у детей и подростков по уровню серотонина в сыворотке крови //Гений ортопедии. – 2023. – № 29(3). – С. 299-306.
2. Идиопатический сколиоз. Клинические рекомендации. 2024. doi: <https://cr.minzdrav.gov.ru/clin-rec>.
3. Кассаб Д.Х., Камышанская И.Г., Трухан С.В. Новая интеллектуальная система для автоматической диагностики сколиоза по фронтальным рентгенограммам позвоночника: точность, преимущества и ограничения // Digital Diagnostics. – 2024. – Т. 5., № 2. – С. 243-254.

4. Alfraihat A., Samdani A.F., Balasubramanian S. Predicting curve progression for adolescent idiopathic scoliosis using random forest model // PLoS ONE. – 2022. – Vol. 17(8): e0273002.
5. Altaf F., Gibson A., Dannawi Z., Noordeen H. Adolescent idiopathic scoliosis // BMJ Br. Med. J. – 2013. – Vol. 346 :f2508.
6. Atwood J., Towsley D. Diffusion-convolutional neural networks // Adv. Neural. Inf. Process Syst. – 2015. [https:// doi. org/ 10](https://doi.org/10).
7. Asher M.A., Burton D.C. Adolescent idiopathic scoliosis: natural history and long term treatment effects // Scoliosis. – 2006. – Vol. 1:2.
8. Bertsch M., Mulatero L., Salehpour S. et al. Exploring radiation-free scoliosis monitoring: systematic review and meta-analysis of non-ionizing methods // BMC Musculoskelet Disord. – 2025. – Vol. 26(1): 899.
9. Birch N.C., Tsirikos A.I. Long-term follow-up of patients with idiopathic scoliosis: providing appropriate continuing care // Bone Joint J. – 2023. – Vol. 105-B(2). – P. 99–100.
10. Bonacchi R., Filippi M., Rocca M.A. Role of artificial intelligence in MS clinical practice // Neuroimage Clin. – 2022. Vol. 35: 103065.
11. Bunnell W.P. Selective screening for scoliosis // Clin. Orthop. Relat. Res. – 2005. – Vol. 434. – P. 40-45.
12. Chan W.W.-Y., Fu S.-N., Parent E.C. et al. A Systematic Review of Machine Learning Models for Predicting Curve Progression in Teenagers with Idiopathic Scoliosis // JOSPT Open. – 2024. – Vol. 2(3). – P. 202-224.
13. Cheung J.P.Y., Cheung P.W.H. Supine flexibility predicts curve progression for patients with adolescent idiopathic scoliosis undergoing under arm bracing // Bone Joint. J. – 2020. – Vol. 102-B(2). – P. 254–260.
14. Cheung P.W.H., Cheung J.P.Y. Does the Use of Sanders Staging and Distal Radius and Ulna Classification Avoid Mismatches in Growth Assessment with Risser Staging Alone? // Clin. Orthop. Relat. Res. – 2021. – Vol. 479(11). – P. 2516-2530.
15. Choi R.Y., Coyner A.S., Kalpathy-Cramer J. et al. Introduction to machine learning, neural networks, and deep learning // Transl. Vis. Sci. Technol. – 2020. – Vol. 9: 14.
16. Chu K., Kuang X., Cheung P.W.H., Li S., Zhang T., Cheung J.P.Y. Predicting progression in adolescent idiopathic scoliosis at the first visit by integrating 2D imaging and 1D clinical information // Glob. Spin. J. – 2025. – Vol. 15(2). – P. 770-781.
17. Dolan L.A., Weinstein S.L., Abel M.F. et al. Bracing in Adolescent Idiopathic Scoliosis Trial (BrAIST): Development and Validation of a Prognostic Model in Untreated Adolescent Idiopathic Scoliosis Using the Simplified Skeletal Maturity System // Spine Deform. – 2019. – Vol. 7(6). – P. 890-898.
18. Dunn J., Henrikson N.B., Morrison C.C. et al. Screening for adolescent idiopathic scoliosis: evidence report and systematic review for the US preventive services task force // JAMA. – 2018. – Vol. 319. – P. 173–87.

