



Криштопова М.А. ✉, Костюкович Д.Ю., Титов В.Р., Пивовар М.Л., Кабанова А.А.
Витебский государственный ордена Дружбы народов медицинский университет,
Витебск, Беларусь

Разработка и применение алгоритма создания 3D-модели околоносовых пазух носа для изучения гидродинамики ирригационной терапии

Конфликт интересов: не заявлен.

Вклад авторов: Криштопова М.А., Кабанова А.А. – концепция и дизайн исследования, редактирование; Костюкович Д.Ю., Пивовар М.Л. – техническое исполнение; Титов В.Р. – обзор литературы.

Подана: 24.05.2024

Принята: 26.10.2024

Контакты: m.a.krishtopova@gmail.com

Резюме

Цель. Разработка алгоритма создания полноразмерной 3D-модели околоносовых пазух, а также оценка эффективности ее использования для изучения гидродинамики ирригационной терапии.

Материалы и методы. Исследование состояло из 2 этапов. В качестве исходных данных для первого этапа исследования использовались набор медицинских изображений ($n=12$), компьютерные программы InVesalius 3.1 и Meshmixer, фотополимерная смола eSUN Standard. На 2-м этапе исследования проводилась оценка эффективности использования разработанной 3D-модели для изучения гидродинамики двух видов ирригационной терапии. Для анализа эффективности использования полученной 3D-модели проводили оценку записанного видео процедур и оценку по шкале Лайкерта.

Результаты. Разработан алгоритм создания 3D-модели околоносовых пазух носа, изучена гидродинамика ирригационной терапии. Оценка суммы баллов по шкале Лайкерта показала коэффициент воспроизводимости 0,92, а среднестатистический ранг категории показывает общую положительную установку группы экспертов на 3D-модель, что подтверждает ее эффективность для применения при планировании ирригационной терапии пациентам.

Заключение. Разработан алгоритм создания 3D-модели пазух носа, которая позволяет эффективно изучить гидродинамику ирригационной терапии. Анализ и выбор наиболее рационального варианта ИТ должен проводиться с использованием индивидуальной 3D-модели околоносовых пазух.

Ключевые слова: 3D-модель, околоносовые пазухи, гидродинамика, ирригационная терапия, компьютерная томография

Kryshchapava M. ✉, Kostyukovich D., Tsitou U., Pivavar M., Kabanava A.
Vitebsk State Order of Peoples' Friendship Medical University, Vitebsk, Belarus

Elaboration and Use of an Algorithm for Creating Paranasal Sinuses Full-size 3D Model to Study Irrigation Therapy Hydrodynamics

Conflict of interest: nothing to declare.

Authors' contribution: Kryshchapava M., Kabanava A. – study concept and design, editing; Kostyukovich D., Pivavar M. – technical implementation; Tsitou U. – literature review.

Submitted: 24.05.2024

Accepted: 26.10.2024

Contacts: m.a.kryshchapova@gmail.com

Abstract

Purpose. To elaborate an algorithm for creating a full-size 3D model of the paranasal sinuses, and to evaluate this model effectiveness in use for studying irrigation therapy hydrodynamics.

Materials and methods. The study consisted of 2 stages. The initial data for the first stage of the study were CT scans (n=12), computer programs InVesalius 3.1 and Meshmixer, and photopolymer resin eSUN Standard. At the 2nd stage of the study, the effectiveness of using the elaborated 3D model was assessed. To analyze the effectiveness of using the resulting 3D model for studying hydrodynamics of two types of irrigation therapy, the recorded video of procedures was evaluated and Likert scale scores were assessed.

Results. An algorithm for creating a 3D model of the paranasal sinuses was elaborated, and hydrodynamics of irrigation therapy was studied. When assessing the sum of Likert scale scores, a reproducibility factor of 0.92 was obtained, and the mean category rank demonstrated the overall positive attitude of the expert group toward the 3D model, thus confirming its effectiveness for use in planning patients' irrigation therapy.

Conclusion. An algorithm for creating a 3D model of the nasal sinuses was elaborated, allowing effective study of irrigation therapy hydrodynamics. Analyzing and selecting the most rational irrigation therapy option should be performed using an individual 3D model of the paranasal sinuses.

