

Метод и устройство цифровой диафаноскопии для диагностики патологий верхнечелюстных пазух

Аннотация

Рассматриваются метод и устройство цифровой диафаноскопии для диагностики патологий верхнечелюстных пазух. Представлена схема экспериментальной установки, описаны специализированные медико-технические требования, предъявляемые к устройству. Апробация методики проводилась с привлечением условно здоровых добровольцев и пациентов с патологиями верхнечелюстных пазух. Результатом проведенных исследований является разработка модели классификации на основе линейного дискриминантного анализа, позволяющей выявлять наличие патологических изменений верхнечелюстных пазух с показателями чувствительности и специфичности, равными 0,88 и 0,98 соответственно.

Введение

В настоящее время заболевания верхнечелюстных пазух (ВЧП) играют существенную роль в социально-экономической ситуации в мире [1], при этом наблюдается ежегодный рост заболеваемости [2]. Назальная эндоскопия является важным методом диагностики ВЧП. Однако данный метод позволяет выявлять только косвенные признаки синусита, такие как гиперемия, отек слизистой оболочки носа на пораженной стороне, сужение просвета носовых ходов [3]. Диагностическая ценность ультразвукового исследования (УЗИ) в ЛОР-приложениях ограничена из-за низкой точности, обусловленной высокой частотой ложноположительных диагнозов [4]. Использование рентгенографии и компьютерной томографии (КТ) ограничено из-за наличия лучевой нагрузки на пациента [3].

В настоящее время широко используются оптические методы визуализации [5], среди которых выделяют метод цифровой диафаноскопии [6]. Наряду с назальной эндоскопией и УЗИ, диафаноскопия рассматривается как бюджетный метод диагностики, заключающийся в зондировании ВЧП безопасным низкоинтенсивным излучением видимого и ближнего инфракрасного спектра (650 и 850 нм). В норме ВЧП представляет собой пневматизированную полость, выстланную слизистой оболочкой [7]. Зондирующее излучение, проходящее через пазуху, частично поглощается при наличии патологических изменений в виде гнойного содержимого, кистозной жидкости, опухолевого образования и т. д. Наличие поглощения света связано с высокими значениями коэффициента поглощения ВЧП с патологическими изменениями из-за содержания крови или наличия поглощающих экссудатов [8], [9]. Следовательно, регистрация диафаногрмм позволяет визуализировать наличие или отсутствие патологических изменений в ВЧП.

Проведенные ранее исследования показали важность не только количественной оценки зарегистрированных диафаногрмм, но и разработки практического инструмента, позволяющего в режиме реального времени выявлять наличие патологических изменений в ВЧП [10]. При этом количественные параметры, рассчитываемые для зарегистрированных диафаногрмм, могут быть использованы в качестве диагностических критериев для построения модели классификации [11], в частности с использованием линейного дискриминантного анализа (ЛДА) [5].

Таким образом, целью рассматриваемой работы являлось повышение качества диагностики патологий ВЧП за счет разработки метода и устройства цифровой диафаноскопии, позволяющих выявлять патологию с меньшей вероятностью ложноотрицательного результата.

Материалы и методы

С использованием разработанного устройства цифровой диафаноскопии (рис. 1) [10] были проведены экспериментальные исследования с участием 49 условно здоровых добровольцев (13 мужчин, 36 женщин, средний возраст – 20 ± 3 года) и 42 пациентов с патологиями ВЧП (20 мужчин, 22 женщины, средний возраст – 49 ± 17 лет) с подтверждением полученных

результатов референтными методами (КТ/МРТ). Исследования с участием пациентов проводились на базе оториноларингологического отделения Клинического центра челюстно-лицевой, реконструктивной и пластической хирургии Университетской клиники Московского государственного медико-стоматологического университета им. А.И. Евдокимова (г. Москва, Россия). После ознакомления с протоколом исследования добровольцы подписывали информированное согласие, указывающее на их готовность участвовать в исследовании.