19. Ferrero E., Lafage R., Vira S. et al. Three-dimensional reconstruction using stereoradiography for evaluating adult spinal deformity: a reproducibility study // *Eur. Spine. J.* – 2017. – Vol. 26(8). – P. 2112–2120.
20. Hamet P., Tremblay J.. Artificial intelligence in medicine // *Metabolism.* – 2017. – Vol. 69S. P. S36-S40.
21. Hengwei F., Zifang H., Qifei W., et al. Prevalence of idiopathic scoliosis in Chinese schoolchildren: a large, population-based study // *Spine.* – 2016. – Vol. 41. – P. 259–264.
22. Hong A., Jaswal N., Westover L. et al. Surface topography classification trees for assessing severity and monitoring progression in adolescent idiopathic scoliosis // *Spine.* – 2017. – Vol. 42(13). – P. e781-e787.
23. García-Cano E., Arámbula Cosío F., Duong L. et al. Prediction of spinal curve progression in adolescent idiopathic scoliosis using random forest regression // *Comput. Biol. Med.* – 2018. – Vol. 103. – P. 34–43.
24. Ghaneei M., Ekyalimpa R., Westover L. et al.. Customized k-nearest neighbourhood analysis in the management of adolescent idiopathic scoliosis using 3D markerless asymmetry analysis // *Comput Methods Biomech Biomed Engin.* – 2019. – Vol. 22(7). – P. 696–705.
25. González-Ruiz J.M., Mohamed N., Hassan M. et al. Clinical and Topographic Screening for Scoliosis in Children Participating in Routine Sports: A Prevalence and Accuracy Study in a Spanish Population // *J. Clin. Med.* – 2025. – Vol. 14(1): 273.
26. Grivas T.B., Vasiliadis E., Mouzakis V. et al. Association between adolescent idiopathic scoliosis prevalence and age at menarche in different geographic latitudes // *Scoliosis.* – 2006. – Vol. 1: 9.
27. Kadoury S., Mandel W., Roy-Beaudry M. et al. 3-D morphology prediction of progressive spinal deformities from probabilistic modeling of discriminant manifolds // *IEEE Trans Med Imaging.* – 2017. – Vol. 36(5). – P. 1194–1204.
28. Kaiser M., Mudavamkunnel M., Bertsch M. et al. Investigating the relationship between internal spinal alignment and back shape in patients with scoliosis using PCdare: A comparative, reliability and validation study // *PLoS One.* – 2025. – Vol. 20(7): e0321429.
29. Kariri E., Louati H., Louati A., Masmoudi F. Exploring the Advancements and Future Research Directions of Artificial Neural Networks: A Text Mining Approach // *Appl. Sci.* – 2023. – Vol. 13: 3186..
30. Kaul V., Enslin S., Gross S.A. History of artificial intelligence in medicine // *Gastrointest Endosc.* – 2020. – Vol. 92(4). – P. 807-812.
31. Khodaei M., Parent E., Le L.H. et al. Using ultrasound reflection coefficient index and other clinical parameters to predict the risk of progression in adolescents with idiopathic scoliosis (AIS) – a pilot study // *Eur. Spine J.* – 2025. – Vol. 34. – P. 1861–1868.
32. Komeili A., Westover L.M., Parent E.C. et al. Surface topography asymmetry maps categorizing external deformity in scoliosis // *Spine J.* – 2014. – Vol. 14(6). – P. 973-983.

33. Kotwicki T., Durmała J., Czaprowski D. et al. Conservative management of idiopathic scoliosis—guidelines based on SOSORT 2006 consensus // *Ortop Traumatol Rehabil.* – 2009. – Vol. 11(5). – P. 379–395.
34. Lenz M., Oikonomidis S., Harland A. et al. Scoliosis and Prognosis—a systematic review regarding patient-specific and radiological predictive factors for curve progression // *Eur. Spine J.* – 2021. – Vol. 30(7). – P. 1813–1822.
35. Li L., Wong MS. The application of machine learning methods for predicting the progression of adolescent idiopathic scoliosis: a systematic review // *BioMed Eng OnLine.* – 2024. – Vol. 23: 80.
36. Li Y. Artificial neural network model for indoor decoration intelligence calculation and automation design // *Comput Intell Neurosci.* – 2022: 2246211.
37. Lv Z., Lv W., Wang L., Ou J. Development and validation of machine learning-based models for prediction of adolescent idiopathic scoliosis: a retrospective study // *Medicine.* – 2023. – Vol. 102(14): e33441.
38. Manzetti M., Ruffilli A., Barile F. et al. Is there a skeletal age index that can predict accurate curve progression in adolescent idiopathic scoliosis? A systematic review. // *Pediatr. Radiol.* – 2024. – Vol. 54(2). – P. 299–315.
39. Marshall W.A., Tanner J.M. Variations in pattern of pubertal changes in girls // *Arch. Dis. Child.* – 1969. – Vol. 44(235). – P. 291–303. doi:
40. Meskó B., Görög M. A short guide for medical professionals in the era of artificial intelligence. *NPJ Digit // Med.* – 2020. – Vol. 3: 126.
41. Mudey A.B., Dhonde A.S., Chandrachud M.V. Artificial intelligence in healthcare with an emphasis on public health // *Cureus.* – 2024. – Vol. 16 (8): e67503.
42. Nault M.L., Beauséjour M., Roy-Beaudry M. et al. A predictive model of progression for adolescent idiopathic scoliosis based on 3D spine parameters at first visit // *Spine.* – 2020. – Vol. 45. – P. 605–611.
43. Negrini S., Grivas T.B., Kotwicki T. et al. Why do we treat adolescent idiopathic scoliosis? What we want to obtain and to avoid for our patients. SOSORT 2005 consensus paper // *Scoliosis.* – 2006. – Vol. 1: 4.
44. Negrini S., Donzelli S., Aulisa A.G. et al. 2016 SOSORT guidelines: orthopaedic and rehabilitation treatment of idiopathic scoliosis during growth // *Scoliosis Spin. Disord.* – 2018. – Vol. 13(1): 3.
45. Noshchenko A., Hoffecker L., Lindley E.M. et al. Predictors of spine deformity progression in adolescent idiopathic scoliosis: A systematic review with meta-analysis // *World J. Orthop.* – 2015 Vol. 6(7). – P. 537–558.
46. Parent E.C., Donzelli S., Yaskina M. et al. Prediction of future curve angle using prior radiographs in previously untreated idiopathic scoliosis: natural history from age 6 to after the end of growth (SOSORT 2022 award winner) // *Eur. Spine J.* – 2023. – Vol. 32(6). – P. 2171–2184.
47. Patel M., Liu X.-C., Yang K. et al. 3D back contour metrics in predicting idiopathic scoliosis progression: retrospective cohort analysis, case series report and proof of concept // *Children.* – 2024. – Vol. 11(2): 159.