Keywords: 3D model, paranasal sinuses, hydrodynamics, irrigation therapy, CT-scan

■ ВВЕДЕНИЕ

Ведущая роль в защитной функции носа принадлежит слизистой оболочке, которая покрыта псевдомногослойным эпителием, состоящим из мерцательных, бокаловидных, а также коротких и длинных вставочных эпителиоцитов. Реснитчатый аппарат мерцательных клеток располагается в слизи, покрывающей поверхность слизистой оболочки, и образует вместе с ней мукоцилиарный эскалатор, или мукоцилиарную транспортную систему, которая благодаря строгой ритмичности мерцательного движения обеспечивает перемещение продуктов секреции слизистой оболочки и оседающих на ее поверхности микроорганизмов и различных

чужеродных частиц в сторону носоглотки, осуществляя таким путем ее постоянное очищение или клиренс. Клетки мерцательного эпителия, принимающие участие в образовании секрета, выделяют в норме небольшое его количество, однако в условиях патологии количество секрета, выделяемого ими, может значительно возрастать [1].

Одна из причин неэффективного лечения воспалительных заболеваний верхних дыхательных путей – проблема качественной ирригационной терапии (ИТ). ИТ включена в международные и отечественные рекомендации для лечения заболеваний носа и околоносовых пазух, что отражено в таких международных согласительных документах, как EPOS (Европейские стандарты лечения острых и полипозных синуситов) и ARIA (Европейские стандарты лечения аллергического ринита и астмы) [2, 3]. Предполагают, что положительный клинический эффект ИТ обусловлен улучшением мукоцилиарного транспорта, уменьшением отека слизистой оболочки, уменьшением количества медиаторов воспаления, механическим удалением густой слизи. Важной целью ИТ является очищение полости носа и околоносовых пазух за счет механического вымывания органических и неорганических остатков струей жидкости, а также антимикробной, противовирусной и противогрибковой активности ирригационного раствора (ирриганта). ИТ включает в себя целый ряд методов промывания и орошения слизистой оболочки солевыми и буферными растворами или растворами различных лекарственных веществ.

ИТ широко используется при хроническом риносинусите (ХРС), хроническом рините, а также после операций на околоносовых пазухах [2–7]. Согласно Европейскому согласительному документу по риносинуситу и назальным полипам (EPOS 2020) ИТ (промывание носа изотоническим раствором) присвоены самый высокий уровень доказательности (IA) и обоснованность рекомендаций (A) при ХРС [2]. Согласно международному консенсусу по риносинуситам Американской академии оториноларингологии – хирургии головы и шеи (ICOR 2016) и систематическому обзору Кохрейновского фонда ИТ большим объемом жидкости (более 200 мл) имеет преимущества перед орошением полости носа солевыми растворами [3, 6], что обеспечивает его проникновение в глубокие отделы полости носа, носоглотку и околоносовые пазухи [7]. Европейский согласительный документ по риносинуситу и назальным полипам (EPOS 2020) с высоким уровнем доказательности (IA) рекомендует использование ИТ после операций на околоносовых пазухах при ХРС и хроническом одонтогенном риносинусите (ХОП) [2]. Авторы международного консенсуса по риносинуситам Американской академии оториноларингологии – хирургии головы и шеи (ICOR 2016) при ХРС с и без полипов после операций на околоносовых пазухах рекомендуют ИТ (уровень доказательности B), которую следует начинать через 24–48 ч. после хирургического вмешательства [3, 8].

В постановлении Министерства здравоохранения Республики Беларусь № 49 от 1 июня 2017 г. об утверждении клинического протокола «Диагностика и лечение пациентов с оториноларингологическими заболеваниями (взрослое население)» промывание или ИТ растворами различных лекарственных веществ применяется при местном лечении: хронического ринита (J31.0) – промывание носа 0,5–2% раствором гидрокарбоната натрия, 1% раствором, содержащим препараты йода и калия йодида, 0,9% раствором хлорида натрия 3–4 раза в сутки 10–14 дней; хронического синусита (J32.0, J32.1, J32.2, J32.3, J32.4, J32.8, J32.9) – промывание околоносовых

пазух носа по Проетцу № 3–5 (по показаниям), пункция верхнечелюстной пазухи с последующим промыванием растворами антисептиков.

