



¹ Санкт-Петербургский
НИИ уха, горла,
носа и речи

² Северо-Западный
государственный
медицинский
университет
им. И.И. Мечникова

Возможности трехмерной реконструкции поверхности барабанной перепонки

М.В. Комаров^{1,2}, А.А. Федотова²

Адрес для переписки: Михаил Владимирович Комаров, 7_line@mail.ru

Для цитирования: Комаров М.В., Федотова А.А. Возможности трехмерной реконструкции поверхности барабанной перепонки. Эффективная фармакотерапия. 2025; 21 (14): 44–51.

DOI: 10.33978/2307-3586-2025-21-14-44-51

Цель. Морфология барабанной перепонки играет важную роль в диагностике и прогнозировании патологий среднего уха, особенно при хронических воспалительных изменениях и формировании ретракционных карманов. Визуальная оценка указанных изменений традиционно проводится с использованием отомикроскопии и эндоскопии, однако эти методы характеризуются субъективностью и не позволяют получить объективные количественные параметры. В данной работе рассмотрена возможность применения метода фотограмметрии с использованием программной платформы Agisoft Metashape для построения трехмерной модели поверхности барабанной перепонки.

Материал и методы. Исследование выполнено на серии эндоскопических изображений, полученных у пациентов в амбулаторных условиях. Съемка проводилась через ригидный отоскоп с цифровой камерой, подсоединенной посредством оптического адаптера. Серии из 20–40 перекрывающихся снимков позволяли формировать высокоточные 3D-модели с использованием алгоритмов Structure-from-Motion, включающих этапы выравнивания фото, построения облака точек, генерации сетки и наложения текстуры.

Обсуждение. Полученные модели демонстрировали высокую геометрическую точность, позволяющую проводить количественную оценку ретракции: измерение глубины, площади и объема втяжения. Метод позволял строить сагиттальные и фронтальные профили деформации и использовать их в динамике для оценки прогрессирования патологии у одного и того же пациента. Повторные исследования подтвердили пригодность метода для объективного контроля изменений во времени.

Заключение. Несмотря на некоторые ограничения (блики, узость слухового прохода, участки тени), методика показала высокую воспроизводимость и применимость в амбулаторной практике. Фотограмметрия может быть использована не только в диагностике и наблюдении за хроническими процессами, но и в обучении, планировании хирургических вмешательств и телемедицине, открывая новые горизонты в отохирургии.

Ключевые слова: отохирургия, фотограмметрия, барабанная перепонка, 3D-визуализация, ретракционный карман



Введение

Морфологическое состояние барабанной перепонки является важным критерием в диагностике заболеваний среднего уха. Оценка локализации, размера, типа и степени дегенеративных изменений в ее анатомических структурах позволяет сделать выводы о прогнозе заболевания и возможности его эффективного лечения. Однако, несмотря на свою значимость, визуальный анализ этих изменений остается субъективным методом диагностики, точность которого зависит как от качества оборудования, так и от опыта оториноларинголога.

Для точной постановки диагноза и назначения адекватного лечения заболеваний среднего уха необходимо глубокое понимание морфологии барабанной перепонки, особенно в случаях ее хронических воспалительных изменений, ретракций, перфораций и других патологических процессов [1–4].

При ретракции, когда происходит истончение фибрилл и потеря эластичности собственно пластины барабанной перепонки, в результате чего она становится более рыхлой, а ее слизистая оболочка контактирует со сквамозным эпителием, возникают ретракционные карманы [5, 6].

Эти карманы часто развиваются на фоне хронических воспалительных процессов, которые возникают из-за длительной дисфункции слуховой трубы [7, 8]. Немаловажную роль в этом играют факторы, приводящие к окклюзии ее глоточного устья, что может быть связано с носоглоточными патологиями [9].

Если говорить о внутритимпанальных причинах возникновения ретракций, то основной из них считается нарушение вентиляции в области тимпанальной диафрагмы. Это приводит к тому, что барабанная полость разделяется на изолированные сегменты, что, в свою очередь, способствует возникновению втяжений барабанной перепонки различной степени [10–13].

Оценка ретракционных карманов барабанной перепонки осуществляется на основании ряда патогенетически значимых критериев, включая их анатомическую локализацию, степень выраженности деструктивных изменений (эрозивное поражение костных структур, протеолитическая активность в области втяжения и прилежащих тканях), способность к самоочищению, а также характер морфогенеза, в том числе тенденцию к формированию спаек с элементами звукопроводящего аппарата или сращению с костными стенками барабанной полости [2, 3, 14, 15]. Наиболее клинически значимыми являются карманы, характеризующиеся фиксированным положением, краевым расположением и нарушением эвакуации эпидермального содержимого, что существенно ограничивает возможности их объективного анализа при стандартной отомикроскопии и обосновывает необходимость применения высокоточных методов визуализации и динамического контроля [2, 3, 14, 15].