48. Peng Y., Wang S.R., Qiu G.X. et al. Research progress on the etiology and pathogenesis of adolescent idiopathic scoliosis // *Chin. Med. J. (Engl)*. – 2020. – Vol. 133. – P. 483–493.
49. Post M., Verdun S., Roussouly P., Abelin-Genevois K. New sagittal-classification of AIS: validation by 3D characterization // *Eur. Spine J.* – 2019. – Vol. 28(3). – P. 551–558.
50. Rayward L., Pearcy M., Izatt M. et al. Little JP. Predicting spinal column profile from surface topography via 3D non-contact surface scanning // *PLoS One*. – 2023. – Vol. 18(3): e0282634.
51. Richards B.S., Bernstein R.M., D’Amato C.R., Thompson G.H. Standardization of criteria for adolescent idiopathic scoliosis brace studies: SRS Committee on Bracing and Nonoperative Management // *Spine (Phila Pa 1976)*. – 2005. – Vol. 30. – P. 2068-2075.
52. Rigo M., Quera-Salvá G., Villagrasa M. Sagittal configuration of the spine in girls with idiopathic scoliosis: progressing rather than initiating factor // *Stud. Health Technol. Inform.* – 2006. – Vol. 123. – P. 90-94.
53. Roye B.D., Wright M.L., Williams B.A. et al. Does ScolioScore provide more information than traditional clinical estimates of curve progression? // *Spine*. – 2012. – Vol. 37(25): 2099-2103.
54. Sanders J.O., Khoury J.G., Kishan S. et al. Predicting scoliosis progression from skeletal maturity: a simplified classification during adolescence. // *J .Bone Joint. Surg. Am.* – 2008. – Vol. 90(3). – P. 540-553.
55. Schlösser T.P.C., Vincken K.L., Rogers Ket al. Natural sagittal spino-pelvic alignment in boys and girls before, at and after the adolescent growth spurt // *Eur. Spine J.* – 2015. – Vol. 24(6). – P. 1158–1167.
56. Simony A., Hansen E.J., Christensen S.B. et al. Incidence of cancer in adolescent idiopathic scoliosis patients treated 25 years previously // *Eur. Spine J.* – 2016. – Vol. 25(10). – P. 3366–3370.
57. Soydaner D. Attention mechanism in neural networks: where it comes and where it goes // *Neural Comput Appl.* – 2022. – Vol. 34(16). – P. 13371–13385.
58. Su X., Dong R., Wen Z., Liu Y. Reliability and Validity of Scoliosis Measurements Obtained with Surface Topography Techniques: A Systematic Review // *J .Clin. Med.* – 2022. – Vol. 11(23): 6998.
59. Tajdari M., Tajdari F., Shirzadian P. et al. Next-generation prognosis framework for pediatric spinal deformities using bio-informed deep learning networks // *Eng. Comput.* – 2022. – Vol. 38(5). – P. 4061–4084.
60. Topol E.J. High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence // *Nat Med.* – 2019. – Vol. 25 (1). – P. 44-56.
61. Zhang H., Huang C., Wang D. et al. Artificial Intelligence in Scoliosis: Current Applications and Future Directions // *J. Clin. Med.* – 2023. – Vol. 12(23): 7382.
62. Zhang T., Zhu C., Zhao Y. et al. Deep learning model to classify and monitor idiopathic scoliosis in adolescents using a single smartphone photograph // *JAMA Netw Open.* – 2023. – Vol. 6(8). – P. e2330617–e2330617.

