

ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДОВ ЦЕФАЛОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РЕНТГЕНОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ТРЕХМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ (ОБЗОР)

DOI: 10.17691/stm2024.16.3.07

УДК 616.314–089.23–073.75

Поступила 22.12.2023 г.



И.О. Аюпова, к.м.н., доцент кафедры стоматологии детского возраста и ортодонтии¹;

А.Ю. Махота, студент Института стоматологии¹;

А.В. Колсанов, д.м.н., профессор, профессор РАН, зав. кафедрой оперативной хирургии и клинической анатомии с курсом инновационных технологий¹; ректор¹;

Н.В. Попов, д.м.н., доцент, зав. кафедрой стоматологии детского возраста и ортодонтии¹;

М.А. Davidyuk, Bachelor of Computer Science²;

И.А. Некрасов, студент стоматологического факультета³;

П.А. Романова, студент стоматологического факультета⁴;

А.М. Хамадеева, д.м.н., профессор кафедры стоматологии детского возраста и ортодонтии¹

¹Самарский государственный медицинский университет, ул. Чапаевская, 89, Самара, 443099;

²University of the People, 595 E. Colorado Boulevard, Suite 623, Pasadena, California, 91101, USA;

³Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, 117198;

⁴Тверской государственный медицинский университет, ул. Советская, 4, Тверь, 170100

Для оценки состояния челюстно-лицевой области (ЧЛО) пациента врачам необходимо проводить измерения на рентгенологических изображениях в различных проекциях, фотографиях лица, гипсовых или цифровых моделях челюстей. Множество методик делает диагностику трудоемкой и трудозатратной, поэтому актуальным является вопрос поиска технологии мультифункционального краниометрического анализа. Все чаще в литературе встречаются данные о диагностике по трехмерным рентгенологическим изображениям как о наиболее информативном методе исследования пациентов.

Целью нашей работы стал обзор современных методов трехмерного цефалометрического анализа и оценка их эффективности.

Поиск научных публикаций, описывающих современные способы диагностики ЧЛО в стоматологической практике, проводили в базах данных PubMed, Web of Science и eLIBRARY.RU, а также в поисковой системе Google Scholar по следующим ключевым словам: трехмерная цефалометрия, трехмерный цефалометрический анализ, ортодонтия, асимметричные деформации ЧЛО, зубочелюстно-лицевые аномалии, 3D-цефалометрия, КЛКТ.

Анализ литературы показал, что многие методы цефалометрического анализа, представленные как трехмерные, используют двухмерные реформаты для измерений. Истинно трехмерные методы не применимы для практических целей по причине фрагментарности данных. Отмечается отсутствие единства в выборе опорных точек и плоскостей, что усложняет диагностику и увеличивает ее стоимость. Основной проблемой является отсутствие унифицированных стандартов для трехмерных измерений анатомических структур черепа, с которыми можно сопоставлять полученные данные. В связи с этим перспективным представляется применение искусственных нейронных сетей и технологий глубокого обучения для обработки объемных изображений и определения нормативных показателей.

Ключевые слова: трехмерная цефалометрия; трехмерный цефалометрический анализ; ортодонтия; асимметричные деформации ЧЛО; зубочелюстно-лицевые аномалии; 3D-цефалометрия; КЛКТ.

Как цитировать: Ayupova I.O., Makhota A.Yu., Kolsanov A.V., Popov N.V., Davidyuk M.A., Nekrasov I.A., Romanova P.A., Khamadeeva A.M. Capabilities of cephalometric methods to study X-rays in three-dimensional space (review). *Sovremennye tehnologii v medicine* 2024; 16(3): 62, <https://doi.org/10.17691/stm2024.16.3.07>

Для контактов: Махота Анна Юрьевна, e-mail: mahota.deadline@yandex.ru

Capabilities of Cephalometric Methods to Study X-rays in Three-Dimensional Space (Review)

I.O. Ayupova, MD, PhD, Associate Professor, Department of Pediatric Dentistry and Orthodontics¹;

A.Yu. Makhota, Student, Institute of Dentistry¹;

A.V. Kolsanov, MD, DSc, Professor of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of Operative Surgery and Clinical Anatomy with Innovation Technology Course¹; Rector¹;

N.V. Popov, MD, DSc, Associate Professor, Department of Pediatric Dentistry and Orthodontics¹;

M.A. Davidyuk, Bachelor of Computer Science²;

I.A. Nekrasov, Student, Faculty of Dentistry³;

P.A. Romanova, Student, Faculty of Dentistry⁴;

A.M. Khamadeeva, MD, DSc, Professor, Department of Pediatric Dentistry and Orthodontics¹

¹Samara State Medical University, 89 Chapayevskaya St., Samara, 443099, Russia;

²University of the People, 595 E. Colorado Boulevard, Suite 623, Pasadena, California, 91101, USA;

³The Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, 6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russia;

⁴Tver State Medical University, 4 Sovetskaya St., Tver, 170100, Russia

To assess the patient's maxillofacial area (MFA) morphology of the patient, an orthodontist needs to measure on X-ray images in various views, photos of the face, gypsum or digital models of the jaws. A variety of techniques makes diagnosis time-consuming and requires a lot of equipment; therefore, the issue of searching for a technology for multifunctional craniometric analysis is relevant. Increasingly, the data on diagnostics based on three-dimensional X-ray images are found in the literature, it being the most informative method of examining patients.

The aim of the study was a systematic review of modern methods of three-dimensional cephalometric analysis, and the assessment of their efficiency.

The scientific papers describing modern diagnostic methods of MFA in dental practice were searched in databases PubMed, Web of Science, eLIBRARY.RU, as well as in a searching system Google Scholar by the following key words: three-dimensional cephalometry, three-dimensional cephalometric analysis, orthodontics, asymmetric deformities, maxillofacial anomalies, 3D cephalometry, CBCT.

The literature analysis showed many methods of cephalometric analysis described as three-dimensional to use two-dimensional reformates for measurements. True three-dimensional methods are not applicable for practical purposes due to the fragmentary nature of the studies. There is the disunity in choosing landmarks and supporting planes that makes the diagnosis difficult and costly. The major issue is the lack of uniform standards for three-dimensional measurements of anatomical structures of the skull, and the data revealed can be compared to them. In this regard, the use of artificial neuron networks and in-depth study technologies to process three-dimensional images and determining standard indicators appear to be promising.

Key words: three-dimensional cephalometry; three-dimensional cephalometric analysis; orthodontics; asymmetric MFA deformities; maxillofacial anomalies; 3D cephalometry; CBCT.

Введение

Ортодонтия, а также ортопедическая и хирургическая стоматология требуют тщательного исследования челюстно-лицевой области (ЧЛО) пациента для достижения гармонии лицевых структур [1–3]. С этой целью применяют цефалометрический анализ рентгенологических снимков, биометрические измерения диагностических моделей челюстей, фотопротокол и другие способы [4–9]. Комплексное использование методов, определяющих уникальные антропометрические параметры, позволяет специалисту получить полноценное представление о патологическом состоянии ЧЛО пациента [10–13]. По причине высокой информативности предпочтение чаще всего отдается различным видам рентгенологического обследования, для каждого из которых разработаны методики получения данных и проведения измерений.

Общеизвестно, что использование исключительно двухмерных рентгенограмм является недостаточным для получения диагностических данных [14–21], а погрешности двухмерных рентгенологических изображений [22] послужили причиной совершенствования их качества [23] и обусловили предпосылки к поиску новых видов исследований.

Еще с конца XX века в практической медицине начали применять конусно-лучевую компьютерную томографию (КЛКТ), которая по мере своего развития становилась безопаснее для пациента и информативнее для специалиста [24–30]. Объемные изображения характеризуются высокой детализацией, что позволяет комплексно оценивать симметричность строения ЧЛО благодаря отсутствию искажения контуров костных структур и определять координаты отдельных анатомических ориентиров, залегающих в пространствах черепа [16, 23, 31–36]. Одним из основных

преимуществ цефалометрического анализа в трехмерном пространстве является повышение точности идентификации анатомических ориентиров, необходимых для вычисления антропометрических параметров [37–40].

За последние годы все больше работ в области стоматологии направлены на создание методов краниометрической диагностики в трехмерном пространстве с использованием данных КЛКТ [41–45]. Все вышесказанное обусловило актуальность нашего исследования.

Цель работы — обзор методов цефалометрического анализа рентгенологических изображений в трехмерном пространстве и оценка их эффективности.

Материалы и методы

Поиск публикаций проводили в информационно-научных системах PubMed, Google Scholar, Web of Science и eLIBRARY.RU по следующим ключевым словам: трехмерная цефалометрия, трехмерный цефалометрический анализ, ортодонтия, асимметричные деформации ЧЛО, зубочелюстно-лицевые аномалии, 3D-цефалометрия, КЛКТ.

Выбор статей осуществлялся двумя экспертами независимо друг от друга, все разногласия устранялись путем консенсуса, а также при консультации с третьим специалистом. Релевантность материалов оценивали по критериям соответствия цели и полноты изложенной информации с использованием программы Statistica 10.0.1011. Повторяющиеся исследования были подвергнуты элиминации, а работы, не имевшие в открытом доступе полнотекстовой версии, не учитывались. Поиск по ключевым словам в октябре 2023 г. выявил 9842 публикации, 94 из которых полностью отвечали тематике и направлению исследования.

Результаты и обсуждение

При обзоре литературы установлено, что рядом авторов описаны собственные методики трехмерного цефалометрического анализа, однако все измерения проводятся на реформатах изображений в системе двух координат, а в трех плоскостях определяются лишь опорные точки с целью повышения качества идентификации ориентиров.

J. Treil с соавт. (1999) [46] разработали способ, основанный на использовании данных КЛКТ для вычисления локализации анатомических ориентиров, где реформат изображения строился относительно сагиттальной плоскости, после чего в системе двух координат рассчитывали угловые и линейные параметры. Предложенный авторами метод позволял определить наклон резцов и высоту лица, но не учитывал другие особенности строения ЧЛО пациента. Не были также описаны ориентиры, на которые авторы опирались при построении сагиттальной плоско-

сти, что может вызвать существенные разногласия при получении данных.

