Вестник оториноларингологии
2021, Т. 86, №2, с. 49-53
https://doi.org/10.17116/otorino20218602149

Vestnik otorinolaringologii
2021, Vol. 86, No. 2, pp. 49-53
https://doi.org/10.17116/otorino20218602149

Автоматизированная система определения морфометрических параметров верхнечелюстной пазухи

© С.Л. КАБАК[1], Г.М. КАРАПЕТЯН[1], Ю.М. МЕЛЬНИЧЕНКО[1], Н.А. САВРАСОВА[2], И.И. КОСИК[1]

[1]УО «Белорусский государственный медицинский университет» Минздрава Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь;
[2]ООО «ЛОДЭ», Минск, Республика Беларусь

РЕЗЮМЕ

Цель исследования. Сравнить ручной, полуавтоматический и автоматический методы определения объема верхнечелюстной пазухи, используя изображения, полученные с помощью конусно-лучевой компьютерной томографии (КЛКТ).

Материал и методы. Данные КЛКТ 48 пациентов (96 верхнечелюстных пазух) медицинских центров Минска, у которых в анамнезе отсутствовали сведения о хирургических вмешательствах на верхнечелюстной пазухе и альвеолярном отростке верхней челюсти. Обучение нейронной сети произведено на КЛКТ сканах 42 пациентов (84 верхнечелюстные пазухи). На КЛКТ сканах 6 пациентов (12 верхнечелюстных пазух) ручным методом измеряли высоту, глубину и ширину пазухи. Объем (V) рассчитывали по формуле: V=высота×глубина×$^1/_3$ ширины. В полуавтоматическом режиме сегментация проводилась экспертом (рентгенологом) интерактивно. Для сегментации верхнечелюстной пазухи в автоматическом режиме применена технология сверточной нейронной сети.

Результаты. При использовании автоматического метода измерения объема пазухи выявлены наибольшие значения параметра. Эти значения находятся в пределах 95% доверительного интервала (±4,29 см^3) среднего объема пазухи при экспертном методе обработки КЛКТ.

Выводы. Установлена высокая корреляция данных, полученных с помощью технологии сверточной нейронной сети (искусственный интеллект), с результатами морфометрии пазухи ручным и полуавтоматическим методами. Использование автоматического метода создания 3D-изображения пазухи не требует от пользователя специальных знаний. Метод имеет хорошую воспроизводимость и реализуется в коротком временном интервале.

Ключевые слова: *верхнечелюстная пазуха, конусно-лучевая компьютерная томография, нейронная сеть.*

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:
Кабак С.Л. — https://orcid.org/0000-0002-7173-1818; e-mail: kabakmorph@gmail.com
Карапетян Г.М. — https://orcid.org/0000-0002-3672-9405; e-mail: greg.itlab@gmail.com
Мельниченко Ю.М. — https://orcid.org/0000-0002-3672-9405; e-mail: mjm1980@yandex.ru
Саврасова Н.А. — https://orcid.org/0000-0003-1297-0226; e-mail: ninasavrassova@tut.by
Косик И.И. — https://orcid.org/0000-0002-0582-0556; e-mail: ivankosik91@gmail.com
Автор, ответственный за переписку: Мельниченко Ю.М. — e-mail: mjm1980@yandex.ru

КАК ЦИТИРОВАТЬ:
Кабак С.Л., Карапетян Г.М., Мельниченко Ю.М., Саврасова Н.А., Косик И.И. Автоматизированная система определения морфометрических параметров верхнечелюстной пазухи. *Вестник оториноларингологии*. 2021;86(2):49–53.
https://doi.org/10.17116/otorino20218602149

Automated system of the determination of maxillary sinus morphometric parameters

© S.L. KABAK[1], G.M. KARAPETYAN[1], Y.M. MELNICHENKO[1], N.A. SAVRASOVA[2], I.I. KOSIK[1]

[1]Belarusian State Medical University, Minsk, Belarus;
[2]LLC «LODE», Minsk, Belarus

ABSTRACT

The aim of the study was to compare manual, semi-automatic and automatic methods for determining the maxillary sinus volume using cone beam computed tomography (CBCT).

