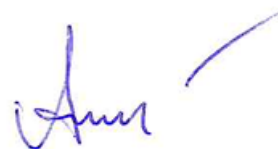


Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ
(МИИГАиК)**

На правах рукописи



Уколова Алина Владимировна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ СОЗДАНИЯ И СРАВНЕНИЯ
РАЗНОВРЕМЕННЫХ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ЛИЦА ЧЕЛОВЕКА,
ПОЛУЧЕННЫХ СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИМ СПОСОБОМ**

Специальность 1.6.19 – Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
кандидат технических наук, доцент
Скрыпицына Татьяна Николаевна

МОСКВА 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ	2
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ	
ДИАГНОСТИКИ АСИММЕТРИИ ЛИЦА.....	
13	13
1.1 Основные причины возникновения асимметрии лица человека.....	13
1.2 Способы контроля происходящих изменений рельефов лица и оценки их динамики	16
Вывод по главе 1	20
ГЛАВА 2. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ СОЗДАНИЯ	
ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ЛИЦА ЧЕЛОВЕКА	
22	22
2.1 Создание цифровой модели лица на основе одной фотографии	22
2.2 Создание цифровой модели лица методом сканирования структурированным светом (оптическое сканирование).....	25
2.3 Создание цифровой модели лица стереофотограмметрическим методом	30
Вывод по главе 2	36
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ	
СИСТЕМЫ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОЙ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ	
ИЗМЕНЕНИЯ РЕЛЬЕФА ЛИЦА ЧЕЛОВЕКА	
38	38
3.1 Конструкция и особенности фотоустановки, предназначенной для съемки лица	40
3.2 Алгоритм фотограмметрической обработки снимков для создания цифровой модели лица	53
3.3 Разработка алгоритма приведения всех моделей лица в единую систему координат	57
3.3.1 Существующие алгоритмы приведения моделей к единой системе координат	57
3.3.2 Алгоритм ориентирования моделей лица в единую систему первой модели при недостаточном количестве устойчивых ориентиров.....	61

3.4 Методология и результаты оценки точности физиологической нестатичности лица	63
3.5 Методы оценки асимметрии лица на основе инструментов геопространственного анализа	68
3.6 Метод сравнений рельефов по полигональным моделям путем измерения расстояний вдоль нормалей, который учитывает общую сферичность лицевой части головы	76
Вывод по главе 3	85
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	86
ОПРЕДЕЛЕНИЯ	89
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	90
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ СПОСОБОВ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЙ ЛИЦА В МЕДИЦИНЕ	104
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА СИНХРОНИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ФОТОГРАФИРОВАНИЯ	105
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. СКРИПТ (СЦЕНАРИЙ) – РАСПОЗНАЕТ ПОДКЛЮЧЕННЫЕ УСТРОЙСТВА, ОПРЕДЕЛЯЕТ КАМЕРЫ, СКАНИРУЕТ ДИРЕКТОРИИ С ИЗОБРАЖЕНИЯМИ И АВТОМАТОМ ПРОИЗВОДИТ КОПИРОВАНИЕ И СОРТИРОВКУ	106
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. БЛОК СХЕМА СОРТИРОВКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПО ДИРЕКТОРИЯМ	107
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. КАТАЛОГ КООРДИНАТ 12–БИТНЫХ КОДИРОВАННЫХ МАРОК	108
ПРИЛОЖЕНИЕ 6. КАТАЛОГ ЭЛЕМЕНТОВ ВНЕШНЕГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ КАМЕР УСТАНОВКИ	109
ПРИЛОЖЕНИЕ 7. ТАБЛИЦА КОНТРОЛЬНЫХ ПРОМЕРОВ	110
ПРИЛОЖЕНИЕ 8. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ОЦЕНКЕ ТОЧНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ И ПОВТОРЯЕМОСТИ МОДЕЛЕЙ ЛИЦА	112

ПРИЛОЖЕНИЕ 9. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА СОЗДАНИЯ И СРАВНЕНИЯ РАЗНОВРЕМЕННЫХ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ЛИЦА ЧЕЛОВЕКА, ПОЛУЧЕННЫХ СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИМ СПОСОБОМ	116
---	-----

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность диссертационной работы. В настоящее время моделирование рельефа поверхности лица человека является нетипичной, но востребованной задачей в медицине, решение которой находит широкое применение в хирургии, неврологии, стоматологии и других научно-практических медицинских направлениях.

Структурные изменения лица человека могут появляться в результате различных заболеваний, хирургического вмешательства, косметологических и пластических процедур. В подавляющем большинстве случаев даже небольшие изменения в области лица ощутимо ухудшают качество жизни человека: нарушается симметрия лица, подвижность его областей, становятся менее эффективными функции моргания, жевания, кроме того, появляется значительный дискомфорт из-за эстетической составляющей.

В ходе лечения и коррекции нарушений в области лица необходим постоянный контроль происходящих изменений и оценка их динамики, в связи с чем, в медицинской практике применяются различные способы оценки асимметрии лица для анализа изменений рельефа поверхности.

Самыми распространенными способами оценки изменений лица являются:

- визуальный осмотр при выполнении мимических проб, проводимый медицинским специалистом очно (осмотр пациента) и заочно (просмотр фото);
- математический анализ изменений на основе фотоизображений [4].

Методы, включающие визуальную оценку, носят субъективный характер, зависят от опыта врача и не дают объективной числовой и количественной оценки. Методики, основанные на принципах измерения по фотографии, являются более точными по сравнению с визуальным анализом, однако не позволяют учесть всех особенностей микрорельефа лица человека и не всегда позволяют провести оценку изменения объемов.

Учитывая особенности структуры лица человека, такие как значительное количество мимических мышц, различная природа их сокращения, локальные

изменения (отечность и т.д.), основными требованиями к методам создания трехмерных моделей лица и алгоритмам их интерпретации для медицинских целей являются:

- обеспечение постоянства выражения и состояния лица;
- повторяемость результата;
- учет нестатичности.

Учитывая имеющийся на сегодняшний день опыт в области построения моделей поверхностей и их численного описания, целесообразным является применение морфометрических подходов при моделировании лица и проведении вычислений. Вместе с тем, в целях подробного описания особенностей изменений рельефа лица необходимо модифицировать методы оценки рельефа, принятые в науках о Земле, основанные на использовании анализа разновременных поверхностей, в том числе на базе опыта геоморфометрии [64,66,95,108]. В существующих подходах анализа изменений рельефа лица такая система не используется, что делает актуальной задачу разработки и апробации соответствующих методов. Предложенные результаты исследований будут востребованы для постоянного мониторинга изменений асимметрии лица и подвижности лицевых мышц с фиксацией промежуточных результатов в ходе лечения острых и хронических заболеваний, а также для целей доказательной медицины.

Степень разработанности темы исследования. В развитие наземной стереофотограмметрической съемки для построения трехмерных моделей объектов значительный вклад внесли российские ученые: Михайлов А.П., Чибуничев А.Г., Журкин И.Г., Скрыпицына Т.Н., Курков В.М., Дрыга Д.О. Работы в данной области направлены на оптимизацию применяемого математического аппарата, повышение точности выходного результата, а также обеспечение устойчивости методов к внешним воздействиям и шумам. Кроме того, их исследования сосредоточены на совершенствовании многокамерных систем, которые обеспечивают синхронное и единомоментное получение изображений с разных ракурсов. Это особенно важно для

создания высокоточных 3D-моделей динамических объектов, где любые задержки могут приводить к искажениям из-за движения объекта.

В области медицины исследования активно ведутся такими специалистами, как Князь В.А., Ряховский А.Н., Левицкий В.В., Манак Т.Н., Гагарина М.И., Небаба С.Г., Захарова А.А., а также зарубежными учеными Choi J.W., Lee J.Y., Oh T.S., Sforza C., Dellavia C., Rosati R. Их работы направлены на применение трехмерных моделей для диагностики, планирования лечения и мониторинга результатов в медицине. Эти исследования позволяют внедрять 3D-технологии в практическую медицину, обеспечивая высокую точность и наглядность при работе с пациентами. В частности, такие технологии находят применение в пластической хирургии, ортодонтии, челюстно-лицевой хирургии и реабилитационной терапии.

Для создания трехмерных моделей лиц широко применяются многокамерные системы, такие как 3DMD. Эти устройства позволяют получать изображения объекта синхронно (что особенно важно для подвижных объектов, таких как лица людей), предотвращая искажения, вызванные движением. Однако их использование зачастую ограничено высокой стоимостью оборудования. Также применяются технологии на основе метода муаровых полос (например, КОМОТ (Россия), Diers (Германия)), которые обеспечивают высокую точность при работе с неподвижными объектами, и оптические дальномеры (Kinect, Structure Sensor Developer Occipital Raises, ArtecEva Lite). Последние, хотя и обладают высокой точностью, менее эффективны для динамических объектов из-за ограничений в скорости и синхронности съемки.

Исследования в области стереофотограмметрии направлены как на совершенствование технической базы для повышения точности и детализации моделей, так и на расширение сфер их применения, в том числе в медицинской практике.

Целью диссертационной работы является разработка и апробация методов и алгоритмов создания и сравнения разновременных цифровых моделей лица человека, полученных стереофотограмметрическим способом.

Для достижения поставленной цели необходимо решение **следующих задач**:

1. Разработка методов фотограмметрической съемки с целью получения разновременных моделей лица.
2. Разработка алгоритмов ориентирования разновременных динамических объектов.
3. Разработка способов оценки асимметрии лица по его трехмерным поверхностям.
4. Разработка многокамерной съемочной системы, позволяющей получать трехмерную модель лица.
5. Оценка точности полученных моделей.
6. Апробация предложенного метода в профильном медицинском учреждении.

Объектом исследования являются методы создания и сравнения разновременных цифровых моделей лица человека.

Предмет исследования – трехмерные разновременные модели человеческого лица.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Впервые для определения и оценки динамики рельефов лица предложен новый метод доказательной медицины, имеющий более высокую точность, информативность и достоверность, чем применяемые в медицинской практике другие методы оценки эффективности лечения. А именно позволяющий:

- фиксировать асимметрию лицевых мышц с использованием различных способов визуализации рельефа;
- выполнять количественную оценку динамики мышц лица в разных его областях, путем сравнения моделей мимических проб с исходной моделью;
- выполнять сравнение рельефов по полигональным моделям путем измерения расстояний вдоль нормалей, учитывающего общую сферичность лицевой части головы.

2. Усовершенствован алгоритм ориентирования разновременных моделей объектов. Он позволяет приводить все модели лица к системе координат первой модели, даже при недостаточном количестве устойчивых опорных ориентиров. Это обеспечивает достоверную оценку изменений лица по разновременным моделям.

Теоретическая значимость диссертационных исследований заключается в совершенствовании методов стереофотограмметрической съемки и алгоритмов анализа цифровых моделей рельефа для прикладных задач, а конкретно для моделирования и оценки рельефов лица человека.

Практическая значимость работы:

1. Предлагаемый метод получения трехмерной модели лица, реализованный с помощью многокамерной фотоустановки, обеспечивает необходимые показатели точности и детализации.

2. Разработан алгоритм ориентирования моделей лица в единую систему первой модели при недостаточном количестве устойчивых ориентиров, позволяющий ориентировать модели, полученные в разные периоды.

3. Опытный образец многокамерной фотоустановки и разработанные методы оценки используются в процессе разработки новых методов лечения на кафедре кожных болезней и косметологии ФГАОУ ВО «РНИМУ им. Н.И. Пирогова» и на кафедре нервных болезней ИПО ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. Сеченова».

Методология и методы исследования. При выполнении исследований использованы базовые методы наземной стереофотограмметрической съемки, 3D-моделирования, системного анализа, математической статистики и экспериментальные подходы.

Эмпирическую базу составили данные, полученные с помощью специализированного аппаратного комплекса, включающего 15-камерную синхронизированную установку. Для верификации точности применялся эталонный гипсовый бюст с 52 контрольными маркерами.

Программная обработка данных осуществлялась в Agisoft Metashape Pro (версия 2.1.2). Сравнение разновременных моделей проводилось в Geomagic Control X (v.2023).

Фотограмметрическая обработка реализована поэтапно: построение разреженного облака точек с использованием алгоритмов SIFT/SURF/ORB, генерация плотного облака методом Semi-Global Matching и триангуляция поверхности по методу Пуассона. Для анализа асимметрии применялся метод сравнения объемов, включающий разделение модели на правую и левую половины и расчёт объёмов через тесселяцию Делоне. Морфометрический анализ предполагал расчёт средней кривизны поверхности с визуализацией результатов в QGIS через изолинии с шагом 0.1 мм.

Сравнение разновременных моделей выполнялось с использованием алгоритма ICP (Iterative Closest Point). Статистическая обработка включала расчёт коэффициента вариации и составила для фотограмметрических моделей. Автоматизация процессов обеспечивалась Python-скриптами для сортировки изображений и обработки данных с применением библиотек numpy, scipy, open3d.

Апробация на 3 пациентах с параличом Белла подтвердила работоспособность метода.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методы для определения и оценки динамики рельефа лица на основе трехмерных моделей, включающие:

- анализ перераспределения мягких тканей, с использованием визуализации информации о рельефе лица с помощью изолиний и послойной окраски;

- количественную оценку динамики мышц лица в разных его областях, путем сравнения моделей мимических проб с исходной моделью;

- метод сравнений рельефов по полигональным моделям путем измерения расстояний вдоль нормалей, который учитывает общую кривизну человеческого лица.

2. Алгоритм ориентирования моделей лица в единую систему первой модели при недостаточном количестве устойчивых ориентиров, позволяющий ориентировать модели, полученные в разные периоды.

Тема диссертации соответствует пунктам паспорта научной специальности 1.6.19. Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия (технические науки): п. 9. Теория и методы получения изображений. Разработка и исследование технических средств и технологий, фиксирующих в виде изображений различные элементы объектов исследований. Методы повышения качества аэрокосмических изображений и п. 13. Теория, методы и технологии создания трехмерных моделей объектов земной поверхности, инженерных и других объектов на основе различных видов съемки (оптическая, радиолокационная, лазерно-локационная и др.).

Степень достоверности полученных в диссертационной работе результатов основана на большом объеме экспериментальных работ с использованием разработанной многокамерной фотоустановки в медицинском учреждении профильного типа.

Основные положения работы и полученные результаты докладывались и обсуждались на международных научных конференциях:

– 19–ой Междисциплинарной Конференции с международным участием «Вейновские Чтения» г. Москва, 08 – 10 февраля 2023 г.

– International Workshop «Photogrammetric and computer vision techniques for environmental and infraStructure monitoring, Biometrics and Biomedicine» – PSBB23, г. Москва, 24–26 апрель 2023.

– XVII Всероссийской конференции «Геоинформационные технологии и космический мониторинг» г.Новороссийск, п.Абрау-Дюрсо 9-13 сентября 2024 г.

– International Workshop «Photogrammetric Data Analysis» – PDA24, г. Москва, 07-09 октября 2024 г.

Результаты диссертационных исследований внедрены в медицинскую практику в ООО «Клиника Данищука» (Лицензия №ЛО-77-01-018160 от 3 Июня 2019) и в ООО «Центр Междисциплинарной Стоматологии и Неврологии».

Публикации по теме диссертации. По результатам диссертационного исследования опубликованы четыре научные статьи, из них одна — в рецензируемом журнале, рекомендованном ВАК России, и две — в изданиях, индексируемых в Scopus.

Объём и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы и приложений. Работа содержит 7 таблицы и 29 рисунков. Объем диссертации 116 страниц. Библиография включает 108 наименований.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ ДИАГНОСТИКИ АСИММЕТРИИ ЛИЦА

В данной главе рассматривается современное состояние диагностики асимметрии лица, включая её причины, механизмы возникновения и методы диагностики. Проведен обзор и анализ распространённых способов контроля изменений рельефа лица и оценки их динамики.

1.1 Основные причины возникновения асимметрии лица человека

Лицо человека обладает сложной анатомической структурой, в которой сосредоточено более 40 мимических мышц, обеспечивающих выразительность и подвижность. Эти мышцы, управляемые сложно организованной нервной системой, играют ключевую роль в синхронизации выражений и эмоций. Возникновение мимической асимметрии, к примеру, может привести к несинхронной работе мышц одной стороны лица, что, в свою очередь, вызывает не только эстетические, но и функциональные проблемы, такие как трудности с речью и глотанием (Рисунок 1).

Мимическая асимметрия — это явление, при котором мимические мышцы одной стороны лица функционируют несинхронно или менее интенсивно по сравнению с мышцами другой стороны.

Асимметрия может быть врожденной или приобретенной. Врожденная асимметрия лица может быть вызвана генетическими факторами или особенностями внутриутробного развития. Она проявляется в неравномерности формы или размера различных частей лица, таких как глаза, нос, рот, подбородок и уши.

Приобретенная асимметрия может возникать вследствие травм, хирургических вмешательств, заболеваний (например, паралича Белла, инсульта, неудачных пластических операций) и возрастных изменений [9].

МИМИЧЕСКИЕ МЫШЦЫ ЛИЦА И ШЕИ

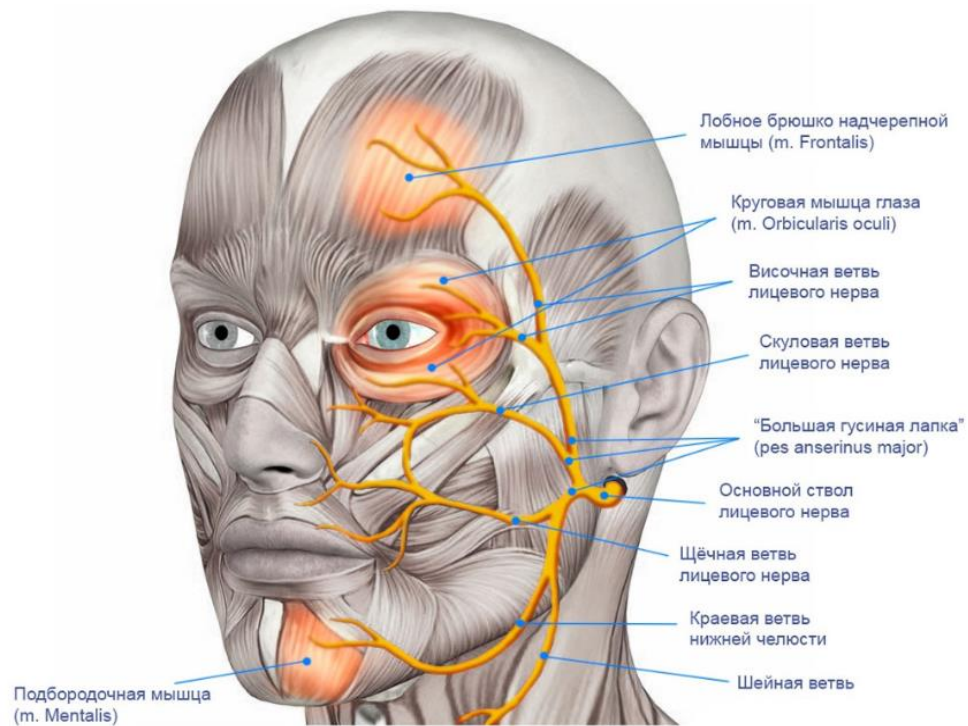
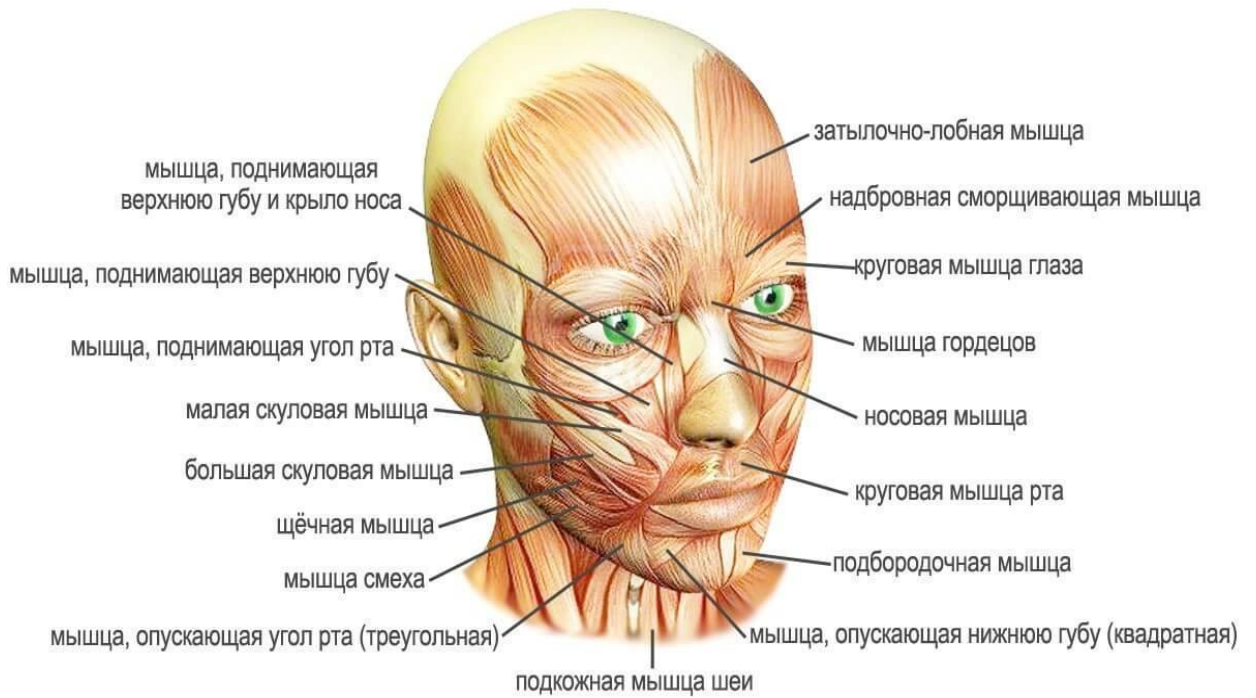


Рисунок 1 – Анатомия человеческого лица: мимические мышцы человека (сверху), топография ветвей лицевого нерва (снизу) ¹

¹<http://edan-moscow.ru/index.php/articles-menu/16-mimicheskie-myshtsy-litsa-3d-anatomiya-cheloveka>

Во многих случаях асимметрия лица связана с нарушениями функции лицевого нерва [35]. Лицевой нерв отвечает за движение мышц лица, и его повреждение может привести к параличу или ослаблению мышц. В зависимости от степени повреждения лицевого нерва выделяют шесть стадий поражения:

I стадия: лицевой нерв сохраняет свою функциональность.