Во многих методах, использующих реформаты изображений для измерений, существуют проблемы с построением плоскости для ориентации изображения. Так, R. Olszewski с соавт. (2006) [47], разработавшие способ трехмерной топографической цефалометрии для идентификации ориентиров, предложили для этих целей 3 черепные (C1–C3) и 9 черепно-лицевых плоскостей (F1–F8, MP) (рис. 1). Однако все расчеты они выполняли на реконструкциях черепа относительно сагиттальной плоскости, которая строилась по точкам на верхней челюсти, что не позволяло сделать вывод о симметричности костных структур нижней челюсти [47], так как ее смещение от этой плоскости может быть вызвано ротацией в суставах [48].

В других методах нет четко сформулированной методики построения реформата. Так, G.R. Swennen и F. Schutysen (2006) [49] предприняли попытку совершенствования краниометрического анализа с применением новых ориентиров, относительно которых стало возможным определение размеров анатомических структур, ранее недоступных визуально на двухмерных снимках из-за их глубокого залегания в пространствах черепа. Преимущество метода было доказано сравнительным анализом данных телерентгенограмм (ТРГ) и КЛКТ, однако отсутствовало описание построения сагиттальной плоскости.

В 2022 г. В. Baldini с соавт. [50] выполнен сравнительный анализ данных ТРГ и реконструкций КЛКТ левой и правой сторон ЧЛО одних и тех же пациентов. Измерения проводили по классической методике Steiner, включающей работу с 8 линейными и 7 угловыми параметрами, определяемыми в автоматизированном режиме в вертикальном, сагиттальном и трансверсальном направлениях. Измерения включали расчеты длин отрезков: PNS–A; S–N; N–Me; N–ANS; ANS–Me; Go–Me; Go–S; Go–Co; SNA, SNB, ANB; BaSN; S–N[^]PNS–ANS; PNS–ANS[^]Go–Me; S–N[^]Go–Me с построением срединной сагиттальной плоскости, проходящей через точки Ba, Se и N; аксиальной — M, S, MSP; а также коронарной, являющейся перпендикуляром по отношению к аксиальной плоскости. По результатам исследований при измерениях параметров на основании данных ТРГ и реконструкций КЛКТ не получено существенных различий в значениях. Ранее другими исследователями в работе [51], посвященной измерениям размеров тела нижней челюсти с левой и правой сторон, была выявлена вариабельность расположения точки Me. Это подчеркивает важность определения костных структур в трехмерном пространстве для понимания клинической ситуации конкретного пациента. Данные разногласия, возможно, обусловлены исключением из исследования В. Baldini с соавт. [50] КЛКТ пациентов с асимметричными деформациями ЧЛО и использованием упрощенных алгоритмов вычисления антропометрических параметров, а также построе-

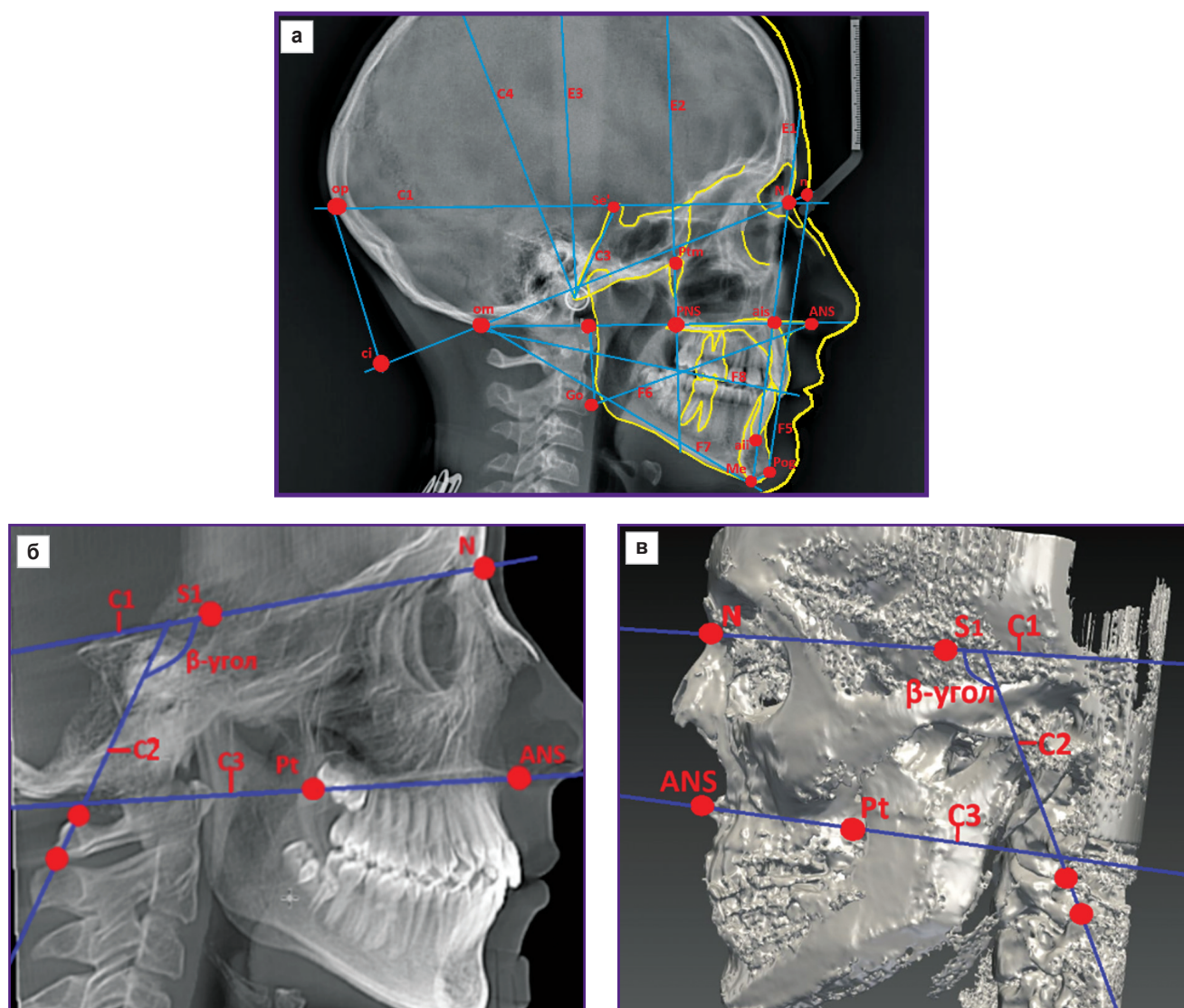


Рис. 1. Трехмерный цефалометрический анализ по R. Olszewski с соавт. [47]:

а — изображаемые плоскости: C1–C4; E1–E3; F5–F8;

б — изображаемые плоскости: C1 — линия, соединяющая точки S1 и N; C2 — линия, проведенная через вершины остистых отростков 3-го и 4-го шейных позвонков к плоскости C1; C3 — линия, проведенная через точки ANS и Pt к плоскости C3;

в — изображаемые плоскости: C1 — линия, соединяющая точки S1 и N; C2 — линия, проведенная через вершины остистых отростков 2-го и 3-го шейных позвонков к плоскости C1; C3 — линия, проведенная через точки ANS и Pt к плоскости C3

нием сагиттальной плоскости без учета возможных нарушений нижней челюсти.

Таким образом, приведенные выше методики не являются способами определения параметров в истинно трехмерном пространстве, так как все измерения осуществляются на двумерной плоскости. Кроме того, фрагментарные сведения о методиках не обеспечивают комплексного представления о строении ЧЛО. Часто представленные результаты основываются исключительно на субъективных оценках авторов и не обусловлены статистическими расчетами и клинической эффективностью. Многие источники [46–50] не содержат информации о способах измерения ан-

тропометрических параметров в истинно трехмерном пространстве и не предоставляют данные о разработанных нормах для параметров анатомических ориентиров относительно референтных плоскостей. Авторы также опираются на уже существующие методики двумерных исследований и не дают четкого описания плоскости, относительно которой происходит реконструкция латеральных цефалограмм.

Применение данных КЛКТ с сохранением истинной ориентации отдельных анатомических ориентиров в трехмерном пространстве целесообразно для планирования ортодонтического [52] или ортогнатического лечения [53–55] (особенно у лиц с асимметричными

деформациями ЧЛО [56], а также при дисфункции височно-нижнечелюстного сустава (ВНЧС) [57]), для измерения длины зубной дуги [58] и определения объема костной ткани альвеолярного отростка при проведении имплантации [59, 60].

Попытки развития и усовершенствования трехмерной краниометрии предпринимались исследователями неоднократно. Еще в 1994 г. А. Jacobson и R.L. Jacobson [61] предложили подход, заключающийся в совмещении данных КЛКТ — для расчета твердотканых параметров и скана лица — для получения данных о состоянии мягких тканей. Была предпринята попытка определения антропометрических норм, относительно которых стало бы возможно измерение

цефалометрических параметров в истинно трехмерном пространстве. Анализ осуществляли с применением программного комплекса для цефалометрии. На изображении черепа последовательно расставляли 29 базовых точек, необходимых для проведения измерений. В качестве референтных плоскостей использовали переднюю плоскость лица для оценки истинного положения носа, губ и подбородка относительно точки А; верхнюю и нижнюю, правую и левую латеральные, а также срединную сагитальную плоскости (рис. 2). При измерениях удалось определить истинное положение верхней челюсти при гармонично развитом лице; положение мягких тканей носа, верхней, нижней губ и подбородка относительно передней

лицевой плоскости; положение нижней челюсти относительно переднего основания черепа.