С внедрением в клиническую практику цифровых технологий открываются новые подходы к трехмерной визуализации анатомических структур [16]. Одним из таких перспективных методов является фотограмметрия – процесс построения трехмерной

модели на основе серии перекрывающихся фотографий объекта, выполненных под разными углами [17]. Фотограмметрия базируется на принципе триангуляции, при котором измеряются расстояния и углы между опорными точками на 2D-изображениях для восстановления их пространственного расположения в трехмерной модели. Этот метод аналогичен работе 3D-сканеров, позволяя с высокой точностью определять координаты объектов в трехмерном пространстве [18–20]. Программное обеспечение Agisoft Metashape позволяет реализовать данный подход с высокой точностью, автоматизируя ключевые этапы реконструкции: выравнивание изображений, построение облака точек, формирование полигональной сетки и наложение текстуры [21]. Методология, реализованная в Agisoft Metashape, соответствует современным стандартам фотограмметрии и демонстрирует высокую воспроизводимость результатов в исследованиях геоморфологии, археологии и мониторинга окружающей среды [22–24].

Настоящее исследование посвящено разработке и апробации метода построения трехмерной модели поверхности барабанной перепонки на основе серии эндоскопических изображений, полученных с помощью цифровой камеры, соединенной с эндоскопом через фотоадаптер.

Цель работы – оценить возможность применения 3D-реконструкции в условиях стандартного амбулаторного осмотра и продемонстрировать потенциал метода для дальнейшего использования в диагностике, планировании хирургического лечения и в образовательных целях.

Материал и методы

Съемка проводилась в амбулаторных условиях у пациентов с интактной или патологически измененной барабанной перепонкой. Положение пациента – лежа или сидя с повернутой в противоположную сторону головой (рис. 1). Обезболивание или медикаментозная седация не применялась из-за безопасной



Рис. 1. Процесс получения фотографий в амбулаторных условиях



и безболезненной техники проведения фотосъемки. Производилось очищение наружного слухового прохода от различного рода артефактов (слущенный эпителий, серные массы), препятствующих визуализации барабанной перепонки. В исследование не включали пациентов с заболеваниями кожи наружного слухового прохода, а также с выраженным болевым синдромом, связанным с воспалением среднего уха.

Оборудование и условия съемки

Для каждой перепонки осуществлялась серия из 20–40 перекрывающихся изображений, полученных при незначительном изменении угла наклона эндоскопа. Основное требование – наличие перекрытия между соседними изображениями не менее 90%, обеспечивающего возможность точной пространственной реконструкции поверхности.

Техническое оснащение для проведения съемки:

1. Цифровая фотокамера Canon PowerShot A590 IS (Япония) с 8,0-мегапиксельной матрицей. Камера имеет ручные настройки экспозиции и фокусировки, что позволяет получать стабильные изображения и избегать автофокусных искажений при ближней макросъемке через оптическую систему эндоскопа.

2. Жесткий эндоскоп Karl Storz (Германия) с углом обзора 0°, длиной 180 мм и диаметром 4 мм. Этот эндоскоп обеспечивает прямую визуализацию барабанной перепонки с высокой оптической четкостью. Эндоскоп оснащен стандартным



Рис. 2. Одна из исходных эндофотографий барабанной перепонки. В переднем и заднем карманах Трельча, а также в пространстве Пруссакса есть ателектаз. Ретракционный карман доходит до длинной ножки наковальни и сухожилия мышцы, натягивающей барабанную перепонку. Это состояние соответствует клинической картине селективного дисвентиляционного синдрома нижнего аттика

Luer-Lock-интерфейсом для легкой интеграции с источником света и адаптером камеры.

3. Портативный источник света Karl Storz (артикул 11301D4, производства Германии) с рабочим напряжением 3 В и цветовой температурой света 5500 К. Этот источник обеспечивал стабильное освещение и минимизировал тени и блики на поверхности барабанной перепонки, что особенно важно для последующего сопоставления изображений в фотограмметрии.

4. Оптический адаптер, соединяющий цифровую камеру с эндоскопом, изготовлен по индивидуальному заказу на АО «ЛОМО» (Россия). Это устройство обеспечивало точное совмещение оптических осей обоих приборов, что критически важно для получения несмещенных и геометрически стабильных изображений, пригодных для трехмерной реконструкции методом Structure from Motion.