II стадия: нарушение функции лицевого нерва минимальное, проявляется в виде легкой асимметрии при улыбке и затруднений при закрывании глаз.

III стадия: нарушение функции лицевого нерва умеренное, проявляется в виде более выраженной асимметрии при улыбке, затруднений при закрывании глаз и нарушения движения бровей.

IV стадия: нарушение функции лицевого нерва выраженное, проявляется в виде значительной асимметрии при улыбке, невозможности полностью закрыть глаза и нарушения движения бровей.

V стадия: нарушение функции лицевого нерва тяжелое, проявляется в виде полного паралича мышц лица на одной стороне.

VI стадия: нарушение функции лицевого нерва крайнее, проявляется в виде полного паралича мышц лица на одной стороне и нарушения движения мышц шеи.

Асимметрия лица может проявляться в трех формах: статической, динамической и смешанной.

Статическая асимметрия видна в состоянии покоя и может быть вызвана неравномерностью костей, мышц или жировой ткани. Врожденная статическая асимметрия чаще всего связана с генетическими заболеваниями, такими как синдромы Дауна или Патау. Приобретенная асимметрия наблюдается у пациентов с нарушениями ортогнатического профиля, после перенесенных заболеваний, таких как онкологические, а также в результате хирургических вмешательств, например, после операции по коррекции челюсти.

Динамическая асимметрия проявляется при движении мышц лица (например, при улыбке или мигании) и обусловлена систематическими заболеваниями, травмами

или хирургическими вмешательствами. Мимические пробы позволяют выявить такие состояния с высокой достоверностью. Например, при выполнении мимических проб можно оценить степень асимметрии и её влияние на функциональные возможности пациента.

Смешанная асимметрия сочетает в себе обе вышеописанные формы.

Патологическая асимметрия не только ухудшает качество жизни из-за визуального несовершенства и локальных проблем с функционированием лица, но и приводит к нарушению здоровья в целом. Например, у людей с выраженной асимметрией могут возникать проблемы с жеванием, что, в свою очередь, может привести к заболеваниям зубов и десен, а также изменениям в суставных и костных системах.

Для диагностики асимметрии лица используются различные методы, включая физикальное обследование, фотографии, рентгеновские снимки и компьютерную томографию. Лечение зависит от причины и степени тяжести асимметрии и может включать хирургическое вмешательство, ортодонтическое лечение, инъекции ботулотоксина или филлеров, физиотерапию и другие методы.

Учитывая высокую подвижность лицевых мышц и их участие в важных физиологических процессах, а также проявления асимметрии как в статике, так и в динамике, актуальным становится поиск методов для точной и своевременной диагностики и последующего лечения асимметрии лица, включая возможность промежуточной фиксации результатов лечения и оценки динамики изменений.

1.2 Способы контроля происходящих изменений рельефов лица и оценки их динамики

В настоящее время всё больше исследований посвящено изучению человеческого лица как сложной динамической системы [99,102]. Изменения, вызванные заболеваниями, хирургическими вмешательствами и косметологическими

процедурами, требуют длительного поэтапного восстановления, что обуславливает необходимость контроля эффективности лечения и оценки происходящих изменений [12–15,27,57,65].

Для диагностики мимической асимметрии применяются различные методы [8,25], позволяющие выявить билатеральную, статическую и динамическую асимметрию, а также определить функциональные особенности мимических мышц и объемы мягких тканей.

Одним из таких методов является анализ видеозаписи мимики лица [7,28, 48,72]. Пациент выполняет различные мимические движения, такие как, например, улыбка или поднятие бровей, после чего видеозапись анализируется специалистом. Этот метод позволяет выявить асимметрию в движениях мышц и определить её степень и характер [74]. Важно отметить, что данный подход требует высокой квалификации специалиста, так как субъективная оценка может влиять на результаты.

Другим методом является электромиография (ЭМГ), измеряющая электрическую активность мимических мышц. ЭМГ позволяет определить степень асимметрии в работе мышц и выявить нарушения их функционирования. Этот метод также может быть использован для мониторинга изменений в состоянии мышц после лечения.

Оба вышеописанных метода служат инструментами обнаружения изменений, но не дают количественной оценки: получаемые результаты требуют непосредственного анализа силами специалистов и при этом не содержат прямых численных значений, описывающих асимметрию, что снижает объективность и точность составляемого описания.

В Российской Федерации используются следующие основные подходы к оценке асимметрии:

- описательный (балльный) метод оценки симметрии лица в покое и при движениях (шкала House-Brackmann Grading System [73]) и шкала Янгихара [85]),

- количественные методы, основанные на визуальном осмотре лица пациента в статическом состоянии при выполнении мимических проб [54,62],
- антропометрический метод, который опирается на метрическую основу асимметрии, получаемую путём наложения сетки [74].

Первый из приведенных методов достаточно субъективен и зависит от квалификации врача, тогда как второй имеет низкую повторяемость результатов и относительную точность. Для повышения объективности и надежности диагностики необходимо интегрировать в подобные методы современные технологии.

В рамках антропометрического метода одним из наиболее распространённых является способ, описанный в работе [49]. Он заключается в наложении сетки с ячейкой 1x1 см на лицо пациента. По сетке рассчитывается среднее отклонение анатомических ориентиров, что позволяет определить право-левостороннюю асимметрию. Однако этот метод также имеет свои недостатки, включая неудобство для пациентов, которые должны долго сохранять неподвижность.

Современные технологии позволяют не только визуально оценивать состояние пациента, но и осуществлять трёхмерное моделирование поверхностей лица, выполнять расчётные задачи и наглядно визуализировать результаты [62,66]. Это минимизирует субъективность в оценке изменений и позволяет выразить их в числовом формате.

Так, создание цифровой модели поверхности лица позволяет выявить асимметрию в рельефе, а также определить объемы исходных и изменяющихся мягких тканей, что является ощутимым шагом к объективной интерпретации результатов, в том числе – получаемых в динамике [9,26]. Трёхмерные модели могут быть использованы для более точной оценки изменений как до, так и после лечения, что делает их незаменимыми на практике.

Трёхмерные модели в том числе могут быть использованы для создания индивидуальных планов лечения и мониторинга изменений с течением времени.

Обычно оценка изменений осуществляется путём фотофиксации мимических проб пациентов (Рисунок 2) с оценкой положения маркированных точек на лице [21,66,97,100,107]. Однако этот способ не предоставляет метрической оценки ряда параметров лицевой структуры, особенно связанных с динамической асимметрией.

Различные исследователи предложили подходы к построению трёхмерных поверхностей лица и анализу асимметрии [16,18–20]. В работе [105] представлен метод распознавания выражений лица в 3D, основанный на использовании карты нормалей, которая описывает геометрические атрибуты поверхности. Этот подход позволяет учитывать детали рельефа лица, что существенно улучшает качество распознавания выражений и, в частности, выявление асимметрии.

В [86] предложен 3D-дескриптор для анализа выражений лица, известный как многомасштабные локальные нормальные паттерны (Multi-Scale Local NormalPatterns). Этот дескриптор обеспечивает высокую степень детализации и позволяет выделять характерные особенности выражений на различных масштабах, что может быть полезно для более точного анализа асимметрии.



Рисунок 2 – Стандартные мимические пробы

Работа [100] описывает автоматическое 3D/4D распознавание выражений лица, основанное на модели мышечного движения. Данный подход учитывает динамику изменений выражений, что делает его особенно актуальным для приложений, связанных с анализом эмоциональных состояний. Важно отметить, что динамика выражений также может вносить вклад в оценку асимметрии, поскольку различные мышцы могут активироваться по-разному, создавая асимметричные эффекты.

Среди множества подходов к анализу трёхмерных поверхностей лиц только Desrosiers [66] рассматривает количественную оценку двусторонней лицевой асимметрии в продолжительном временном интервале. Однако в указанных исследованиях трёхмерные поверхности лиц получены методом оптического сканирования, что является существенным недостатком, так как для получения полной и показательной модели требуется длительное время. В неврологии важно минимизировать задействование пациента в процессе измерений, поскольку длительное участие может вызвать дискомфорт (неконтролируемые движения лицевых мышц, нервные тики и т.д.).

Вывод по главе 1

1. Асимметрия лица является многогранной проблемой, затрагивающей как эстетические, так и функциональные аспекты жизни человека. Важно учитывать анатомические особенности лица (врожденные или приобретенные), которые сопровождают и/или способствуют развитию патологий [37,38].

2. Существующие методы диагностики асимметрии, такие как видеоанализ, электромиография и антропометрия, имеют свои достоинства и недостатки. Однако они не всегда обеспечивают необходимую точность и объективность.

3. Трёхмерные модели позволяют избежать субъективности, присущей традиционным методам оценки. Они обеспечивают точные количественные данные о размерах лицевых структур.

4. Существующие методы оценки асимметрии по трехмерным моделям не учитывают принципиальную нестатичность лицевых мышц, поэтому при пролонгированных исследованиях показывают неверные результаты.

5. На современном этапе в Российской Федерации не разработаны и не внедрены в медицинскую практику способы визуализации трехмерных цифровых моделей лица, которые бы позволяли наглядно выявлять и оценивать изменения рельефа.

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ЛИЦА ЧЕЛОВЕКА

Для создания цифровых моделей лица человека разработаны и активно применяются на практике различные методы и алгоритмы. Современные подходы основываются на достижениях в области компьютерного зрения, машинного обучения, нейронных сетей, а также использовании различных источников данных, таких как фотографии, видео и результаты 3D-сканирования. Эти технологии находят применение в биометрии, медицине, анимации, виртуальной реальности и других областях.

В данной главе представлен анализ ключевых методов и алгоритмов, применяемых для построения трехмерных моделей лица, с акцентом на их особенности, преимущества и ограничения.

2.1 Создание цифровой модели лица на основе одной фотографии

Создание цифровой модели лица человека на основе одной фотографии представляет собой одну из наиболее сложных и актуальных задач в области компьютерного зрения. Этот подход, называемый монокулярной реконструкцией, позволяет восстанавливать трехмерную геометрию лица, имея в распоряжении лишь двумерное изображение. Данный метод активно используется в таких областях, как биометрия, анимация, виртуальная реальность, медицина и судебная экспертиза [51,53,56,79,83]. Его популярность объясняется значительными достижениями в области машинного обучения и нейронных сетей, которые позволили автоматизировать процесс реконструкции и повысить его точность. Однако, несмотря на это, монокулярная реконструкция имеет ряд существенных ограничений, которые снижают её применимость в задачах, требующих высокой точности, таких как диагностика и лечение асимметрии лица. Принцип работы монокулярной

реконструкции заключается в следующем: фотография лица обрабатывается с использованием алгоритмов глубокого обучения для извлечения ключевых точек, таких как глаза, нос, рот и внешние контуры (Рисунок 3) [87,88,91]. На первом этапе выполняется детекция лица с помощью современных алгоритмов, например, MTCNN (Multi-task Cascaded Convolutional Networks) или Dlib, которые обеспечивают высокую точность даже при наличии искажений, вызванных поворотом головы или недостаточным освещением. Затем происходит выделение ключевых анатомических точек, таких как уголки глаз, губ и носа. Эти точки используются для создания базовой трёхмерной модели лица.

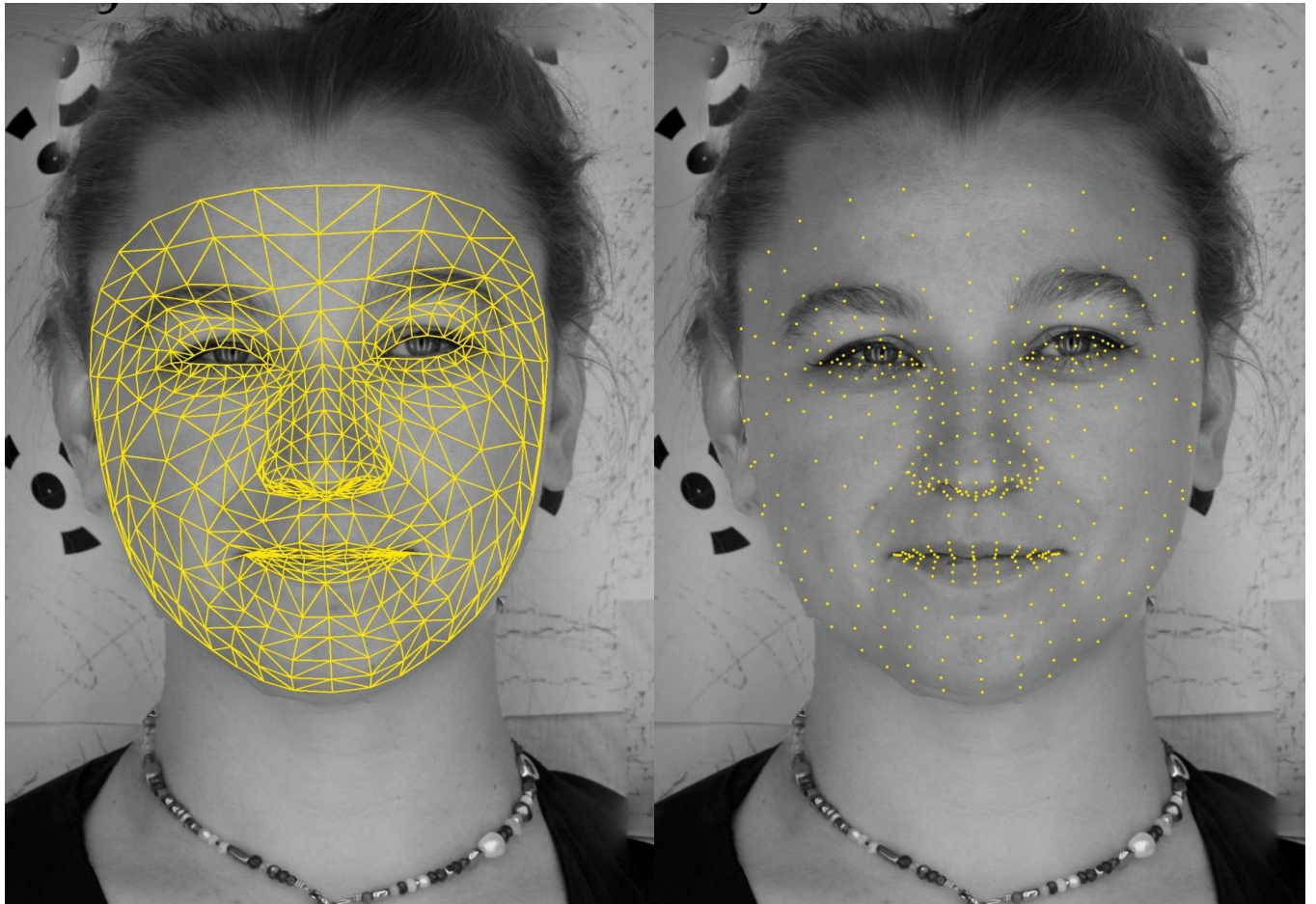


Рисунок 3 – Создание трехмерной модели лица по ключевым точкам

Для создания модели часто применяется концепция трёхмерных морфируемых моделей (3D MorphableModels, 3DMM), представляющих собой параметрическое описание формы и текстуры лица на основе статистического анализа большого числа

трёхмерных сканов. На следующем этапе выполняется оптимизация параметров модели для минимизации расхождений между проекцией трёхмерной модели и исходным изображением. Этот процесс реализуется с использованием методов оптимизации, таких как градиентный спуск.

После этого применяется текстурирование модели: на поверхность трёхмерной модели накладываются текстуры, извлечённые из исходного изображения, с использованием алгоритмов текстурирования и UV-маппинга. Для повышения качества и детализации текстур могут использоваться генеративные состязательные сети (GANs). Завершающим этапом является оптимизация модели и финальная визуализация, что позволяет достичь высокой степени реализма. Применение методов морфинга и деформации сетки позволяет адаптировать базовую геометрию к уникальным особенностям лица. Для оценки качества и реалистичности созданной модели проводится валидация с использованием сравнительного анализа с оригинальной фотографией и другими методами оценки качества [4,5].

Монокулярная реконструкция обладает рядом преимуществ, которые делают её привлекательной для определённых задач. Во-первых, для выполнения реконструкции требуется лишь одно изображение, что существенно упрощает процесс по сравнению с методами, требующими сложного оборудования (например, 3D-сканеров) [6,7]. Во-вторых, благодаря использованию нейронных сетей и алгоритмов глубокого обучения, процесс реконструкции может быть полностью автоматизирован. В-третьих, метод может быть использован для создания моделей лица на основе архивных или старых фотографий, где другие технологии недоступны.

Однако, несмотря на свои преимущества, монокулярная реконструкция имеет существенные ограничения. Во-первых, метод использует только одну проекцию объекта, что приводит к искажениям в геометрии модели, особенно в областях, скрытых от камеры, таких как боковые части лица. Во-вторых, точность реконструкции существенно зависит от качества изображения. Низкое разрешение, плохое освещение или наличие визуальных артефактов могут существенно снизить

точность модели. В-третьих, метод не способен воспроизводить мелкие анатомические особенности, такие как текстура кожи, морщины или поры, что делает его неприменимым для задач медицинской диагностики. Наконец, метод демонстрирует неустойчивость к значительным вариациям позы и выражения лица. Хотя современные алгоритмы способны учитывать некоторые отклонения, например, небольшой поворот головы, значительные изменения угла съёмки или мимики могут приводить к существенным ошибкам реконструкции.

Таким образом, монокулярная реконструкция представляет собой перспективный метод для создания трёхмерных моделей лица в условиях ограниченных ресурсов. Она находит применение в биометрии, анимации и виртуальной реальности. Однако её ограничения, связанные с отсутствием данных о глубине, низкой точностью и зависимостью от качества изображения, снижают её применимость для задач, требующих высокой детализации. В частности, метод не подходит для диагностики и лечения асимметрии лица, где ключевыми факторами являются высокая точность и воспроизводимость результатов. В таких случаях предпочтение следует отдавать более точным технологиям, таким как стереофотограмметрия или оптическое сканирование.

2.2 Создание цифровой модели лица методом сканирования структурированным светом (оптическое сканирование)

Метод получения трёхмерной модели с использованием структурированного света основывается на расчёте продольных параллаксов по искажениям линий проецирования [97]. Этот подход зарекомендовал себя как один из наиболее точных и эффективных для задач трёхмерной реконструкции, особенно в приложениях, требующих высокой детализации, таких как биометрия, медицинская диагностика, визуализация и анимация. Основной принцип метода заключается в использовании геометрических и оптических свойств света для анализа поверхности объекта, что

позволяет воспроизводить его трёхмерную структуру с высокой точностью. На рисунке 4 показан процесс получения 3D-модели головы с использованием структурированных световых проекций.

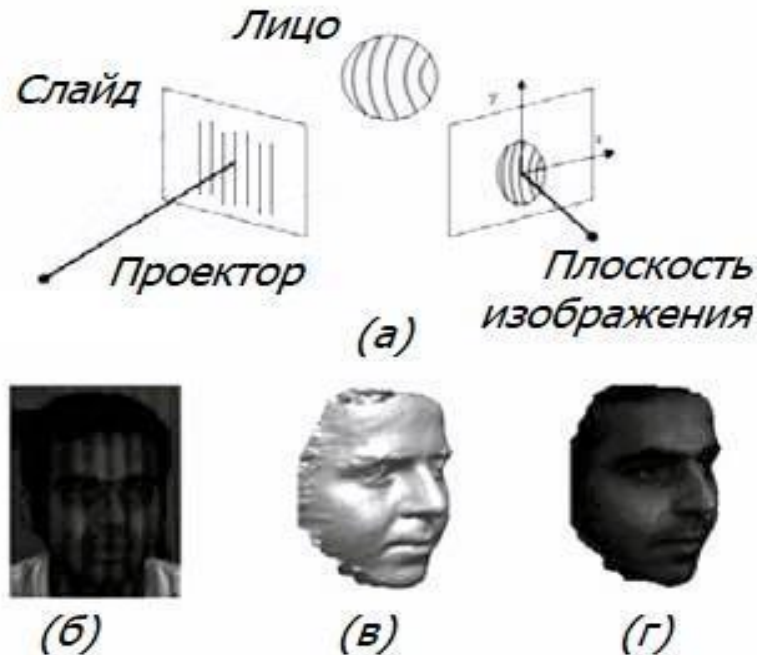


Рисунок 4 – Процесс получения трехмерной модели головы методом структурированной световой проекции: (а) – простая конструкция структурированного светового проектора, (б) – структурированный свет, проецируемый на лицо, (в) – затененное трехмерное лицо и (г) – текстурированная трехмерная модель лица²

Процесс начинается с проекции светового рисунка на поверхность объекта. Для этого используется проектор, создающий контрастные паттерны, такие как полосы, точки или сетки. Эти паттерны, попадая на неровную поверхность, искажаются, а отражённый свет фиксируется одной или несколькими оптическими камерами. На этом этапе важно учитывать разрешение и чувствительность камер, так как от них зависит способность системы улавливать мельчайшие деформации проецируемого рисунка. Метод структурированного света реализован в ряде современных мобильных

²<https://eduherald.ru/ru/article/view?id=17296>

оптических сканеров, таких как ArtecEva Lite, StructureSensor Developer OccipitalRaisesa и Kinect (Рисунок 5). Эти устройства сочетают в себе компактность, высокую точность и удобство использования, что делает их популярными в различных областях применения.



Рисунок 5 – Процесс оптического сканирования лица³

После получения изображений происходит их обработка для удаления шумов, вызванных внешними факторами, такими как освещение, отражения или дефекты оборудования. Для этого применяются различные фильтры, включая гауссов фильтр, медианный фильтр и адаптивные алгоритмы подавления шумов. Эти методы обеспечивают повышение качества данных, что особенно важно для последующих этапов анализа. Одновременно с этим выполняется сегментация изображений, направленная на выделение ключевых областей объекта, таких как контуры глаз, носа или рта в случае реконструкции лица.

³<https://cvetmir3d.ru/blog/primenenie/primenenie-3d-skamera-v-meditsinskoj-praktike-ot-skanirovaniya-zubov-do-modelirovaniya-protezoj/>

Ключевым этапом является вычисление глубины каждой точки поверхности. Этот процесс основан на стерео-триангуляции, где разность параллаксов между соответствующими точками на изображениях используется для определения расстояния до объекта. Геометрическая модель метода описывается формулой:

$$Z = \frac{f \cdot B}{p} \quad (1)$$

где:

Z – глубина (расстояние до объекта),

f – фокусное расстояние камер,

B – базовое расстояние между двумя камерами (базис),

p – разность поперечных параллаксов (разница в положении соответствующих точек на левом и правом изображениях).

