

НОВЫЙ ПОДХОД К ИЗУЧЕНИЮ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ АНАТОМИИ ВЕРХНЕЧЕЛЮСТНЫХ ПАЗУХ В СРАВНЕНИИ С ОБЩЕПРИНЯТЫМИ МЕТОДИКАМИ

Зелёва О.В.¹, Зельтер П.М.¹, Колсанов А.В.¹, Сидоров Е.А.¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Самара, e-mail: egors9494@yandex.ru

Изучение строения анатомии черепа человека требует различных подходов и обусловлено важными проблемами современной медицины. Сложное топографо-анатомическое строение верхнечелюстных пазух определяет предрасположенность и особенности течения различных патологических процессов, а также возникновение осложнений. В настоящее время остаются актуальными задачи, связанные с эффективным построением объемных моделей верхнечелюстных пазух, анализом их топографических взаимоотношений, формы и объема. Наиболее переменчивым из показателей является объем околоносовых пазух. Создание трехмерных моделей верхнечелюстных пазух дает возможность провести комплексный анализ воздухоносных структур. Для получения объемных полигональных моделей верхнечелюстных пазух используется методика сегментации в различных вариациях. Нами был выполнен анализ возможных методик сегментации верхнечелюстных пазух с определением их преимуществ и недостатков и разработан собственный алгоритм создания трехмерных моделей при помощи системы автоматизированного планирования хирургического лечения «Автоплан», АПК «Автоплан», РУ.СГМУ.941149.001.ПС, в котором до настоящего времени отсутствовали плагины для построения трехмерных моделей воздухоносных структур. Разработанный нами алгоритм сегментации позволяет быстро и с максимальной точностью измерять объем околоносовых пазух и определять их особенности на трехмерных моделях, что дает возможность вывести подход к изучению анатомии верхнечелюстных пазух на новый уровень.

Ключевые слова: околоносовые пазухи, верхнечелюстные пазухи, трехмерное моделирование, компьютерная томография, КТ.

A NEW APPROACH TO THE STUDY OF THE SPATIAL ANATOMY OF THE MAXILLARY SINUSES IN COMPARISON WITH THE GENERALLY ACCEPTED METHODS

Zeleva O.V.¹, Zelter P.M.¹, Kolsanov A.V.¹, Sidorov E.A.¹

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Samara State Medical University» of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Samara, e-mail: egors9494@yandex.ru

The study of the anatomy structure of the human skull requires different approaches and is due to important problems of modern medicine. The complex topographic and anatomical structure of the maxillary sinuses determines the predisposition and features of the course of various pathological processes, as well as the occurrence of complications. Today, the tasks associated with the effective construction of three-dimensional models of the maxillary sinuses, the analysis of their topographic relationships, shape and volume remain relevant. The most variable of the indicators is the volume of the paranasal sinuses. The creation of three-dimensional models of the maxillary sinuses enables a comprehensive analysis of air-containing structures. To obtain volumetric polygonal models of the maxillary sinuses, the segmentation technique in various variations is used. We analyzed the possible methods of segmentation of the maxillary sinuses with the definition of their advantages and disadvantages, and developed our own algorithm for creating three-dimensional models using the Autoplan automated surgical treatment planning system, Autoplan APK, RU.SGMU.941149.001.PS, in which up to Currently, there were no plugins for building three-dimensional models of air-containing structures. The segmentation algorithm developed by us allows you to quickly and with maximum accuracy measure the volume of the paranasal sinuses and their features on three-dimensional models, which allows you to bring the approach to the study of the anatomy of the maxillary sinuses to a new level.

Keywords: paranasal sinuses, maxillary sinuses, 3D modeling, computed tomography, CT.

Изучение строения анатомии черепа человека требует различных подходов и обусловлено важными проблемами современной медицины. Анатомические особенности черепа представляют интерес для врачей разных специальностей, особенно для оториноларингологов, челюстно-лицевых хирургов и нейрохирургов. Сложное топографо-анатомическое строение верхнечелюстных пазух определяет предрасположенность и особенности течения различных патологических процессов, а также возникновение осложнений. Околоносовые пазухи выполняют различные важные функции в организме человека, причем дискуссия о них продолжается до сих пор. Наиболее значимыми являются снижение массы черепа, голосовой резонатор и согревание вдыхаемого воздуха пазух [1].