Для каждого объекта было выполнено определенное количество снимков в формате jpeg, с высоким уровнем взаимного перекрытия кадров. Изменение угла визуализации осуществлялось вручную, с минимальными отклонениями траектории и фиксации эндоскопа в различных позициях по окружности слухового прохода. Изображения снимались с постоянным фокусным расстоянием и освещением.

Предобработка изображений

Фотографии проходили отбор по качеству (резкость, отсутствие переэкспозиции и артефактов), при необходимости выполнялась коррекция яркости и цветового баланса. Крайя изображений с затемнением, обусловленным особенностями оптики, удалялись путем кадрирования.

Трехмерная реконструкция

Полученные снимки были импортированы в программную среду Agisoft Metashape Professional версии 2.2.1 (дата релиза – 31.12.2024). Предварительно проводилась ручная фильтрация изображений по качеству (резкость, блики, экспозиция), после чего они подвергались этапам автоматизированной обработки в рамках фотограмметрического пайплайна:

- *Align Photos* – автоматическое выравнивание и определение параметров положения камеры;
- *Build Dense Cloud* – построение плотного облака точек;
- *Build Mesh* – генерация полигональной поверхности;
- *Build Texture* – наложение текстуры с высокой детализацией.

Все этапы выполнялись с использованием параметров высокого качества (High), без масштабирования разрешения изображений, в режиме полной фотограмметрической обработки.

Применение модели для оценки ретракции

Полученные 3D-модели использовались для количественной оценки пространственной геометрии



барабанной перепонки. При использовании встроенных инструментов измерения (Distance, Profile) проводились следующие операции:

- определение глубины ретракционного кармана относительно плоскости нормальной перепонки;
- вычисление площади втяжения на текстурированной модели.

Для оценки динамики изменений у одного и того же пациента проводилось сопоставление моделей, полученных в разные временные точки. Сравнение осуществлялось методом визуального совмещения моделей (по анатомическим ориентирам) с последующим анализом разницы по глубине и площади ретракции.

Критерии оценки качества трехмерной реконструкции моделей:

- полнота покрытия барабанной перепонки;
- геометрическая достоверность (отсутствие искажений и провалов);
- точность текстурирования;
- репродуцируемость при повторной съемке;
- возможность количественного анализа глубины втяжения и профиля деформации.

Результаты

Качество исходных изображений и исходные параметры реконструкции

Загруженные в программную среду Agisoft Metashape Professional версии 2.2.1 изображения демонстрировали высокую степень выравниваемости: в каждом проекте было успешно выровнено 94–100% снимков. Среднее значение ошибки репроекции (reprojection error) не превышало 0,4 пикселя, что соответствует критерию высокой точности построения внутренних и внешних параметров камеры. На основании этих данных формировалось разреженное облако точек, служащее основой для последующих этапов пространственного моделирования.

Построение плотного облака точек и полигональной модели

После успешного выравнивания и калибровки снимков осуществлялось построение плотного облака точек. Обработка выполнялась с настройками высокого качества (High), с фильтрацией глубины Mild для минимизации шума на границах перепонки и стенок слухового прохода. В результате формировалось от 350 000 до 480 000 точек на модель, с плотностью распределения, варьирующей от 140 до 210 точек на 1 мм², в зависимости от количества и разнообразия ракурсов.

На основе плотного облака строилась полигональная поверхность методом Delaunay-триангуляции, с автоматическим ограничением сложности до 120 000–150 000 треугольников. Полученные сетки были непрерывными, топологически целостными и не содержали сквозных дефектов. Даже в случаях ретракции с резкими углублениями моделям

удавалось сохранить геометрическую достоверность при сохранении адекватной плотности сетки на участках перехода между нормальной и втянутой перепонкой.

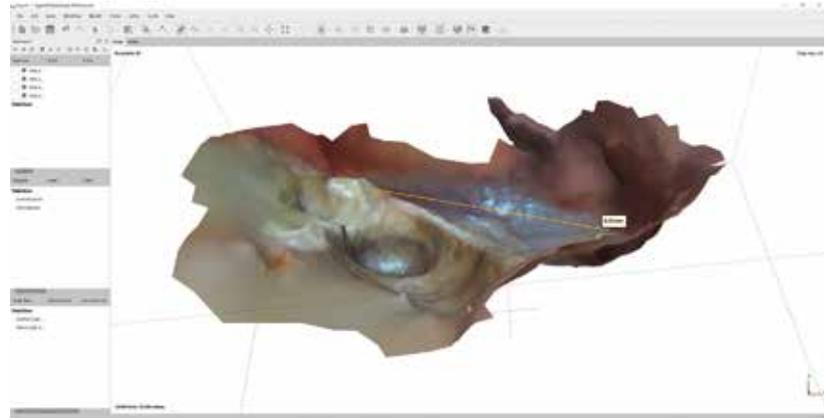


Рис. 3. Трехмерная реконструкция барабанной перепонки: процесс измерения расстояния между латеральным отростком молоточка и наиболее отдаленной частью барабанной борозды