Эта формула лежит в основе большинства современных систем стереовидения и позволяет точно рассчитывать пространственные координаты каждой точки объекта. Однако точность метода зависит от ряда факторов, включая стабильность проекционного рисунка, разрешение камеры и качество оптических компонентов.

На следующем этапе создаётся облако точек, представляющее трёхмерную структуру объекта. Это облако формируется на основе анализа изображений и данных глубины, полученных на предыдущих этапах. Для преобразования облака точек в непрерывную поверхность используются алгоритмы, такие как Poisson-реконструкция или MarchingCubes. Эти методы позволяют формировать замкнутую сетку, которая описывает форму объекта с сохранением всех его геометрических особенностей. На практике выбор алгоритма зависит от требований к точности и скорости обработки данных. Например, Poisson-реконструкция обеспечивает более гладкие поверхности, что важно для визуализации, тогда как MarchingCubes используется для задач, требующих высокой детализации.

После формирования поверхности модели выполняется её сглаживание и текстурирование. Сглаживание направлено на устранение возможных артефактов или

искажений, возникших в процессе сканирования [29,30]. Для этого применяются алгоритмы, такие как лапласово сглаживание или бикубическая интерполяция. Текстурирование, в свою очередь, позволяет накладывать на модель визуальную информацию, полученную с исходных изображений. Это особенно важно для приложений, где требуется высокая реалистичность, например, в анимации или виртуальной реальности. Современные методы текстурирования нередко используют алгоритмы машинного обучения, включая генеративные сети, которые позволяют восстанавливать утраченные детали или улучшать качество текстуры.

Метод структурированного света находит применение в самых разных областях. В биометрии он используется для создания цифровых моделей лица, которые применяются в системах идентификации и распознавания личности [24]. Высокая точность метода позволяет фиксировать уникальные особенности лица, такие как микрорельеф кожи, что значительно повышает надёжность биометрических систем [47]. В медицине этот метод используется для планирования хирургических операций, создания протезов и ортопедических устройств. Например, в стоматологии он позволяет точно моделировать форму зубов и челюсти, минимизируя ошибки при изготовлении имплантов. В анимации и киноиндустрии метод применяется для создания цифровых персонажей и аватаров, где требуется высокая степень реализма мимики и движений.

Однако метод структурированного света имеет и свои ограничения. Одним из главных недостатков является высокая чувствительность к движениям объекта во время сканирования. Даже незначительные движения могут приводить к искажениям модели, что особенно критично при работе с живыми объектами, такими как лицо человека [106]. Кроме того, метод требует стабильного и контролируемого освещения, так как сильные блики или тени могут негативно повлиять на качество данных. Проблемы также возникают при совмещении нескольких разновременных сканов, так как для этого требуется точное ориентирование моделей относительно друг друга. Ещё одним ограничением является то, что метод плохо подходит для

задач, связанных с диагностикой и лечением асимметрии лица. Это связано с тем, что высокая чувствительность к движениям и необходимость в идеальной неподвижности объекта делают затруднительным точное измерение асимметричных характеристик, особенно если требуется учёт динамических изменений или деформаций. Таким образом, применение метода структурированного света в подобных задачах оказывается ограниченным.

2.3 Создание цифровой модели лица стереофотограмметрическим методом

Стереофотограмметрия является одним из главных методов создания трёхмерных моделей различных объектов, включая лицо человека [32, 40]. Этот метод основан на обработке двух или более снимков с перекрытиями, снятых с разных точек съёмки [50]. Использование всего двух снимков для моделирования лица возможно лишь в случаях, когда требуется построить трёхмерную модель анфас. Однако лицо человека представляет собой сложную поверхность с выраженным рельефом, что делает невозможным создание полной цифровой модели лица на основе пары снимков. Для получения точной трёхмерной модели лица требуется множество снимков, выполненных с различных ракурсов.

Существует несколько способов получения трёхмерной модели лица методом стереофотограмметрии. Один из них — это пошаговая съёмка множества кадров с разных ракурсов. Данный метод предполагает последовательное фотографирование объекта вручную или с использованием стабилизирующего оборудования (штативы, рельсы и т.д.). Основное преимущество этого подхода заключается в его доступности, так как для реализации требуется минимум оборудования — достаточно одной камеры с высоким качеством съёмки. Однако данный метод имеет существенные ограничения, особенно в медицинской практике. Во-первых, он подвержен ошибкам, связанным с изменением расстояния и углов между снимками, что может привести к искажениям модели. Во-вторых, процесс съёмки занимает значительное время, в

течение которого пациенту необходимо сохранять неподвижность. Это особенно проблематично в неврологии, где пациенты могут испытывать трудности с контролем движений из-за тремора, гиперкинезов или других нарушений моторики. Таким образом, пошаговая съёмка не обеспечивает должной точности и воспроизводимости, необходимых для диагностики и мониторинга асимметрии лица в неврологии.

Второй метод – это съёмка с использованием вращающегося поворотного стола и камеры. В данном случае пациент размещается на вращающейся платформе, а камеры фиксируют изображения с равными угловыми интервалами. Такой метод обеспечивает равномерное покрытие объекта и высокую точность данных. Однако его применение в неврологии ограничено, так как пациенты с неврологическими нарушениями могут испытывать трудности с сохранением неподвижности на протяжении всей процедуры. Более того, потенциальные произвольные движения пациента могут привести к искажениям трёхмерной модели, что снижает её диагностическую ценность.

Третий способ — это одномоментная съёмка с использованием статической стереоустановки, которая состоит из двух или более камер, расположенных под разными углами [57]. Такой подход позволяет синхронно фиксировать объект с нескольких ракурсов, что минимизирует вероятность ошибок, вызванных движением пациента. Это особенно важно в неврологической практике, где даже минимальные движения пациента, вызванные произвольной активностью мышц, могут существенно повлиять на точность результатов. Одномоментная съёмка обеспечивает высокую детализацию и позволяет получить полное покрытие объекта, что делает её оптимальным выбором для задач, требующих высокой точности. На рисунке 6 представлены профессиональные технологические решения для съёмки тела и лица человека, предназначенные для создания трёхмерных моделей лица, которые находят применение в медицине, включая неврологию, а также в других областях, таких как биометрия и виртуальная реальность [85, 86, 99].



Рисунок 6 – Примеры фотоустановок для съёмки лица и тела человека⁴

Наиболее эффективным решением данной проблемы является использование специализированной многокамерной системы. Такая система позволяет одновременно фиксировать изображения с разных ракурсов, минимизируя влияние движений человека на результат. Благодаря этому обеспечивается высокая точность геометрии трёхмерных моделей лица. Таким образом, применение многокамерной системы обосновано как оптимальный подход для создания точных и детализированных трёхмерных моделей лица.

Основой процесса фотограмметрического моделирования является использование алгоритмов, которые позволяют извлечь информацию о пространственной структуре объекта из множества изображений, полученных под разными углами. Эти алгоритмы можно разделить на несколько ключевых категорий: поиск связующих точек, сопоставление этих точек между изображениями, восстановление трёхмерной структуры объекта и построение его поверхности.

⁴<https://3dmd.com/products/#https://3dmd.com/products/#!/flex>

Первым этапом обработки фотограмметрических данных является поиск связующих точек. Этот процесс играет решающую роль, так как от качества выделенных точек зависит точность всей дальнейшей обработки. Среди алгоритмов, используемых на этом этапе, выделяются SIFT (Scale-Invariant Feature Transform), который обеспечивает инвариантность к масштабу, вращению и изменениям освещения, а также SURF (Speeded-Up Robust Features), предлагающий более высокую скорость работы при некотором снижении точности. Для задач, где важна производительность, применяется ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) [6,27,43,56,57], который сочетает в себе эффективность и устойчивость к изменениям ориентации объектов. Эти алгоритмы позволяют выделить уникальные точки на изображении, которые затем используются для сопоставления между снимками.

Следующим этапом является сопоставление связующих точек. На этом этапе необходимо определить, какие из выделенных точек на одном изображении соответствуют точкам на других снимках. Для этого применяются такие методы, как RANSAC (Random Sample Consensus) [6,43,56,57], который позволяет отфильтровать ложные соответствия, и KNN (k-Nearest Neighbors), используемый для поиска ближайших соседей в пространстве признаков. RANSAC особенно важен для устранения ошибок, вызванных шумом или сложной геометрией объекта, так как он строит модель, наиболее точно описывающую взаимное расположение изображений.

После установления соответствий между изображениями выполняется восстановление трёхмерной структуры объекта. Здесь ключевую роль играют алгоритмы Structure from Motion (SfM) и Multi-View Stereo (MVS) [43,56,59]. SfM позволяет одновременно воссоздать трёхмерную структуру объекта и определить параметры движения камеры, что делает его основным инструментом для фотограмметрической обработки. MVS, в свою очередь, используется для создания плотного облака точек, обеспечивая высокую детализацию модели. Эти алгоритмы дополняются методами, такими как Delaunay Triangulation, которые позволяют построить треугольную сетку на основе полученного облака точек.

На этапе построения поверхности используются алгоритмы, преобразующие облако точек в полноценную 3D-модель. Среди них наиболее популярны Poisson Surface Reconstruction [72,77], который создаёт гладкую поверхность, и MarchingCubes, обеспечивающий построение полигональных сеток с высокой точностью. Для объектов с высокой плотностью точек может применяться Ball-Pivoting Algorithm (BPA) [79,103], который строит поверхность, используя принцип «катания» сферы по облаку точек. Эти методы позволяют получить геометрически корректную модель, пригодную для визуализации и анализа.

Неотъемлемым этапом фотограмметрической обработки является оптимизация и текстурирование. Оптимизация выполняется с использованием алгоритма Bundle Adjustment, который минимизирует ошибки в координатах точек и параметрах камеры, улучшая общую точность модели. Текстурирование, или наложение текстур, осуществляется с помощью методов проекции изображений на поверхность модели, что обеспечивает её фотореалистичность. Финальная модель может быть экспортирована в специализированные форматы для дальнейшего использования в различных приложениях, таких как архитектура, инженерия, археология или виртуальная реальность.

Таким образом, фотограмметрия, благодаря своим современным алгоритмам, таким как SIFT, RANSAC, SfM, MVS и Poisson Surface Reconstruction, предоставляет эффективные средства для создания высокоточных трёхмерных моделей. Выбор конкретных алгоритмов и их комбинаций зависит от требований к точности, скорости обработки и характеристик объекта.

При определении трехмерных координат точек на поверхности объекта с помощью фотограмметрических методов решается несколько основных задач:

Выбор методики (режимов и конфигурации) съёмки. Точность и корректность фотограмметрических моделей в значительной степени зависят от параметров съёмки, таких как геометрия расположения съёмочных камер и их ориентации, масштаб снимков, линейное разрешение на объекте, сложность формы объекта, условия

освещения и некоторые ограничения, налагаемые условиями съёмки. Для обеспечения требуемых показателей качества модели, таких как метрическая точность и фотореалистичность, необходимо в каждом конкретном случае решать задачу обоснованного выбора параметров и условий съёмки.

Калибровка съёмочной системы и подготовка сети опорных точек (съёмочного обоснования). Задача калибровки включает в себя определение элементов внутреннего ориентирования фотокамер и проектирование положения сети съёмочного обоснования.

Непосредственно съёмка, фотограмметрическая обработка снимков и создание трёхмерной модели объекта. Главная задача на этом этапе – получение координат в относительной системе координат модели объекта, необходимого количества точек поверхности модели (облака точек), которые являются результатом стереоотождествления их на поверхности объекта. Проблема заключается в идентификации на разноракурсных стереоснимках соответствующих двумерных изображений одних и тех же выбранных (связующих) точек на поверхности объекта и высокоточном определении их координат на этих изображениях.

Расчёт трёхмерных координат облака точек объекта сложной формы в локальной системе координат, масштабирование и ориентация модели в заданной системе координат.

Аппроксимация трёхмерной поверхности модели объекта по облаку точек (полигонами или сплайнами), её текстурирование, «раскраска» модели и преобразование её в один из специализированных форматов для хранения и визуализации в доступной среде заинтересованных исследователей.

Построение трёхмерных моделей лица требует высокой точности, однако подвижность человека во время сканирования или фотографирования представляет серьёзную проблему. Даже незначительные движения тела или сокращения мимических мышц могут вызвать расхождения между отдельными сканами при

оптическом сканировании или между снимками при стереосъёмке, что значительно снижает точность и качество итоговой модели.

Наиболее эффективным решением этой проблемы является использование специализированной многокамерной системы. Такая система позволяет одновременно фиксировать изображения с разных ракурсов, минимизируя влияние движений человека на результат. Это обеспечивает высокую точность геометрии трёхмерных моделей лица и делает многокамерные системы оптимальным выбором для создания точных и детализированных моделей.

Метод стереофотограмметрии, в свою очередь, обладает рядом преимуществ, которые делают его особенно подходящим для трёхмерного моделирования лица, в том числе в медицинской практике. Во-первых, он обеспечивает высокую точность и детализацию благодаря использованию множества снимков, сделанных с разных ракурсов [33]. Это позволяет учитывать сложную геометрию лица, включая мельчайшие особенности его рельефа. Во-вторых, стереофотограмметрия эффективно устраняет влияние движений пациента, особенно при применении многокамерных систем, которые синхронно фиксируют изображения. В-третьих, метод менее инвазивен и не требует использования специализированных устройств, таких как лазерные сканеры, что делает его более доступным для широкого применения.

Эти характеристики обеспечивают универсальность и надёжность метода стереофотограмметрии, что особенно важно для задач диагностики и мониторинга состояния пациентов в неврологии.

Вывод по главе 2

1. Проведённый анализ показывает (Приложение 1), что для создания детализированных и точных цифровых моделей лица наиболее перспективным методом является стереофотограмметрия. Использование многокамерной установки позволяет минимизировать влияние движений объекта, повысить точность геометрии

и обеспечить высокую воспроизводимость результатов. Это делает данный метод оптимальным выбором для задач, связанных с медицинской диагностикой, биометрией и другими областями, где требуется высокая точность трёхмерного моделирования.

2. Сравнение с другими методами, такими как монокулярная реконструкция и оптическое сканирование, подчёркивает преимущества стереофотограмметрии. Монокулярная реконструкция демонстрирует более низкую точность, так как она не даёт полной информации о глубине и детализации. Оптическое сканирование, хотя и обеспечивает высокую точность, требует строгого контроля условий (например, полного отсутствия движений объекта) и может быть менее удобным для пациента. В отличие от этого, стереофотограмметрия позволяет одновременно получать 3D-модели с высокой детализацией и минимальным участием пациента, что снижает риск дискомфорта.

3. Стереофотограмметрия обеспечивает возможность точной количественной оценки лицевой асимметрии в динамике, что делает её незаменимым инструментом в современной практике диагностики и мониторинга. Что особенно важно в задачах диагностики асимметрии лица, которая может быть связана с неврологическими состояниями (например, паралич лицевого нерва, последствия инсульта или врождённые аномалии) [1,102].

4. Многокамерные установки, используемые в этом методе, обладают потенциалом интеграции с современными алгоритмами обработки данных, включая машинное обучение. Это открывает возможности для дальнейшего повышения точности реконструкции, автоматизации процессов и применения метода в реальных условиях, где присутствуют движения объекта.

Все перечисленные достоинства делают стереофотограмметрию наиболее подходящим способом для создания трёхмерных моделей лица.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОЙ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ РЕЛЬЕФА ЛИЦА ЧЕЛОВЕКА

Методика оцифровки человеческого лица должна учитывать такие аспекты, как измерительные характеристики (точность и достоверность воспроизведения рельефа лица, реалистичность отображения, время получения итоговой модели) и требования эргономики (простота использования, стоимость оборудования). Проблема применения в медицинском моделировании методов традиционной фотографии состоит в том, что ряд параметров в данном методе может вызвать изменения изначальных условий наблюдения, и, как следствие, несоответствие при сравнении двух внешне похожих фотографий. Например, расстояние между камерой и объектом, угол поля зрения камеры и характер искажений, положение и ориентация головы относительно оптической оси камеры, несоответствие методики съемки [67]. Таким образом, подобные несоответствия могут приводить к искажениям в измерениях и неверной интерпретации результата, а также невозможности осуществления оценки динамики изменений лица.

В данной главе рассматриваются этапы разработки фотограмметрической системы, предназначенной для количественной оценки изменений рельефов человеческого лица. Система включает два ключевых компонента: многокамерную установку для съёмки и программные алгоритмы обработки данных, обеспечивающие построение и взаимное ориентирование разновременных трёхмерных моделей. Описывается процесс создания системы, включая её конструктивные особенности, алгоритмы обработки данных и методы анализа. Подробно описаны конструкция многокамерной установки, процесс её калибровки, алгоритмы обработки данных и результаты оценки точности полученных моделей. Также представлен пошаговый процесс получения полноразмерной цифровой модели лица пациента с использованием разработанной системы.

Фотограмметрическая система ориентирована на применение в медицине, как в ходе мониторинга процессов лечения пациентов, так и в решении задач доказательной медицины. Она позволяет получать высокоточные трёхмерные модели, которые используются для анализа изменений лица, оценки мимической асимметрии, а также изучения функциональных особенностей мимических мышц и мягких тканей.

Метод оценки мимической асимметрии, основанный на трёхмерных моделях лица, позволяет выявлять билатеральную, статическую и динамическую асимметрию, определять функциональные особенности мимических мышц и измерять объёмы мягких тканей. Для решения этих задач разработаны алгоритмы, обеспечивающие точное сравнение разновременных моделей и анализ динамики изменений.

Основные задачи, решаемые с помощью системы:

1. Построение высокоточных трёхмерных моделей лица в разные моменты времени для оценки изменений формы и размеров.
2. Сравнение разновременных моделей лица для изучения динамики изменений в течение длительного периода.
3. Получение объективных данных о движениях лица для их последующего анализа.
4. Разработка алгоритмов обработки фотограмметрических данных для повышения точности моделей.
5. Создание цифровых моделей, применимых в медицине, безопасности, анимации и других областях.

Выбор многокамерной установки обусловлен необходимостью обеспечения высокой точности и скорости получения данных. Одномоментная съёмка с нескольких точек позволяет минимизировать влияние движений пациента и других внешних факторов на итоговую модель. Кроме того, использование многокамерной системы обеспечивает равномерное покрытие всех участков лица, что особенно важно для анализа сложных поверхностей и мелких деталей. Альтернативные подходы, такие как последовательная съёмка одной камерой или использование ручных 3D-

сканеров, уступают многокамерной системе по точности, скорости работы и удобству для пациента. Таким образом, многокамерная установка стала оптимальным решением, соответствующим требованиям медицинских исследований и практического применения.

3.1 Конструкция и особенности фотоустановки, предназначенной для съемки лица

Специализированная многокамерная фотоустановка для съемки лиц предназначена для одномоментного получения высококачественных изображений с различных ракурсов. В данном случае очень важен предварительный расчет количества необходимых изображений и положения камер относительно лица в момент фотографирования. Так как каждый снимок требует использования отдельной камеры, которая должна быть жестко зафиксирована на раме при проведении съемки. Определение необходимого и достаточного количества снимков в данной работе напрямую будет влиять как на стоимость самой установки, так и на требуемые ресурсы для обработки.

За основу расчета минимально необходимого количества снимков было принято решение использовать формулу угла конвергенции [10]:

$$\gamma = \Omega (100 - p) / 100, \quad (2)$$

где p – требуемое перекрытие, которое примем за 60%, а Ω — центральный угол между направлениями в пределах «эффективного сектора», рассчитываемый по формуле:

$$\Omega = 2 [45^\circ - \arcsin (\sin (45^\circ) R/D)], \quad (3)$$

где R — радиус головы (100 мм), D — расстояние от точки фотографирования до центра головы (700 мм).

Для расчета центрального угла Ω сначала вычислим отношение радиуса к расстоянию: $R/D=100/700=0,142857$. Затем определим значение $\sin(45^\circ)$, которое

равно 0,7071. Умножая это значение на R/D , получаем $0,7071 \cdot 0,142857 = 0,10102$. Найдем $\arcsin(0,10102)$, что составляет примерно $5,79^\circ$. Таким образом, $45^\circ - 5,79^\circ = 39,21^\circ$, а умножив результат на 2, получаем $\Omega = 78,42^\circ$.

Теперь рассчитаем угол конвергенции γ . Подставляя значение $p=60$ в формулу, находим $100-p=40$, а затем $\Omega \cdot (100-p) = 78,42 \cdot 40 = 3136,8$. Делим результат на 100 и получаем $\gamma = 31,37$.

Исходя из расчетов, угол конвергенции для съемки в один маршрут должен составлять порядка 31° . Однако в случае съемки в два маршрута было решено уменьшить этот угол до 30° , чтобы обеспечить более равномерное распределение камер. В таком случае для съемки участка от уха до уха (область в 150°) необходимо использовать пять камер на одном маршруте, десять камер – при использовании двух маршрутов или пятнадцать камер при съемке лица в три маршрута. Эти расчеты были подтверждены путем симуляции съемки в программе Blender3D, а в дальнейшем в ходе экспериментов (Рисунок 7).

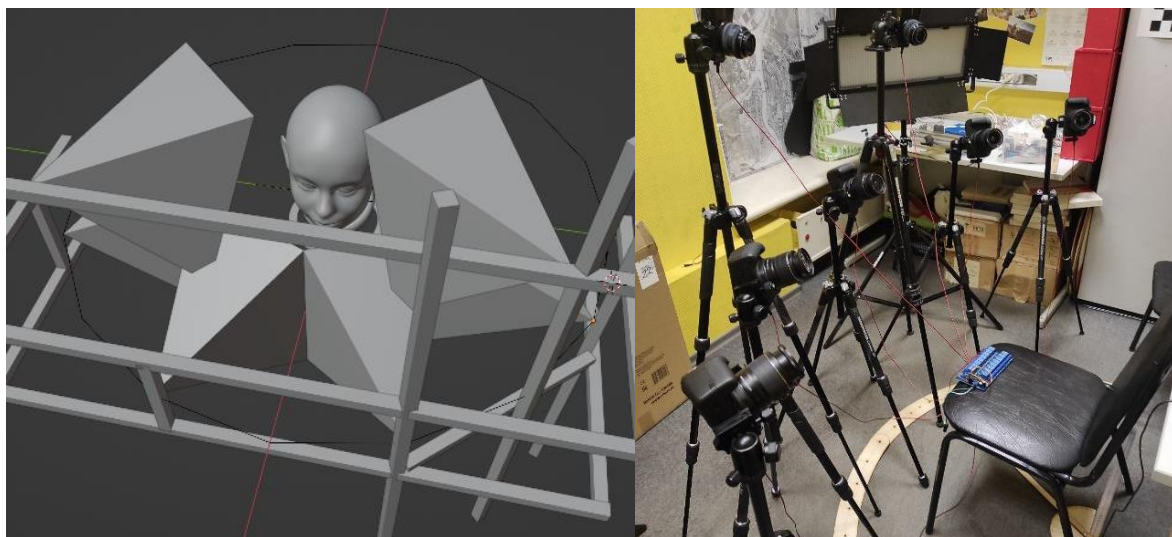


Рисунок 7 – Расположение снимков в программе Blender слева, экспериментальные съемки справа

Предрасчет точности определения координат точек объекта

Для выполнения фотограмметрической обработки важно заранее оценить точность определения координат точек объекта. Это позволяет определить, насколько

выбранные параметры съемки обеспечивают итоговую точность. Далее был выполнен предварительный расчет точности определения координат точек объекта на основе теоретических формул и исходных данных.