Начальную роль в изучении анатомии верхнечелюстных пазух сыграл Везалий в XVI в. Он одним из первых описал анатомию околоносовых пазух и установил, что они являются воздухоносными структурами. Фаллопий установил отсутствие верхнечелюстных пазух у новорожденных. В XVII в. Натаниель Гаймор опубликовал книгу «Corpus Disquisition Anatomies». В ней анатом описал строение верхнечелюстных пазух и ходы, сообщающиеся с ними. Именно после его описания верхнечелюстные пазухи называли гайморовыми. Важными исследовательскими работами являются исследования Р. Лэнга и Г. Риттера, посвященные изучению и описанию трупных материалов.

В связи с изучением строения околоносовых пазух на морфологическом материале объем анализируемых материалов был в значительной степени ограничен [2]. Исследование анатомии верхнечелюстных пазух проводилось путем распила трупного материала и изучения базы черепов. Подобные методы обладали рядом недостатков, таких как невозможность прижизненного изучения и необходимость разрушения препарата, так как верхнечелюстные пазухи располагаются внутри черепа [3].

Улучшение понимания анатомического строения полости носа связано с появлением эндоскопического исследования Уолтера Мессерклингера из Граца, Австрии. Свое описание он изложил в книге «Эндоскопия носа» и опубликовал ее в Великобритании в 1978 г.

Появление лучевых методов исследования, в первую очередь, сделало возможным получать данные по анатомическому строению органов прижизненно и в высоком разрешении, при этом анализ часто проводится ретроспективно, после исключения патологических изменений у пациента. До настоящего времени самым распространенным и доступным методом изучения анатомии верхнечелюстных пазух оставалась рентгенография околоносовых пазух. Однако данное исследование не давало полноценного пространственного представления об объеме и форме верхнечелюстных пазух (рис. 1).

С появлением КТ изучение топографо-анатомических особенностей верхнечелюстных пазух стало возможным прижизненно на основе большой выборки материала и расширило

возможности морфометрических методик исследования. Компьютерно-томографическому изучению анатомии верхнечелюстных пазух было посвящено несколько публикаций [4, 5] (рис. 2).



Рис. 1. Рентгенография околоносовых пазух, прямая проекция



Рис. 2. КТ околоносовых пазух, коронарная проекция, костное окно

В большинстве подобных работ подробно анализировались линейные размеры верхнечелюстных пазух, их связь с половыми и возрастными характеристиками.

Мультиспиральная компьютерная томография (МСКТ) является оптимальным методом визуализации околоносовых пазух. Данные МСКТ в обязательном порядке сохраняются в формате DICOM, в отличие от конусно-лучевой компьютерной томографии (КЛКТ), яркость элементов объемного изображения отображается в зависимости от плотности в единицах Хаунсфилда (HU), что создает более благоприятные условия для обработки и сегментации изображений [6]. Данные КТ традиционно анализировались стандартным путем визуализации аксиальных срезов и при помощи построения мультипланарных, т.е. сагиттальных и фронтальных (коронарных), реконструкций. Такой подход является

классическим и широко использовался в работах по изучению анатомии околоносовых пазух [7].

Самым распространенным альтернативно-варьирующим признаком верхнечелюстных пазух является наличие полных или добавочных перегородок, которые часто определяют рельеф и форму пазухи. Наиболее вариабельным из показателей является объем пазух. В настоящие дни остаются актуальными задачи, связанные с эффективным построением объемных моделей верхнечелюстных пазух, анализом их топографических взаимоотношений, формы и объема.

Цель исследования. Рассмотреть возможные методики изучения анатомии верхнечелюстных пазух и разработать алгоритм создания трехмерных моделей верхнечелюстных пазух при помощи системы автоматизированного планирования хирургического лечения «Автоплан», АПК «Автоплан», РУ.СГМУ.941149.001.ПС.

Материал и методы исследования

Трехмерное моделирование – это активно развивающаяся методика, которая позволяет перейти от плоскостных изображений к картине, имитирующей объемную реальность. Такая визуализация дает возможность наглядно представить форму и размер анатомической структуры, ее особенности и топографо-анатомические соотношения. До настоящего времени опубликованы единичные работы по методике получения трехмерных моделей верхнечелюстных пазух [8].

Для получения объемных полигональных моделей верхнечелюстных пазух используется методика сегментации в различных вариациях.