Material and methods. CBCT images from 48 patients (96 maxillary sinuses) with no history of sinus and alveolar bone surgery, who were presented to Minsk medical centers, were used in this study. Neural network training was performed on CBCT scans of 42 patients (84 maxillary sinuses).The height, depth and width of the sinus were measured manually on CBCT scans of 6 patients (12 maxillary sinuses). Maxillary sinus volume (V) was calculated by the formula: V=height´depth´1/3 width. Semi-automatic segmentation was carried out by an expert radiologist. The convolutional neural network technology was applied for maxillary sinus automatic segmentation.

Results. The largest values were revealed by using the automatic method for sinus volume measurement. These values were within the 95% confidence interval (±4.29 cm^3) of the average sinus volume obtained from semi-automatic method.

Conclusion. The data obtained using the convolutional neural network technique (artificial intelligence) has a high correlation with the results of sinus morphometric analysis acquired through manual and semi-automatic methods. Automatic maxillary sinus segmentation technique does not require special user knowledge. This method is reproducible and it is implemented in a short time interval.

Keywords: *maxillary sinus, cone beam computed tomography, neural network.*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:
Kabak S.L. — https://orcid.org/0000-0002-7173-1818; e-mail: kabakmorph@gmail.com
Karapetyan G.M. — https://orcid.org/0000-0002-3672-9405; e-mail: greg.itlab@gmail.com
Melnichenko Y.M. — https://orcid.org/0000-0002-3672-9405; e-mail: mjm1980@yandex.ru
Savrasova N.A. — https://orcid.org/0000-0003-1297-0226; e-mail: ninasavrassova@tut.by
Kosik I.I. — https://orcid.org/0000-0002-0582-0556; e-mail: ivankosik91@gmail.com
Corresponding author: Melnichenko Y.M. — e-mail: mjm1980@yandex.ru

TO CITE THIS ARTICLE:
Kabak SL, Karapetyan GM, Melnichenko YM, Savrasova NA, Kosik II. Automated system of the determination of maxillary sinus morphometric parameters. *Bulletin of Otorhinolaryngology = Vestnik otorinolaringologii.* 2021;86(2):49–53. (In Russ.).
https://doi.org/10.17116/otorino20218602149

Формирование верхнечелюстной пазухи начинается у человека на 3-м месяце внутриутробного развития и завершается при вступлении в период постоянного прикуса, примерно в 18—20-летнем возрасте [1]. Усредненные морфометрические параметры пазухи взрослого человека: высота примерно 33 мм, ширина — 23—25 мм и переднезадний размер около 34 мм, объем в среднем 15 см^3 [2].

Морфометрические параметры пазухи детерминированы, прежде всего, полом (у мужчин все размеры пазухи статистически значимо больше, чем у женщин) и формой черепа [3, 4]. Абсолютные значения этих параметров варьируют в зависимости от расовой или этнической принадлежности [5]. Кроме того, факторами, влияющими на объем верхнечелюстной пазухи, могут быть тип дыхания и стоматологический статус [6].

Определение морфометрических параметров верхнечелюстной пазухи у живого человека помогает при диагностике и лечении ряда патологических состояний, связанных с этой анатомической структурой. Например, соотношение объемов верхнечелюстной пазухи, занимаемых измененной слизистой оболочкой и воздухом, может служить критерием тяжести хронических риногенных синуситов, а также использоваться для оценки эффективности химио- и радиотерапии злокачественных опухолей, при планировании процедуры синус-лифтинга или эндоскопических операций на пазухе [6].

Цель исследования — сравнить ручной, полуавтоматический и автоматический методы определения объема верхнечелюстной пазухи, используя изображения, полученные с помощью конусно-лучевой компьютерной томографии (КЛКТ).