Точность определения координат объекта в пространстве зависит от базиса съемки (B), фокусного расстояния (f), угла конвергенции (γ), расстояния до объекта (D) и ошибки измерения координат и продольных параллаксов изображений точек на стереопаре снимков параметров ($m_{x,y}$, m_p).

Для оценки точности используются следующие формулы:

СКО по глубине (m_z):

$$m_z = \frac{m_p \cdot D}{B \cdot \sin \gamma}, \quad (4)$$

СКО в плане ($m_{x,y}$):

$$m_{x,y} = \frac{m_{x,y} \cdot D}{f}, \quad (5)$$

Эти формулы основаны на геометрии треугольника, образованного базисом съёмки, фокусным расстоянием и расстоянием до объекта. И показывают среднеквадратическую ошибку фотограмметрической засечки при съемке конвергентным способом.

Расстояние до объекта съемки (головы пациента) определяется как разность между радиусом установки камеры и средним радиусом головы человека. Радиус установки камеры составляет 700 мм. Средний радиус головы рассчитывается на основе окружности: для мужчин он равен 560 мм (что соответствует радиусу примерно 89,15 мм), а для женщин — 540 мм (радиус около 85,91 мм). В итоге средний радиус головы взрослого человека составляет примерно 87,55 мм. Таким образом, расстояние до объекта съемки вычисляется как 700 мм минус 87,55 мм, что дает 612,45 мм. Округляя, получаем значение 612 мм, что близко к ранее принятому значению 610 мм и подтверждает корректность расчетов.

Для съёмки используются цифровые камеры из линейки *Canon 550D*, параметры которой определяют исходные данные для расчётов.

Для оценки точности конвергентной съемки были использованы следующие исходные данные из технической документации камеры⁵: базис съемки $B=385$ мм, фокусное расстояние $f=55$ мм, угол конвергенции $\gamma=30^\circ$, размер пикселя камеры 4,3 мкм, среднеквадратическая ошибка измерения координат и продольных параллаксов изображений точек на стереопаре снимков 0,5 пикселя. Расстояние до объекта составило $D = 612$ мм.

Среднеквадратическая ошибка измерения координат и продольных параллаксов изображений точек на стереопаре снимков будет $m_{x,y}, m_p = 0,0043 \cdot 0,5 = 0,03$ мм, тогда:

$$m_z = \frac{0,03 \cdot 612}{385 \cdot \sin 30^\circ},$$

$$\text{то: } m_z = \frac{0,03 \cdot 612}{385 \cdot 0,5} = 0,95 \text{ мм}$$

$$m_{x,y} = \frac{0,03 \cdot 612}{55} = 0,33 \text{ мм}$$

Существует еще одна методика для оценки точности по глубине и в плане в конвергентной съемке. В этой методике используется классическая формула предрасчета точности определения координат с добавлением коэффициента для конвергентного случая съемки $q=0,5$. Этот коэффициент основан на исследованиях Никишина и др., [17], которые экспериментально установили, что точность по глубине и в плане в конвергентной съемке увеличивается в 1,5-2 раза.

Таким образом, формулы для расчета точности принимают следующий вид:

$$- \text{СКО по глубине: } m_z = \frac{D}{b} \cdot m_p \cdot q = 0,53 \text{ мм} \quad (6)$$

$$- \text{СКО в плане: } m_{x,y} = \frac{D}{f} \cdot m_{x,y} \cdot q = 0,10 \text{ мм} \quad (7)$$

Эта методика позволяет более точно оценить погрешности в конвергентной съемке, учитывая специфику данного метода. Результаты, полученные с использованием данной методики, соответствуют подходу, описанному в [59], и учитывают влияние угла конвергенции, что делает расчеты более точными.

⁵ <https://www.canon.ru/>

Для определения оптимального количества маршрутов была проведена экспериментальная съемка с использованием трех рядов камер и последующей обработкой отдельных наборов снимков. В результате исследования было установлено, что использование только двух нижних рядов камер возможно в случае анализа непосредственно нижней области лица, что актуально при проведении операций и лечении челюстных заболеваний.

Использование двух верхних рядов также дает удовлетворительные результаты для верхней части лица, однако в области подбородка образуется значительное количество мертвых зон. Фотограмметрическая обработка, выполненная с использованием верхнего и нижнего ряда камер, привела к удовлетворительным результатам. Однако при обработке снимков, сделанных со всех трех маршрутов, итоговая трехмерная модель наиболее детально отображает все участки лица в зоне от уха до уха, обеспечивая равномерную плотность сетки треугольников на всей площади.

Результаты обработки всех четырех случаев представлены на рисунке 8. Далее было проведено сравнение геометрии трех трехмерных моделей с моделью, построенной на основе данных всех трех маршрутов. Среднеквадратическое отклонение (СКО) расстояния между поверхностями моделей, построенных по двум маршрутам, и моделью, созданной по данным трех маршрутов, не превышало 0,2 мм во всех случаях. Наибольшее расхождение наблюдалось в мертвых зонах: в частности, в области подбородка, где при съемке двумя верхними маршрутами расхождения между моделями достигали 3 мм (Рисунок 8, г).

С точки зрения времени, затрачиваемого на обработку снимков, использование трех маршрутов потребовало 2,3 минуты на обработку до этапа построения трехмерной модели и 3 секунды на построение ЦММ и ортофотоплана.

В то время как использование двух маршрутов заняло 1,3 минуты на обработку до этапа построения трехмерной модели и также 3 секунды на построение цифровой модели местности (ЦММ) и ортофотоплана. В таблице 1 приведено сравнение

времени обработки снимков в ПО Agisoft Metashape на процессоре 12th Gen Intel Core i7-12650H с 16 ГБ оперативной памяти и видеокартой Nvidia GeForce RTX 2050.

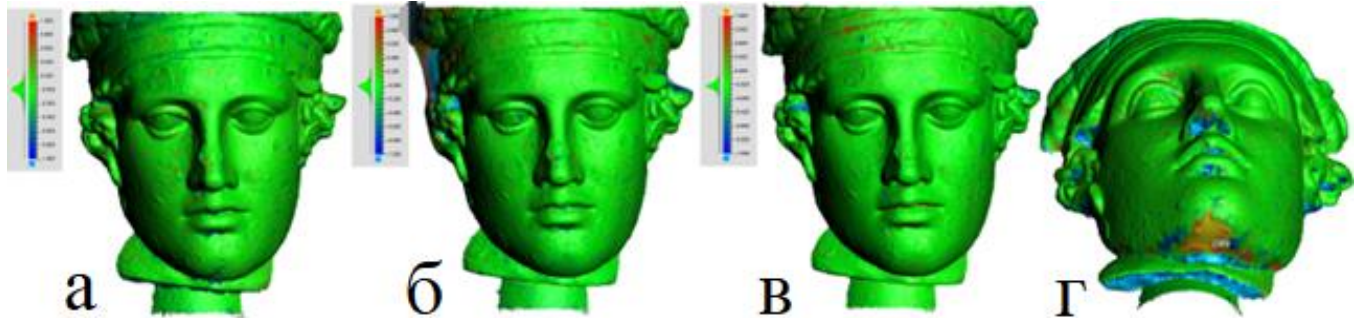


Рисунок 8 – Расстояния между поверхностями моделей построенной по трем маршрутам и: а) по двум верхним маршрутам б) по верхнему и нижнему маршруту в) по двум нижним маршрутам. г) Расстояние между поверхностями моделей случая (а), вид снизу

Несмотря на небольшие различия в геометрических параметрах моделей и явное преимущество в скорости обработки (обработка на 172% быстрее), плотность триангуляционной модели и размеры пикселей цифровой модели поверхности и ортофотоплана немного различаются.

Таблица 1 – Сравнение времени обработки снимков в ПО Agisoft Metashape

Этап	Количество снимков	
	15	10
Взаимное ориентирование	10с	5с
Построение карт глубины	87с	47с
Построение триангуляционной модели	42с	28с
Построение ЦММ	1с	1с
Построение ортофотоплана	3с	2с
Всего	143с	83с

Размер пикселя составляет 0,19 мм/пиксель для ортофотоплана, построенного по 15 снимкам и 0,21 мм/пиксель для ортофотоплана, построенного по 10 снимкам. При таком незначительном различии качество ортофотоплана, построенного по 10 снимкам, ниже, что заметно невооруженным глазом (Рисунок 9).

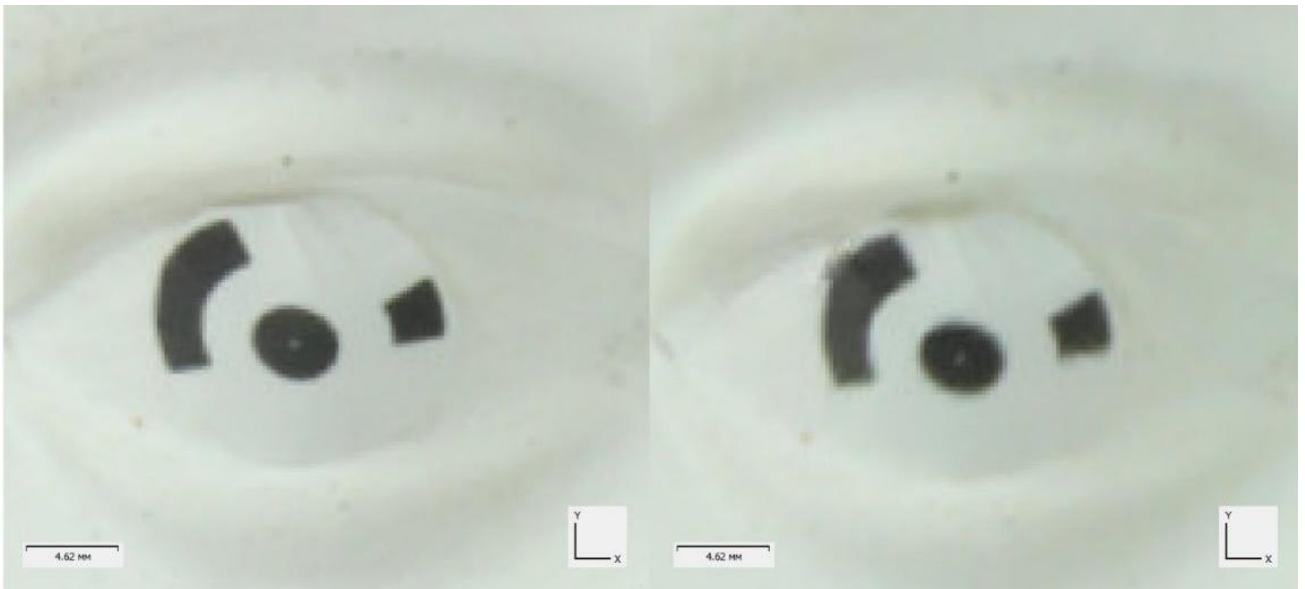


Рисунок 9 – Фрагменты ортофотоплана, построенный по 15 изображениям (слева) и по 10 изображениям(справа)

Таким образом, для построения трехмерных моделей было принято решение использовать данные всех трех маршрутов, что позволяет получить оптимальные результаты с минимальным количеством мертвых зон, повысить плотность триангуляции и качество ортофотоплана.

Фотоустановка для съемки лица состоит из нескольких компонентов, каждый из которых выполняет важную роль в процессе съемки. Она предназначена для получения высококачественных изображений и точных измерений для дальнейшего анализа и мониторинга изменений в форме лица.

Конструкция фотоустановки включает в себя цифровые камеры с объективом фиксированного фокусного расстояния, несколько источников света для равномерного освещения лица, специальную заднюю панель с марками для калибровки и персональный компьютер.

На первом этапе поставленная задача решается за счет синхронной съемки лица пациента несколькими камерами, жестко закрепленными в раме и ориентированными в пространстве для получения детальных изображений всей поверхности лица с тройным перекрытием, с минимальным количеством мертвых зон. Точная

синхронизация камер позволяет исключить ошибки в построении трехмерных моделей, связанные с нестатичностью лицевых мышц пациента.

Экспериментальная съемочная установка (общая схема представлена на рисунке 10) представляет собой жесткую раму в форме полуцилиндра – 1, на которой установлены цифровые фотографические камеры (ЦФК) – 2 в количестве 15 штук, и осветительное оборудование – 3.

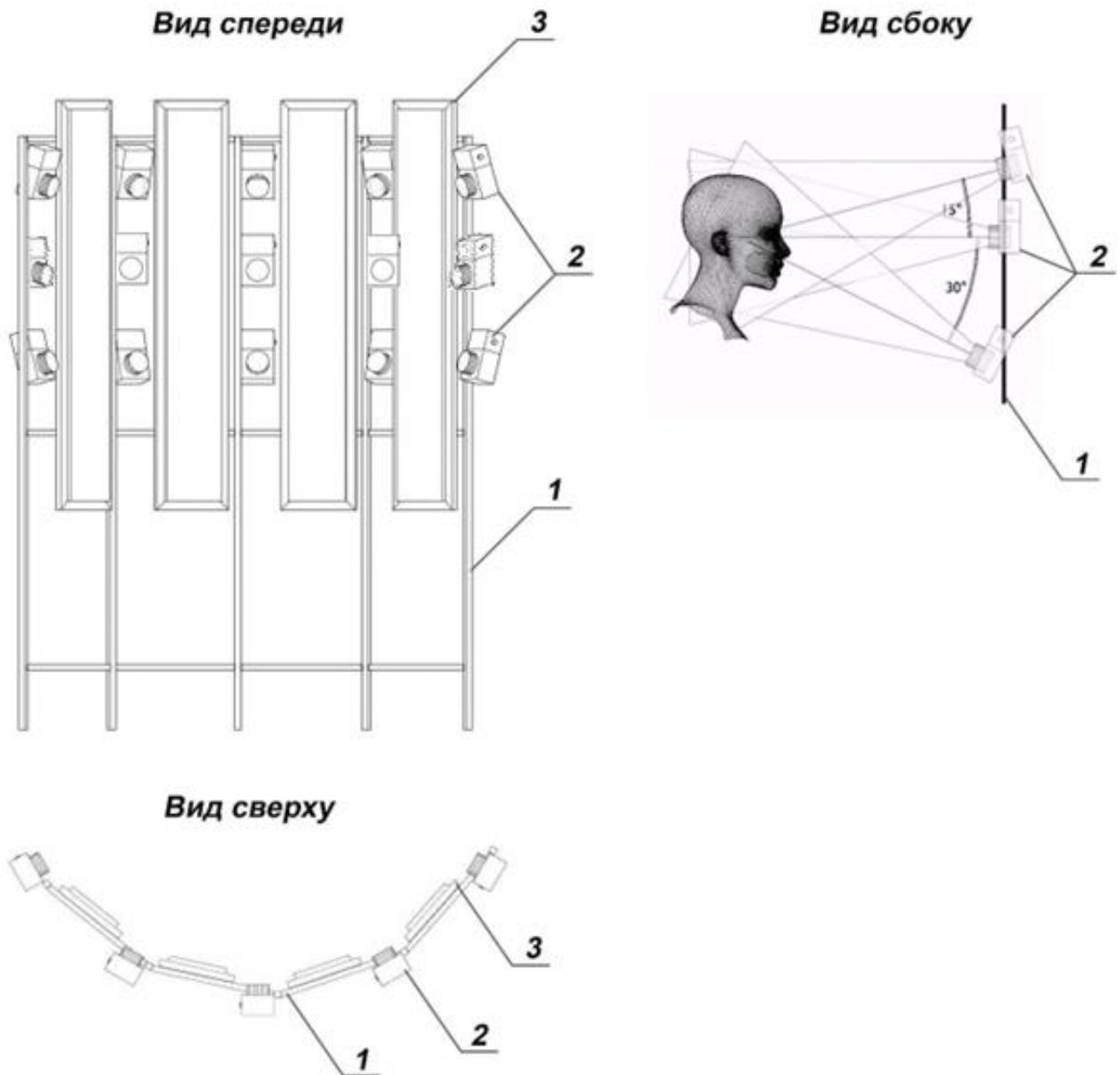


Рисунок 10 – Принципиальная схема фотоустановки

Из общего количества ЦФК, пятнадцать камер используются для получения модели, при этом центральная камера также используется для контроля положения головы. Оптическая ось контрольной камеры находится в горизонтальном положении и направлена в рассчитанный геометрический центр установки. При правильном расположении головы пациента горизонтальная ось сетки нитей (кадрирующей сетки, отображаемой на дисплее в режиме предпросмотра «Live view») должна пересекать уголки глаз, а вертикальная – проходить через лоб, нос и подбородок, зрительно разделяя лицо пополам. Таким образом, можно корректировать положение и ориентацию головы пациента в процессе фотографирования, а также получить изображение лица пациента анфас.

Радиус цилиндра, в который вписана рама, составляет 70 см, что, с использованием выбранного комплекта фотосъемочного оборудования, позволяет получить необходимую область лица в кадре с номинальным размером пикселя 0,06 мм.

Установка является модульной, состоит из алюминиевого конструкционного профиля с возможностью увеличения высоты и количества стоек, а также быстрой установки необходимого количества фотокамер. Как уже было сказано выше, в данной комплектации установки опытным путем было подобрано 15 камер, установленных таким образом, чтобы построить модель, захватывающую все лицо пациента (до ушей). Уменьшение количества камер приводит к существенным погрешностям в построении трехмерной модели или к уменьшению области построения [10]. Камеры жестко фиксируются на раме при помощи специально изготовленного переходника, что обеспечивает постоянство их положения и ориентации относительно всего стенда.

В качестве источников освещения используется 12 светодиодных панелей, которые обеспечивают равномерное освещение всего объекта съемки и поддерживают фиксированную цветовую температуру для стабильности цветопередачи.

Управление процессом фотографирования осуществляется через группу реле, что позволяет точно синхронизировать время получения изображений, в отличие от использования программ для удаленного управления, которые используют USB-протокол. Принципиальная схема синхронизации процесса фотографирования приведена в приложении 2. Оценка скорости синхронизации камер проводилась путем съемки монитора с секундомером. На полученных изображениях (Приложение 2) отображался один и тот же кадр (на всех изображениях указано одинаковое время на секундомере). Частота обновления экрана составляла 90 Гц, что соответствует выдержке 1/100 секунды. Такая организация съемки позволяет исключить проявление неконтролируемой работы мимических мышц на разных снимках.

Для автоматической сортировки всех изображений предварительно производится синхронизация системного времени всех ЦФК. После проведения сеанса съемки полученные изображения переносятся на электронный носитель информации персонального компьютера посредством подключения всех камер к разветвителю USB-Hub. Далее снимки сортируются по директориям с учетом времени фотографирования. Созданный в ходе работы скрипт (сценарий) на языке Python распознает все подключенные по интерфейсу USB-устройства, определяет камеры и их идентификатор, сканирует директории с целью поиска новых изображений, и при их наличии автоматически производит копирование и сортировку (Приложение 3). Таким образом, после сеанса фотографирования все полученные изображения группируются по отдельным директориям, в каждой из которых находятся изображения, которые были получены в один момент времени. Блок-схема сортировки изображений по директориям представлена в приложении 4. Далее директории с изображениями импортируются в облако на сервер для дальнейшей обработки, что обеспечивает удобный доступ к данным и возможность использования мощных вычислительных ресурсов для анализа изображений.

Для исследования сконструированной многокамерной установки и её подготовки к выполнению экспериментальных съемок лица были выполнены:

- калибровка съёмочной системы;
- тестовая съёмка маркированного бюста (гипсовой головы), для оценки точности определения координат точек объекта.

Калибровка съёмочной системы проводилась с использованием плоского тест-объекта, содержащего 96 точек. Для автоматизации процесса калибровки на тест-объекте применялись круговые 12-битные маркеры (Рисунок 11), положение которых определяется на изображениях автоматически. Эти маркеры были отпечатаны на самоклеящейся пленке и перенесены на твердую поверхность пенокартона, что защищает калибровочный стенд от искажений и деформаций.

Началом координат выбрана центральная точка базовой линии, проходящей через маркеры с номерами 29-48. Ось X располагается вдоль базовой линии, а ось Y направлена вверх от центральной точки. Базовая линия была измерена женовской линейкой двумя операторами в два приема, после чего было вычислено среднее значение. Координаты маркеров были получены с помощью тахеометра марки Trimble M3 3". Стенд был закреплен на стене за установкой (Рисунок 11).