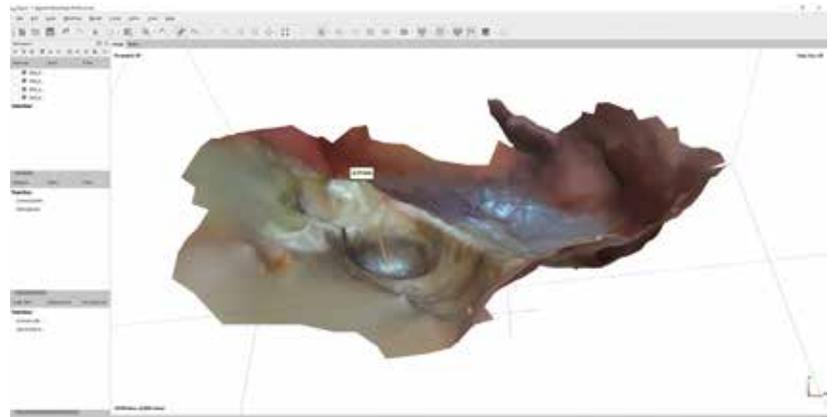


Рис. 4. Процесс измерения глубины ретракции барабанной перепонки от латерального отростка молоточка до дна ретракционного кармана

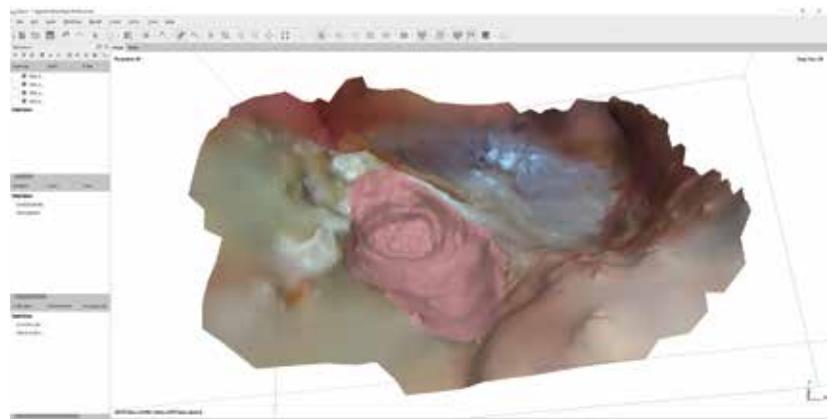


Рис. 5. Определение площади ретракционного кармана, границы ретракции выставляются оператором



Текстурирование моделей и визуальный анализ анатомии

Заключительный этап – наложение текстуры на трехмерную сетку – выполнялся в режиме Generic Mapping с разрешением текстуры 4096 × 4096 пикселей. При этом программа автоматически использовала изображения с наибольшей резкостью и наименьшим количеством бликов, что обеспечивало равномерную детализацию. Визуализация на готовых моделях позволила уверенно идентифицировать все ключевые анатомические элементы барабанной перепонки (рис. 2–9).



Рис. 6. Одна из исходных эндифотграфий барабанной перепонки. На снимке видны проявления селективного дисвентиляционного синдрома: ретроимпанум – вследствие блокады заднего тимпанального соустья с формированием ретракционного кармана в задневерхнем квадранте *pars tensa* и верхний аттик, который проявляется из-за обструкции переднего тимпанального соустья при сохранной анатомии складки *m. tensor tympani*