Материал и методы

Данные КЛКТ 48 пациентов (96 верхнечелюстных пазух) медицинских центров Минска. Критерием отбора пациентов было отсутствие в анамнезе сведений о хирургических вмешательствах на верхнечелюстной пазухе и альвеолярном отростке верхней челюсти, после которых могла бы измениться нативная архитектура пазухи. Изменения слизистой оболочки пазухи и наличие в ее полости патологического содержимого в расчет не принимались, так как это не препятствовало дифференцировке костных стенок.

Морфометрия 12 верхнечелюстных пазух 6 пациентов (4 женщины и 2 мужчины в возрасте от 22 до 60 лет) проводилась в ручном, полуавтоматическом и автоматическом режимах.

На КЛКТ сканах ручным методом определялись следующие линейные размеры пазухи **(рис. 1)**:

Высота (краниокаудальный размер, craniocaudal dimension, CC) — максимальное расстояние между нижней стенкой глазницы и нижней стенкой пазухи на сагиттальных срезах.

Глубина (переднезадний размер, antero-posterior dimension, AP) — максимальное расстояние между передней и задней стенками пазухи на сагиттальных срезах.

Ширина (медиолатеральный размер, medio-lateral dimension, ML) — максимальное расстояние между медиальной и латеральной стенками пазухи на фронтальных срезах.

Каждое измерение проводилось двумя исследователями, которые выполняли калибровку вместе с рентгенологом.

Во всех случаях пазухи имели форму, близкую к пирамиде, поэтому их объем рассчитывали по формуле:

$$V = \text{высота} \times \text{глубина} \times {}^1/_3 \text{ ширины}.$$

3D-реконструкция в полуавтоматическом и автоматическом режимах, а также расчет объемов верхнечелюстных синусов осуществлялись с использованием функций библиотеки VTK (Visualization Toolkit). Предварительно сегментировались участки верхнечелюстных пазух, обнару-

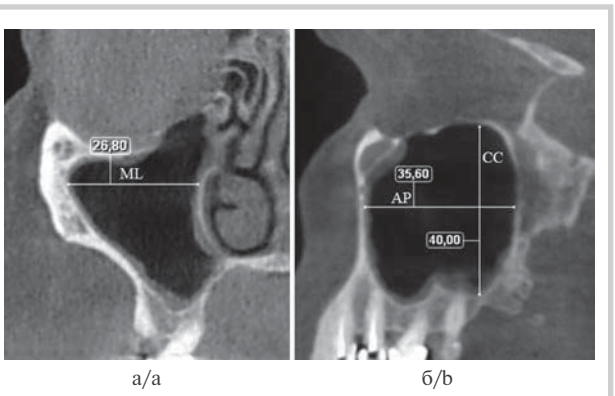


Рис. 1. **Конусно-лучевые компьютерные томограммы.**
а — фронтальная проекция; б — сагиттальная проекция. Линейные размеры правой верхнечелюстной пазухи. ML — медиолатеральный размер (ширина); AP — переднезадний размер (глубина); CC — краниокаудальный размер (высота).

Fig. 1. **The linear dimensions of the right maxillary sinus**
a — frontal; b — sagittal CBCT scans. ML — medio-lateral size (width), AP — antero-posterior size (depth), CC — craniocaudal size (length).

живаемые на КЛКТ-срезах. В полуавтоматическом режиме сегментация проводилась экспертом (рентгенологом) интерактивно. При этом контуры костной стенки и слизистой оболочки выделялись поочередно с помощью инструмента «Умная кисть», программно реализованного на основе алгоритма кластеризации *k*-средних [7].

Для сегментации верхнечелюстной пазухи в автоматическом режиме применена технология сверточной нейронной сети (СНС). При этом использовалась модернизированная U-Net архитектура СНС. Модернизация сети заключалась в интегрировании в ее состав подсети DenseNet и осуществлялась на языке программирования Python в связке с отдельными модулями популярной библиотеки Keras, ориентированной на работу с нейронными сетями.