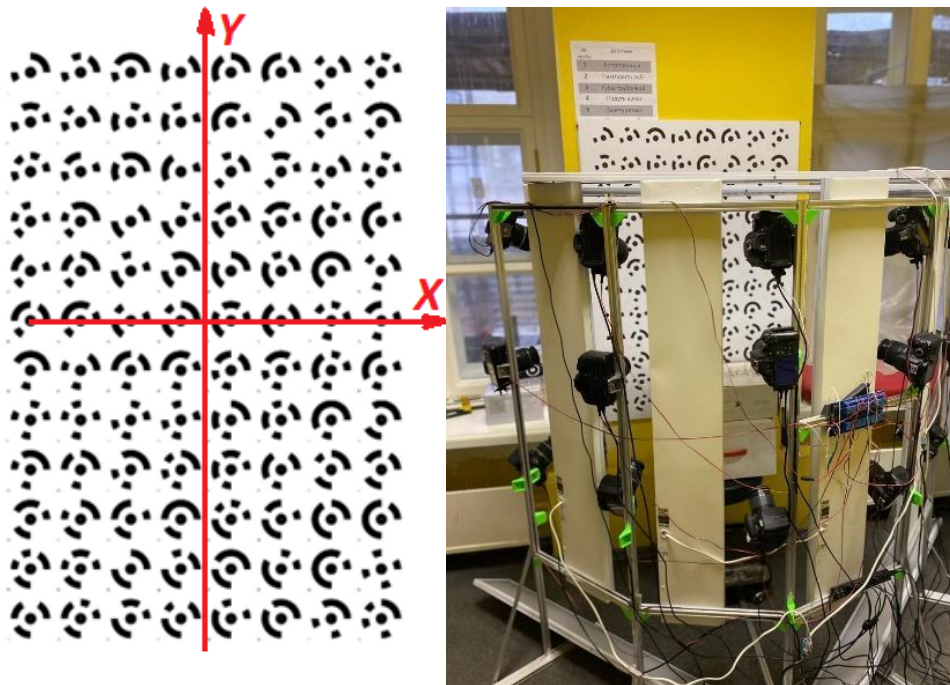


Рисунок 11 – Плоский тест-объект, состоящий из 96 12-битных маркеров, распечатанных на пенокартоне формата А0

Фотограмметрическая обработка снимков выполнялась в программном обеспечении Agisoft Metashape Pro. Уравнивание фотограмметрической сети осуществлялось по координатам 60 точек тест-объекта. В результате уравнивания среднее значение расхождений уравненных и исходных координат опорных точек составило 0,6 мм, а среднее значение расхождений координат точек на снимках – 0,4 пикселя. Это позволило получить координаты центров проекции снимков в системе координат тест-объекта.

Калибровка по 12–битным кодированным маркам в Agisoft Metashape Pro (AM) выполняется в несколько этапов:

1. Съемка тест-объекта: производится 15–камерной установкой без пациента.
2. Импорт изображений: загружаются полученные изображения с 12–битными кодированными маркерами и файл с координатами маркеров (Приложение 5) в формате, поддерживаемом AM (например, .csv или .txt).
3. Обнаружение маркеров: с помощью команды "Detect Markers" программа автоматически обнаруживает маркеры на загруженных изображениях. Если некоторые маркеры не были идентифицированы автоматически, их можно указать вручную на каждом снимке.
4. Калибровка: после обнаружения и связывания маркеров с их реальными координатами, с использованием команды "Use markers" в окне "Align Photos" выполняется калибровка. В этом процессе используются координаты маркеров для вычисления элементов внутреннего и внешнего ориентирования камеры (Приложение 6).
5. Проверка и оптимизация: после калибровки результаты проверяются и при необходимости оптимизируются с помощью инструмента «Optimization».
6. Экспорт результатов: после успешной калибровки и оптимизации результаты экспортируются в формат .txt.

Таким образом, описанные шаги обеспечивают точность и надежность калибровки системы, что критически важно для дальнейшей фотограмметрической обработки.

Для *исследования оценки точности съёмочной установки* была проведена тестовая съёмка гипсовой головы. На поверхности гипсовой головы предварительно разместили тридцать пять 12-битных кодированных маркеров, по которым выполнили измерение пятидесяти двух контрольных отрезков (Рисунок 12). Промеры выбирались как длинные, так и короткие, в вертикальном и горизонтальном направлениях. Измерения проводились с использованием штангенциркуля двумя операторами в два приема. Электронный штангенциркуль обладает заявленной точностью измерения 0,01мм. Однако фактическая точность может составлять около 0,1 мм. Это связано с несколькими факторами, включая сложность геометрии измеряемого объекта и правильность наведения губок штангенциркуля на центр марки. Для повышения точности были вычислены средние значения каждого отрезка, которые использовались в качестве эталонных данных.

Элементы внутреннего и внешнего ориентирования камер, вычисленные в процессе калибровки, применялись для уравнивания фотограмметрической сети.

В результате фотограмметрической обработки снимков была построена трехмерная модель бюста. Точность модели оценивалась по измерениям 52-х контрольных отрезков, выполненных по фотограмметрической и полигональной моделям. Среднеквадратическое отклонение (СКО) составило 1,01 мм для фотограмметрической модели и 0,96 мм для полигональной модели (Приложение 7).

Полученные результаты демонстрируют высокую точность съёмочной установки, подтверждаемую минимальными значениями СКО. Это указывает на возможность использования данной методики и оборудования для задач, требующих высокой метрической точности.

Далее подробнее рассмотрим методику фотограмметрической обработки снимков для создания цифровой модели лица.

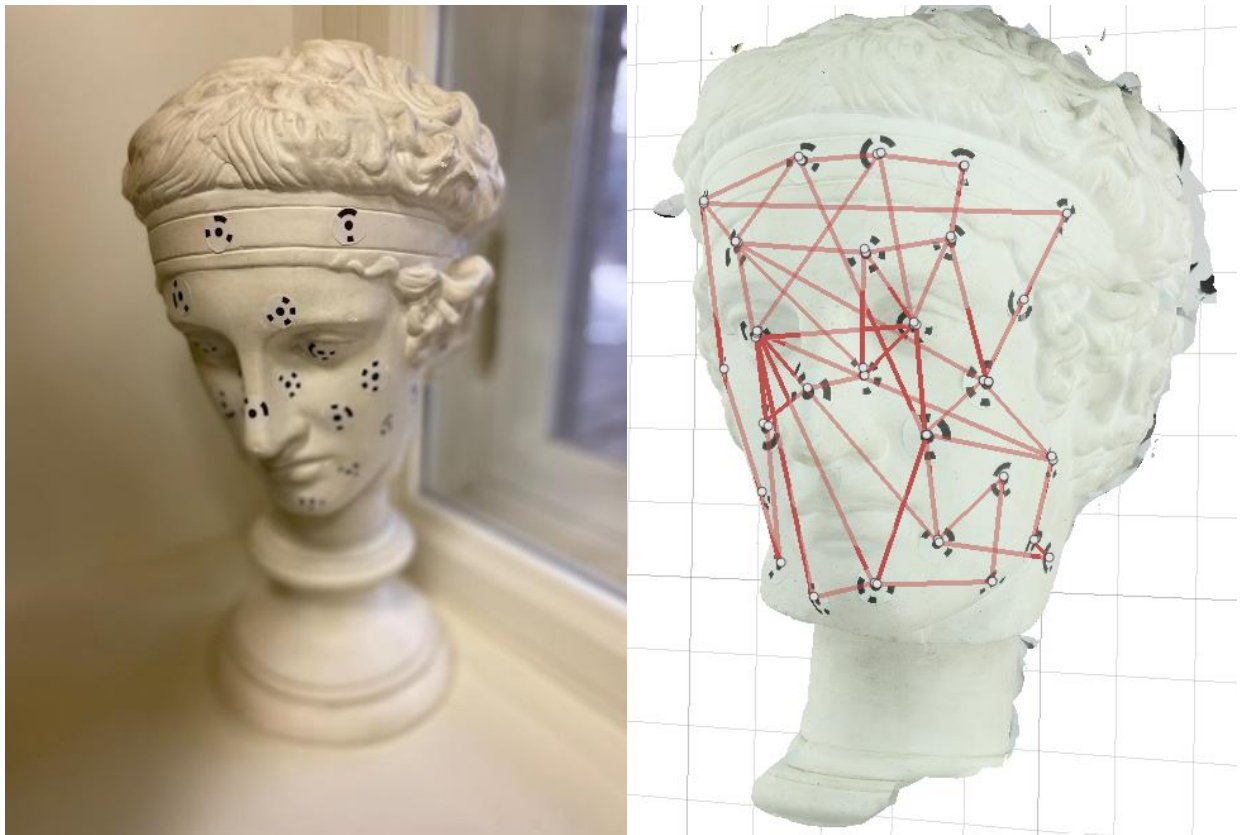


Рисунок 12 – Замаркированная гипсовая голова (слева) и контрольные промеры на гипсовой голове (справа)

3.2 Алгоритм фотограмметрической обработки снимков для создания цифровой модели лица

На этапе фотограмметрической обработки предполагаются процессы:

1. Калибровка съемочной системы, результате которой определяются элементов внешнего ориентирования всех камер по изображениям тест-объекта.
2. Фототриангуляция фотоснимков лица по методу связок; связующие точки определяются алгоритмами MVS-SFM [42].
3. Построение плотного облака точек с помощью алгоритмов, которые относятся к группе методов квазиглобального сопоставления [58, 80].

4. Построение цифровых моделей рельефа лица путем интерполяции плотного облака методом IDW (обратно взвешенные расстояния).

5. Построение триангуляционных текстурированных моделей.

Эти процессы являются стандартными для подавляющего большинства современных фотограмметрических программ.

Калибровка съемочной системы выполняется по технологии, представленной в 3.1.

Этап фототриангуляции представляет собой блочную фототриангуляцию методом связок. В качестве исходных данных используются 15 изображений лица и ЭВО камер фотоустановки (Рисунок 13).

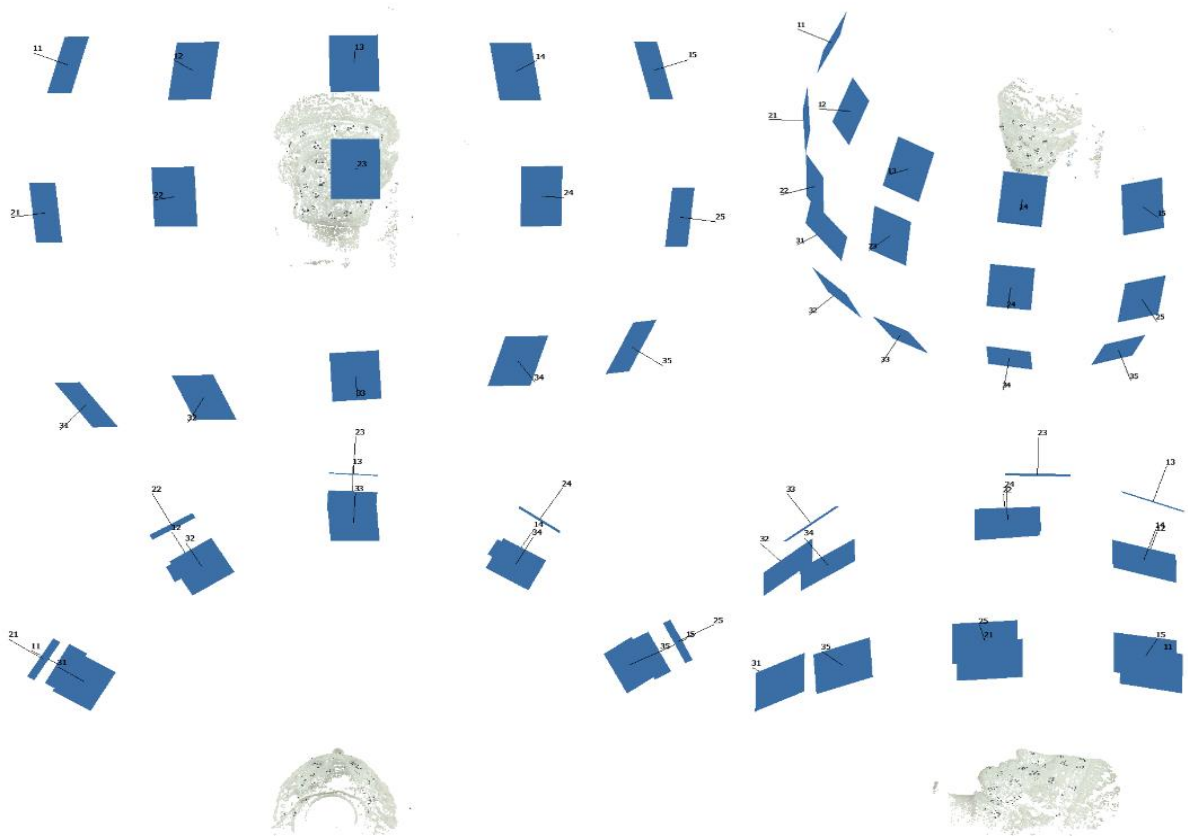


Рисунок 13 – Диаграмма расположения снимков с установленными ЭВО, в соответствии с Приложением 5

На этом этапе определяются координаты связующих точек снимков. Результатами являются разреженное облако связующих (Рисунок 14а) точек в 3D-

пространстве модели и данные о положении и ориентации камер в системе координат стенда. Однако для определения динамики изменений данная система координат не подходит, так как пациент может изменить положение и ориентацию своего тела/головы относительно стенда. В таком случае необходим переход от системы координат стенда к системе координат первой (исходной) модели. Такие задачи решаются путем ориентирования всех моделей по устойчивым анатомическим ориентирам [22,44].

Построение плотного облака точек происходит по алгоритмам, опирающимся на метод квазиглобального сопоставления (Semi-Global Matching (SGM)) [77]. Суть метода заключается в том, что каждый пиксель сравнивается на предмет изменений разности продольных параллаксов только по восьми направлениям вокруг данного пикселя. Для этого по каждому изображению строятся карты глубины (параллаксов, диспаратета, диспаратности). На основании элементов внешнего ориентирования, рассчитанных на первом этапе обработки, карт глубины, по формулам прямой фотограмметрической засечки вычисляются координаты для каждого пикселя изображения. Поскольку один снимок перекрывается сразу с несколькими соседними, то таким образом для каждого снимка рассчитывается несколько карт глубины.

Построение цифровых моделей рельефа лица осуществляется путем интерполяции нерегулярного массива точек плотного облака в регулярную модель высот с использованием метода обратных взвешенных расстояний (IDW). Этот метод основывается на принципе, заключающемся в том, что близлежащие точки в пространстве имеют большее влияние на значение интерполируемой функции, чем удаленные.

На начальном этапе из плотного облака точек выделяются координаты X , Y и Z , которые представляют собой трехмерные координаты каждой точки. Затем для каждой точки, для которой необходимо вычислить значение Z , определяется набор ближайших соседей из плотного облака.

Метод IDW применяет следующую формулу для расчета значения Z [69]:

$$Z_{interp} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}} \quad (8)$$

где:

Z_{interp} – интерполированное значение,

Z_i – значения Z ближайших точек,

d_i – расстояние от интерполируемой точки до каждой из ближайших точек,

p – параметр, определяющий степень влияния расстояния (обычно $p=2$) [67].

После применения метода IDW формируется цифровая модель рельефа лица, которая отображает изменения высоты и формы поверхности. Эта модель может быть использована для дальнейшего анализа, включая визуализацию, измерения и создание анимаций.

Построение текстуры. Текстура представляет собой растровое изображение, которое накладывается на поверхность 3D–модели и содержит цветную информацию об объекте. Построение текстуры включает в себя выбор проекции, расчет текстурных координат, интерполяцию цвета, фильтрацию и уточнение, а также создание текстуры (Рисунок 14г).

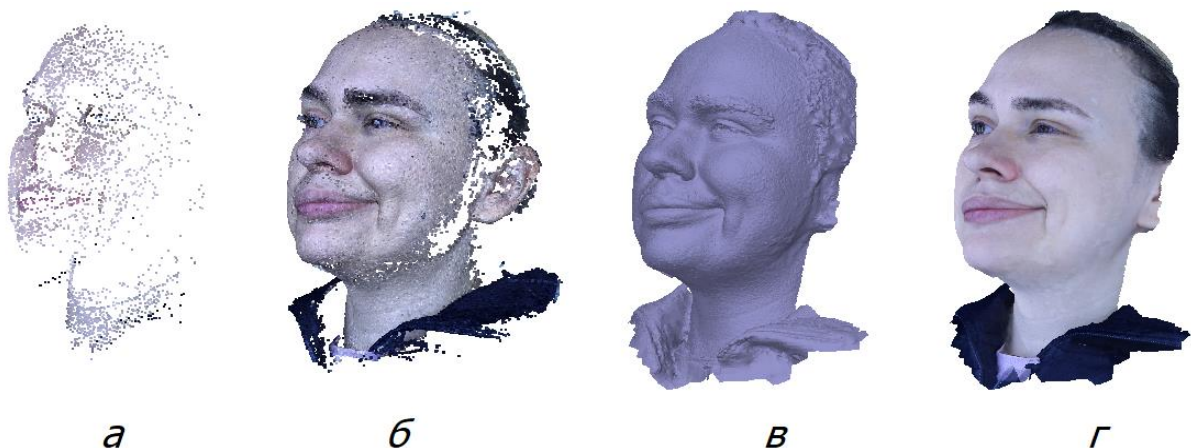


Рисунок 14 – Визуализация этапов фотограмметрической обработки снимков лица. а – разреженное облако связующих точек, б – плотное облако точек лица, в – полигональная модель лица, г – текстурированная модель лица

После фотограмметрической обработки снимков получаются метрически точные триангуляционные поверхностные модели десяти стандартных мимических выражений лица одного пациента.

3.3 Разработка алгоритма приведения всех моделей лица в единую систему координат

Как уже было сказано выше, основными проблемами сравнительного анализа моделей лица являются три факта. Первый – это невозможность повторить позу пациента при пролонгированном мониторинге. Второе – необходимость сравнивать лица при выполнении динамических проб. Третье – отсутствие необходимого количества (три и более) устойчивых анатомических ориентира на лице.

3.3.1 Существующие алгоритмы приведения моделей к единой системе координат

По связующим точкам. Приведение в единую СК основано на сопоставлении связующих точек, извлеченных из изображений двух разновременных блоков. Алгоритм находит соответствия между точками из разных блоков, обычно выполняется путем определения разницы между двумя облаками точек (например, CloudtoCloud – C2C) для определения их местоположения и ориентации [75,82].

После нахождения пар точек определяется трансформация, минимизирующая расхождения между ними. Методом IterativeClosest Point (ICP) осуществляется дальнейшей оптимизации связи, уточняя положение блоков ⁶.

Преимущества рассматриваемого метода заключаются в его гибкости, что позволяет эффективно обрабатывать большие объемы данных и работать с облаками точек различной плотности. Также стоит отметить автоматизацию, благодаря которой

⁶ <https://www.agisoft.com/>

алгоритм способен самостоятельно находить соответствия, что значительно упрощает процесс приведения в единую СК. Дополнительно, метод демонстрирует устойчивость к шуму, что способствует минимизации негативного влияния шумовых артефактов на результирующие данные.

Однако среди недостатков можно выделить чувствительность к начальным условиям. Это требует адекватного начального приближения для достижения оптимальных результатов. Кроме того, время обработки может быть значительным при наличии большого количества точек, что может стать ограничивающим фактором в контексте практического применения метода. При наличии существенных изменений снимаемого объекта возможны недостоверные результаты. Точность метода можно повысить использованием маскирования наиболее изменившихся зон на изображениях.

По опорным точкам. В этом методе используются опорные точки, которые измеряются на изображениях первой съемки. Алгоритм распознает эти точки на изображениях второй и последующих съемках и определяет их положение в 3D-пространстве. Затем присваивает им координаты референсной модели, рассчитывает параметры преобразования Гельмерта и пересчитывает координаты остальных точек.

Плюсы данного метода включают высокую точность, так как использование опорных маркеров обеспечивает надежные точки привязки, что значительно повышает точность приведения к единой СК. Кроме того, оператор имеет возможность контролировать размещение маркеров, что позволяет избежать ошибок. Однако, это одновременно является и минусом: требуется предварительная подготовка, поскольку необходимо заранее установить маркеры, что может быть трудоемким процессом. Выбор точек в малоподвижных зонах объекта съемки повышает достоверность взаимной ориентации моделей.

По элементам внешнего ориентирования камер. Этот метод использует информацию о положении и ориентации камер, которые были использованы для съемки. Алгоритм анализирует данные о расположении камер и на основе этого

определяет, как блоки изображений должны быть сориентированы относительно друг друга. Начальное приведение в единую СК по ЭВО камер создает общее представление о сцене, после чего метод ИСР уточняет положение блоков.

Плюсы данного метода включают скорость, так как он обеспечивает быстрое начальное приведение в единую СК на основе информации о камерах. Также метод учитывает геометрию, что позволяет принимать во внимание пространственные соотношения между камерами и объектами. Однако существуют и минусы: метод зависит от точности данных, и если информация о камерах неточная, это может привести к ошибкам в ориентации.

Поскольку человек не способен воспроизводить одно и то же положение относительно стенда через значительный промежуток времени, начальное приближение работает неэффективно, что негативно сказывается на дальнейшем приведении данных в единую систему координат. Таким образом, данный метод не подходит для случая, когда положение объектов относительно центров проекций камер изменяется от съемки к съемке. Ошибки в определении начального приближения не позволяют использовать метод уточнения положения блоков, что приводит к неудовлетворительным результатам.

Сравнение двух методов (по опорным точкам и по связующим точкам) приведения моделей к единой системе координат производилось по двум мимическим гримасам: когда человек с надутыми щеками и в спокойном состоянии. Съемка была проведена дважды с промежутком в 30 дней. Полученные полигональные модели были ориентированы в системе координат первой модели первой съемки. Затем производилось вычитание: из моделей второй серии съемок (24 – надуть щеки, 21 – спокойное состояние) вычитали соответствующие модели первой серии съемок (14 – надуть щеки, 11 – спокойное состояние). Разность определялась как кратчайшее расстояние между двумя моделями, нормали восстанавливались из референсной модели к поверхности сравниваемой модели. СКО разностей моделей составляют 1,4 мм, 1,2 мм, 1,3 мм, 1,1 мм соответственно. Оба метода по данным статистики имеют

практически одинаковые результаты. Но очевидна визуальная разница распределения этих ошибок, которая выявляет слабость способа «по связующим точкам» приведения моделей в единую СК. Так при ориентировании модели 21 -11 присутствует систематическая ошибка лица: на рисунке 15 (нижний ряд справа) выделено оранжевым цветом на лбу и щеке модели. Очевидно, что основной проблемой ориентирования является определение угловых элементов.