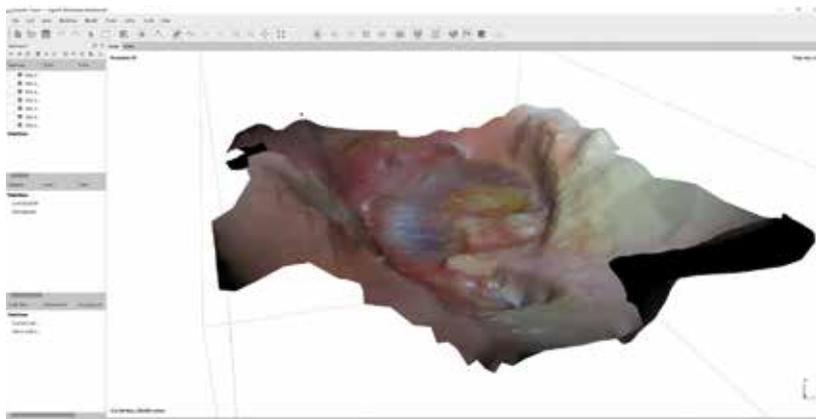


Рис. 7. Трехмерное моделирование при реконструкции барабанной перепонки: методика обеспечивает визуализацию зон ретракционных карманов, недоступных для стандартной отомикроскопии и эндоскопического исследования

Количественный анализ втяжений барабанной перепонки

На основе построенных моделей проведена количественная оценка ретракционных изменений у пациентов с подозрением на формирование или прогрессирование ретракционного процесса. Для этого в пространстве модели определялась референтная плоскость, соответствующая нормальному положению натянутой перепонки (с опорой на края слухового прохода и ориентиры рукоятки молоточка). Измерялась максимальная вертикальная глубина втяжения от этой плоскости до наиболее удаленной точки поверхности. Также с помощью инструментов пространственного выделения рассчитывались:

- площадь участка втяжения;
- объем втянутого участка относительно нативной поверхности.

Глубина втяжений варьировала от 0,8 до 3,2 мм. Участки втяжения занимали площадь от 3,5 до 14,2 мм², в зависимости от локализации и стадии процесса. У пациентов с ретракцией в области аттика или задневерхнего квадранта модель позволяла построить сагиттальный и фронтальный профиль поверхности, что давало возможность не только количественной, но и морфометрической оценки кривизны.

Сравнение моделей при динамическом наблюдении

У двух пациентов проведено повторное 3D-сканирование через три и шесть месяцев соответственно. Полученные повторные модели были совмещены с исходными по ряду анатомических точек (короткий отросток, центр пупка перепонки, проекция сосудистой полоски). Совмещение моделей позволило наглядно оценить изменение пространственной конфигурации втяжения:

- у одного пациента наблюдалось увеличение глубины ретракции на 0,9 мм и расширение площади на 3,3 мм²;
- у второго – углубление на 0,4 мм с незначительным увеличением площади (на 2,1 мм²);
- при этом в обоих случаях профиль втяжения становился более крутым, а область втяжения распространялась к задневерхнему квадранту.

Данные наблюдения подтверждают возможность применения предложенной методики для объективного контроля динамики ретракционного процесса в ходе наблюдения.

Ограничения метода, выявленные в исследовании

В ходе обработки были выявлены факторы, ограничивающие точность и воспроизводимость моделей:

- сильные блики от освещенной поверхности барабанной перепонки снижали надежность сопоставления ключевых точек, особенно в центральной зоне; это требовало ручного исключения отдельных изображений;



- неполный охват зоны втяжения возникал при узости слухового прохода, ограничивающей возможность варьирования угла обзора (это особенно касалось задневерхнего квадранта и области аттика).
- глубокие втяжения с резкими переходами создавали участки тени или геометрической неопределенности, что в ряде случаев снижало плотность точек и ухудшало разрешение модели в соответствующей зоне.

Тем не менее, несмотря на указанные ограничения, построенные модели сохраняли диагностическую и измерительную пригодность и позволяли проводить количественную оценку втяжения даже при частичной утрате данных.

Обсуждение

Оценка пространственной конфигурации барабанной перепонки, особенно при ее ретракции, представляет собой одну из наименее стандартизированных задач в отиатрии. Несмотря на широкое распространение эндоскопии и отомикроскопии, визуальное суждение врача о степени втяжения остается субъективным и не всегда совпадает у разных специалистов. В этой связи актуальными становятся подходы, позволяющие получить объективные и количественно воспроизводимые данные, в частности – с применением трехмерной реконструкции.

В ряде исследований последних лет подтверждена возможность построения анатомических 3D-моделей [25–27], в том числе и структур уха, на основе данных КТ и МРТ [28, 29]. Однако частое использование томографических методов в амбулаторной практике ограничено из-за их кумулятивных рисков, стоимости и отсутствия возможности динамического контроля. Альтернативой является фотограмметрический метод, обеспечивающий построение точных трехмерных моделей на основе двумерных изображений при условии их достаточного количества и перекрытия [16].