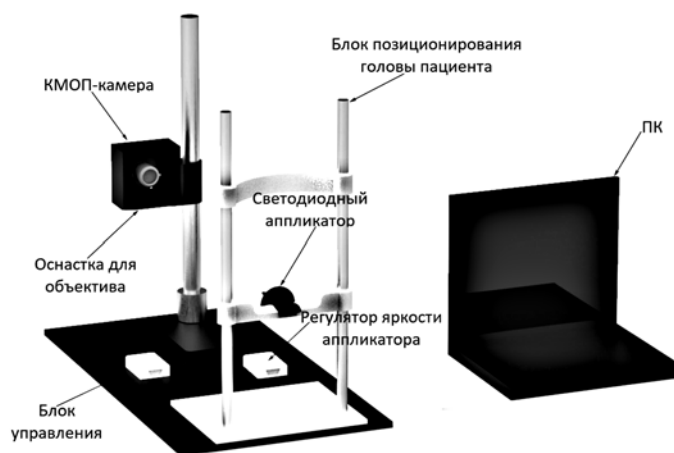


Рис. 1. Экспериментальная установка цифровой диафаноскопии

Во время исследования светодиодный аппликатор диафаноскопа, работающий на двух длинах волн зондирования (650 и 850 нм), помещали в ротовую полость пациента для дальнейшего зондирования ВЧП. В соответствии с обособленными специализированными медико-техническими требованиями [11] для диагностики пациентов женского пола значения оптической мощности устанавливались равными 25 и 65 мВт, для диагностики пациентов мужского пола – 85 мВт. Далее производилась регистрация диафаногрмм размером $N_x \times N_y$ ($N_x = 1280$, $N_y = 1024$) с помощью КМОП-камеры «UI-3240CP-NIR-GL Rev. 2» («Оберзульт», ФРГ) с объективом «Pentax C1614-M (KP)» («Pentax», Япония), расположенной напротив лица пациента. Значение времени экспозиции камеры устанавливалось равным 40 мс.

На зарегистрированных диафаногрммх каждая точка (пиксель) соответствует значению интенсивности света, который достигает детектора камеры после поглощения и рассеяния в нормальных или/и измененных патологией тканях ВЧП. Вывод о наличии или отсутствии патологического изменения делается на основе пространственного распределения света, обнаруженного камерой, определяемого, в частности, сильным поглощением света на длинах волн 650 и 850 нм в области ВЧП с патологиями [8], [9].

Специально разработанное программное обеспечение позволяет управлять работой устройства (выбор источника излучения и режима работы камеры), регистрировать диафа-

нограммы, а также осуществлять их качественную (визуализация) и количественную (псевдоокрашивание) обработку, которая заключается в преобразовании диафаногаммы $D(x, y)$ в 8-битное изображение, в дальнейшем для удобства представленное в процентном масштабе $I_n(x, y)$, в соответствии с формулой (1):

$$I_n = \frac{D(x, y) - \min_{x=1...N_x, y=1...N_y} D(x, y)}{\max_{x=1...N_x, y=1...N_y} D(x, y) - \min_{x=1...N_x, y=1...N_y} D(x, y)} \cdot 100\% \quad (1)$$

Таким образом, в зависимости от степени поглощения света псевдоокрашивание позволяет лучше визуализировать верхнечелюстные пазухи при наличии патологического изменения.

Результаты исследования

Клинические исследования

Здоровая ВЧП пневматизирована из-за отсутствия патологических изменений, соответственно в здоровой ВЧП нет поглощения света, что подтверждается результатами цифровой диафаноскопии, полученными для условно здорового добровольца (рис. 2, вверху). При этом в области левой и правой ВЧП отсутствует поглощение света, что свидетельствует об их пневматизации и отсутствии патологических изменений.

В приведенном примере для пациента (рис. 2, внизу) зарегистрированная диафаногамма, а также результаты псевдоокрашивания показывают затемнение в области правой ВЧП (белым кругом отмечена область ВЧП с патологическим изменением), что указывает на снижение прозрачности и соответственно наличие патологического изменения (левая пазуха в норме).

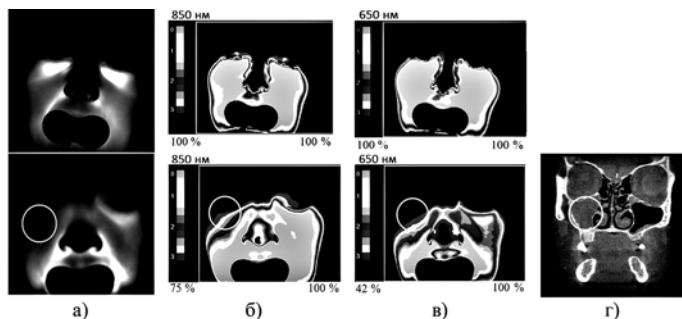


Рис. 2. Пример результата исследования условно здорового добровольца (вверху) и пациента с мицетомой правой ВЧП (внизу): а) зарегистрированные диафаногаммы; б), в) результаты псевдоокрашивания для длин волн зондирующего излучения 850 и 650 нм соответственно; г) КТ верхней и нижней челюстей в корональной плоскости

На основании рассмотренного примера можно сделать вывод о том, что обнаруженные с помощью КТ патологические изменения в ВЧП можно выявлять с помощью разработанного устройства цифровой диафаноскопии.