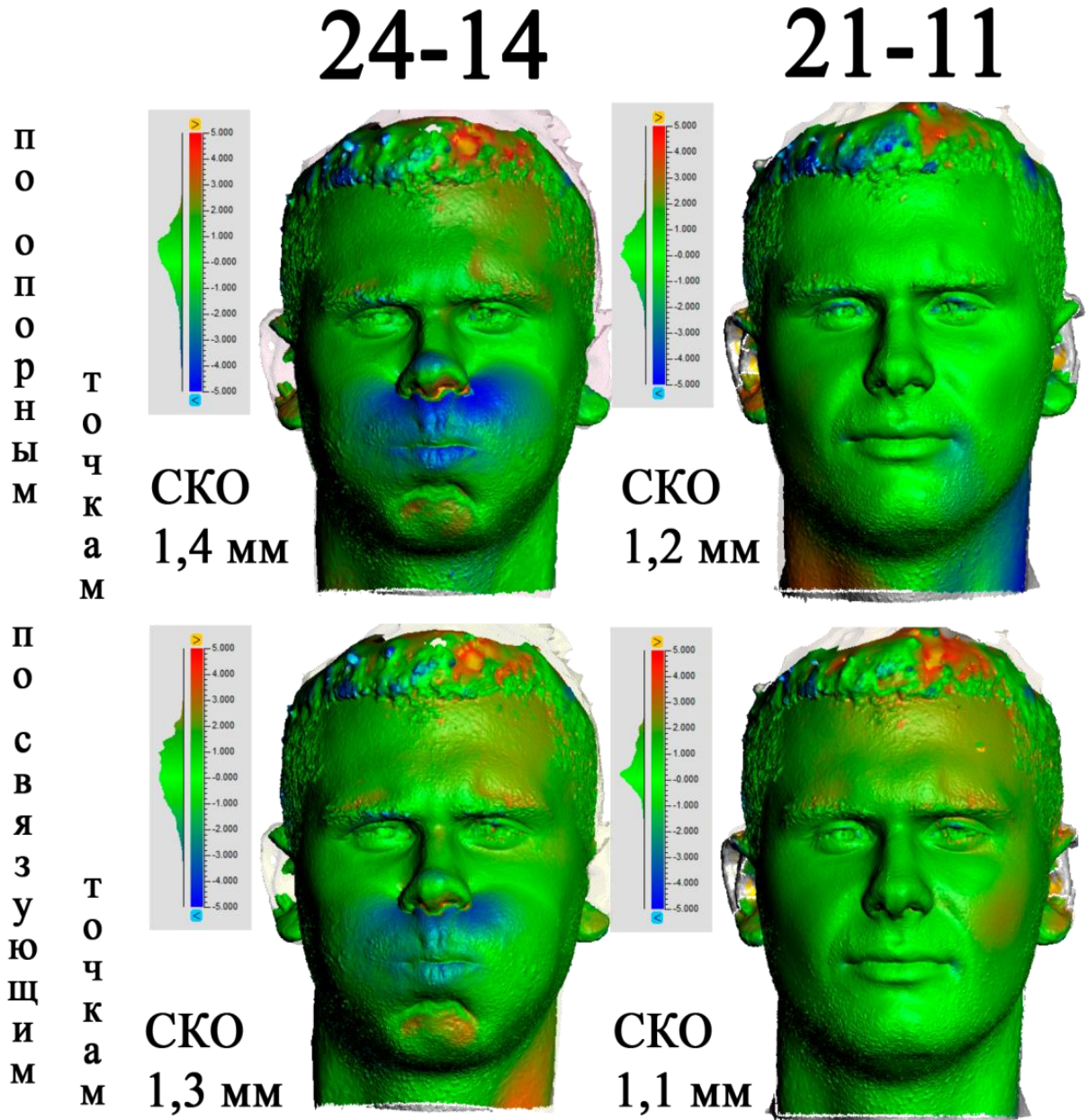


Рисунок 15 – Результаты приведения трехмерных моделей в единую систему координат: по опорным точкам (верхний ряд) и по связующим точкам (нижний ряд)

3.3.2 Алгоритм ориентирования моделей лица в единую систему первой модели при недостаточном количестве устойчивых ориентиров

Исследуя характер распределения разностей и с учетом вышеописанных особенностей съемки, был предложен алгоритм ориентирования по устойчивым анатомическим ориентирам. Экспериментально установлено, что на лице такими ориентирами могут быть только две точки – внутренние уголки глаз [44, 46, 50]. Точку, которая располагается у основания волосяного покрова на осевой линии лица можно назвать относительно устойчивой: она не имеет четкого местоположения, но при этом сохраняет постоянство высоты относительно поверхности черепа. Таким образом, необходимо решить задачу ориентирования при неполном количестве опорных точек. Две точки позволяют определить, разворот и продольный наклон модели. При невозможности определить поперечный наклон, его нужно задать. Поэтому, для приведения всех моделей к единой системе отсчета, была задана система координат лица, сформированная следующим образом (Рисунок 16). Ось X проходит через внутренние уголки глаз. Начало системы координат находится в середине этого отрезка, соединяющего уголки глаз, ось Y проходит перпендикулярно оси X и является математической осью лица, ось Z дополняет систему до правой.

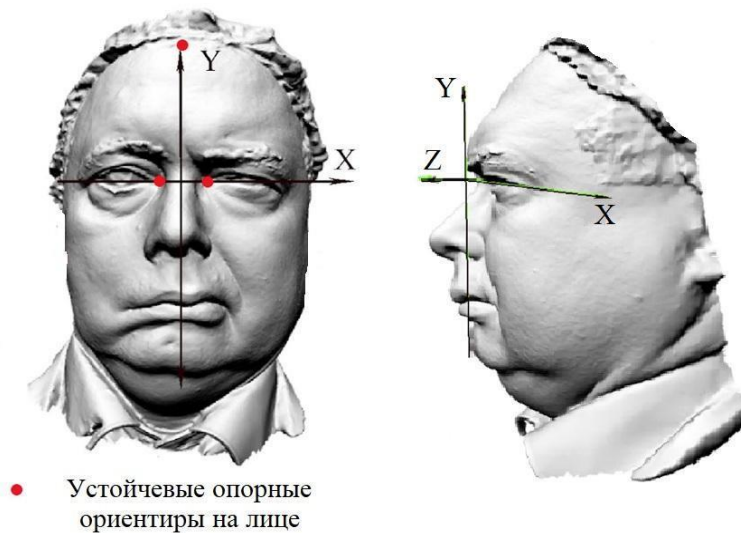


Рисунок 16 – Система координат лица

Приведение всех моделей лица в единую систему координат происходит в три основных этапа: выполняется построение первой модели лица (естественное состояние), ориентирование первой модели в СК сетки и в заключении выполняется построение всех моделей, где на этапе триангуляции они привязываются к СК первой модели, по дополнительным опорным точкам (маркерам).

Рассмотрим подробнее представленный алгоритм:

1. Изображения всех сеансов съёмки, каждый из которых включает девять мимических гримас, загружаются в единый проект АМ.

2. Выполняется построение первой модели лица в естественном состоянии, с выполнением всех этапов фотограмметрической обработки. При этом используются параметры внутреннего и внешнего ориентирования камер, полученные в результате предварительной калибровки съёмочной системы, описанной ранее.

3. Ориентирование первой модели в системе координат сетки. В проект загружается заранее созданная универсальная сетка через импорт фигур. Центральные оси сетки окрашены в красный цвет (см. Рисунок 17а). Далее в ручном режиме «подтягивается» модель первого лица так, чтобы центральные оси (окрашенные в красный цвет) проходили через опорные ориентиры. Ось X проходит через внутренние уголки глаз, а ось Y представляет собой условную математическую ось лица, которая проходит по линии подбородок – нос – лоб (см. Рисунок 17б). Ось Z располагается на уровне подбородка – лба (см. Рисунок 17в);

4. Выполняется построение всех последующих моделей, в режиме пакетной обработки. В пакетной обработке однократно прописываются все операции, с указанием настроек и путей к исходным файлам (импорт камер, взаимное ориентирование, построение модели, удаление элементов, не привязанных к модели).

5. Модели ориентируются в СК первой модели, по опорным анатомическим ориентирам, таким как уголки глаз, мочки ушей. Эти четыре точки измеряются вручную на снимках всех серий и мимических гримас. Затем выполняется взаимное ориентирование всех блоков снимков в СК первой модели (режим по маркерам).

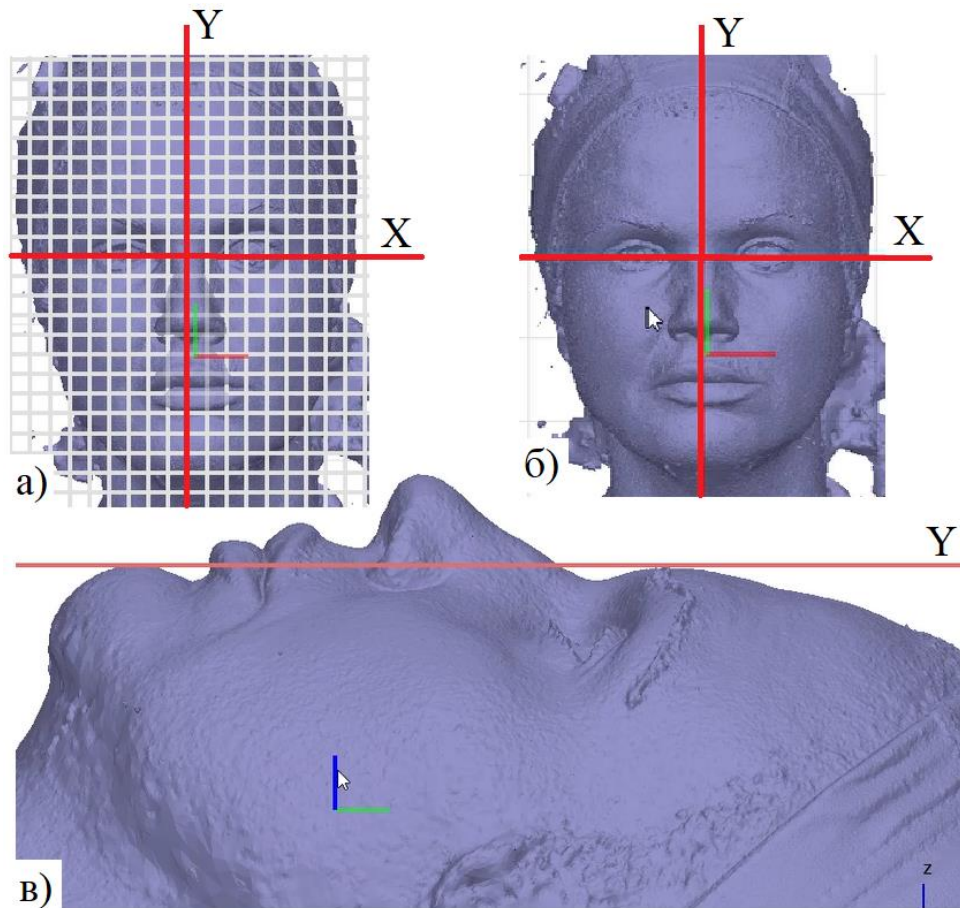


Рисунок 17 – Ориентирование первой модели (естественное состояние) лица по сетке

Представленный алгоритм, хотя и требует трудозатрат из-за необходимости ручного измерения опорных ориентиров на снимках, обеспечивает высокую точность ориентирования, что в свою очередь позволяет избежать систематических ошибок, вызванных неоднозначностью поворота модели вокруг оси Y .

3.4 Методология и результаты оценки точности физиологической нестатичности лица

Оценка измерений по модели, которая была определена для фотограмметрической установки, показывает инструментальную точность предложенного метода получения моделей. Для медицинских исследований не менее

важен показатель, по которому будет определяться вариабельность моделей, вызванная физиологической нестатичностью лица. Проще говоря, диапазон естественной изменчивости принципиально нестатического трехмерного объекта, каким является лицо человека.

Нестатичность оценивалась по тестовой съемке, состоящей из десяти подходов (естественное состояние лица, после выполнения артикуляционных упражнений), представленных в таблице 2.

Таблица 2 – Подходы тестовой съемки

№ съемки	Описание
1, 7–10	естественное состояние лица
2	после выполнения артикуляционных упражнений
3	после смены температуры окружающей среды (нахождение на морозе порядка 10 минут)
4	после жевательных движений
5	после физических упражнений
6	после зажмуривания

Для оценки на лице испытуемого с помощью дермографического карандаша были отмечены 19 точек (Рисунок 18). Расположение точек было выбрано путем изучения подобных исследований [21,92,95,104], а также основываясь на принципах крепления мимических мышц [39]. По этим 19 точкам определяли 44 расстояния, которые рассчитывались в миллиметрах по координатам измеренных на модели ориентиров по формуле 2:

$$s = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (9)$$

После каждой съемки временной интервал составлял примерно 10 минут. Для внешнего ориентирования первой модели используются координаты центров проекции снимков, полученные в ходе калибровки всей съемочной системы со среднеквадратической ошибкой (СКО) не хуже 0,5 мм. Остальные модели ориентируются в системе координат первой модели по опорным устойчивым ориентирам на лице, таких как внутренние уголки глаз, козелки ушей и кончик носа. СКО ориентирования моделей составляет примерно 2 мм. Повторяемость измерений

(ошибка оператора) оценивалась путем десяти последовательных наведений на маркированные точки на модели лица. В медицине редко используется маркировка лица, поэтому дополнительно были измерены немаркированные точки, такие как уверенно опознаваемые элементы лица (родинки, уголки губ и т.д.).

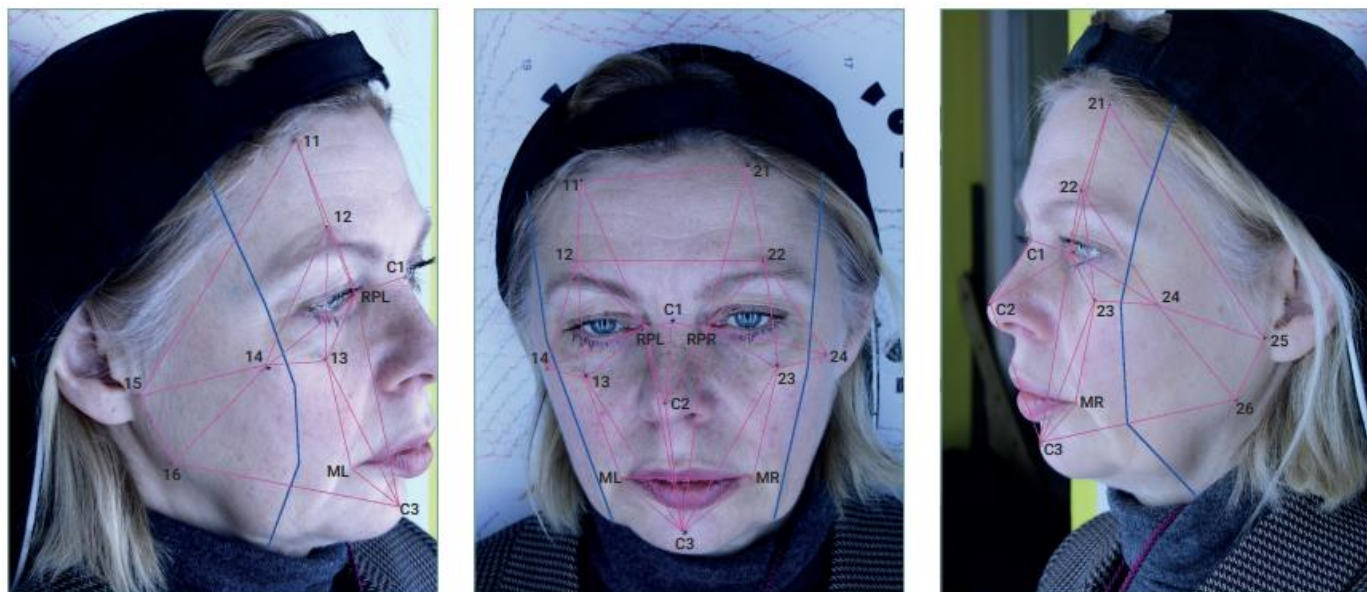


Рисунок 18. Расположение маркированных точек и контрольных отрезков на лице.

Фронтальная область лица выделена синими линиями

Чувствительность метода к естественным изменениям лица (вариабельность метода) определялась двумя способами. Первый способ заключается в сравнении соответственных отрезков, которые вычислялись по координатам измеренных точек на каждой из моделей.

Это позволяет выявить наиболее статичные части лица, но показывает объективные оценки только на измеренных точках. Второй способ – это последовательное вычитание из первой цифровой модели рельефа (ЦМР) лица моделей всей серии, что позволяет определить разницу высот в каждом пикселе модели. Количественные переменные, принятые в медицине, выражаются как среднее значение (Cp_{abc}), среднеквадратическая ошибка (СКО) и коэффициент вариации ($KB\% = (СКО / Cp_{abc})100\%$) [94].

В результате проведенных экспериментов по оценке точности и повторяемости моделей лица, полученных с помощью фотограмметрического метода, были получены следующие результаты:

1. Расхождения измерений на маркированных точках составили в среднем 0,46 мм, СКО = 0,59 мм.

2. Расхождения измерений на немаркированных точках составили в среднем 1,6 мм, СКО = 2,0 мм.

3. Вариабельность была оценена в зависимости от изменения внешних условий. Сравнивались расстояния между точками на лице после различных упражнений и в спокойном состоянии (первая модель) и разности ЦМР лиц, также относительно первой модели. Для оценки использовался коэффициент вариации, который показывает, какую долю составляет средний разброс случайной величины от среднего значения этой величины. Коэффициент вариации измерений отрезков на модели лица показал, что вариабельность промеров моделей лица в среднем не превышает 1%. В некоторых случаях (после зажмуриваний – модель № 6 или жевательных движений – модель № 4) этот показатель достигал 2-3,5%. Очевидно, что это касается тех участков лица, где нагрузки приводят к наибольшим изменениям (Приложение 8, Таблица 5, 6; Рисунок 29).

4. При анализе матриц разности ЦМР лица показатель КВ был выше, так как он охватывал всю поверхность лица (в среднем 3,3%), максимальное значение достигало 4,2% (модель № 4). Тем не менее, этот показатель находится в пределах клинической нормы в 5% (Приложение 8, Таблица 7).

Все определенные показатели коррелируют с результатами, полученными при исследованиях на других фотограмметрических установках, предназначенных для медицинских целей [38,84–86, 96].

Предлагаемая альтернативная схема, в данном случае, отличается от традиционной схемы сравнения моделей с натурными измерениями, проводимых с помощью штангенциркуля. Это связано с тем, что размер пятна от карандаша

составляет примерно 2 мм и имеет неправильную форму, в результате чего наведение на контур по высокодетальной фотографии будет более точным, чем при использовании штангенциркуля. Этот вывод подтверждается в исследованиях прибора Vectra H1 [91], также предназначенного для моделирования лица в медицине.

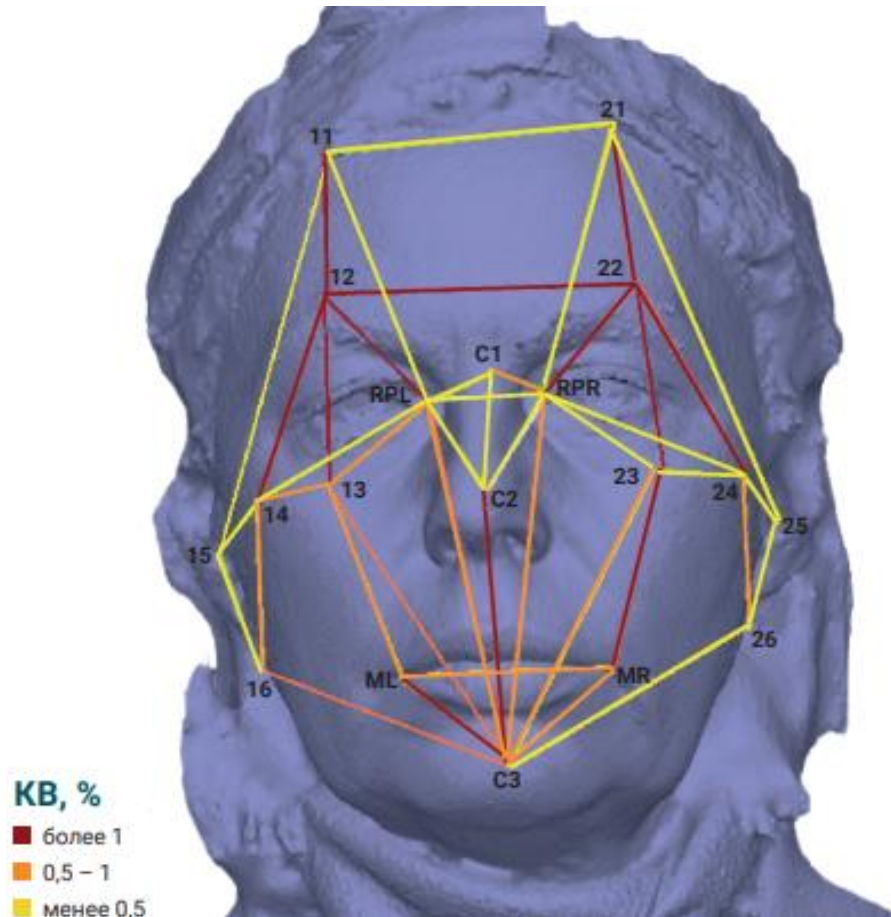


Рисунок 19 – Вариабельность контрольных отрезков в зависимости от расположения на лице

Кроме того, при проведении длительных по времени исследований маркировка лица не используется, а измеряются естественные ориентиры (уголки губ, глаз и т.д.). Определение ошибки наведения на немаркированные точки дает более реалистичные показатели измерений по трехмерной модели.

При анализе контрольных отрезков между маркированными точками были выявлены устойчивые и неустойчивые части лицевых мышц. Полученные данные индивидуальны, однако они согласуются с подобными зарубежными исследованиями

[86,91]. Следовательно, эти точки, расположенные на устойчивых частях лица, могут использоваться в качестве опорных точек для взаимного ориентирования цифровых моделей лиц, полученных на протяжении выполнения всего курса лечебных процедур. Как можно видеть на рис. 19, нижняя часть лица и щеки не попали в зону статистики.

Картина выглядит гораздо более объективно при вычитании ЦМР (Приложение 8, Таблица 7, Рисунок 29), так как именно по нижнему контуру лица и на щеках наблюдаются самые большие расхождения. Это обуславливается физиологическим строением мимических мышц и их возрастными изменениями.

Делая выводы по оценке точности, можно сказать, что фотограмметрический метод получения модели лица, реализованный с помощью 15-камерной установки обладает высокой точностью. Что касается повторяемости и воспроизводимости, СКО составила 0,59/2 мм и 0,47 мм соответственно, что вполне приемлемо для клинической практики [101].

Эти показатели коррелируют со значениями, полученными при исследованиях других фотограмметрических установок, предназначенных для медицинских целей [38,84–86, 90,96,97].

Таким образом, можно заключить, что измерения, полученные с помощью разработанной системы трехмерной визуализации, являются достоверными и воспроизводимыми для оценки рельефов лица взрослых пациентов и могут быть применимы в клинических условиях и для целей доказательной медицины [44].