Сегментация изображения — это разбиение его на связанные области, где каждая область является однородной и идентифицируется уникальной меткой [9]. Термин «однородный» применимо к сегментации означает, что все пиксели имеют одинаковую яркость (плотность при КТ). Применимо к медицинским изображениям это означает, что все пиксели близки к некоторой средней яркости, которая генерируется определенным распределением вероятностей.

Рассмотрим различные варианты сегментации с возможными преимуществами.

- Мануальная сегментация.

Мануальная (ручная) сегментация – это процесс выделения анатомического объекта на томографическом изображении путем рисования контуров на каждом срезе. Данный способ может быть несколько усовершенствован в системах по сегментации путем рисования на части срезов с пропуском оставшихся и использованием функции интерполяции.

Данная методика требует значительного опыта и времени, поэтому она практически неприменима в повседневной жизни. Тингельхофф и иные оценили точность мануальной

сегментации и ее потенциальную полезность для роботизированной хирургии. Исследование показало высокую индивидуальную вариабельность, а среднее время сегментации – 75,9 минуты, при этом был сделан вывод, что мануальная сегментация требует необоснованно много времени и не дает надежных результатов [10] (рис. 3).

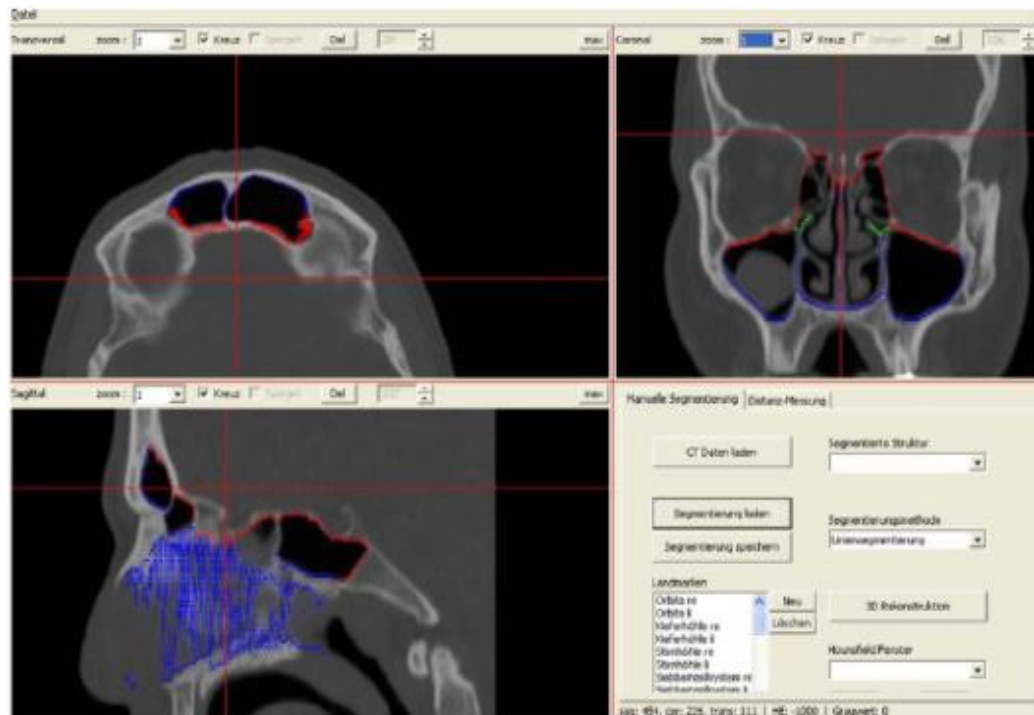


Рис. 3. Результат мануальной сегментации левой верхнечелюстной пазухи. Время обработки: 93 минуты (по Тингельхоффу)

- Пороговая сегментация

В приложениях, где конкретные значения яркости в областях не важны, можно разделить изображение на «передний план» (или «объекты») и «фон», просто выбрав порог яркости, которая зависит от рентгеновской плотности при компьютерной томографии. Данный метод частично может быть применим для выделения воздухосодержащих областей, но изолированно не используется из-за невозможности отделения околоносовых пазух друг от друга и воздуха в окружающей среде.

- Методы активных контуров

Концепция активных контуров была разработана для решения проблемы, связанной с тем, что любой алгоритм обнаружения краев не работает на всех изображениях, потому что в определенных областях изображения краев просто не существует. Сначала искусственный контур запускается либо пользователем, либо автоматически. Затем контур перемещается и движется до тех пор, пока большинство точек контура не совпадут с краевыми точками изображения [11]. Данный метод применяется для задач сегментации околоносовых пазух в полуавтоматическом режиме [12].