Обучение нейронной сети произведено на КЛКТ сканах 42 пациентов (44% мужчин и 56% женщин в возрасте от 8 до 69 лет (38±13 лет)). Эта процедура начиналась с разбивки изображений на тренировочную и валидационную серии в пропорции 75% на 25%.

Следующим шагом в процедуре обучения было получение из 3D-серий, разделенных на тренировочные и валидационные, плоских обучающих изображений (КЛКТ-срезов). В тренировочный набор попали 808 срезов пазухи 31 пациента. Валидационный набор состоял из 314 срезов пазухи 11 пациентов.

Для оценки качества использовалась метрика Intersection Over Union (или иначе Jaccard index — мера Жаккара), задаваемая формулой:

$$IoU=\frac{TP}{TP+FP+FN}=\frac{Im_1\cap Im_2}{Im_1\cup Im_2}=\frac{Im_1\cap Im_2}{Im_1+Im_2-Im_1\cap Im_2},$$

где: *TP (true positive)* — выбор пикселя, реально принадлежащего пазухе; *FP (False positive)* — ошибочный выбор пикселя, не принадлежащего пазухе; *FN (False negative)* — ошибочно отмеченный пиксель в качестве не принадлежащего пазухе; Im_1 — область пазухи, выделенная экспертом; Im_2 — область пазухи, выделенная нейронной сетью.

Используя процедуру аугментации, из первоначально имеющегося исходного набора изображений генерировали дополнительные обучающие данные [8]. Для аугментации использовалась библиотека Albumentations. Максимальная точность получена у обученной модели с размером входных изображений 352×352, размером блока (batch-size) 8 и составила 0,93 (IoU, индекс Жаккара). Использовались оптимизатор Adam, функция потерь: комбинация бинарной кросс-энтропии и функции потерь Серенсена (Dice loss). Данную модель обучали 100 эпох, используя видеокарту GeForce GTX 1080 Ti.

Для статистической обработки полученных данных использовали пакет программ Statistica 10.0.

Результаты

В **табл. 1** приведены данные об объеме верхнечелюстной пазухи, полученные разными методами. Во всех случаях ручной метод демонстрирует самые низкие значения объема пазухи по сравнению с другими методами, тогда как при использовании автоматического метода получаются наибольшие значения показателя. В обоих случаях эти значения находятся в пределах 95% доверительного интервала (±4,29 см^3) для среднего объема пазухи, полученного экспертным методом. При этом объемы, рассчитанные автоматическим методом, ближе к значениям, которые определены в полуавтоматическом режиме сегментации с помощью эксперта. В **табл. 2** приведены значения модулей абсолютных ошибок измерения относительно результатов эксперта: Δ_1=|РМ—Э| и Δ_2=|НС—Э|, а также медианы (Me) и верхние квартили (Q_{III}). Эти данные позволяют проанализировать разбежки результатов получения объемов ручным, полуавтоматическим и автоматическим методами.

В среднем отклонение от результатов эксперта при автоматическом методе оказалось равным 0,58, т.е. средняя погрешность измерения (относительная ошибка) составляет 4,97%. Аналогичные показатели при ручном методе равны 2,41 и 20,7%.

Неслучайность обнаруженных различий в точности методов подтверждена ранговым критерием Манна—Уитни (Uэмп=16, Uтаб.=31) при уровне значимости α=0,01.

Обсуждение

В настоящее время для определения морфометрических параметров верхнечелюстной пазухи чаще всего использу-

***Таблица 1*. Объем верхнечелюстной пазухи, определенный разными методами измерения**

***Table 1*. The volume of the maxillary sinus, determined by different methods of its measurement**

Пациент	Пол	Возраст (годы)	Сторона	Ручной метод (см^3)	Полуавтоматический (экспертный) метод (см^3)	Автоматический метод (нейронная сеть) (см^3)
№1	М	42	правая	14,5	17,2	18,7
			левая	11,4	14,2	15,2
№2	Ж	60	правая	5,4	6,1	6,0
			левая	11,8	13,6	13,7
№3	Ж	22	правая	6,2	8,3	9,7
			левая	1,5	1,7	3,6
№4	М	40	правая	7,4	7,9	8,1
			левая	21,3	27,1	27,9
№5	Ж	50	правая	7,0	10,8	10,8
			левая	2,7	4,6	4,5
№6	Ж	51	правая	11,6	13,8	14,1
			левая	10,3	14,7	14,9
S±σ				9,26±5,45	11,67±6,83	12,27±6,80
ДИ (доверительный интервал)					±4,29	—