Преимущество предложенного метода [61] заключается в четко определенных, хотя и единичных нормах параметров ЧЛО (общей высоты лица, верхней и нижней его частей, вертикальных размеров подбородка и ширины лица применительно для мужчин и женщин, а также для отдельных форм черепа в зависимости от этнической принадлежности пациента). Ценность метода снижает отсутствие внимания к сагитальной плоскости нижней челюсти как к отдельной подвижной структуре черепа. Несмотря на возможность измерения угловых и линейных параметров объемного изображения и определения расстояний между антропометрическими точками, глубоко залегающими в анатомических пространствах черепа, существенным недостатком метода является отсутствие информации о статистически значимо верифицированных антропометрических нормах параметров черепа.

Более информативный метод был предложен G. Bettega с соавт. (2000) [62]. Для определения истинного положения верхней челюсти относительно основания черепа проводили цефалометрический анализ, основанный на методе Delarie. Для исследования ЧЛО использовали 12 анатомических ориентиров: симметричные (Me, Pcp, fm) и несимметричные (N, ANS, PNS, np, chin, chin'), а также 2 угла: α и β . С помощью

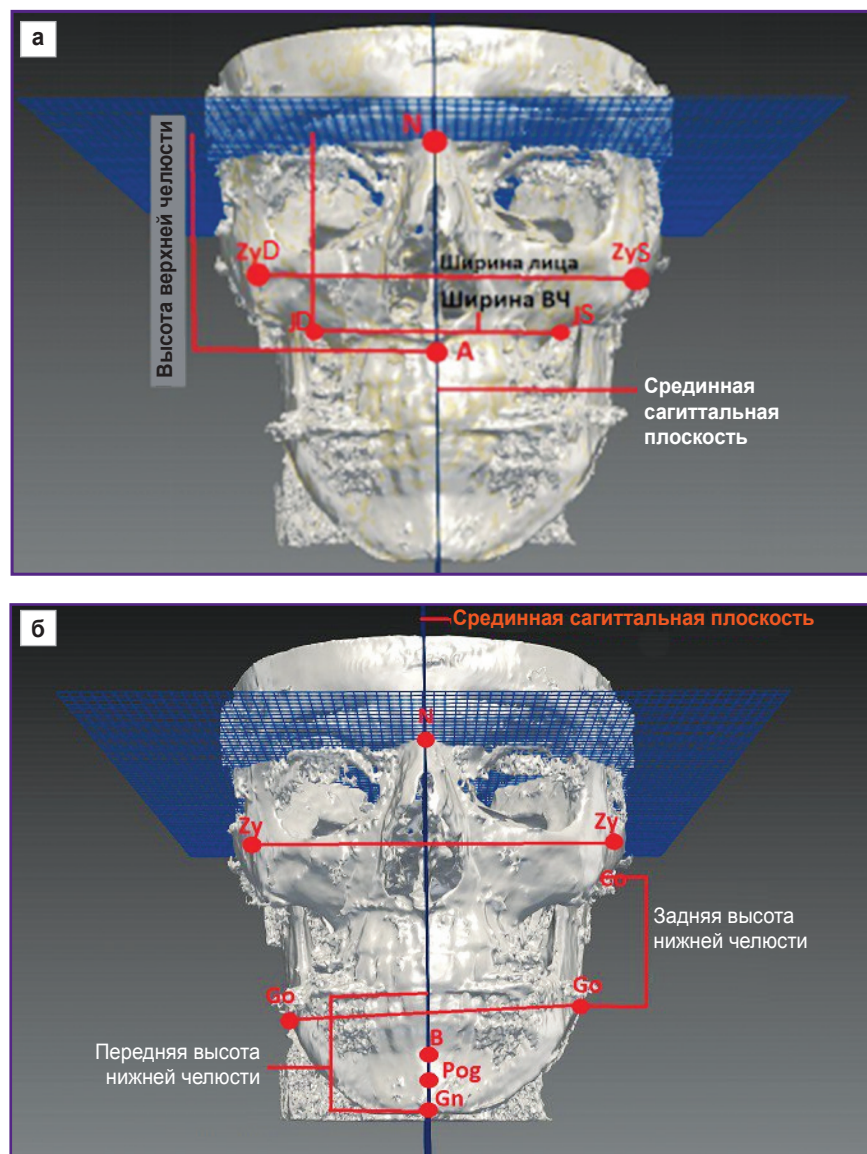


Рис. 2. Трехмерная краниометрия по А. Jacobson и R.L. Jacobson [61]:
 а — построение срединной сагитальной плоскости через точки N и A; определение высоты верхней челюсти (A–N); ширины верхней челюсти (JD–JS); ширины лица (ZyD, ZyS);
 б — определение задней высоты нижней челюсти (Pt–Go); передней высоты нижней челюсти (OP–Gn)

этих анатомических опорных точек осуществляли построение референсных плоскостей и выполняли цефалометрический анализ. В ходе исследования авторам удалось определить ре- и прогнатизм верхней и нижней челюстей и идентифицировать их положение относительно основания черепа. Недостатком предложенного способа является построение срединной сагиттальной плоскости через точки, расположенные на основании черепа, верхней и нижней челюстях, т.е. при таком подходе не учитываются возможные асимметричные деформации ЧЛО, при которых эти анатомические ориентиры будут находиться в разных плоскостях. Это в свою очередь может привести к серьезным искажениям в полученных результатах измерений.

Одной из попыток создания истинной трехмерной цефалометрии стал комплексный анализ Total Face Approach (TFA), предложенный G. Perrotti с соавт. (2017) [63, 64]. Метод представлял собой алгоритмы для определения симметричности лицевых структур, сагиттальных соотношений челюстей и локализации отдельных антропометрических ориентиров и позволял классифицировать тип роста лицевых структур на основании данных КЛКТ. Цель анализа — определение истинных размеров анатомических структур без искажения значений параметров, характерного для двухмерных изображений. В ходе исследования на 36 КЛКТ проводили вычисления в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. В нулевом положении расставляли точки-ориентиры, относительно которых в дальнейшем осуществляли угловые и линейные измерения анатомических структур черепа путем определения расстояния между исходной точкой и референсной плоскостью. TFA предполагал построение

4 плоскостей в аксиальной проекции, которые были параллельны друг другу: передняя плоскость лица, плоскость передней носовой ости, подбородочная плоскость, а также фронтальная плоскость (рис. 3). Расстояния между плоскостями измерялись относительно одной точки и одной плоскости: например, передние верхние вертикальные размеры определяли расстоянием между SFP (superior facial plane) и ANS (anterior nasal spine) и расстоянием между ANSP (anterior nasal spine plane) и Me; полные передние вертикальные размеры — расстоянием между MP (mental plane) и Nasion.

Преимущество системы TFA заключалось в дополнительном применении данных мультиспиральной компьютерной томографии [23, 65, 66]. Это дает возможность получить развернутое представление о твердых и мягких тканях ЧЛО, повышая при этом точность цефалометрического исследования [67].

Ретроспективный характер исследований и небольшой объем выборки КЛКТ не позволяют всесторонне оценить эффективность TFA. Теоретически применение данного подхода могло бы способствовать разработке стандартизированных норм антропометрических параметров, необходимых для проведения цефалометрического анализа в истинно трехмерном пространстве. Однако текущее отсутствие таких норм ставит под сомнение целесообразность использования метода TFA для полноценного изучения структур ЧЛО [65–67].

Трехмерные изображения черепа также востребованы в ортодонтии и хирургической стоматологии для определения положения отдельных групп зубов [68–70].

Данные КЛКТ позволяют получить информацию о залегании ретинированных зубов в альвеолярном

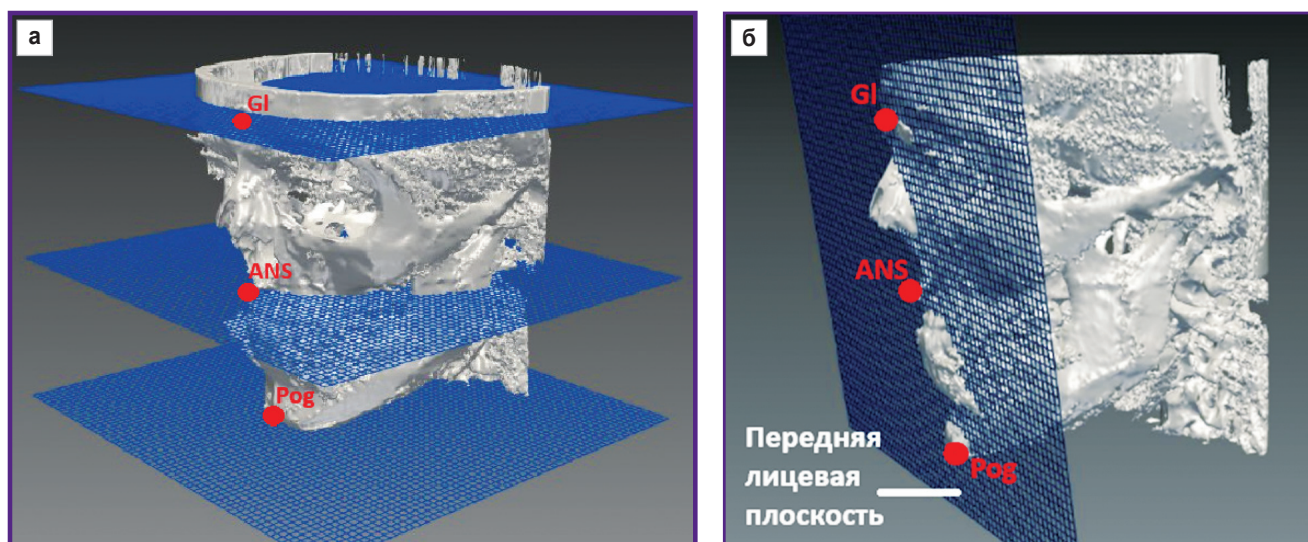


Рис. 3. Трехмерный цефалометрический анализ методом Total Face Approach [63, 64]:

а — построение аксиальной плоскости через точки GI (фронтальная плоскость), ANS (плоскость передней носовой ости), Pog (подбородочная плоскость);

б — построение передней лицевой плоскости через точки GI, ANS, Pog

отростке челюсти и работать с изображениями, повышая точность идентификации положения зубов [71–74].