В данной работе продемонстрирована возможность создания трехмерной модели поверхности барабанной перепонки на основе серии эндосонографических изображений при условии их достаточного количества и перекрытия [16]. В данной работе продемонстрирована возможность создания трехмерной модели поверхности барабанной перепонки на основе серии эндосонографических изображений, полученных в условиях амбулаторного приема, без применения дорогостоящего оборудования или программных средств визуализации, требующих радиационной нагрузки. Использование программной платформы Agisoft Metashape, основанной на методе Structure from Motion (SfM), позволило получить геометрически точные и текстурированные цифровые реконструкции, пригодные для количественного анализа ретракции.

Согласно опубликованным данным, ранее подобные методы применялись преимущественно в стоматологии и дерматологии для анализа поверхностей [30–32], однако их трансляция в область отиатрии открывает новые клинические перспективы. В частности, анализ профиля втяжения перепонки вдоль рукоятки молоточка или по направлению

к аттику может использоваться для определения стадии ретракционного процесса по классификации Sade или Tos [6, 33, 34], но уже с опорой на точные цифровые метрики.

Дополнительным преимуществом предложенного подхода является возможность динамического мониторинга. Построение моделей в разные временные точки позволяет не только сравнивать визуальную картину, но и проводить субъективно независимое сопоставление глубины и площади ретракции, что имеет большое значение при принятии решений



Рис. 8. Состояние после первого этапа двухэтапной тимпаноластики (санирующее вмешательство): сохранение купольного положения барабанной перепонки

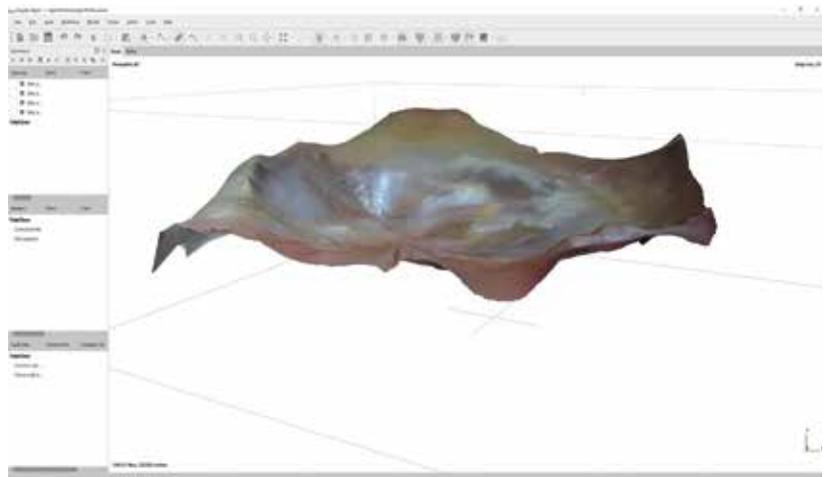


Рис. 9. Трехмерное моделирование при реконструкции серии отоскопических изображений (см. рис. 8), демонстрирующее вид на уровне барабанной борозды. Неотимпанальная мембрана формирует куполообразную структуру с вершиной в области головки стремянки



о хирургическом вмешательстве. Таким образом, методика может быть использована для контроля пациентов с патологией, известной как «ретракционный карман», на стадии наблюдения, без необходимости немедленного хирургического вмешательства.

Следует отметить, что метод имеет и ограничения. Качество 3D-модели существенно зависит от условий съемки: стабильности руки исследователя, глубины резкости, наличия переэкспонированных участков, симметричных элементов и пр. Однако опыт показывает, что при соблюдении протокола и применении камер разрешением от 8 Мп можно добиться устойчиво воспроизводимых результатов.

Перспективным направлением развития методики является ее интеграция с данными компьютерной томографии, в частности для уточнения пространственного положения костных ориентиров (молоточек, короткий отросток, граница аттика). Также возможно использование полученных цифровых моделей в обучающих целях и при планировании

реконструктивных операций, особенно в условиях анатомических вариаций или повторных вмешательств.

Заключение

Использование фотограмметрии открывает новые возможности в сфере здравоохранения. Метод позволяет создавать высокоточные 3D-модели анатомических структур, что способствует детальной и персонализированной диагностике. Это особенно актуально для реконструктивной хирургии и послеоперационного наблюдения.