Таблица 2. **Различия объемов верхнечелюстной пазухи, определенных разными методами их измерения**

Table 2. **Differences in the volumes of the maxillary sinus determined by different methods of their measurement**

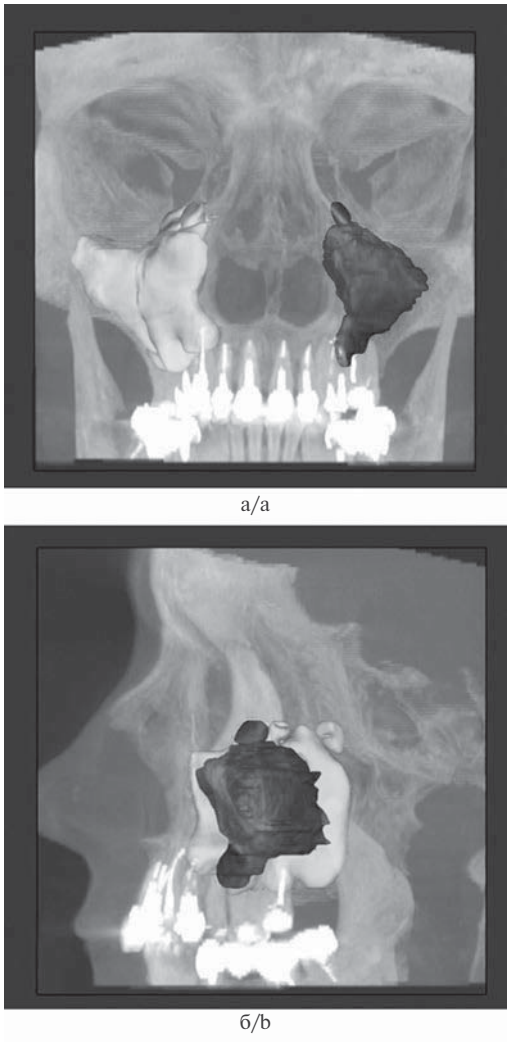
Пациент	Сторона	|РМ—Э| (см^3)	|НС—Э| (см^3)
№1	Правая	2,7	1,5
	Левая	2,8	1,0
№2	Правая	0,7	0,1
	Левая	1,8	0,1
№3	Правая	2,1	1,4
	Левая	0,2	1,9
№4	Правая	0,5	0,2
	Левая	5,8	0,2
№5	Правая	3,8	0
	Левая	1,9	0,1
№6	Правая	2,2	0,3
	Левая	4,4	0,2
		2,41	0,58
Me		2,15	0,2
Q_{III}		3,05	1,1

Примечание. РМ — ручной метод; Э — экспертный (полуавтоматический) метод; НС — автоматический метод (нейронная сеть).

ются ручные методы [9—12], реже — полуавтоматические методы [13]. Они представляют собой достаточно трудоемкий процесс, поскольку требуют обязательного просмотра в интерактивном режиме каждого КЛКТ-слоя с определением и выделением на нем области интереса. При этом не все структуры исследуемой области обладают высокой контрастностью и четкостью. Это касается в первую очередь контура слизистой оболочки.

В последнее время предпринимаются отдельные попытки разработать полностью автоматизированные программы для расчета объема придаточных пазух носа. G. Giacomini и соавт. [6] предложили автоматизированный метод определения объема верхнечелюстной пазухи, который использует методы сегментации, водораздела, выбора порога и морфологического анализа изображений, полученных с помощью компьютерной томографии. Проведенные статистические сравнения между автоматизированным и ручным количественным методами оценки данного параметра показали сильные зависимости между переменными величинами и низкую дисперсию результатов независимо от индивидуальных вариаций объема пазухи. Средняя процентная разница между автоматизированными и ручными методами была приблизительно 7% для обоих методов.