Так, группа отечественных ученых (2018) [75] предложила способ определения степени залегания ретинированных зубов, а также оси угла расположения ретинированных зубов фронтального отдела базиса верхней челюсти. С целью получения данных о топографии резцов и клыков на КЛКТ-изображении в сагиттальной проекции отмечали точки SNA и SNP, после чего соединяли их отрезком SNA–SNP. Далее

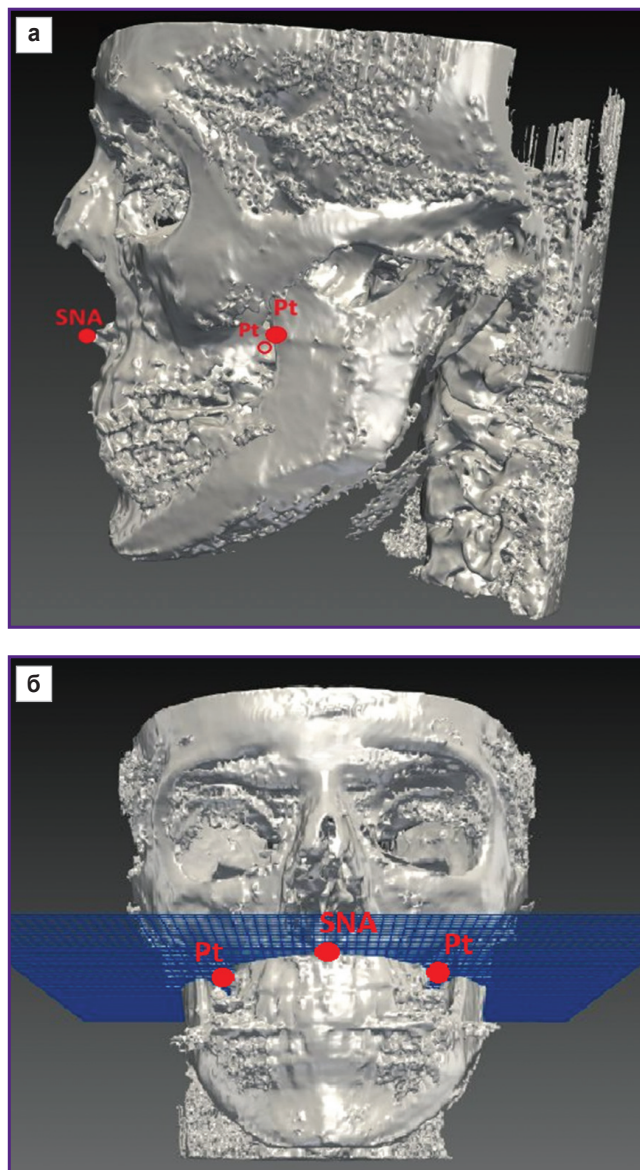


Рис. 4. Способ определения положения верхней челюсти по методу А.С. Архиповой и А.В. Архипова [76]:
 а — анализ изображения конусно-лучевой компьютерной томографии в боковой проекции путем построения плоскости, проходящей через точки SNA, Pt справа и слева;
 б — анализ изображения конусно-лучевой компьютерной томографии во фронтальной проекции путем построения плоскости, проходящей через точки SNA, Pt справа и слева

на апикальном базисе верхней челюсти строили плоскость, а вертикальное расстояние между ее отрезками делили на 3 равные части, через каждую точку каждой части проводили горизонтальные линии. Полученные линии при пересечении образуют углы, относительно которых возможно определить истинное положение ретинированных зубов и оценить сложности постановки зуба в зубной ряд в ходе ортодонтического лечения в зависимости от степени его залегания в альвеолярном отростке. Метод также предполагал определение оси наклона ретинированного зуба путем измерения угла, одна из сторон которого — срединная ось ретинированного зуба. Недостатками данного метода являются ограниченный диапазон определяемых параметров и определение положения ретинированных зубов исключительно фронтальной группы без возможности изучения локализации моляров и премоляров.

Группой других отечественных ученых предпринимались попытки перехода к работе с рентгенограммами в трехмерном пространстве. Так, в 2019 г. предложен метод определения истинного положения верхней челюсти в трехмерном пространстве [76]. Данные КЛКТ пациента предварительно обрабатывали в ПО для перевода их в двухмерные цефалогаммы. На полученных срезах изображения отмечали точку ANS и точки Pt–M справа и слева, через которые строили небную плоскость (ANS–Pt–M-plane), соответствующую истинному положению верхней челюсти (рис. 4). Недостаток предложенного авторами метода заключался в отсутствии возможности получения числовых значений для определения положения верхней челюсти, а также для измерения расстояния от изучаемой структуры до других анатомических образований черепа. Кроме того, метод не предусматривает его использования для нижней челюсти.

С. Maspero с соавт. (2020) [77] предложили методику определения размеров нижней челюсти и направления ее роста. На теле нижней челюсти последовательно обозначали точки GoR (Go Right), GoL (Go Left) и Me и рассчитывали угловые и линейные параметры между получившимися отрезками. Авторы доказали необходимость определения точек костных структур в трехмерном пространстве для наиболее полного понимания клинической ситуации конкретного пациента.

Для оценки апикального базиса верхней челюсти Е.А. Ищенко и Н.В. Попов (2022) [78] выполняли КЛКТ и переводили полученные данные в STL-формат для создания цифровой модели зубов (рис. 5). При моделировании удаляли воксели, представляющие собой костную ткань альвеолярного отростка, благодаря чему становилось возможным проведение измерений относительно корней зубов. Измерения в области многокорневых зубов осуществляли по щечным корням, заканчивая дистально-щечным корнем первого постоянного моляра на верхней челюсти и дистальным корнем на нижней челюсти. Для интерпретации

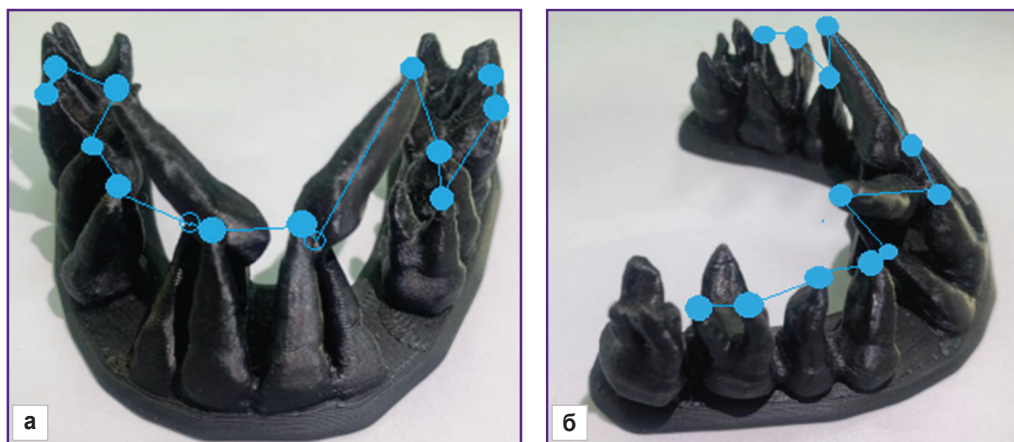


Рис. 5. Модель зубного ряда для измерения апикального базиса верхней челюсти по Е.А. Ищенко и Н.В. Попову [78]

полученных результатов авторы определили нормы соотношения мезио-дистальных размеров 12 верхних зубов к длине и ширине апикального базиса в отдельных группах зубов. Исследование правой и левой сторон челюсти проводили отдельно для выявления степени асимметрии и сопоставления с шириной апикального базиса, измеряемой как расстояние между дистальными корнями первых премоляров и дистально-щечными корнями первых постоянных моляров обеих сторон челюсти. Затем, сравнивая данные с мезио-дистальными размерами коронок 12 постоянных зубов, определяли наличие необходимого пространства для зубов с левой или правой стороны челюсти. Авторы предлагают определять мезио-дистальные размеры от контактных пунктов зубов, поскольку это дает представление о протяженности зубного ряда, однако такой способ не позволяет рассчитать место, необходимое для расположения имеющихся зубов. Параметры апикального базиса челюсти невозможно измерить по верхушкам корней зубов, так как при аномалиях в вертикальном и вестибуло-оральном направлениях будет происходить искажение результатов, что может привести к удлинению измеряемых отрезков. Существенным недостатком метода также является отсутствие возможности определения положения челюсти в пространстве черепа. Кроме того, метод является трудоемким и трудозатратным и требует наличия специализированного оборудования.

С целью определения истинных размеров и положения верхней челюсти относительно переднего основания черепа в трехмерном пространстве предложен способ [79], в котором с помощью математических алгоритмов строятся Франкфуртская горизонтальная, срединная сагиттальная и назальная плоскости, а также плоскость переднего основания черепа (рис. 6). Данный метод позволяет определить истинные размеры и положение верхней челюсти и оценить степень симметричности костных структур обеих половин лица в области исследования, однако не предусматривает

получения пространственного взаиморасположения верхней и нижней челюстей.

Важной задачей трехмерного цефалометрического анализа является определение параметров нижней челюсти. Длина тела нижней челюсти, измеряемая расстоянием между точками Me и Go, существенно подвержена проекционным искажениям на ТРГ, что подтверждено многочисленными исследованиями [80–82].