В телемедицине технология открывает возможности для инновационного взаимодействия специалистов, повышая эффективность совместной диагностики и терапии. Кроме того, использование метода обогащает клинические исследования ценными данными, способствуя разработке новых терапевтических подходов и оптимизации существующих протоколов. Таким образом, фотограмметрия укрепляет позиции в качестве перспективного инструмента современной медицины. ☼

Литература

1. Дементьева Н.Ф., Шиленков А.А., Козлов В.С. Состояние слуха у больных с ретракционными карманами. *Российская оториноларингология*. 2008; 3 (34): 118–123.
2. Alper C., Olszewska E. Assessment and management of retraction pockets. *Otolaryngol. Pol.* 2017; 71 (1): 1–21.
3. Danishyar A., Ashurst J.V. Acute Otitis Media. *StatPearls* [Internet]. 2025.
4. Tos M. Anatomy and histology of the middle ear. *Clin. Rev. Allergy*. 1984; 2 (4): 267–284.
5. Alzahrani M., Saliba I. Tympanic membrane retraction pocket staging: is it worthwhile? *Eur. Arch. Otorhinolaryngol.* 2014; 271: 1361–1368.
6. Paparella M.M., Hiraide F., Juhn S., Kaneko Y. Cellular events involved in middle ear fluid production. *Ann. Otol. Rhinol. Laryngol.* 1970; 79 (4): 766–779.
7. Canali I., Rosito L.P.S., Longo V.D., et al. Critical analysis of moderate and severe retractions in the pars tensa and pars flaccida of the tympanic membrane. *Braz. J. Otorhinolaryngol.* 2023; 89: 114–121.
8. Proctor B. Attic-aditus block and the tympanic diaphragm. *Ann. Otol. Rhinol. Laryngol.* 1971; 80 (3): 371–375.
9. Azuma T., Nogaki T., Schachern P., et al. Structural Analysis of Tensor Tympani Muscle, Tympanic Diaphragm, Epitympanum, and Protympanum in Menière's Disease. A Human Temporal Bone Study. *Otol. Neurotol.* 2018; 39 (4): 499–505.
10. Marchioni D., Alicandri-Ciuffelli M., Molteni G., et al. Selective epitympanic dysventilation syndrome. *Laryngoscope*. 2010; 120 (5): 1028–1033.
11. Paparella M. Pathology and pathogenesis of retraction pockets and cholesteatoma. Amsterdam: 1989, Kugler and Ghedini Publications, 401–411.
12. Akyildiz N., Akbay C., Ozgürçin O.N., et al. The role of retraction pockets in cholesteatoma development: an ultrastructural study. *Ear. Nose Throat. J.* 1993; 72 (3): 210–220.
13. Remondino F., El-Hakim S. Image-based 3D modelling: A review. *Photogramm. Rec.* 2006; 21 (115): 269–291.
14. Leung G., Pickett A.T., Bartellas M., et al. Systematic review and meta-analysis of 3D printing in otolaryngology education. *Int. J. Pediatr. Otorhinolaryngol.* 2022; 155: 111083.
15. Quispe-Enriquez O.C., Valero-Lanzuela J.J., Lerma J.L. Craniofacial 3D Morphometric Analysis with Smartphone-Based Photogrammetry. *Sensors (Basel)*. 2023; 30; 24 (1): P–230.
16. Hsung T.-C., Lo J., Li T.-S., et al. Automatic detection and reproduction of natural head position in stereo-photogrammetry. *PLoS ONE*. 2015; 10 (6): e0130877.
17. Barbero-García I., Lerma J.L., Mora-Navarro G. Fully automatic smartphone-based photogrammetric 3D modelling of infant's heads for cranial deformation analysis. *ISPRS. J. Photogramm. Remote. Sens.* 2020; 166: 268–277.
18. Agisoft. [(accessed on 1 april 2025)]. URL: <https://www.agisoft.com>.
19. Mohren J., Schulze M. Automated cleaning of tie point clouds following USGS guidelines in Agisoft Metashape professional (ver. 2.1.0). *MethodsX*. 2024; 12: 102679.
20. Zhou Z., Li P., Ren J., et al. Virtual facial reconstruction based on accurate registration and fusion of 3D facial and MSCT scans. *J. Orofac. Orthop.* 2016; 77 (2): 104–111.