K. Souadih и соавт. [14] описали методику полностью автоматической сегментации клиновидной пазухи с использованием DeepMedics 3D CNN (многослойной трехмерной СНС, обрабатывающей данные в нескольких масштабах). Авторы отметили неплохую корреляцию результатов измерения между автоматизированным и ручным методами определения объема пазухи. В настоящем исследовании использована аналогичная методика, и она показала результаты, сопоставимые с данными ручного и полуавтоматического методов исследования. При этом абсолютные значения объема верхнечелюстной пазухи, полученные с использованием автоматизированного метода, на 24,5 и 4,9% выше по сравнению с результатами, полученными ручным и полуавтоматическим методами соответственно. По данным G. Giacomini и соавт. [6], объем верхнечелюстной пазухи при измерении в автоматическом режиме был на 14—17% выше по сравнению с объемом, полученным ручным методом.



а/a

б/b

Рис. 2. **Трехмерная реконструкция верхнечелюстных пазух.**
а — вид спереди; б — вид сбоку.

Fig. 2. **Three-dimensional reconstruction of the maxillary sinuses**
a — front view; b — side view.

Реальный объем пазухи, измеренный автоматическим методом, составил 12,27±6,80 см^3. По данным литературы, в отдельных выборках объем верхнечелюстной пазухи у взрослых пациентов колеблется в диапазоне от 10,9±2,8 до 24,7±9,0 см^3 [6, 10, 11, 15, 16]. Таким образом, метод определения объема пазухи с использованием искусственного интеллекта позволяет установить реальные морфометрические показатели. При этом значительно упрощается процедура выделения и измерения области интереса, а также параллельно уменьшаются временные затраты и повышается точность результатов. Достаточно лишь запустить исполняемый модуль программы и загрузить нужную КЛКТ-серию. Упрощение работы исследователя достигается за счет усложнения работы программистов по разработке, интеграции и обучению нейронной сети.

Еще одним важным преимуществом автоматизированного метода является возможность определения соотношения между объемами слизистой оболочки и воздухоносной полости **(рис. 2)**. Считается, что в норме толщина слизистой оболочки (расстояние между костной стенкой и поверхностью слизистой оболочки пазухи) не должна превышать 1 мм [17].