В 2023 г. коллектив авторов [83] разработал способ, позволяющий определять истинные размеры нижней челюсти в трехмерном пространстве при помощи специализированного программного обеспечения. Так, определить длину и степень симметричности тела нижней челюсти и ее ветвей можно путем расстановки анатомических опорных точек относительно определенных плоскостей (рис. 7). Авторами была предложена сагиттальная плоскость, учитывающая возможные отклонения в височно-нижнечелюстном суставе и позволяющая повысить точность диагностики симметричности костных структур правой и левой половин нижней челюсти. Недостатки метода — отсутствие анализа пространственных взаимоотношений челюстей и фрагментарность данных, не позволяющие оценивать другие структуры ЧЛО и определять направления их роста.

Описанные разработки [14, 79–83] позволили получить информацию об истинных размерах и о положении верхней и нижней челюстей относительно других структур ЧЛО, а также определить их симметричность в пространстве. Однако при проведении измерений игнорировались другие цефалометрические параметры, а также отсутствовали значения антропометрических норм для величин анатомических образований.

Таким образом, подтверждена несостоятельность современных методов объемного цефалометрического анализа, которая проявляется в разрозненности и фрагментарности, а также в отсутствии стандартизированных норм, с которыми возможно сопоставлять данные полученных измерений.

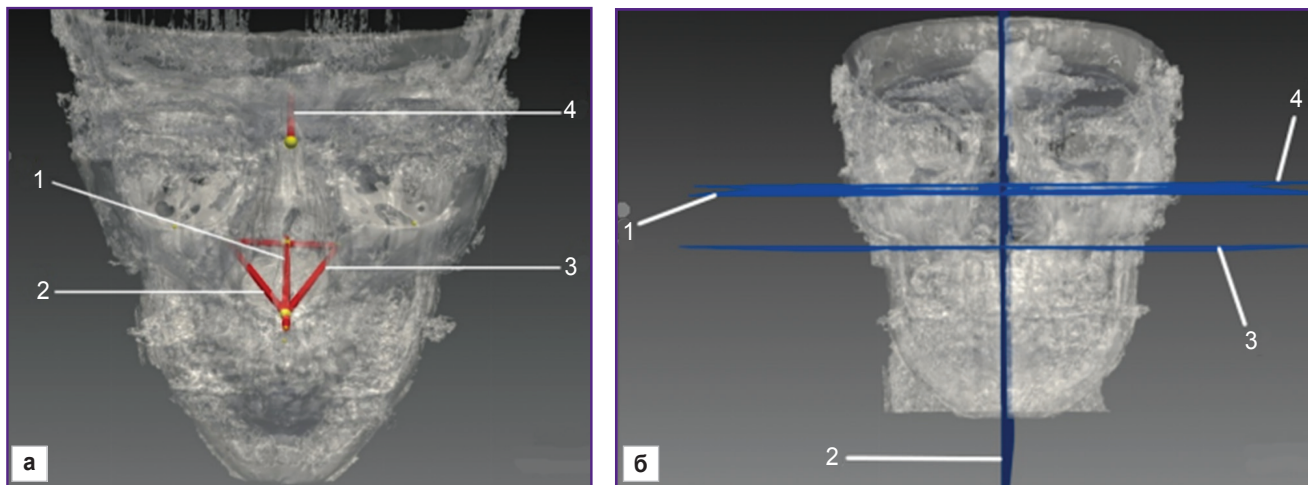


Рис. 6. Определение истинных размеров верхней челюсти в трехмерном пространстве по А.В. Колсанову с соавт. [79]:
 а — изображаемые отрезки: 1 — ANS–PNS; 2 — FPMID' A', длина верхней челюсти справа; 3 — FPMIS' A', длина верхней челюсти слева; 4 — NSe;
 б — изображаемые плоскости: 1 — FHD (Frankfort plane dexter), правая франкфуртская горизонтальная плоскость; 2 — PSMax (planum saggitale maxillae), саггитальная плоскость верхней челюсти; 3 — PN (planum nasale), горизонтальная плоскость передней и задней носовых остей; 4 — FHS (Frankfort plane sinistra), левая франкфуртская горизонтальная плоскость

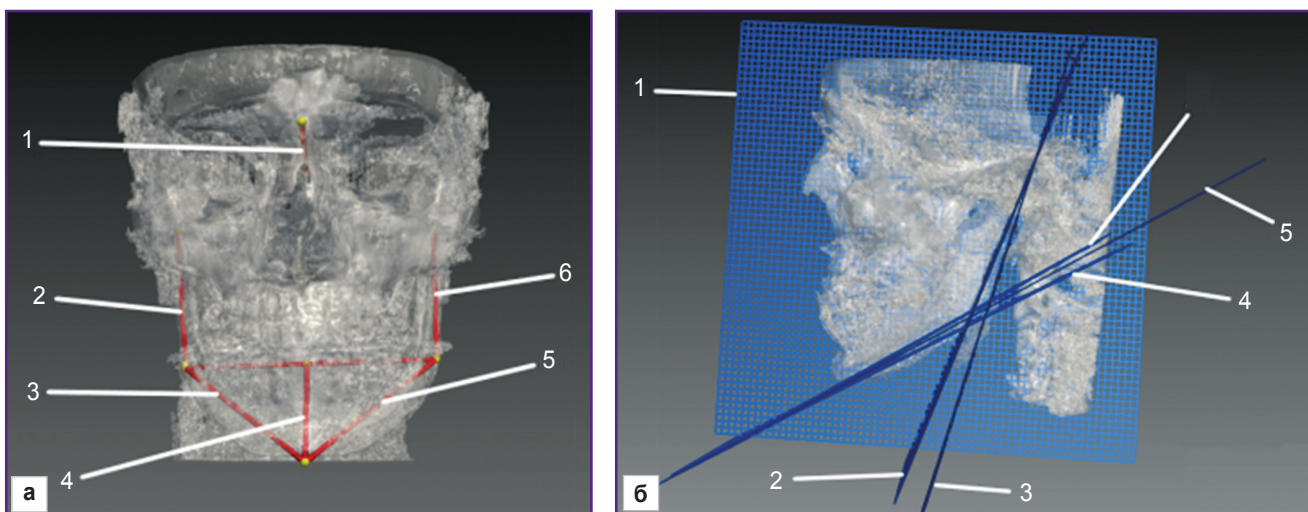


Рис. 7. Определение истинных размеров нижней челюсти в трехмерном пространстве при помощи программного обеспечения [83]:
 а — изображаемые отрезки: 1 — отрезок, соединяющий точки N и Se; 2 — отрезок PRMD (plana ramus mandibulae dexter); 3 — отрезок PCMD (plana corpus mandibulae dexter); 4 — перпендикуляр к правой и левой плоскостям ветвей нижней челюсти; 5 — отрезок PCMS (plana corpus mandibulae sinister); 6 — отрезок PRMS (plana ramus mandibulae sinister);
 б — изображаемые плоскости: 1 — PSM (plana saggitalia mandibula), саггитальная плоскость нижней челюсти; 2 — PRMS, вертикальная плоскость левой ветви нижней челюсти; 3 — PRMD, вертикальная плоскость правой ветви нижней челюсти; 4 — PCMS, горизонтальная плоскость тела нижней челюсти слева; 5 — PMMI (plana media mandibulae inferioris), горизонтальная плоскость тела нижней челюсти; 6 — PCMD, горизонтальная плоскость тела нижней челюсти справа

Заключение

Анализ литературных данных показал, что многие методы цефалометрического анализа рентгенологических изображений, заявленные как трехмерные, не являются таковыми, поскольку используют двухмерные реформаты изображений челюстно-лицевой

области пациента для измерения угловых и линейных параметров. В методах же истинно трехмерного анализа содержится противоречивая и фрагментарная информация, основанная на ограниченных наборах данных. Кроме того, наблюдается отсутствие единства относительно выбора опорных точек и референтных плоскостей для измерения искомым

параметров. Некоторые методики предполагают совмещение двух и более видов исследований, что делает диагностику трудоемкой и дорогостоящей. Вероятно, по этой причине они не нашли широкого клинического применения. Часто из вида упускается тот факт, что нижняя челюсть является отдельной подвижной структурой [84], требующей определения ее собственной сагиттальной плоскости для корректной диагностики.

Одним из основных недостатков существующих методов является отсутствие унифицированных стандартов для измерений в трехмерном пространстве. Их разработка предполагает анализ большого массива данных, что представляет собой непростую задачу. Программы-просмотрщики в большинстве случаев имеют ограниченные функции, что обуславливает необходимость создания методик для точного вычисления координат анатомических ориентиров в пространстве и определения их взаимосвязей, а также расширения функционала программных комплексов [85–88]. В этом контексте использование искусственных нейронных сетей и технологий глубокого машинного обучения представляется перспективным для обработки объемных изображений. Эти технологии могут значительно облегчить процесс сбора данных для разработки норм, поскольку позволяют определять положение отдельных вокселей, отражающих конкретные образования на черепе, и выполнять сложные комплексные измерения [89–94].

Вклад авторов: И.О. Аюпова, А.В. Колсанов, Н.В. Попов — концепция и дизайн исследования; И.О. Аюпова, А.Ю. Махота, М.А. Davidyuk, И.А. Некрасов, П.А. Романова — сбор и обработка материалов; Хамадеева А.М. — интерпретация результатов; Аюпова И.О., Махота А.Ю. — написание текста; А.В. Колсанов, Н.В. Попов, А.М. Хамадеева — редактирование текста.

Финансирование исследования и конфликт интересов. Исследование не финансировалось какими-либо источниками, и конфликты интересов, связанные с данным исследованием, отсутствуют.

Литература/References

1. Kaya K.S., Türk B., Cankaya M., Seyhun N., Coşkun B.U. Assessment of facial analysis measurements by golden proportion. *Braz J Otorhinolaryngol* 2019; 85(4): 494–501, <https://doi.org/10.1016/j.bjorl.2018.07.009>.
2. Popova E., Petrova A., Zhilyaeva O. Anthropometric indicators of diagnostic models in 12–15 aged children with crowdedness of the teeth. *Internauka* 2017; 30: 74–78.
3. Paiva J.B., Attizzani M.F., Miasiro Júnior H., Rino Neto J. Facial harmony in orthodontic diagnosis and planning. *Braz Oral Res* 2010; 24(1): 52–57, <https://doi.org/10.1590/s1806-83242010000100009>.
4. Успенская О.А., Плишкина А.А., Жданова М.Л., Горячева И.П., Богомолова Ю.Б. Роль цифровой дентальной фотографии в практике врача-стоматолога терапевта.