3.5 Методы оценки асимметрии лица на основе инструментов геопространственного анализа

Лицо человека обладает множеством структурных особенностей, которые могут изменяться под воздействием мимических движений, функциональных изменений в организме, различных заболеваний, хирургических вмешательств и т. д. Для оценки

характеристик, таких как форма лица, пропорции глаз, размер носа, рта, линий бровей, губ, глаз, цвета и текстуры кожи, наличия волос, ранее традиционно использовались прямые изменения непосредственно на лице (например, с применением штангенциркулей) или измерения на двумерных фотографиях [4]. Однако в последнее десятилетие все большее распространение получают методы, основанные на анализе трехмерных моделей лиц [27,31,34,41,64,68,74,85,91,96,105].

В исследовании предложены четыре способа, которые позволяют численно определить асимметрию в трех измерениях и наглядно показать перераспределение мимических мышц, и ориентированы на потребителей, не обладающих навыками работы с геонформационными данными.

Данный комплекс методик может быть успешно применен для диагностики (в том числе – экспертной), при планировании и ведении терапии, а также в доказательной медицине [41] при оценке аппаратных, нитевых и инъекционных манипуляций в эстетической медицине.

1. Объемы и площади поверхности правых и левых половин лица.

По цифровым моделям лица выполняется расчёт площади кожного покрова и объема разных частей лица. Иллюстрация процесса представлена на рисунке 20. Начало системы координат находится в середине отрезка, соединяющего уголки глаз (ось X). При этом плоскость XY (а) проходит через вершины подбородка и лба, ось Y (б) делит лицо пополам. Далее модель (в) обрезается по заранее подготовленному шаблону (используются булевы операции вычитания), что позволяет привести все трехмерные модели к единому покрытию по площади, а также обрезать артефакты на краях фотограмметрических моделей. Одновременно с этим замыкается полигональная сетка модели, что позволяет в дальнейшем проводить измерения не только площадей, но и объемов моделей. После этого удаляются все полигональные сетки, не пересекающиеся с главной моделью (имеющей большее количество граней). В заключительной части работ полученная модель (г) разрезается плоскостью YZ , в результате чего создаются две новые модели – правой и левой стороны лица.

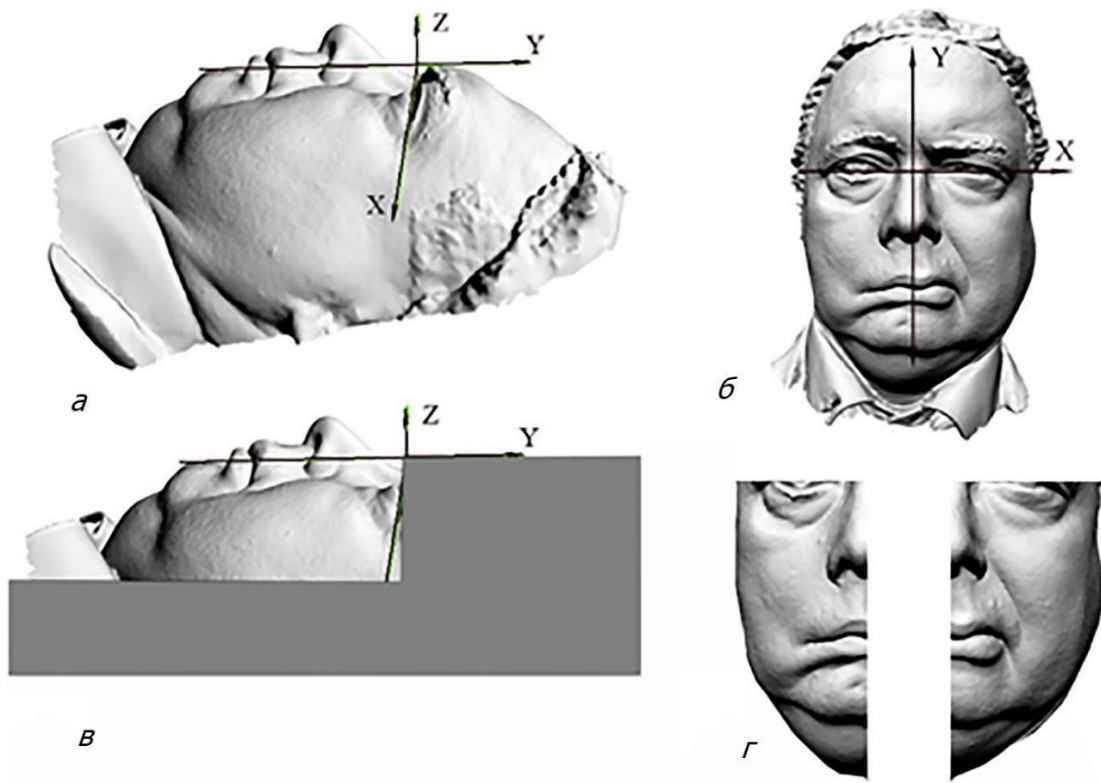


Рисунок 20 – Процесс выделения половин лица по цифровой модели рельефа для вычисления объемов

Далее вычисляются объемы половин лица и площади кожного лоскута, а также процентное соотношение этих значений. Все операции по обрезке и измерениям моделей производятся в Blender 3D [70].

Объем половины лица определяется алгоритмом, в результате которого происходит автоматическое разбиение модели на тетраэдры с использованием триангуляции Делоне. Эти элементарные тетраэдры позволяют полностью повторить геометрию исходной модели.

Тело вычислительной части программы состоит только из команд расчёта по заданным координатам вершин исходной фигуры массива тесселяции Делоне для замощения трёхмерной структуры прямоугольниками. Далее в цикле к вершинам всех созданных прямоугольников применяется основная функция программы, комбинирующей возможные сочетания вершин тетраэдров Делоне и проверяющей, какие четыре из них попадают в одну сферу.

Затем вычисляются объемы тетраэдров (10) и суммируются в общий объем фигуры.

$$V_{\text{пирамиды}} = \pm \frac{1}{6} |a_x a_y a_z b_x b_y b_z c_x c_y c_z| \quad (10),$$

Где a, b, c – координаты векторов, образующих пирамиду.

$V = \sum V_n$, где n – количество элементарных пирамид

Для определения объема трехмерной фигуры использовался алгоритм, предложенный в работе [63], который использует (10). Прежде чем вычислять объем, графические файлы, которые поступают после векторизации разрывов, преобразуются в систему треугольников. Такая предварительная обработка, называемая триангуляцией, широко используется при кодировании сетки, обработке сигналов сетки и редактировании сетки. Сначала определяется направление нормали для треугольника с помощью порядка вершин и правила правой руки.

После получения нормалей строится набор треугольников, соединяя все вершины многоугольника с началом координат. Каждое ребро и начало образуют элементарный треугольник, который является наименьшей единицей для вычислений. Мы определяем площадь каждого элементарного треугольника, как показано ниже: величина этого значения – площадь треугольника, а знак величины определяется путем проверки положения начала координат относительно ребра и направления нормали.

В трехмерном случае элементарной расчетной единицей является тетраэдр. Для каждого треугольника – каждая из его вершин соединяется с началом координат и формируется тетраэдр.

Технология построения была реализована с использованием библиотек Python и Blender API (BPY).

Этот метод позволяет определить убыль мягких тканей пораженной части лица и изменение площади фрагмента кожного покрова. Вычисленные величины в числе

других клинических признаков могут служить основой для принятия решения о выборе метода лечения асимметрии.

2. *Способ визуализации рельефов лица изолиниями с послойной окраской*

Классический метод визуализации рельефа не только метрически, но главным образом, наглядно позволяет оценить право-левостороннюю асимметрию лица. Мышцы лица являются парными (см. Рисунок 1). Это значит, что рисунок изгибов изолиний относительно вертикальной оси для здорового лица должен быть практически симметричен (с учетом естественной вариабельности). Послойная окраска заменяет подписи высот и позволяет определить превышения между различными частями лица, то есть объективно оценивать равномерность распределения рельефов левой и правой сторон лица (Рисунок 21).

Изолинии строятся по ЦМР через равные интервалы, слои с одинаковой высотой подкрашиваются. Начальная высота определяется плоскостью YZ , которая одинакова для всех моделей одного пациента. Данная технология позволяет оценивать асимметрию мышц без необходимости маркировать лицо.

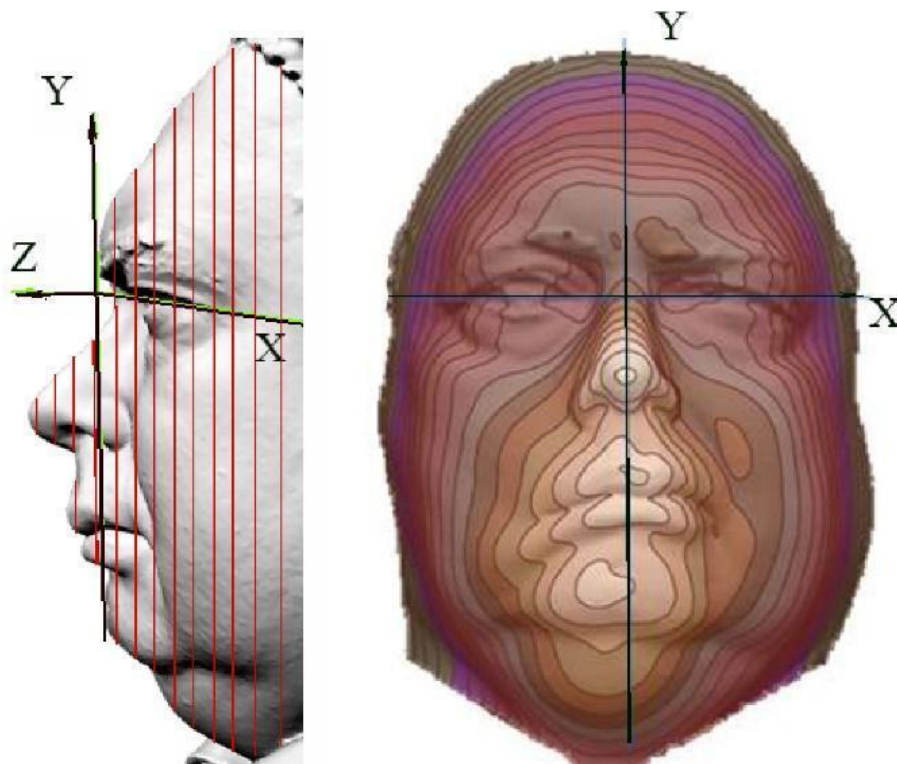


Рисунок 21 – Схема визуализации ЦМР с помощью изолиний и послойной окраски

3. *Количественная оценка динамики мышц лица в разных его областях*

Выполняется путем сравнения моделей мимических проб с исходной моделью, показывает устойчивые области и области активного изменения рельефов лица [100]. Производится путем вычитания ЦМР спокойного состояния лица из ЦМР мимической пробы (Рисунок 22). При вычитании используется метод билинейной интерполяции. Для визуализации результата задается шкала, которая позволяет оценить изменение рельефов лица: определяется локализация и величина изменений.

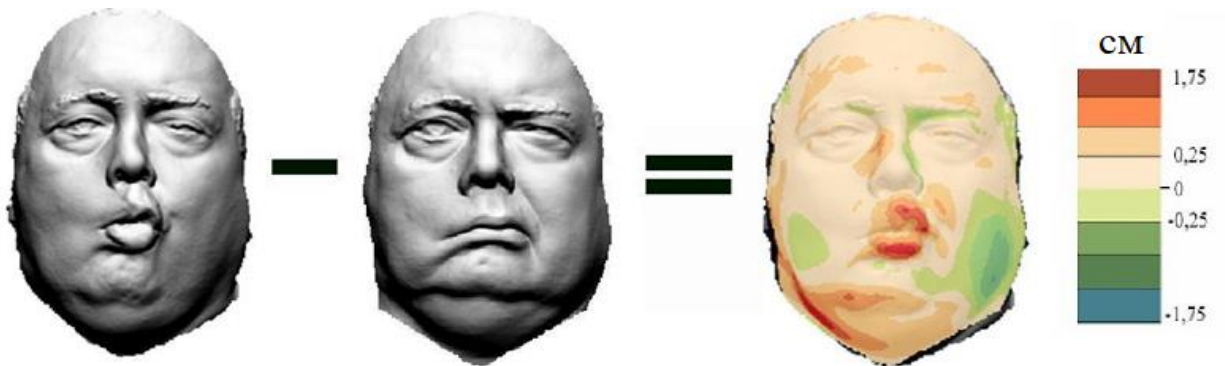


Рисунок 22 – Схема построения модели разности

Изменение цвета при анализе активности мышц изменяется каждые 5 мм. Зеленые – это убыль объемов, красные – прибавление объемов, телесные – без изменения. Ценность этого метода в том, на картограмме можно увидеть не только прогнозируемые (вследствие мимических упражнений) изменения, но и такие, которые в явном виде не видны из-за малости (порядка 5 мм) [52]. Но именно эти изменения позволяют выявить и установить степень выраженности слабости мимических мышц, гиперфункцию мышц здоровой (контрлатеральной) стороны и содружественные движения (например, когда при складывании губ в трубочку напрягаются лобные мышцы, хотя этого не должно быть у здорового человека), что важно для общей оценки динамичности лица.

4. *Количественная оценка микрорельефа лица путем построения морфометрической модели.*

Рельеф лица человека изменяется по направлению мышечных волокон. Из рисунка 1 видно, что вариаций направлений много. Другой особенностью мышц лица

является тот факт, что большинство из них крепятся только с одной стороны к черепу, а другой стороной – к коже. Таким образом, по микрорельефу кожных покровов можно оценить: а) направление смещений, б) силу сокращения.

При обычных методах визуализации рельефов (теневая отмывка или изолинии) выявляются только крупные формы рельефа (выпуклости щек, глубокие носогубные складки и т.п.) на лице. Поэтому для выявления микрорельефа кожных покровов лица предлагается применять морфометрический метод моделирования микрорельефа, описанный в работе И.В. Флоринского [49] – расчет локальных морфометрических величин. Для расчёта локальных кривизн используется цифровая матрица высот. В этой матрице искомый параметр вычисляется для значения высоты каждого пикселя. На основании этих данных строится морфометрическая модель в виде регулярной матрицы, где значения кривизны выделяются с помощью цветовой шкалы.

Поскольку морщины имеют разную ориентацию, опытным путем было определено, что наилучшей величиной для описания микрорельефа лица является Средняя кривизна (*mean curvature, H*). В физическом смысле Средняя кривизна сочетает два механизма аккумуляции потоков, что позволяет выявить мельчайшие изгибы в рельефе в разных направлениях.

$$\frac{1}{2}(k_h + k_v) = -\frac{(1+q^2)r-2pqs+(1+p^2)t}{2\sqrt{(1+p^2+q^2)^3}} \quad (11)$$

$$k_h = -\frac{q^2r-2pqs+p^2t}{(p^2+q^2)\sqrt{1+p^2+q^2}}, \quad k_v = -\frac{p^2r+2pqs+q^2t}{(p^2+q^2)\sqrt{1+p^2+q^2}} \quad (12)$$

$$p = \frac{\partial z}{\partial x}, \quad q = \frac{\partial z}{\partial y} \quad (13)$$

где k_h – горизонтальная кривизна, k_v – вертикальная кривизна, p и q – частные производные высоты.

На рисунке 23 представлен пример результатов вычисления микрорельефа лица пациента. Вычисление горизонтальной и вертикальной кривизны (12) производилось

в QGIS в модуле Grass ⁷. Затем с помощью калькулятора растров определялось среднее значение по формуле (11).

В предыдущих методах оценки динамики асимметрии лица основное внимание уделялось анализу, осуществляемому путем сравнения цифровых моделей рельефа лица, представленных в виде регулярных матриц высот. Этот метод удобен по нескольким причинам:

1. Инструменты анализа рельефа доступны в любой геоинформационной системе (ГИС), что позволяет использовать их в широком круге исследований.



Рисунок 23 – ЦМР, представленная в режиме Hillshaded (слева), и морфометрическая модель средней кривизны (справа).

2. Не требуется специальных программ просмотра для визуализации, что упрощает процесс анализа и делает его более доступным для специалистов с различным уровнем подготовки.

3. Результаты могут быть распечатаны для отчетов и добавлены в документацию, что способствует более эффективному представлению данных.

⁷ GRASS Development Team, 2020. QuntumGIS.Version: 3.10.5–A Coruña. Open-Source Geospatial Foundation. <https://qgis.org>(February 10th, 2020)

3.6 Метод сравнений рельефов по полигональным моделям путем измерения расстояний вдоль нормалей, который учитывает общую сферичность лицевой части головы

Несмотря на очевидные преимущества в простоте вычисления, картограммы изменений имеют ряд критических недостатков. Проецирование данных на плоскость вместо непосредственного отображения на поверхность черепа ограничивает точность моделирования шарообразного объекта. Это приводит к недостаточному учету рельефа лица, что, в свою очередь, может значительно снизить достоверность и точность получаемых результатов.

Достоверность сравнения ЦМР зависит от расположения рабочей плоскости, относительно которой строятся ЦМР. Обычно эта плоскость задается вручную и ориентирована перпендикулярно сагиттальной плоскости черепа, однако она может иметь отклонение от вертикальной. Плоскость строится по двум наиболее выступающим точкам: кончику подбородка и линии бровей (Рисунок 24).

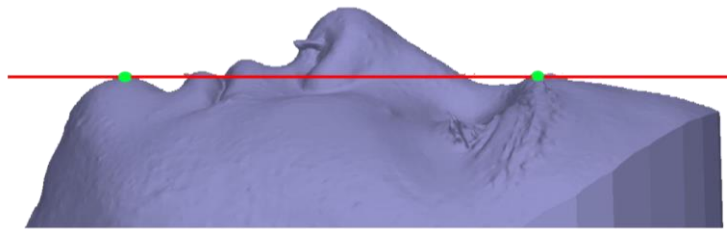


Рисунок 24 – Расположение рабочей плоскости относительно геометрии лица пациента

Чтобы исключить отрицательные значения, плоскость опускается на фиксированную величину: для женщин — 10 см, для мужчин — 14 см. Сагиттальная плоскость строится относительно положения глаз, проходя через середину надпереносья и разделяя лицо на две симметричные половины. Однако точно определить сагиттальную плоскость невозможно из-за отсутствия четких ориентиров на лице, что усугубляется при анализе пациентов с выраженной асимметрией. Возникает неопределенность положения рабочей плоскости

Очевидно, что поверхность лица (от уха до уха) не следует рассматривать как плоскость, так как кривизну объекта можно игнорировать только в том случае, если размеры участка не превышают 0,1 от радиуса картографируемого объекта. В реальности изменения рельефов лица происходят перпендикулярно нормали к поверхности головы (Рисунок 25).

На рисунке черным цветом изображена форма измеряемого объекта, зеленым – форма эталонного объекта, красным – отклонение моделей перпендикулярно рабочей плоскости, синим – отклонение, определенное вдоль нормали к поверхности измеряемого объекта.

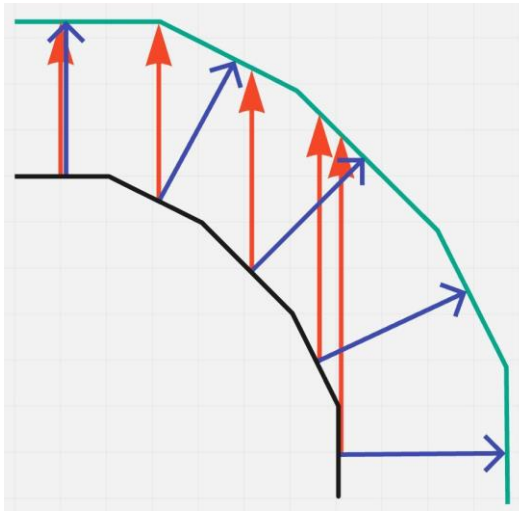


Рисунок 25 – Методы измерения изменений: вдоль заданного направления (красный), вдоль нормали (синий)

В заключении, растровый анализ не позволяет получить объемы мышечной массы по ЦМР, построенной на плоскости.

Поэтому в исследовании предложен метод оценки изменений, который позволяет выявить и визуализировать различия, максимально приближенные к физиологической правдоподобности [52,101].

Сравнение рельефов по полигональным моделям путем измерения расстояний вдоль нормалей.

Сравнение геометрических отклонений между двумя моделями осуществляется путем измерения расстояний, проецируемых от точек одной модели на начальную

модель в заданном направлении. Каждая измеренная вершина определяется координатами на новой (измеряемой) модели и на исходной модели, при этом положение на исходной модели определяется направлением проекции вдоль нормали [101].

Полученные величины изменений отображаются на трехмерной модели в виде цветовой карты диапазонов, что позволяет оценить изменения рельефов лица. Результаты сравнения можно интуитивно анализировать как глобально, так и локально, добавляя аннотации в определенных позициях. Отклонения «+ (плюс)» или «- (минус)» указывают на увеличение или уменьшение площади или особенности измеренных данных.

Для анализа предложенного решения использовались три съемки пациента, у которого был диагностирован парез (онемение) правой части лица (на иллюстрациях в зеркальном отображении – левая часть изображения). В каждом сеансе пациент выполнял три мимические пробы. Модели строились каждые 14 дней.

При построении трехмерных моделей использовалось среднее качество, соответствующее второму уровню заглубления исходных снимков. Плотность модели в среднем составляет порядка $0,08 \text{ мм}^2$ на полигон или около 110 точек на 1 мм^2 , а матрица высот имеет разрешение около 0,27 мм. Использование более высоких точностей при работе с исходными изображениями требует значительно больше вычислительных ресурсов, что увеличивает время обработки. Однако в результате итоговые продукты могут содержать больше шума без улучшения качества рельефа.

Для определения изменений рельефов по 3D моделям использовалась программная платформа Geomagic Control X⁸ для контроля геометрии и качества работы с 3D моделями. Для сравнения методов матрицы разности ЦМР строились в QGIS. Цветовая шкала и диапазоны задавались аналогично матрицам разности. На

⁸ <https://iqb.ru/catalog/software/geomagic-control-x/>

рисунке 26 представлены цветные карты изменений рельефов лица, выполненные двумя методами.