- Метод «роста области» (region growing)

«Рост области» – это метод сегментации изображения на основе выбора пикселей с учетом начальных исходных точек [13]. Этот подход к сегментации исследует соседние пиксели по отношению к начальным исходным точкам и определяет, следует ли добавлять соседние пиксели в область или нет. Первым шагом в сегментации является выбор набора исходных точек. Критериями могут быть, например, интенсивность пикселей, текстура в оттенках серого цвета. Пиксели, смежные с исходными точками, проверяются и классифицируются как исходные точки, если они имеют одинаковое значение интенсивности. Этот процесс повторяется до тех пор, пока на двух последовательных итерационных этапах не будет изменений. Можно выбрать другие критерии, при этом основная цель – классифицировать сходство изображения по областям [14].

В связи с описанными ограничениями наши усилия были направлены на разработку методики для полуавтоматической сегментации полости пазухи, основанной на проанализированных методах пороговой и инкрементальной сегментации, в которой используется алгоритм пространственной сегментации с ростом области (region growing). Для оценки формы и объемных характеристик ранее был продолжен способ построения трехмерных моделей – система автоматизированного планирования хирургического лечения «Автоплан», АПК «Автоплан», РУ.СГМУ.941149.001.ПС – аппаратно-программный комплекс (АПК), предназначенный для предоперационного планирования с использованием данных томографических исследований в целях построения трехмерной полигональной модели. АПК разработан в ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский университет» группой специалистов. До настоящего времени в системе отсутствуют плагины для построения трехмерных моделей воздухосодержащих структур, поэтому задачей исследования стала разработка алгоритмов применения инструментов АПК для целей выделения всех элементов объемного изображения, относящихся к верхнечелюстным пазухам. В качестве основного способа выделения просвета верхнечелюстных пазух использовался метод инкрементальной сегментации, при которой отнесение тех или иных вокселей к модели происходит в режиме онлайн при перемещении курсора мыши. Такой способ является возможным для выбора, так как плотность воздуха в полости пазух находится на уровне -1000HU , что значительно отличается от плотности костных структур, образующих стенки. В результате «заливки» получали следующие изображения: полость пазухи маркировалась цветом, который отделял ее от окружающих тканей (рис. 4).

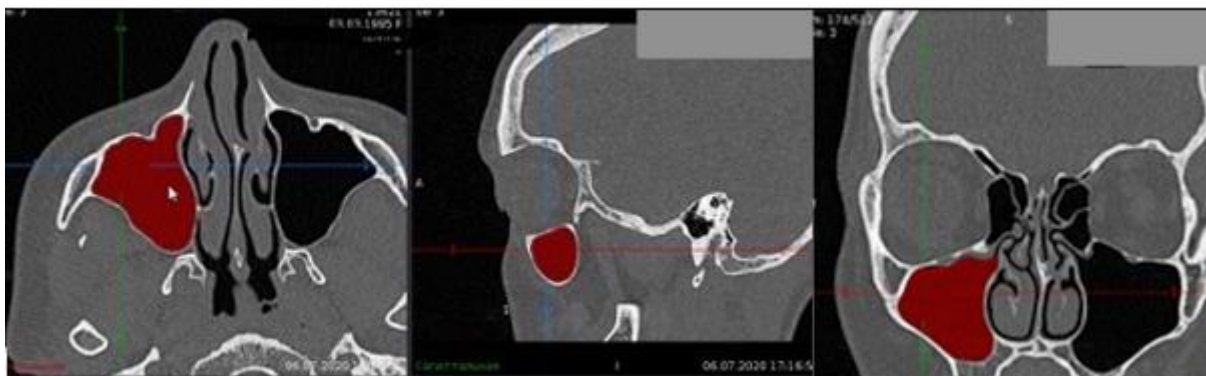


Рис. 4. Метод инкрементальной сегментации: полость пазухи маркируется цветом, который отделяет ее от окружающих тканей

После того как двумерные изображения проверялись на трех плоскостях, создавалась сглаженная трехмерная модель, которая в дальнейшем использовалась для анализа (рис. 5).