Медико-фармацевтический журнал «Пульс» 2019; 21(9): 5–11.

Uspenskaya O.A., Plishkina A.A., Zhdanova M.L., Goryacheva I.P., Bogomolova Yu.B. The role of digital dental photography in the practice of dentistry. *Mediko-farmaceuticeskij zurnal "Pul's"* 2019; 21(9): 5–11.

5. Nishi S.E., Basri R., Alam M.K. Uses of electromyography in dentistry: an overview with meta-analysis. *Eur J Dent* 2016; 10(3): 419, <https://doi.org/10.4103/1305-7456.184156>.

6. Talmaceanu D., Bolog N., Leucuta D., Tig I.A., Buduru S. Diagnostic use of computerized axiography in TMJ disc displacements. *Exp Ther Med* 2022; 23(3): 213, <https://doi.org/10.3892/etm.2022.11137>.

7. Aşantoğrul F., Dursun H., Canger E.M., Bayram F. Clinical and radiological evaluation of dentomaxillofacial involvement in type I Gaucher disease. *Oral Radiol* 2022; 38(2): 210–223, <https://doi.org/10.1007/s11282-021-00546-2>.

8. Sadr S., Mohammad-Rahimi H., Ghorbanimehr M.S., Rokhshad R., Abbasi Z., Soltani P., Moaddabi A., Shahab S., Rohban M.H. Deep learning for tooth identification and enumeration in panoramic radiographs. *Dent Res J (Isfahan)* 2023; 20: 116.

9. Архипов А.В., Логинова Е.А., Архипов В.Д. Современные методы диагностики в ортодонтии. *Наука и инновации в медицине* 2016; 1(2): 10–13, <https://doi.org/10.35693/2500-1388-2016-0-2-10-13>.

Arkipov A.V., Loginova E.A., Arkipov V.D. Modern methods of diagnosis in orthodontics. *Nauka i innovacii v medicine* 2016; 1(2): 10–13, <https://doi.org/10.35693/2500-1388-2016-0-2-10-13>.

10. Кухарев Г.А., Казиева Н. Применение цифровой лицевой антропометрии. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики* 2019; 19(2): 255–269, <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2019-19-2-255-270>.

Kukharev G.A., Kaziyeva N. Application of digital facial anthropometry. *Naucno-tehniceskij vestnik informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki* 2019; 19(2): 255–269, <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2019-19-2-255-270>.

11. Шкарин В.В., Дмитриенко Т.Д., Кочконян Т.С., Дмитриенко Д.С., Ягупова В.Т. Анализ классических и современных методов биометрического исследования зубочелюстных дуг в периоде прикуса постоянных зубов (обзор литературы). *Вестник Волгоградского государственного медицинского университета* 2022; 19(1): 9–16.

Shkarin V.V., Dmitrienko T.D., Kochkonyan T.S., Dmitrienko D.S., Yagupova V.T. Analysis of classical and modern methods of biometric examination of dental arches in the period of permanent teeth (literature review). *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo medicinskogo universiteta* 2022; 19(1): 9–16.

12. Aragón M.L., Pontes L.F., Bichara L.M., Flores-Mir C., Normando D. Validity and reliability of intraoral scanners compared to conventional gypsum models measurements: a systematic review. *Eur J Orthod* 2016; 38(4): 429–434, <https://doi.org/10.1093/ejo/cjw033>.

13. Abu A., Ngo C.G., Abu-Hassan N.I.A., Othman S.A. Automated craniofacial landmarks detection on 3D image using geometry characteristics information. *BMC Bioinformatics* 2019; 19(Suppl 13): 548, <https://doi.org/10.1186/s12859-018-2548-9>.

14. Albarakati S.F., Kula K.S., Ghoneima A.A. The reliability and reproducibility of cephalometric measurements:

a comparison of conventional and digital methods. *Dentomaxillofac Radiol* 2012; 41(1): 11–17, <https://doi.org/10.1259/dmfr/37010910>.

15. Jung P.K., Lee G.C., Moon C.H. Comparison of cone-beam computed tomography cephalometric measurements using a midsagittal projection and conventional two-dimensional cephalometric measurements. *Korean J Orthod* 2015; 45(6): 282–288, <https://doi.org/10.4041/kjod.2015.45.6.282>.

16. Oenning A.C., Jacobs R., Pauwels R., Stratis A., Hedesiu M., Salmon B.; DIMITRA Research Group. Cone-beam CT in paediatric dentistry: DIMITRA project position statement. *Pediatr Radio* 2018; 48(3): 308–316, <https://doi.org/10.1007/s00247-017-4012-9>.

17. Kim M.J., Liu Y. Using three-dimensional craniofacial images to construct horizontal reference plane. *Beijing Da Xue Xue Bao Yi Xue Ban* 2019; 51(5): 937–943, <https://doi.org/10.19723/j.issn.1671-167x.2019.05.024>.

18. Wang R.H., Ho C.T., Lin H.H., Lo L.J. Three-dimensional cephalometry for orthognathic planning: normative data and analyses. *J Formos Med Assoc* 2020; 119(1 Pt 2): 191–203, <https://doi.org/10.1016/j.jfma.2019.04.001>.

19. van Vlijmen O.J.C., Maal T., Bergé S.J., Bronkhorst E.M., Katsaros C., Kuijpers-Jagtman A.M. A comparison between 2D and 3D cephalometry on CBCT scans of human skulls. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2010; 39(2): 156–160, <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2009.11.017>.

20. Kim J., Kim I., Kim Y.J., Kim M., Cho J.H., Hong M., Kang K.H., Lim S.H., Kim S.J., Kim Y.H., Kim N., Sung S.J., Baek S.H. Accuracy of automated identification of lateral cephalometric landmarks using cascade convolutional neural networks on lateral cephalograms from nationwide multi-centres. *Orthod Craniofac Res* 2021; 24(Suppl 2): 59–67, <https://doi.org/10.1111/ocr.12493>.

21. Bras P., Morawe C., Labouré S., Perrin F., Vivo A., Barrett R. X-ray mirrors with sub-nanometre figure errors obtained by differential deposition of thin WSi₂ films. *J Synchrotron Radiat* 2023; 30(Pt 4): 708–716, <https://doi.org/10.1107/s1600577523003697>.

22. Колсанов А.В., Попов Н.В., Аюпова И.О., Махота А.Ю., Давидюк М.А. Способ оценки качества телерентгенологических снимков. Патент РФ 2023100460; 2023.

Kolsanov A.V., Popov N.V., Ayupova I.O., Makhota A.Yu., Davidyuk M.A. A method for assessing the quality of telerentgenological images. Patent RU 2023100460; 2023.

23. Dillenseger J.P., Matern J.F., Gros C.I., Bornert F., Goetz C., Le Minor J.M., Constantinesco A., Choquet P. MSCT versus CBCT: evaluation of high-resolution acquisition modes for dento-maxillary and skull-base imaging. *Eur Radiol* 2015; 25(2): 505–515, <https://doi.org/10.1007/s00330-014-3439-8>.

24. Jacobs R. Dental cone beam CT and its justified use in oral health care. *JBR-BTR* 2011; 94(5): 254–265, <https://doi.org/10.5334/jbr-btr.662>.

25. Chun J.H., de Castro A.C.R., Oh S., Kim K.H., Choi S.H., Nojima L.I., Nojima M.D.C.G., Lee K.J. Skeletal and alveolar changes in conventional rapid palatal expansion (RPE) and miniscrew-assisted RPE (MARPE): a prospective randomized clinical trial using low-dose CBCT. *BMC Oral Health* 2022; 22(1): 114, <https://doi.org/10.1186/s12903-022-02138-w>.

26. Thawri S.R., Paul P., Reche A., Rathi H.P. 3D technology used for precision in orthodontics. *Cureus* 2023; 15(10): e47170, <https://doi.org/10.7759/cureus.47170>.

27. Francisco I., Ribeiro M.P., Marques F., Travassos R., Nunes C., Pereira F., Caramelo F., Paula A.B., Vale F. Application of three-dimensional digital technology in orthodontics: the state of the art. *Biomimetics (Basel)* 2022; 7(1): 23, <https://doi.org/10.3390/biomimetics7010023>.

28. Kapila S.D., Nervina J.M. CBCT in orthodontics: assessment of treatment outcomes and indications for its use. *Dentomaxillofac Radiol* 2015; 44(1): 20140282, <https://doi.org/10.1259/dmfr.20140282>.

29. Salari B., Tofangchiha M., Padisar P., Reda R., Zanza A., Testarelli L. Diagnostic accuracy of conventional orthodontic radiographic modalities and cone-beam computed tomography for localization of impacted maxillary canine teeth. *Sci Prog* 2024; 107(1): 368504241228077, <https://doi.org/10.1177/00368504241228077>.

30. Eslami E., Barkhordar H., Abramovitch K., Kim J., Masoud M.I. Cone-beam computed tomography vs conventional radiography in visualization of maxillary impacted-canine localization: a systematic review of comparative studies. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2017; 151(2): 248–258, <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2016.07.018>.

31. de-Azevedo-Vaz S.L., Peyneau P.D., Ramirez-Sotelo L.R., Vasconcelos Kde F., Campos P.S., Haiter-Neto F. Efficacy of a cone beam computed tomography metal artifact reduction algorithm for the detection of peri-implant fenestrations and dehiscences. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol* 2016; 121(5): 550–556, <https://doi.org/10.1016/j.oooo.2016.01.013>.

32. Togan B., Gander T., Lanzer M., Martin R., Lübbers H.T. Incidence and frequency of nondental incidental findings on cone-beam computed tomography. *J Craniomaxillofac Surg* 2016; 44(9): 1373–1380, <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2016.06.026>.