63. Yahara Y., Tamura M., Seki S. et al. A deep convolutional neural network to predict the curve progression of adolescent idiopathic scoliosis: a pilot study // *BMC Musculoskelet Disord.* – 2022. – Vol. 23(1): 610.
64. Yan B., Lu X., Qiu Q. et al. Predicting adolescent idiopathic scoliosis among Chinese children and adolescents // *Biomed Res. Int.* – 2020:1784360.
65. Yu Y., Si X., Hu C., Zhang J. A review of recurrent neural networks: LSTM cells and network architectures // *Neural Comput.* – 2019. – Vol. 31(7). – P. 1235–1270.
66. Xu L., Wu Z., Xia C. et al. A genetic predictive model estimating the risk of developing adolescent idiopathic scoliosis // *Curr. Genomics.* – 2019. – Vol. 20. – P. 246–251.
67. Van Calster B., Wynants L. Machine Learning in Medicine // *N. Engl. J. Med.* – 2019. – Vol. 380(26): 2588.
68. Vergari C., Gajny L., Courtois I. et al. Quasi-automatic early detection of progressive idiopathic scoliosis from biplanar radiography: a preliminary validation // *Eur. Spine J.* – 2019. – Vol. 28(9). – P. 1970–1976.
69. Vergari C., Gajny L., Ebermeyer E. et al. Early detection of progressive idiopathic scoliosis through the quasiautomatic 3D reconstruction of the spine from biplanar radiography // *Eur. Spine J.* – 2019. – Vol. 28. – P. 2878–2879.
70. Vergari C., Skalli W., Abelin-Genevois K. et al. Effect of curve location on the severity index for adolescent idiopathic scoliosis: a longitudinal cohort study // *Eur. Radiol.* – 2021. – Vol. 31(11). – P. 8488–8497.
71. Wan H.S., Wong D.L.L., To C.S. et al. 3D prediction of curve progression in adolescent idiopathic scoliosis based on biplanar radiological reconstruction // *Bone Jt. Open.* – 2024. – Vol. 5(3). – P. 243–251.
72. Wang H., Zhang T., Cheung K.M., Shea G.K. Application of deep learning upon spinal radiographs to predict progression in adolescent idiopathic scoliosis at first clinic visit // *EClinicalMedicine.* – 2021. – Vol. 42: 101220.
73. Wang H., Zhang T., Zhang C. et al. An intelligent composite model incorporating global/regional X-rays and clinical parameters to predict progressive adolescent idiopathic scoliosis curvatures and facilitate population screening // *EBioMedicine.* – 2023. – Vol. 95: 104768.
74. Ward K., Ogilvie J.W., Singleton M.V. et al. Validation of DNA-based prognostic testing to predict spinal curve progression in adolescent idiopathic scoliosis // *Spine.* – 2010. – Vol. 35(25). – P. e1455–e1464.
75. Weiss H.R., Goodall D. The treatment of adolescent idiopathic scoliosis (AIS) according to present evidence. A systematic review // *Eur. J. Phys. Rehabil. Med.* – 2008. – Vol. 44(2). – P. 177–193.
76. Wilczyński J. Relationship between muscle tone of the erector spinae and the concave and convex sides of spinal curvature in low-grade scoliosis among children // *Children.* – 2021. – Vol. 8(12): 1168.

77. Wong H.-K., Hui J.H.P., Rajan U., Chia H.-P. Idiopathic scoliosis in Singapore schoolchildren: a prevalence study 15 years into the screening program // *Spine*. – 2005. – Vol. 30(10). – P. 1188–1196.

REFERENCES

1. Vinderlih M.E., Shchekolova N.B. Prognozirovanie progressirovaniya skolioza u detej i podrostkov po urovnyu serotoninina v syvorotke krovi // *Genij ortopedii*. – 2023. – T. 29(3). – S. 299-306.

2. Idiopaticheskij skolioz. Klinicheskie rekomendacii. 2024. doi: <https://cr.minzdrav.gov.ru/clin-rec>.

3. Kassab D.H., Kamyshanskaya I.G., Truhan S.V. Novaya intellektual'naya sistema dlya avtomaticheskoy diagnostiki skolioza po frontal'nyh rentgenogrammam pozvonochnika: tochnost', preimushchestva i ogranicheniya // *Digital Diagnostics*. – 2024. – T. 5., № 2. – С. 243-254.