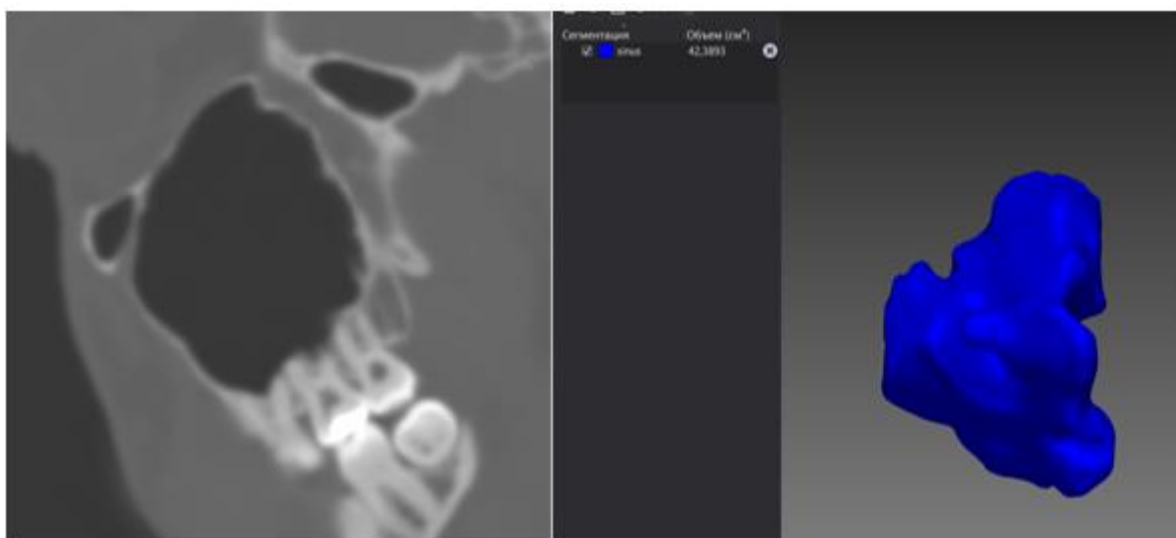


Рис. 5. КТ верхнечелюстных пазух, сагиттальная проекция, костное окно. 3D-модель верхнечелюстных пазух, созданная в АПК «Автоплан». В правой половине экрана приведены данные по общему объему (42,3 см³)

Результаты исследования и их обсуждение

Сегментация полости верхнечелюстных пазух обеспечила нас объективным инструментом по выделению всех элементов объемного изображения, относящихся к пазухе, что позволяет с максимальной точностью измерять объем пазухи, не производя сложных арифметических расчетов по формулам. Создание трехмерных моделей верхнечелюстных пазух дает возможность провести комплексный анализ воздухосодержащих структур, которые были получены в результате разработанного нами алгоритма сегментации данных МСКТ.

Преимуществами используемого нами алгоритма сегментации при помощи системы автоматизированного планирования хирургического лечения «Автоплан» являются скорость и простота в сравнении с другими методиками [9–12], которые не только требуют больших временных затрат, но и не позволяют полноценно оценить воздухосодержащие структуры до малейших анатомических особенностей [10]. Полуавтоматическая сегментация, в отличие от мануальной и пороговой сегментации или метода активных контуров, использует алгоритм пространственной сегментации с ростом области [13], что значительно сокращает время обработки изображений, тем самым увеличивая доступность данного подхода для практикующих врачей в целях оценки верхнечелюстных пазух и планирования хирургического лечения [15].

Выводы

Направление более глубокого изучения анатомических характеристик верхнечелюстных пазух постоянно развивается. Трехмерные модели находят применение в теоретическом изучении анатомии воздушных полостей и практической медицине. Трехмерные анатомические реконструкции изображений верхнечелюстных пазух, получаемых на основе КТ, эффективны для пространственного представления и описания объема и формы верхнечелюстных пазух, что находит свое применение в практической медицине. Разработанный нами алгоритм сегментации позволяет быстро и с максимальной точностью измерять объем околоносовых пазух и определять их особенности на трехмерных моделях, что дает возможность вывести подход к изучению анатомии верхнечелюстных пазух на новый уровень. Необходимы дальнейшее развитие методики и анализ полученных результатов для применения как в клинической практике, так и для антропологических исследований.