33. Gillot M., Miranda F., Baquero B., Ruellas A., Gurgel M., Al Turkestani N., Anchling L., Hutin N., Biggs E., Yatabe M., Paniagua B., Fillion-Robin J.C., Allemang D., Bianchi J., Cevidanes L., Prieto J.C. Automatic landmark identification in cone-beam computed tomography. *Orthod Craniofac Res* 2023; 26(4): 560–567, <https://doi.org/10.1111/ocr.12642>.

34. Xu S., Peng H., Yang L., Zhong W., Gao X., Song J. An automatic grading system for orthodontically induced external root resorption based on deep convolutional neural network. *J Imaging Inform Med* 2024, <https://doi.org/10.1007/s10278-024-01045-6>.

35. Schwarz L., Unger E., Gahleitner A., Rausch-Fan X., Jonke E. A novel approach for gingiva thickness measurements around lower anterior teeth by means of dental magnetic resonance imaging. *Clin Oral Invest* 2023; 28(1): 18, <https://doi.org/10.1007/s00784-023-05459-4>.

36. Abesi F., Hozuri M., Zamani M. Performance of artificial intelligence using cone-beam computed tomography for segmentation of oral and maxillofacial structures: a systematic review and meta-analysis. *J Clin Exp Dent* 2023; 15(11): e954–e962, <https://doi.org/10.4317/jced.60287>.

37. Cattaneo P.M., Bloch C.B., Calmar D., Hjortshøj M., Melsen B. Comparison between conventional and cone-beam computed tomography-generated cephalograms. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2008; 134(6): 798–802, <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2008.07.008>.

38. Park J.H., Hwang H.W., Moon J.H., Yu Y., Kim H., Her S.B., Srinivasan G., Aljanabi M.N.A., Donatelli R.E., Lee S.J. Automated identification of cephalometric landmarks: part 1-comparisons between the latest deep-learning methods

- YOLOV3 and SSD. *Angle Orthod* 2019; 89(6): 903–909, <https://doi.org/10.2319/022019-127.1>.
39. Chang Z.C., Hu F.C., Lai E., Yao C.C., Chen M.H., Chen Y.J. Landmark identification errors on cone-beam computed tomography-derived cephalograms and conventional digital cephalograms. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2011; 140(6): e289–e297, <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2011.06.024>.
40. Huang Y., Fan F., Syben C., Roser P., Mill L., Maier A. Cephalogram synthesis and landmark detection in dental cone-beam CT systems. *Med Image Anal* 2021; 70: 102028, <https://doi.org/10.1016/j.media.2021.102028>.
41. Kotuła J., Kuc A.E., Lis J., Kawala B., Sarul M. New sagittal and vertical cephalometric analysis methods: a systematic review. *Diagnostics (Basel)* 2022; 12(7): 1723, <https://doi.org/10.3390/diagnostics12071723>.
42. Palczewska-Komsa M.P., Gapiński B., Nowicka A. The influence of new bioactive materials on pulp-dentin complex regeneration in the assessment of cone beam computed tomography (CBCT) and computed micro-tomography (micro-CT) from a present and future perspective — a systematic review. *J Clin Med* 2022; 11(11): 3091, <https://doi.org/10.3390/jcm11113091>.
43. Frąckiewicz W., Jankowska A., Machoy M.E. CBCT and modern intraoral scanners as tools for developing comprehensive, interdisciplinary treatment plans. *Adv Clin Exp Med* 2024, <https://doi.org/10.17219/acem/175817>.
44. Patel N. Integrating three-dimensional digital technologies for comprehensive implant dentistry. *J Am Dent Assoc* 2010; 141(2): 20S–24S, <https://doi.org/10.14219/jada.archive.2010.0357>.
45. Наумович С.С., Наумович С.А. Конусно-лучевая компьютерная томография: современные возможности и перспективы применения в стоматологии. *Современная стоматология* 2012; 2: 31–36.
Naumovich S.S., Naumovich S.A. Cone beam computed tomography: contemporary possibilities and perspectives of application in dentistry. *Sovremennaa stomatologia* 2012; 2: 31–36.
46. Treil J., Casteigt J., Borianne P., Madrid C., Jaeger M., de Bonnacaze P. The architectural balance of the face: a 3D cephalometric concept. *Rev Stomatol Chir Maxillofac* 1999; 100(3): 111–112.
47. Olszewski R., Cosnard G., Macq B., Mahy P., Reyhler H. 3D CT-based cephalometric analysis: 3D cephalometric theoretical concept and software. *Neuroradiology* 2006; 48(11): 53–62, <https://doi.org/10.1007/s00234-006-0140-x>.
48. Крыстева С., Матева Н., Боева Т. Рентгенологическая оценка трансверсальных несоответствий лицевого отдела черепа. *Стоматология* 2013; 92(5): 55–60.
Krysteva S., Mateva N., Boeva T. Radiological evaluation of transverse maxillofacial disparity. *Stomatologiya* 2013; 92(5): 55–60.
49. Swennen G.R., Schutyser F. Three-dimensional cephalometry: spiral multi-slice vs cone-beam computed tomography. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2006; 130(3): 410–416, <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2005.11.035>.
50. Baldini B., Cavagnetto D., Baselli G., Sforza C., Tartaglia G.M. Cephalometric measurements performed on CBCT and reconstructed lateral cephalograms: a cross-sectional study providing a quantitative approach of differences and bias. *BMC Oral Health* 2022; 22(1): 98, <https://doi.org/10.1186/s12903-022-02131-3>.
51. Hou D., Capote R., Bayirli B., Chan D.C.N., Huang G. The effect of digital diagnostic setups on orthodontic treatment planning. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2020; 157(4): 542–549, <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2019.09.008>.
52. Jiang X., Pei J., Liu J., Liao X., Jia F. An MRI-only three-dimensional cephalometry protocol based on the integrated and modular architecture of the human head. *Curr Med Imaging* 2023, <https://doi.org/10.2174/0115734056258953231026094236>.
53. Alkhayer A., Piffkó J., Lippold C., Segatto E. Accuracy of virtual planning in orthognathic surgery: a systematic review. *Head Face Med* 20204; 16(1): 34, <https://doi.org/10.1186/s13005-020-00250-2>.
54. Pachnicz D., Ramos A. Mandibular condyle displacements after orthognathic surgery—an overview of quantitative studies. *Quant Imaging Med Surg* 2021; 11(4): 1628–1650, <https://doi.org/10.21037/qims-20-677>.
55. He X., He J., Yuan H., Chen W., Jiang H., Cheng J. Surgery-first and orthodontic-first approaches produce similar patterns of condylar displacement and remodeling in patients with skeletal class III malocclusion. *J Oral Maxillofac Surg* 2019; 77(7): 1446–1456, <https://doi.org/10.1016/j.joms.2019.01.061>.
56. Chen Y.F., Baan F., Bruggink R., Bronkhorst E., Liao Y.F., Ongkosuwito E. Three-dimensional characterization of mandibular asymmetry in craniofacial microsomia. *Clin Oral Investig* 2020; 24(12): 4363–4372, <https://doi.org/10.1007/s00784-020-03302-8>.
57. Warburton G., Mercuri L.G. Alloplastic reconstruction of the temporomandibular joint in patients with dentofacial deformities. *Atlas Oral Maxillofac Surg Clin North Am* 2022; 30(2): 223–233, <https://doi.org/10.1016/j.cxom.2022.06.004>.
58. Chaaban M., AISulaiman A., Kantarci A., Stashenko P., Will L.A., Motro M. Longitudinal changes in the dental arch width and symmetry in identical and fraternal twins. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2022; 162(5): 704–713, <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2021.06.026>.
59. Neumann P., Siebert D., Faulkner G., Krauss M., Schulz A., Lwowsky C., Tolxdorff T. Virtual 3D cutting for bone segment extraction in maxillofacial surgery planning. *Stud Health Technol Inform* 1999; 62: 235–241.
60. Schepers R.H., Raghoobar G.M., Vissink A., Lahoda L.U., van der Meer W.J., Roodenburg J.L., Reintsema H., Witjes M.J. Three dimensional technology and reconstructions of large defects of the jaw. *Ned Tijdschr Tandheelkd* 2013; 120(9): 462–468, <https://doi.org/10.5177/ntvt.2013.09.12261>.
61. Jacobson A., Jacobson R.L. *Radiographic cephalometry: from basics to 3-D imaging. 2nd edition.* Quintessence Pub Co; 2006.
62. Bettega G., Payan Y., Mollard B., Boyer A., Raphaël B., Lavallée S. A simulator for maxillofacial surgery integrating 3D cephalometry and orthodontia. *Comput Aided Surg* 2000; 5(3): 156–165, [https://doi.org/10.1002/1097-0150\(2000\)5:3<156::aid-igs3>3.0.co;2-6](https://doi.org/10.1002/1097-0150(2000)5:3<156::aid-igs3>3.0.co;2-6).
63. Perrotti G., Testori T., Politi M. 3D imaging and dentistry from multiplanar cephalometry to guided navigation in implantology. *Stoma Edu J* 2017; 4(3): 229, [https://doi.org/10.25241/stomaeduj.2017.4\(3\).bookreview.7](https://doi.org/10.25241/stomaeduj.2017.4(3).bookreview.7).
64. Perrotti G., Baccaglione G., Clauser T., Testarelli L., Del Fabbro M., Testori T. Total face approach (TFA): a novel 3D approach to describe the main cephalometric craniomaxillofacial parameters. *Methods Protoc* 2021; 4(1): 15, <https://doi.org/10.3390/mps4010015>.
65. Patel S., Brown J., Pimentel T., Kelly R.D.,

Abella F., Durack C. Cone beam computed tomography in Endodontics — a review of the literature. *Int Endod J* 2019; 52(8): 1138–1152, <https://doi.org/10.1111/iej.13115>.