Применение ЛДА

С целью построения модели классификации для разделения объектов исследования на два класса (здоровые и с наличием патологии) были рассчитаны количественные параметры зарегистрированных диафаногамм: параметр интенсивности (PII) и коэффициент асимметрии (KA). Для расчета PII на изображении вручную выбирается область верхнечелюстной

пазухи (область интереса ROI), в которой рассчитывается среднее значение интенсивности света в соответствии с формулой (2):

$$PII = \frac{\sum_{i=1...N} D_i}{N} \quad (2)$$

где N – количество пикселей в области ROI.

Расчет KA заключается в определении центральной линии лица (оси симметрии), повороте диафаногамм для обеспечения вертикального положения центральной линии и вычисления коэффициента асимметрии между левой и правой частями лица. Расчет производится в соответствии с формулой (3):

$$KA = \frac{\sum_m \sum_n (A_{m,n} - \bar{A}) \cdot (B_{N_x/2-m,n} - \bar{B})}{\sqrt{\sum_m \sum_n (A_{m,n} - \bar{A})^2 \cdot [\sum_m \sum_n (B_{m,n} - \bar{B})^2]}} \quad (3)$$

где $A_{m,n} = D(x = 1...N_x / 2, y = 1...N_y)$ и $B_{m,n} = D(x = N_x / 2 + 1...N_x, y = 1...N_y)$ – интенсивности пикселей в левой и правой частях диафаногаммы соответственно; \bar{A} и \bar{B} – средние интенсивности в левой и правой частях диафаногаммы соответственно; m и n – количество строк и столбцов пиксельной матрицы.

Анализ полученных данных (табл. 1) показал статистически значимую разницу между рассчитанными показателями для условно здоровых добровольцев и пациентов с патологическими изменениями в ВЧП.

Для разделения состояния ВЧП на два класса (с патологией и без) была построена модель классификации на основе ЛДА, при этом в качестве диагностических критериев выступали PII и KA . Модель классификации, соответствующая наилучшим значениям чувствительности и специфичности, имеет вид

$$f = (-0,07PII) + (-7,26KA) + 9,85 \quad (4)$$

Полученные результаты показали, что значения чувствительности и специфичности для длины волны зондирования 850 нм составили 0,88 и 0,98 соответственно ($AUC = 0,98$). Данные точностные характеристики превышают значения показателей чувствительности и специфичности для назальной эндоскопии и УЗИ [4], что указывает на перспективность предлагаемого подхода как в быстрой диагностике ВЧП, так и в эффективности скрининга.

На диаграмме рассеяния значений PII и KA для длины волны зондирования 850 нм (рис. 3а) нанесенная дискриминантная линия делит экспериментальные точки на две группы (здоровые добровольцы и пациенты). Построенная модель классификации позволила разработать алгоритм метода цифровой диафаноскопии для диагностики патологий ВЧП (рис. 3б).

После этапа непосредственной регистрации диафаногамм осуществляется расчет PII и KA и применяется модель классификации, на основании которой делается вывод о наличии или отсутствии патологии ВЧП.

Заключение

Таким образом, в статье представлены разработанные метод и устройство цифровой диафаноскопии для диагностики патологий ВЧП. Применение предложенной модели классификации, основанной на ЛДА, позволяет с высокой точностью выявлять наличие патологии с показателями чувствительности и специфичности, равными 0,88 и 0,98 соответственно, что, в свою очередь, позволяет снизить вероятность ложноот-

Таблица 1

Результаты статистической обработки данных

Длина волны зондирования	PII , отн. ед.		KA , отн. ед.	
	Норма	Патология	Норма	Патология
650 нм	113,80 [49,20; 222,30]	30,05 [0,10; 142,50]*	0,91 [0,74; 0,96]	0,62 [0,09; 0,86]*
850 нм	107,20 [37,40; 198,60]	27,85 [0,10; 100]*	0,89 [0,60; 0,96]	0,62 [0,08; 0,89]*

* Статистически значимая разница между значениями подтверждена при $p < 0,05$ по критерию Манна-Уитни.

рицательного результата. В дальнейшем разработанная модель будет усовершенствована за счет увеличения набора данных и применена для разработки системы поддержки принятия врачебных решений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90147. Выражаем благодарность волонтерам и пациентам Университетской клиники МГМСУ им. А.И. Евдокимова (г. Москва, Россия) и лично врачам д.м.н. Панченкову Д.Н., к.м.н. Бакотиной А.В., к.м.н. Николаевой Ю.О., Пильникову В.Г., а также к.ф.-м.н. Артюшенко В.Г. («art photonics Ltd.», Берлин, ФРГ) за всестороннюю помощь на всех стадиях реализации проекта.