Заключение

Для визуализации объемного изображения верхнечелюстной пазухи и определения ее объема по конусно-лучевым компьютерным томограммам использован искусственный интеллект (технология сверточной нейронной сети). Установлена высокая корреляция данных, полученных с помощью этой технологии, с результатами морфометрии пазухи ручным и полуавтоматическим методами. Использование автоматического метода создания 3D изображения пазухи не требует от пользователя специальных знаний. Метод имеет хорошую воспроизводимость и реализуется в коротком временном интервале.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Balasubramanian T, Seethalakshmi N. Hypoplasia of all paranasal sinuses A case series and Literature review. *Otolaryngology Online Journal*. 2012;2(2):1-5.
2. Lawson W, Patel ZM, Lin FY. The development and pathologic processes that influence maxillary sinus pneumatization. *Anatomical Record (Hoboken)*. 2008;291(11):1554-1563. https://doi.org/10.1002/ar.20774
3. Kiruba LN, Gupta C, Kumar S, D'Souza AS, Sylvan A. A study of morphometric evaluation of the maxillary sinuses in normal subjects using computer tomography images. *Archives of Medicine and Health Sciences*. 2014;2(1):12-15.
4. Aktuna Belgin C, Colak M, Adiguzel O, Akkus Z, Orhan K. Three-dimensional evaluation of maxillary sinus volume in different age and sex groups using CBCT. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*. 2019;276(5):1493-1499. https://doi.org/10.1007/s00405-019-05383-y
5. Abd-alla MA, Mahdi AJJ. Maxillary Sinus Measurements in Different Age Groups of Human Cadavers. *Tikrit Journal for Dental Sciences*. 2013;3(1):107-112.
6. Giacomini G, Pavan ALM, Altemani JMC, Duarte SB, Fortaleza CMCB, de Arruda Miranda JR, De Pina DR. Computed tomography-based volumetric tool for standardized measurement of the maxillary sinus. *PLoS ONE*. 2018;13(1):e0190770. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190770
7. Lloyd SP. Least squares quantization in PCM. *Transactions on Information Theory*. 1982;28(2):129-137. https://doi.org/10.1109/TIT.1982.1056489
8. Ronneberger O, Fischer P, Brox T. *U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation*. 2015. Accessed February 20, 2020. https://arxiv.org/pdf/1505.04597.pdf
9. Pirner S, Tingelhoff K, Wagner I, Westphal R, Rilk M, Wahl FM, Bootz F, Eichhorn KW. CT-based manual segmentation and evaluation of paranasal sinuses. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*. 2009;266(4):507-518. https://doi.org/10.1007/s00405-008-0777-7
10. Sahlstrand-Johnson P, Jannert M, Strömbeck A, Abul-Kasim K. Computed tomography measurements of different dimensions of maxillary and frontal sinuses. *BMC Medical Imaging*. 2011;11:8. https://doi.org/10.1186/1471-2342-11-8
11. Mohlhenrich SC, Heussen N, Peters F, Steiner T, Holzle F, Modabber A. Is the maxillary sinus really suitable in sex determination? A three-dimensional analysis of maxillary sinus volume and surface depending on sex and dentition. *The Journal of Craniofacial Surgery*. 2015;26(8):e723-726. https://doi.org/10.1097/SCS.0000000000002226
12. Przystańska A, Kulczyk T, Rewekant A, Sroka A, Jończyk-Potoczna K, Lorkiewicz-Muszyńska D, Gawriołek K, Czajka-Jakubowska A. Introducing a simple method of maxillary sinus volume assessment based on linear dimensions. *Annals of Anatomy*. 2018;215:47-51. https://doi.org/10.1016/j.aanat.2017.09.010
13. Kirmeier R, Arnetzl C, Robl T, Payer M, Lorenzoni M, Jakse N. Reproducibility of volumetric measurements on maxillary sinuses. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*. 2011;40(2):195-199. https://doi.org/10.1016/j.ijom.2010.10.008
14. Souadih K, Belaid A, Ben Salem D, Conze PH. Automatic Segmentation of the Sphenoid Sinus in CT-Scans Volume with DeepMedics 3D CNN Architecture. *Medical and Biological Engineering and Computing*. 2019;3(1):334-346. https://doi.org/10.26415/2572-004X-vol3iss1p334-346
15. Deeb R, Malani PN, Gil B, Jafari-Khouzani K, Soltanian-Zadeh H, Patel S, Zacharek MA. Three-dimensional volumetric measurements and analysis of the maxillary sinus. *American Journal of Rhinology and Allergy*. 2011;25(3):152-156. https://doi.org/10.2500/ajra.2011.25.3605
16. Gulec M, Tassoker M, Magat G, Lale B, Ozcan S, Orhan K. Three-dimensional volumetric analysis of the maxillary sinus: a cone-beam computed tomography study. *Folia Morphologica*. 2020;79(3):557-562. https://doi.org/10.5603/FM.a2019.0106
17. Amine K, Slaoui S, Kanice F-Z, Kissa J. Evaluation of maxillary sinus anatomical variations and lesions: a retrospective analysis using cone beam computed tomography. *Journal of Stomatology Oral and Maxillofacial Surgery*. 2020;121(5):484-489. https://doi.org/10.1016/j.jormas.2019.12.021

Поступила 06.05.2020
Received 06.05.2020
Принята к печати 25.07.2020
Accepted 25.07.2020