66. Holdaway R.A. A soft-tissue cephalometric analysis and its use in orthodontic treatment planning. Part I. *Am J Orthod* 1983; 84(1): 1–28, [https://doi.org/10.1016/0002-9416\(83\)90144-6](https://doi.org/10.1016/0002-9416(83)90144-6).

67. Hans M.G., Palomo J.M., Valiathan M. History of imaging in orthodontics from Broadbent to cone-beam computed tomography. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2015; 148(6): 914–921, <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2015.09.007>.

68. Постников М.А., Слесарев О.В., Трунин Д.А., Андриянов Д.А., Испанова С.Н. Автоматизированный анализ рентгеновских изображений височно-нижнечелюстного сустава у пациентов с ортогнатическим прикусом и физиологической окклюзией. *Вестник рентгенологии и радиологии* 2019; 100(1): 6–14, <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2019-100-1-6-14>.

Postnikov M.A., Slesarev O.V., Trunin D.A., Andriyanov D.A., Ispanova S.N. Automated analysis of X-ray images of the temporomandibular joint in patients with orthognathic bite and physiological occlusion. *Vestnik rentgenologii i radiologii* 2019; 100(1): 6–14, <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2019-100-1-6-14>.

69. Jacobs R., Salmon B., Codari M., Hassan B., Bornstein M.M. Cone beam computed tomography in implant dentistry: recommendations for clinical use. *BMC Oral Health* 2018; 18(1): 88, <https://doi.org/10.1186/s12903-018-0523-5>.

70. Liu J., Hao J., Lin H., Pan W., Yang J., Feng Y., Wang G., Li J., Jin Z., Zhao Z., Liu Z. Deep learning-enabled 3D multimodal fusion of cone-beam CT and intraoral mesh scans for clinically applicable tooth-bone reconstruction. *Patterns (N Y)* 2023; 4(9): 100825, <https://doi.org/10.1016/j.patter.2023.100825>.

71. Флис П.С., Бродецкая Л.А. Анализ рентгенологических особенностей расположения ретенированных зубов у обследуемых пациентов. *Вестник стоматологии* 2019; 33(3): 47–53.

Flis P.S., Brodetska L.O. Analysis of X-ray features of the location of impacted teeth in the examined patients. *Vestnik stomatologii* 2019; 33(3): 47–53.

72. Терновой С.К., Серова Н.С., Иванова Д.В. Методы лучевой диагностики аномалий зубов. *Вестник рентгенологии и радиологии* 2012; 6: 4–7.

Teranova S.K., Serova N.S., Ivanova D.V. Radiodiagnostic methods for dental anomalies. *Vestnik rentgenologii i radiologii* 2012; 6: 4–7.

73. Jang T.J., Kim K.C., Cho H.C., Seo J.K. A fully automated method for 3D individual tooth identification and segmentation in dental CBCT. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell* 2022; 44(10): 6562–6568, <https://doi.org/10.1109/tpami.2021.3086072>.

74. Dinu Ș., Todor L., Zetu I.N., Păcurar M., Porumb A., Milutinovici R.A., Popovici R.A., Brad S., Sink B.A., Popa M. Radiographic methods for locating impacted maxillary canines. *Rom J Morphol Embryol* 2022; 63(4): 599–606, <https://doi.org/10.47162/rjme.63.4.01>.

75. Постников М.А., Трунин Д.А., Степанов Г.В., Кирилин М.М., Кортунова Е.О. Способ диагностики ретенированных зубов верхней челюсти с использованием конусно-лучевой компьютерной томографии. *Стоматология детского возраста и профилактика* 2018; 17(2): 17–23, <https://doi.org/10.25636/pmp.3.2018.2.3>.

Postnikov M.A., Trunin D.A., Stepanov G.V., Kirilin M.M., Kortunova E.O. Method of diagnosis of impacted teeth on the upper jaw using cone-beam computed tomography. *Stomatologia detского возраста i profilaktika* 2018; 17(2): 17–23, <https://doi.org/10.25636/pmp.3.2018.2.3>.

76. Архипова А.С., Архипов А.В. Способ определения положения верхней челюсти. Патент РФ 2689860С1. 2019.

Arkhipova A.S., Arkhipov A.V. Method of making position of maxilla. Patent RU 2689860C1. 2019.

77. Maspero C., Farronato M., Bellincioni F., Cavagnetto D., Abate A. Assessing mandibular body changes in growing subjects: a comparison of CBCT and reconstructed lateral cephalogram measurements. *Sci Rep* 2020; 10(1): 11722, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68562-6>.

78. Ищенко Е.А., Попов Н.В. Измерение параметров апикального базиса верхней челюсти по данным КЛКТ. *Ортодонтия* 2022; 3: 47.

Ishchenko E.A., Popov N.V. Measurement of maxillary apical base parameters from CBCT data. *Ortodontia* 2022; 3: 47.

79. Колсанов А.В., Попов Н.В., Аюпова И.О. Способ определения параметров верхней челюсти в трехмерном пространстве. Патент РФ 2023100458.

Kolsanov A.V., Popov N.V., Ayupova I.O. A method for determining parameters of the upper jaw in three-dimensional space. Patent RU 2023100458.

80. Pittayapat P., Bornstein M.M., Imada T.S., Coucke W., Lambrechts I., Jacobs R. Accuracy of linear measurements using three imaging modalities: two lateral cephalograms and one 3D model from CBCT data. *Eur J Orthod* 2015; 37(2): 202–208, <https://doi.org/10.1093/ejo/cju036>.

81. Farronato M., Cavagnetto D., Abate A., Cressoni P., Fama A., Maspero C. Assessment of condylar volume and ramus height in JIA patients with unilateral and bilateral TMJ involvement: retrospective case-control study. *Clin Oral Investig* 2020; 24(8): 2635–2643 <https://doi.org/10.1007/s00784-019-03122-5>.

82. Maspero C., Abate A., Bellincioni F., Cavagnetto D., Lanteri V., Costa A., Farronato M. Comparison of a tridimensional cephalometric analysis performed on 3T-MRI compared with CBCT: a pilot study in adults. *Prog Orthod* 2019; 20(1): 40, <https://doi.org/10.1186/s40510-019-0293-x>.

83. Аюпова И.О., Буторина О.А., Колсанов А.В., Попов Н.В., Тиунова Н.В., Давидюк М.А. Оценка симметричности костных структур нижней челюсти по данным конусно-лучевой компьютерной томографии. *Стоматология* 2023; 102(6): 33–38, <https://doi.org/10.17116/stomat202310206133>.

Ayupova I.O., Butorina O.A., Kolsanov A.V., Popov N.V., Tiunova N.V., Davidiuk M.A. Lower jawbone structures symmetry evaluation using cone beam computed tomography. *Stomatologiya* 2023; 102(6): 33–38, <https://doi.org/10.17116/stomat202310206133>.

84. Polizzi A., Quinzi V., Ronsivalle V., Venezia P., Santonocito S., Lo Giudice A., Leonardi R., Isola G. Tooth automatic segmentation from CBCT images: a systematic review. *Clin Oral Investig* 2023; 27(7): 3363–3378, <https://doi.org/10.1007/s00784-023-05048-5>.

85. Leonardi R. Cone-beam computed tomography and three-dimensional orthodontics. Where we are and future perspectives. *J Orthod* 2019; 46(1 Suppl): 45–48, <https://doi.org/10.1177/1465312519840029>.

86. Nijkamp P.G., Habets L.L., Aartman I.H., Zentner A. The influence of cephalometrics on orthodontic treatment planning.

Eur J Orthod 2008; 30(6): 630–635, <https://doi.org/10.1093/ejo/cjn059>.

87. Chung E.J., Yang B.E., Park I.Y., Yi S., On S.W., Kim Y.H., Kang S.H., Byun S.H. Effectiveness of cone-beam computed tomography-generated cephalograms using artificial intelligence cephalometric analysis. *Sci Rep* 2022; 12(1): 20585, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25215-0>.

88. Kim J.H., An S., Hwang D.M. Reliability of cephalometric landmark identification on three-dimensional computed tomographic images. *Br J Oral Maxillofac Surg* 2022; 60(3): 320–325, <https://doi.org/10.1016/j.bjoms.2021.07.003>.

89. Zhao J., Xu Y., Wang J., Lu Z., Qi K. 3-dimensional analysis of hard- and soft-tissue symmetry in a Chinese population. *BMC Oral Health* 2023; 23(1): 32, <https://doi.org/10.1186/s12903-023-03163-z>.

90. Gateno J., Xia J.J., Teichgraeber J.F. A new three-dimensional cephalometric analysis for orthognathic surgery. *J Oral Maxillofac Surg* 2011; 69(3): 606–622, <https://doi.org/10.1016/j.joms.2010.09.010>.

91. Hariharan A., Diwakar N.R., Jayanthi K., Hema H.M., Deepukrishna S., Ghaste S.R. The reliability of cephalometric measurements in oral and maxillofacial imaging: cone beam computed tomography versus two-dimensional digital cephalograms. *Indian J Dent Res* 2016; 27(4): 370–377, <https://doi.org/10.4103/0970-9290.191884>.

92. Hwang H.W., Moon J.H., Kim M.G., Donatelli R.E., Lee S.J. Evaluation of automated cephalometric analysis based on the latest deep learning method. *Angle Orthod* 2021; 91(3): 329–335, <https://doi.org/10.2319/021220-100.1>.

93. Dakhno L., Vyshemyrska T., Burlakov P., Storozhenko K., Flis P. Assessment of the feasibility of using cone-beam computed tomography in children for diagnostics, 3D cephalometry and planning orthodontic treatment (review). *Georgian Med News* 2022; 323: 54–60.

94. Adams G.L., Gansky S.A., Miller A.J., Harrell W.E. Jr., Hatcher D.C. Comparison between traditional 2-dimensional cephalometry and a 3-dimensional approach on human dry skulls. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 2004; 126(4): 397–409, <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2004.03.023>.