Для промывания околоносовых пазух носа по Проетцу пациента необходимо перевести в положение лежа на спине, при этом голова должна свисать с кушетки таким образом, чтобы вершина подбородка и наружный слуховой проход находились на одной вертикальной линии, перпендикулярной полу. В таком положении соустья клиновидных пазух занимают наиболее высокое положение относительно полости пазух. В нос вливают лекарственный раствор, отсос подносят к одной половине носа, другую половину носа закрывают, а пациент удерживает язык в положении произнесения звука «к» для изолирования носоглотки. Отрицательное давление при этом должно быть контролируемым и достигать 0,2 атм. При всасывании и последующем резком его прекращении с открытием противоположной ноздри происходит замещение воздуха в пазухах на раствор под действием атмосферного давления. Таким образом достигают заполнения клиновидной пазухи и задних решетчатых клеток лекарственным раствором. Метод, предложенный А. Proetz, основан на создании контролируемого давления, однако позволяет ввести раствор только в клиновидные пазухи и задние клетки решетчатого лабиринта [9]. При всей очевидной целесообразности, наличии научной обоснованности и доказательной базы до настоящего времени не определены стандартные протоколы ИТ, оптимальный объем жидкости, концентрация и состав раствора, кратность применения и продолжительность курса лечения.

Воздухоносная система носа и околоносовых пазух имеет сложную морфологию, которая характеризуется разветвленным строением. Вопрос о необходимости выполнения лечебной пункции верхнечелюстной пазухи и в настоящее время остается открытым. Считается, что регулярное удаление экссудата при гнойном синусите стимулирует механизмы местной антибактериальной защиты, а также в ряде случаев позволяет ликвидировать блокаду естественного соустья. Однако данная, на первый взгляд, безопасная и широко применяемая в лор-практике процедура связана с риском развития достаточно серьезных осложнений, таких как: кровотечения из носа, воздушная эмболия, прокол глазницы.

С широким распространением медикаментозного лечения необходимость применения пункционного метода все более оспаривается. По данным А.С. Лопатина, лечебные пункции верхнечелюстной пазухи при остром первичном неосложненном риносинусите не повышают эффективность стандартного 10-дневного курса беспункционного лечения [10]. Именно поэтому важность и правильное назначение консервативной терапии, включающей ИТ, является ключевым в успешной терапии заболеваний околоносовых пазух. При промывании носа используются различные приспособления: аквамарис лейка, долфин, назальный ирригатор, ЯМИК-катетер, промывание про Проетцу. Анализ гидродинамики ИТ для выбора оптимальной методики лечения воспалительных заболеваний верхних дыхательных путей является актуальным.

3D-моделирование и печать в медицине позволяет повысить качество оказания медицинской помощи. С помощью 3D-моделирования и 3D-печати стало возможным создавать модели, максимально адаптированные под индивидуальные особенности человека. 3D-технологии также позволяют выполнить конвертацию данных компьютерной томографии (КТ) для дальнейшего моделирования и печати модели.

InVesalius – это бесплатное программное обеспечение для реконструкции изображений КТ и магнитно-резонансной томографии. Программное обеспечение в основном используется в медицинской сфере. Его можно использовать на платформах Microsoft Windows, GNU/Linux и Apple Mac OS X. Основной функцией программного обеспечения является возможность импорта файлов DICOM. Преимущества данной программы: минимальная или нулевая стоимость приобретения; возможность выполнения на недорогих персональных компьютерах; возможность выполнения в различных операционных системах.

Autodesk Meshmixer – профессиональное программное обеспечение, основная функция которого – настройка уже имеющейся 3D-модели для дальнейшей печати на соответствующем оборудовании. Основные функции данной программы: быстрое перемещение объектов – данная программа позволяет выбрать необходимый файл, переместить его на рабочее пространство и сразу же начать взаимодействие; 3D-скульптурирование – можно добавить или изменить детали проекта, тогда в этом помогут инструменты, предназначенные для скульптурирования; дополнительные функции – автоматическая заливка отверстий, зеркалирование, точное позиционирование, автоматические опции для расчета устойчивости и толщины объектов. В настоящее время наиболее доступными для широкого использования являются технологии FDM (fused deposition modeling) и DLP (digital light processing) 3D-печати. Принтеры, основанные на технологии FDM, позволяют быстро распечатывать объекты с относительно низкой стоимостью. Тем не менее, полученные изделия имеют слоистую структуру и требуют трудоемкой механической постобработки. Принтеры, основанные на технологии DLP, лишены значительной части указанных недостатков, однако отличаются более высокой стоимостью используемых материалов и необходимостью отмывки готовых изделий от остатков неполимеризовавшейся смолы в органических растворителях. Вследствие того, что полученная 3D-модель отличается сложной геометрией поверхностей с большим количеством мелких деталей, для печати использовали 3D-принтер Elegoo Mars 4 Ultra 9k, позволяющий получить разрешение по осям X и Y 0,05 мм, а по оси Z – 0,025 мм.