21. Xin P., Yu H., Cheng H., et al. Image fusion in craniofacial virtual reality modeling based on CT and 3dMD photogrammetry. *J. Craniofac. Surg.* 2013; 24 (5): 1573–1576.
22. Engert J., Bauer D., Spahn B., et al. Computed tomographic 3D analysis of the cochlear aqueduct – potential and limitations of clinical imaging. *Acta Otolaryngol.* 2023; 143 (11–12): 931–935.
23. Gadaleta D.J., Huang D., Rankin N., et al. 3D-printed temporal bone as a tool for otologic surgery simulation. *Am. J. Otolaryngol.* 2020; 41 (3): 102273.
24. Yang B., Schinke J., Rastegar A., et al. Cost-Effective Full-Color 3D Dental Imaging Based on Close-Range Photogrammetry. *Bioengineering.* (Basel). 2023; 10 (11): 1268.
25. Stuaní V.T., Ferreira R., Manfredi G.G.P., Cardoso M.V., Sant'Ana A.C.P. Photogrammetry as an alternative for acquiring digital dental models: A proof of concept. *Med. Hypotheses.* 2019; 128: 43–49.
26. Wat H., Kawa N.I., Anderson R.R., et al. Precise volumetric quantification using 3D stereophotogrammetry in procedural and surgical dermatology. *J. Am. Acad. Dermatol.* 2022; 87 (2): 73–75.
27. Pothier D.D. The Sadé and Tos staging systems: not adequately reliable methods of staging retraction of the tympanic membrane? *Clin. Otolaryngol.* 2009; 34 (5): 506–507.
28. Sade J. Correlation between middle ear aeration and mastoid pneumatization. *Eur. Arch. Otorhinolaryngol.* 1992; 249: 301–304.
29. Банашек-Мещерякова Т.В., Семенов Ф.В. Применение аллогенной твердой мозговой оболочки (брефоткань твердой мозговой оболочки) при хирургическом лечении ретракционных карманов барабанной перепонки. *Вестник оториноларингологии.* 2023; 88 (3): 4–7.
30. Комаров М.В., Аникин И.А., Дворянчиков В.В. Классификация патологической эпидермизации (холестеатомы) среднего уха НМАО. *Медицинский совет.* 2023; 17 (7): 102–111.
31. Da Silva T.W., Pereira G., Oliveira B.R.F. Assessing Geometric and Radiometric Accuracy of DJI P4 MS Imagery Processed with Agisoft Metashape for Shrubland Mapping. *Remote Sens.* 2024; 16 (24): 4633.
32. Lastilla L., Belloni V., Ravanelli R., et al. DSM Generation from Single and Cross-Sensor Multi-View Satellite Images Using the New Agisoft Metashape: The Case Studies of Trento and Matera (Italy). *Remote Sens.* 2021; 13 (4): 593.
33. Dascăl A., Popa M. Possibilities of 3D reconstruction of the vehicle collision scene in the photogrammetric environment Agisoft Metashape 1.6.2. *J. of Phys.: Conf. Series.* – IOP Publishing. 2021; 1781 (1): 012053.
34. Комаров М.В., Аникин И.А., Гончаров О.И. К вопросу о предоперационной подготовке пациентов с туботимпанальной формой хронического гнойного среднего отита. *Медицинский совет.* 2023; 17 (7): 132–137.

Capabilities of Three-Dimensional Reconstruction of the Tympanic Membrane Surface

M.V. Komarov^{1,2}, A.A. Fedotova²

¹ Saint-Petersburg Research Institute of Ear, Throat, Nose and Speech

² North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov

Contact person: Mikhail V. Komarov, 7_line@mail.ru

Purpose. The morphology of the eardrum plays an important role in the diagnosis and prognosis of middle ear pathologies, especially in chronic inflammatory changes and the formation of retraction pockets. Visual assessment of these changes is traditionally performed using otomicroscopy and endoscopy, however, these methods are characterized by subjectivity and do not allow obtaining objective quantitative parameters. In this paper, the possibility of using the photogrammetry method using the Agisoft Metashape software platform to build a three-dimensional model of the surface of the eardrum is considered.

Material and methods. The study was performed on a series of endoscopic images obtained from patients on an outpatient basis. The shooting was carried out through a rigid otoscope with a digital camera connected via an optical adapter. A series of 20–40 overlapping images made it possible to form high-precision 3D models using Structure-from-Motion algorithms, including photo alignment, point cloud construction, grid generation, and texture mapping.

Discussion. The obtained models demonstrated high geometric accuracy, which makes it possible to quantify the retraction: measuring the depth, area and volume of retraction. The method made it possible to build sagittal and frontal deformity profiles and use them in dynamics to assess the progression of pathology in the same patient. Repeated studies have confirmed the suitability of the method for objective control of changes over time.

Conclusion. Despite some limitations (glare, narrowness of the ear canal, areas of shadow), the technique has shown high reproducibility and applicability in outpatient practice. Photogrammetry can be used not only in the diagnosis and monitoring of chronic processes, but also in training, surgical intervention planning and telemedicine, opening up new horizons in otosurgery.

Keywords: otosurgery, photogrammetry, eardrum, 3D visualization, retraction pocket