Список литературы

1. Mossa-Basha M., Blitz A.M. Imaging of the paranasal sinuses. *Semin Roentgenol.* 2013. vol. 48 (1) P. 14-34. DOI: 10.1053/j.ro.2012.09.006.
2. Гелашвили П.А., Супильников А.А., Исламова Э.Ш., Юхимец С.Н. Методика определения параметров околоносовых пазух при прижизненной краниометрии методом конусно-лучевой компьютерной томографии (КЛКТ) // *Вестник медицинского института «РЕАВИЗ».* 2016. № 2 (22). С. 163–169.
3. Сергиенко В.И., Петросян Э.А., Фраучи И.В. Топографическая анатомия и оперативная хирургия. Т. 1. 3-е изд. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2014. 832 с.

4. Гомболевский В.А., Масри А.Г., Ким С.Ю., Морозов С.П. Руководство для лаборантов по выполнению протоколов исследований на компьютерном томографе // Методические рекомендации. М., 2017. № 12. С. 61.
5. Aliu A., Mohammad M.S., Sirajo B.S., Ibrahim A.M., Abdullahi Z.D. Classification of anatomical variants of maxillary sinus shapes and symmetry using computerized tomographic imaging. *Sub-Saharan Afr. J. Med.* 2019. vol. 6. P.143-147 DOI: 10.4103/ssajm.ssajm_24_19.
6. Lanis A., Álvarez Del Canto O. The combination of digital surface scanners and cone beam computed tomography technology for guided implant surgery using 3Shape implant studio software: a case history report. *Int. J. Prosthodont.* 2015. vol. 28 (2). P. 169-78. DOI: 10.11607/ijp.4148. PMID: 25822304.
7. Ganz S.D. Three-dimensional imaging and guided surgery for dental implants. *Dent Clin North Am.* 2015. vol. 59 (2). P. 265-290. DOI: 10.1016/j.cden.2014.11.001.
8. Chang Y.B., Xia J.J., Yuan P., Kuo T.H., Xiong Z., Gateno J., Zhou X. 3D segmentation of maxilla in cone-beam computed tomography imaging using base invariant wavelet active shape model on customized two-manifold topology. *J. Xray Sci Technol.* 2013. vol. 21 (2). P. 251-82. DOI: 10.3233/XST-130369.
9. Roerdink Jos, Meijster A. The Watershed Transform: Definitions, Algorithms and Parallelization Strategies. *Fundamenta Informaticae.* 2003. vol. 41 (1-2) DOI: 10.3233/FI-2000-411207.
10. Tingelhoff K., Eichhorn K.W., Wagner I., Kunkel M.E., Moral A.I., Rilk M.E., Wahl F.M., Bootz F. Analysis of manual segmentation in paranasal CT images. *Eur Arch Otorhinolaryngol.* 2008. vol. 265 (9). P. 1061-1070. DOI: 10.1007/s00405-008-0594-z.
11. Zhang B., Wang Y., Ding C., Deng Z., Li L., Qin Z., Ding Z., Bian L., Yang C. Multi-scale feature pyramid fusion network for medical image segmentation. *Int. J. Comput Assist Radiol Surg.* 2022. DOI: 10.1007/s11548-022-02738-5.
12. Bui N.L., Ong S.H., Foong K.W. Automatic segmentation of the nasal cavity and paranasal sinuses from cone-beam CT images. *Int. J. Comput Assist Radiol Surg.* 2015. vol. 10 (8). P. 1269-77. DOI: 10.1007/s11548-014-1134-5.
13. Zhou Z., Wan H., Zhang H., Chen X., Wang X., Lili S., Zhang T. Segmentation of Spontaneous Intracerebral Hemorrhage on CT With a Region Growing Method Based on Watershed Preprocessing. *Front Neurol.* 2022. vol. 13. P. 865023. DOI: 10.3389/fneur.2022.865023.
14. Bitarafan A., Nikdan M., Baghshah M.S. 3D Image Segmentation With Sparse Annotation by Self-Training and Internal Registration. *IEEE J. Biomed Health Inform.* 2021. vol. 25 (7). P. 2665-2672. DOI: 10.1109/JBHI.2020.3038847.

15. Jacobs C.A., Lin A.Y. A New Classification of Three-Dimensional Printing Technologies: Systematic Review of Three-Dimensional Printing for Patient-Specific Craniomaxillofacial Surgery. *Plast Reconstr Surg.* 2017. vol. 139 (5) P. 1211-1220. DOI: 10.1097/PRS.0000000000003232.