В настоящее время нет объемных моделей пазух носа, показывающих движение растворов во время промывания носа и околоносовых пазух.

■ ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработка алгоритма создания полноразмерной 3D-модели околоносовых пазух, а также оценка эффективности ее использования для изучения гидродинамики ирригационной терапии.

■ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование состояло из двух этапов. На 1-м этапе исследования требовалось получить 3D-модели околоносовых пазух по разработанному алгоритму. В качестве исходных данных использовались набор медицинских изображений, которые были получены при РКТ околоносовых пазух исследуемых (n=12) без патологических изменений, компьютерные программы InVesalius 3.1 и Meshmixer, прозрачная бесцветная фотополимерная смола eSUN Standard, отличающаяся относительно низкой вязкостью, что позволяет с высокой точностью воспроизводить мелкие детали.

На 2-м этапе исследования проводилась оценка эффективности использования 3D-модели околоносовых пазух для изучения гидродинамики ирригационной терапии (ИТ). Были проведены симуляции метода ИТ раствором фурацилина в объеме более 200 мл по методу A. Proetz (рис. 1) и с помощью носового ирригатора путем активного нагнетания раствора (рис. 2). Описывали время заполнения пазух ирригационным раствором при анализе записанного видео процедуры.

Анализ эффективности использования полученной 3D-модели проводился по шкале Лайкерта. Шкала Лайкерта включала следующие вопросы:

1. 3D-модель легко использовать?
2. 3D-модель обеспечивает лучшее понимание анатомии?
3. 3D-модель улучшает понимание физиологии?
4. 3D-модель позволяет более глубоко понимать метод ИТ?
5. 3D-модель помогает планировать ИТ?



Рис. 1. Промывание околоносовых пазух по Проетцу
Fig. 1. Proetz nasal lavage



Рис. 2. Промывание с помощью носового ирригатора
Fig. 2. Rinsing with a nasal irrigator

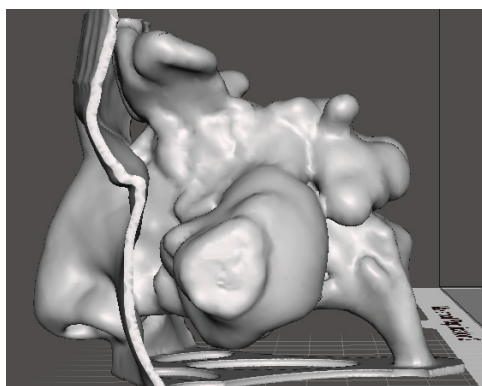


Рис. 3. 3D-модель перед печатью
Fig. 3. 3D model before printing

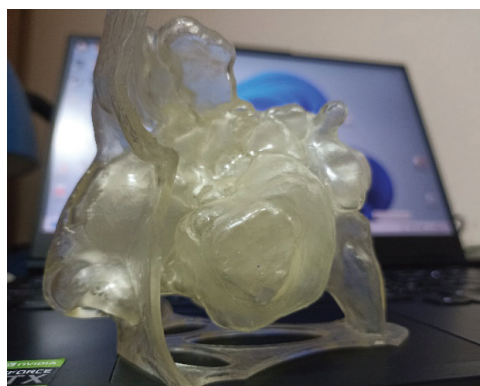


Рис. 4. Итоговая прозрачная модель пазух носа
Fig. 4. 3D model of the paranasal sinuses

Таблица 1
Время заполнения пазух ирригационным раствором
Table 1
Time required for filling the sinuses with irrigation solution

Пазухи	ИТ по Проетцу (время, сек.)	ИТ с помощью ирригатора (время, сек.)
Верхнечелюстные	10	25
Передние решетчатые	2	5
Средние и задние решетчатые	3	10
Лобные	10	25
Основные	5	Не заполняется
Всего	10	25

■ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате 1-го этапа исследования был составлен алгоритм создания 3D-модели околоносовых пазух носа, состоящий из 3 этапов:

- 1) формирование набора медицинских изображений, которые были получены при РКТ околоносовых пазух и сохранение в виде 2D-срезов в формате данных DICOM;
- 2) создание анатомически точной компьютерной 3D-модели с помощью программного обеспечения InVesalius 3.1 и Meshmixer (рис. 3);
- 3) создание и печать компьютерной 3D-модели при помощи DLP принтера, постобработка полученной модели (рис. 4).