Список литературы:

1. Агеев И.В., Агеев Л.И. Медикаментозная полипотомиа полости носа и околоносовых пазух с использованием ямик-процедур // Folia Otorhinolaryngol. Pathol. Respir. 2015. Vol. 21. № 2. PP. 10-13.
2. Шамсиев Д., Вохидов У., Каримов О. Современный взгляд на диагностику и лечение хронических воспалительных заболеваний носа и околоносовых пазух // Молодой ученый. 2018. № 5. С. 84-88.
3. Шадыев Т.Х., Изотова Г.Н., Сединкин А.А. Острый синусит // Российский медицинский журнал. 2013. Т. 21. № 11. С. 567-572.
4. Hsu C.C., Sheng C., Ho C.Y. Efficacy of sinus ultrasound in diagnosis of acute and subacute maxillary sinusitis // J. Chinese Med. Assoc. 2018. Vol. 81 (10). PP. 898-904.
5. Дунаев А.В. Мультимодальная оптическая диагностика микроциркуляторно-тканевых систем организма человека. Монография. – Старый Оскол: ТНТ, 2022. 440 с.
6. Stoelzel K., Szczepek A.J., Olze H., Koss S., Minet O., Zabarylo U. Digital diaphanoscopy of the maxillary sinuses: A revival of optical diagnosis for rhinosinusitis // Am. J. Otolaryngol. 2020. Vol. 41 (3). P. 102444.
7. Al-Qahtani A., Haidar H., Larem A. Textbook of clinical otolaryngology. – Springer Nature, 2020. 796 p.
8. Peters V.G., Wyman D.R., Patterson M.S., Frank G.L. Optical properties of normal and diseased human breast tissues in the visible and near infrared // Physics in Medicine & Biology. 1990. Vol. 35 (9). PP. 1317-1334.
9. Van Veen R., Sterenborg H.J.C.M., Marinelli A.W., Menke-Pluymers M.B.E. Intraoperatively assessed optical properties of malignant and healthy breast tissue used to determine the optimum wavelength of contrast for optical mammography // Journal of Biomedical Optics. 2004. Vol. 9 (6). PP. 1129-1136.
10. Bryanskaya E.O., Novikova I.N., Dremir V.V., Gneushev R.Y., Bibikova O.A., Dunaev A.V., Artyushenko V.G. Optical Diagnostics of the Maxillary Sinuses by Digital Diaphanoscopy Technology // Diagnostics. 2021. Vol. 11 (77). PP. 1-13.
11. Bryanskaya E.O., Novikova I.N., Dremir V.V., Nikolaeva Yu.O., Pil'nikov V.G., Bakotina A.V., Ovchinnikov A.Y., Panchenkov D.N., Baranov A.V., Artyushenko V.G., Dunaev A.V. Digital diaphanoscopy in the diagnosis of maxillary sinus diseases for patients with different anatomical and gender features // Proc. SPIE. 2022. Vol. 12192. P. 121920A.

Екатерина Олеговна Брянская,
стажер-исследователь,
Андрей Валерьевич Дунаев,
д-р техн. наук, доцент,
ведущий научный сотрудник,
научно-технологический центр
биомедицинской фотоники,
ФГБОУ ВО «Орловский государственный
университет им. И.С. Тургенева»,
г. Орел,
e-mail: bryanskaya@mail.ru

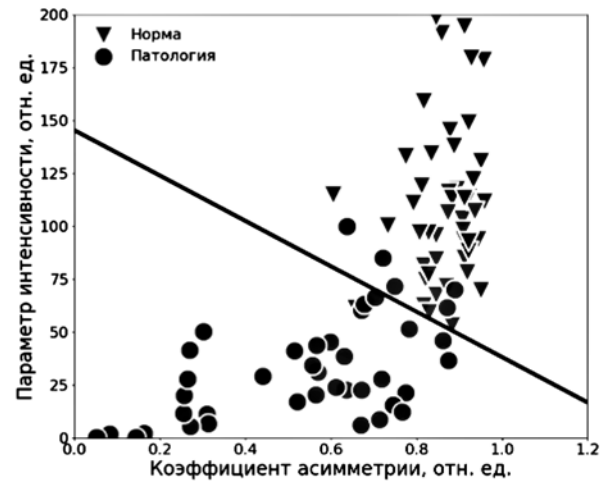


Рис. 3. Диаграмма рассеяния значений ПИ и КА с нанесенной дискриминантной функцией (а), алгоритм метода цифровой диафаноскопии для диагностики патологий ВЧП (б)