Разработанная 3D-модель пазух носа позволяет визуализировать гидродинамику различных методов ирригационной терапии. Время заполнения пазух представлено в табл. 1.

При ИТ по Проетцу общее время заполнения всех пазух составило 10 секунд, причем наблюдалось полное заполнение всех пазух. При ИТ с помощью клапанного ирригатора общее время заполнения всех пазух составило 25 секунд, причем средние и задние решетчатые пазухи и лобные пазухи заполнились частично не более 1/3, а основные пазухи не заполнились совсем.

Оценка суммы баллов по шкале Лайкерта показала коэффициент воспроизводимости 0,92, а среднестатистический ранг категории показывает общую положительную установку группы экспертов на 3D-модель, что подтверждает ее эффективность для применения при планировании ИТ пациентам (табл. 2).

Таблица 2
Оценка модели по шкале Лайкерта
Table 2
Model assessment using a Likert scale

Экспер-ты	3D-модель легко исполь-зовать	3D-модель обеспечи-вает лучшее понимание анатомии	3D-модель улучшает понимание физиологии	3D-модель позволяет более глубоко понимать метод ИТ	3D-модель по-могает планиро-вать ИТ	Сумма баллов
1	5	5	5	5	4	24
2	5	5	4	5	4	23
3	5	5	5	5	5	25
4	5	5	5	5	5	25
5	5	5	4	5	5	24

■ ВЫВОДЫ

1. Разработан алгоритм создания полноразмерной 3D-модели околоносовых пазух взрослого человека.
2. Разработанная 3D-модель может использоваться для наглядности процесса ИТ носа и околоносовых пазух и позволяет измерить время, необходимое для заполнения околоносовых пазух.
3. Анализ и выбор наиболее рационального варианта ИТ должен проводиться с использованием индивидуальной 3D-модели околоносовых пазух с анализом гидродинамики различных методов ИТ.

■ ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Piskunov G. Normal and pathological physiology of the nose and paranasal sinuses. *Russian Rhinology*. 2017;25(3):51–57. (in Russian) Available at: <https://doi.org/10.17116/rosrino201725351-57>
2. Fokkens W.J. et al. *European position paper on rhinosinusitis and nasal polyps 2020*. Rhinology: official organ of the International rhinologic society. 2020.
3. Orlandi R.R. et al. International consensus statement on allergy and rhinology: rhinosinusitis 2021. *International forum of allergy & rhinology*. 2021;11(3):213–739.
4. Rabago D., Zgierska A. Saline nasal irrigation for upper respiratory conditions. *American family physician*. 2009;80(10):1117–1119.
5. King D. et al. Saline nasal irrigation for acute upper respiratory tract infections. *Cochrane Database Syst Rev*. 2015.
6. Chong L.Y. et al. Saline irrigation for chronic rhinosinusitis. *Cochrane Database of Systematic Reviews*. 2016;4.
7. Barham H.P., Harvey R.J. Nasal saline irrigation: therapeutic or homeopathic. *Brazilian journal of otorhinolaryngology*. 2015;81:457–458.
8. Rudmik L. et al. Early postoperative care following endoscopic sinus surgery: an evidence-based review with recommendations. *International forum of allergy rhinology*. Hoboken: Wiley Subscription Services, Inc., A Wiley Company. 2011;1(6):417–430.
9. Proetz A.W. A Special Syringe for Displacement Irrigation of the Nasal Sinuses. *Archives of Otolaryngology*. 1926;4(5):424–424.
10. Lopatin A., Svistushkin V. *Acute rhinosinusitis: etiology, pathogenesis, diagnostics and principles of treatment. Clinical guidelines*. Moscow: Russian Society of Rhinologists. 2009. (in Russian)