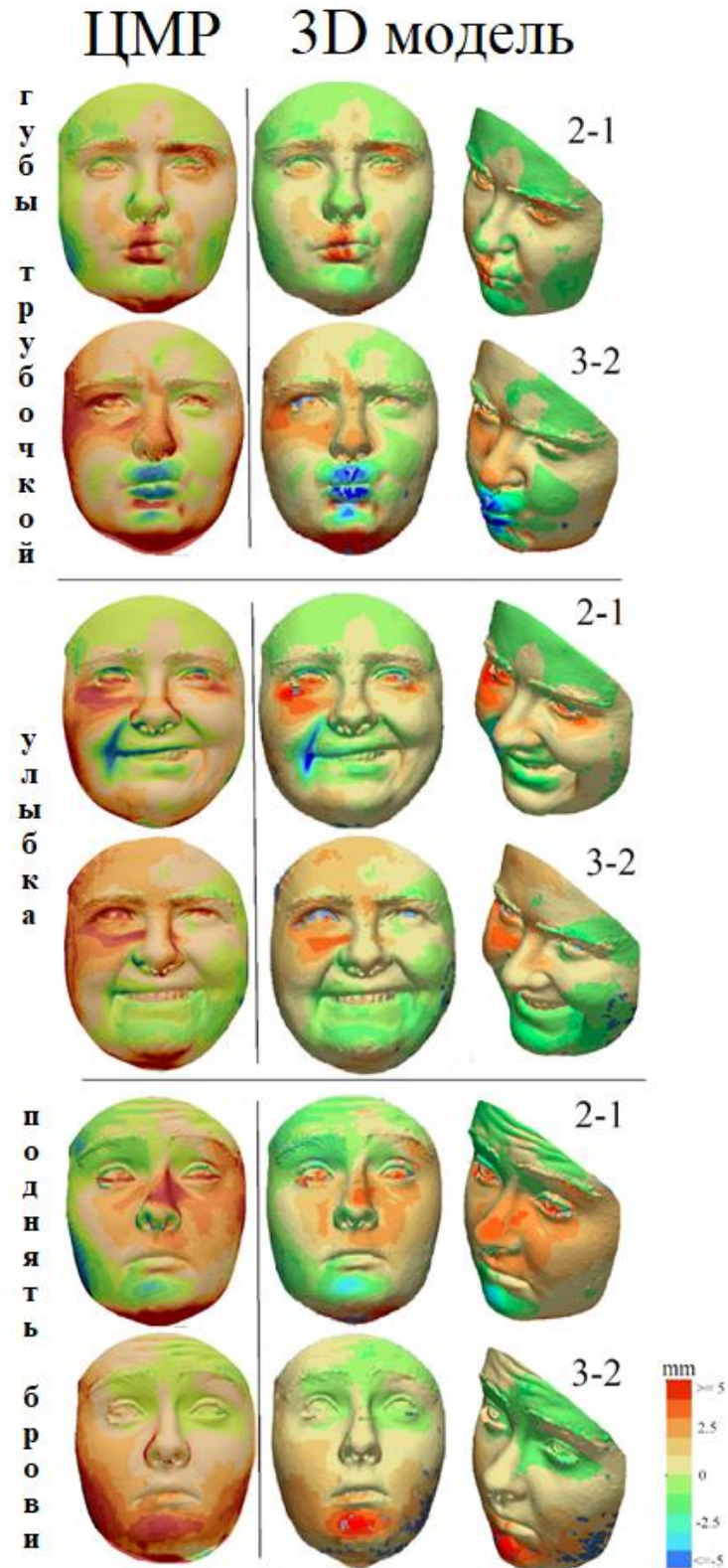


Рисунок 26 – Сравнение двух методов оценки рельефов

Для иллюстрации определения изменений рельефов лица по ЦМР и трехмерной модели использовались три мимические пробы: губы трубочкой, улыбка и поднятие бровей. Каждая проба выполнялась трижды с интервалом в 14 дней. Сеансы обозначены цифрами 1, 2 и 3. Для мониторинга лечения производилось последовательное вычитание: из модели второго сеанса вычиталась модель первого (2-1), а затем из модели третьего сеанса вычиталась модель второго (3-2).

Визуально очевидно, что изменения в наиболее плоской части лица — на лбу — определялись одинаково обоими методами. Однако в щечно-височной зоне, на крыльях носа и скулах, где имеются сильные перегибы рельефа, результаты различаются. Особенно эти различия заметны при поднятии бровей.

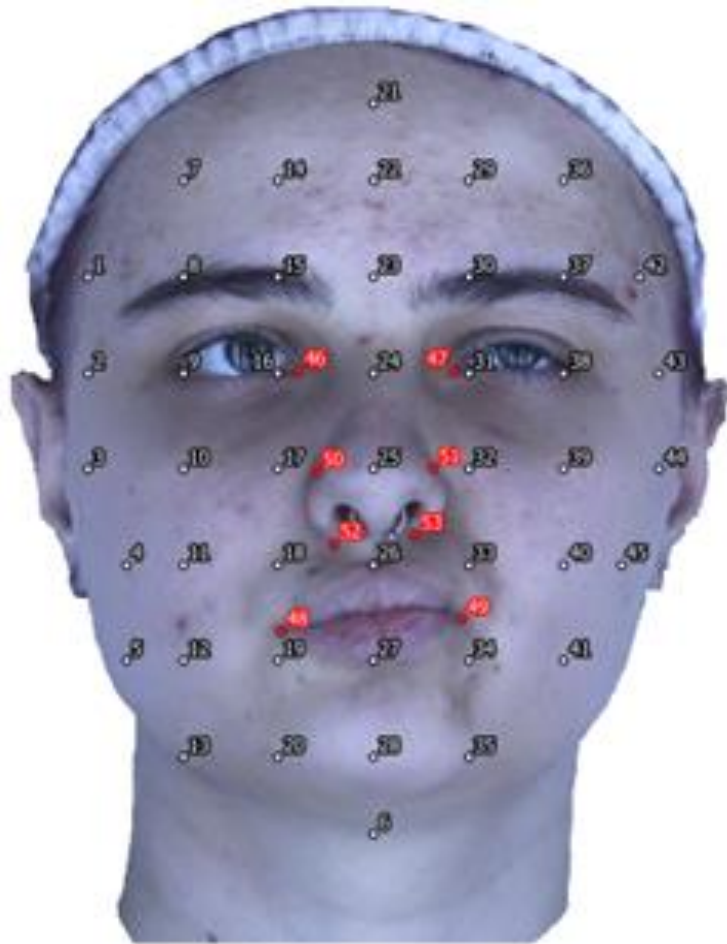


Рисунок 27 – Расположение точек для сравнения двух методов оценки изменений (*D*) рельефов лица: точки регулярной сетки обозначены белым цветом, а ключевые точки обозначены красным цветом.

Также для сравнения двух методов оценки изменений (D) рельефов лица был задан массив из 54 точек (Рисунок 27). Из-за отсутствия маркировки, 45 точек были набраны по регулярной сетке (обозначены белым цветом) и 8 точек были измерены на ключевых (обозначены красным цветом), надёжно опознаваемых участках лица. Для всех этих точек были получены значения как с матрицы разности, так и с модели. Сами модели, можно увидеть на рисунке 26, первый ряд.

Стандартное отклонение (δ) на точках находится в пределах 2 мм (Таблица 3). Значения менее δ соответствуют точкам, расположенным во фронтальной зоне лица с наименьшими перегибами.

Эти значения могут указывать на систематическую ошибку, возникающую в результате интерполяции при построении ЦМР и 3D модели. Ошибки в диапазоне от δ до 2δ относятся к точкам, расположенным на краю лица или на носу. Их распределение по площади лица зависит от выполняемой мимической пробы.

Таблица 3 – Основные оценочные параметры

Мимическая гримаса	Губы трубочкой		Улыбка		Поднять брови	
	2-1	3-2	2-1	3-2	2-1	3-2
Max(-) (DDEM-DMod), мм	-6,0	-1,3	-3,9	2,0	5,2	1,5
Max(+) (DDEM-DMod), мм	3,4	9,3	7,2	8,7	7,2	9,4
δ (DDEM-DMod), мм	1,3	1,7	1,4	1,4	1,6	1,8

В массиве также имеются грубые измерения с значениями более 2δ . На всех графиках эти ошибки находятся в одних и тех же местах (Рисунок 28). Пик слева – это точка №6, расположенная на шее. Пики справа относятся к точкам (58-53), которые были измерены в области носогубных складок и крыльев носа.

Вокруг этих точек формируются локальные области выпуклых или вогнутых участков на лице, которых на самом деле нет. Таким образом, предположение о том, что ЦМР не вполне корректно отражает рельеф лица, является обоснованным.

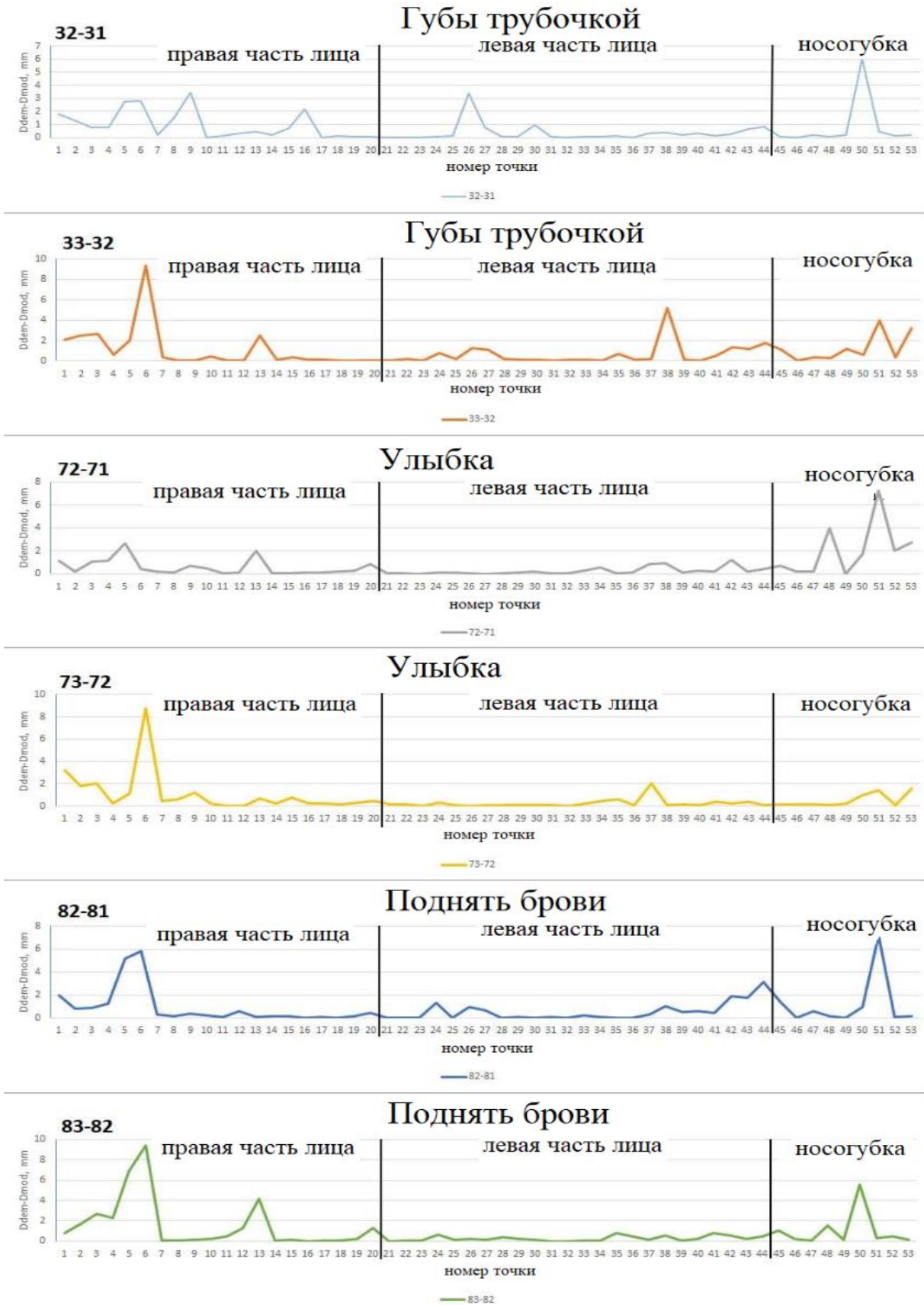


Рисунок 28 – График ошибок в определении высот по матрице разности

Оценка изменений рельефов лица, вычисленных по 3D-моделям

На данном этапе пока не существует универсальных общепринятых в неврологии и эстетической медицине показателей, по которым бы оценивался результат лечения по цифровым моделям. С появлением нового метода сравнения для оценки можно предложить следующие параметры, которые могут служить числовой мерой оценки лечения заболевания:

Min: Наибольшее отрицательное изменение. Описывает максимальное уменьшение объемов.

Max: Наибольшее положительное изменение. Описывает максимальное увеличение объемов.

Mediana — это «серединное» значение. В данном случае этот параметр помогает оценить, каких значений больше - положительных или отрицательных.

Average - среднее значение по модулю. Показывает в среднем величины изменений, происходящие в рельефе лица независимо от знака.

Можно предложить δ - стандартное отклонение всех значений в качестве общей меры изменений, произошедших во время лечения. Уменьшение стандартного отклонения будет показывать снижение эффекта изменения рельефов.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (D_i - A)^2} \quad (14)$$

где D - величина изменений;

n - количество измерений;

A - среднее арифметическое значений всех изменений.

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i \quad (15)$$

Оценка изменений рельефов лица производилась по всем вершинам моделей D . Таблица 4 показывает, что в промежутке между первым и вторым сеансами наибольшее по площади изменение рельефов можно было увидеть при выполнении пробы «поднять брови». В промежутке между вторым и третьим сеансами эффективность лечения более всего заметна при выполнении пробы «Губы

трубочкой». Параметр медиана для всех проб в промежутке между вторым и третьим сеансами увеличивается, а это значит, что происходит общее увеличение объемов.

Таблица 4 – Оценка изменений рельефов лица путем сравнения 3-D моделей

Номера сеансов	Название пробы	Min, мм	Max, мм	mediana, мм	average, мм	δ, мм
1-2	Губы трубочкой	-2,5	6,4	0,14	0,73	0,97
2-3		-7,5	10,6	0,72	1,03	1,40
1-2	Улыбка	-7,3	5,6	0,20	0,79	1,12
2-3		-3,1	6,5	0,50	0,86	1,05
1-2	Поднять брови	-3,6	6,5	0,28	1,14	1,37
2-3		-1,7	5,6	0,44	0,65	0,88

Безусловно, что представленная выборка мала, чтобы выводить определенные статистические закономерности. Тем не менее, данный метод оценки с визуальным контролем по моделям, позволит в дальнейшем численно оценивать результаты лечения пациентов.

Сравнительный анализ двух методов (трехмерной модели и ЦМР) визуализации изменений рельефа лица демонстрирует основные преимущества использования трехмерных полигональных моделей, которые заключаются в повышении оперативности обработки благодаря сокращению числа операций в алгоритме, увеличению информативности за счет наглядного трехмерного отображения, позволяющего анализировать изменения с различных ракурсов, особенно в боковых частях лица и подбородке, а также в минимизации ошибок, вызванных пересчетом модели лица в цифровую матрицу рельефа [101].

Вывод по главе 3

1. В данной главе предложена комплексная методика анализа асимметрии лица человека, которая включает в себя описание используемой аппаратной части в виде фотограмметрической установки и представление полученных результатов с использованием высокоточных моделей поверхности лица.

2. Измерения, полученные с помощью разработанной системы трехмерной визуализации, являются достоверными и воспроизводимыми для оценки рельефов лица взрослых пациентов и могут быть применимы в клинических условиях и для целей доказательной медицины

3. Благодаря практическому тестированию, из ряда предложенных способов оценки были выделены те, которые понятны врачам и наилучшим образом позволяют оценить состояние пациента.

4. Предложенная методика анализа асимметрии лица является эффективным и практичным инструментом для оценки состояния пациентов в клинических условиях.

5. Использование фотограмметрической установки и высокоточных моделей поверхности лица позволяет проводить объективную и точную оценку асимметрии лица, что является важным фактором при диагностике и лечении различных заболеваний и состояний.

6. Предложенный метод сравнений рельефов по полигональным моделям путем измерения расстояний вдоль нормалей, который учитывает общую кривизну человеческого лица, демонстрирует положительные перспективы, включая повышение оперативности обработки, увеличение информативности и минимизацию ошибок, что усиливает его практическую ценность в клинической практике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного диссертационного исследования достигнута поставленная цель – разработаны методы и алгоритмы создания и сравнения одновременных цифровых моделей лица человека, полученных стереофотограмметрическим способом. Разработанные методы включают в себя: методику фотограмметрической съемки с целью получения моделей лица, алгоритмы ориентирования одновременных моделей, способы оценки асимметрии лица и конструкцию съемочной системы.

Особое внимание уделено разработке алгоритмов фотограмметрической обработки данных, включающих методы квазиглобального отождествления соответственных точек, интерполяции облаков точек и текстурирования моделей. Предложен инновационный алгоритм ориентирования одновременных моделей в единую систему координат, основанный на использовании устойчивых анатомических ориентиров, таких как внутренние уголки глаз. Данный метод устраняет проблему несоответствия поз пациента при пролонгированном мониторинге и обеспечивает корректное сравнение динамических изменений рельефа лица.

Экспериментальные исследования продемонстрировали высокую точность и воспроизводимость результатов. Методика оценки асимметрии, основанная на анализе объемов половин лица и послойной визуализации рельефа, позволила выявить микроизменения в мягких тканях с точностью, соответствующей клиническим требованиям. Разработанные способы сравнения моделей вдоль нормалей с учетом кривизны поверхности обеспечили объективную интерпретацию данных даже при значительной нестатичности лицевых мышц.

Так же в рамках диссертационных исследований была разработана специализированная многокамерная фотоустановка для съемки лиц, которая обеспечивает одномоментное получение высококачественных изображений с разных

ракурсов. Эта система позволяет минимизировать влияние движений пациента и внешних факторов на итоговую модель, благодаря одновременной съемке с нескольких точек. Многокамерная установка обеспечивает равномерное покрытие снимками всех участков лица, что критически важно для анализа сложных поверхностей и мелких деталей. В сравнении с традиционными методами, такими как последовательная съемка одной камерой или использование ручных 3D-сканеров, многокамерная система демонстрирует значительно более высокую точность, скорость работы и удобство для пациента. Таким образом, разработанная установка представляет собой оптимальное решение по сбору пространственных биометрических данных, соответствующее требованиям медицинских исследований и практического применения.

В ходе диссертационных исследований была выполнена калибровка сконструированной многокамерной установки, в результате которой были получены элементы внешнего и внутреннего ориентирования всех камер, а также проведена тестовая съемка маркированного бюста (гипсовой головы) для оценки точности определения координат точек объекта. Эти исследования подтвердили эффективность разработанной методики.

Ключевым достижением работы является подтверждение высокой востребованности разработанных технологий в медицинской практике. Точная оценка рельефа лица, реализованная через синхронную съемку и алгоритмы обработки данных, стала инструментом для диагностики патологий, мониторинга реабилитации и оценки результатов хирургических вмешательств. Алгоритмы количественной оценки асимметрии, интегрированные в систему, предоставляют врачам объективные метрики, что особенно важно при работе с динамическими изменениями, такими как парезы лицевого нерва.

Практическая ценность и востребованность работы подтверждена внедрением технологии в медицинскую практику профильных учреждений, включая кафедру кожных болезней и косметологии РНИМУ им. Н.И. Пирогова и клинические базы

Первого МГМУ им. Сеченова. Апробация методики в условиях реального клинического применения показала ее целесообразность и эффективность для диагностики парезов лицевого нерва, оценки результатов пластических операций и динамического мониторинга реабилитации пациентов.

Результаты исследований отражены в публикациях в рецензируемых научных журналах, включая издания, рекомендованные ВАК и Scopus, а также представлены на международных конференциях, таких как International Workshop PSBB23 и PDA24.

Перспективным направлением является интеграция методов машинного обучения для автоматизации анализа микрорельефа и прогнозирования динамики изменений. Это позволит не только повысить точность оценки, но и расширить спектр применения технологии — от персонализированной косметологии до реабилитационной медицины. Дальнейшая работа будет сосредоточена на адаптации системы для мобильных устройств, что обеспечит ее доступность для широкого круга медицинских учреждений.

Проведенная работа вносит значительный вклад в развитие методов медицинской визуализации, расширяя инструментарий доказательной медицины и повышая качество диагностики заболеваний, связанных с асимметрией лица. Разработанные решения открывают новые возможности для междисциплинарных исследований на стыке биометрии, компьютерного зрения и клинической практики.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Morphing — трансформация — технология в компьютерной анимации, визуальный эффект, создающий впечатление плавной трансформации одного объекта в другой.

UV–маппинг — UV–преобразование или развёртка в трёхмерной графике — это соответствие между координатами на поверхности трёхмерного объекта (X,Y,Z) и координатами на текстуре (U,V).

ЭВО — элементы внешнего ориентирования

Depth map — Карта глубины — это изображение, где для каждого пикселя вместо цвета хранится его расстояние до камеры

ЦМР — цифровая модель рельефа в виде регулярной матрицы

ПО — программное обеспечение

СК – система координат

СКО — среднее квадратические отклонения

ЦФС — цифровая фотограмметрическая станция

JPEG — (англ. Joint Photographic Experts Group) – формат представления графических данных

TIN — (англ. Triangulated Irregular Network) — нерегулярная триангуляционная сеть неперекрывающихся треугольников

ZIP — формат сжатия данных и архивации файлов

3D — (англ. 3–Dimensional) — трёхмерный

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альфарес Мухаммад Абдульмунеам. Разработка и исследование фотограмметрических методов определения геометрических характеристик поверхности биологических объектов [текст]: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.34 / Альфарес Мухаммад Абдульмунеам. – М., 2010. – 111 с.
2. Ангелова, С.И. Модели, созданные с помощью сканирования и компьютерного моделирования [текст] / С.И. Ангелова // Роль и место информационных технологий в современной науке. – 2016. – С. 193–196.
3. Бацева, Д.А. Пассивные технологии моделирования головы человека [текст] / Д.А. Бацева, Ю.С. Белов // Научное обозрение. Технические науки. – 2017. – № 2. – С. 11–14.
4. Блинов, Н.Н. Биомедицинские изображения в современной медицине [текст] / Н.Н. Блинов // Медицинская техника. – 2010. – № 5. – С. 5–9.
5. Бойко, Е.А. Оценка и коррекция нарушений эстетической функции лица при хирургических заболеваниях челюстно-лицевой области [текст] / Е.А. Бойко, Д.А. Аббасова, Р.Р. Ахмеров // Институт стоматологии. – 2008. – № 1. – С. 42–43.
6. Бойцев, А.А. Детекция ключевых точек лица с помощью капсульных нейронных сетей [текст] / А.А. Бойцев // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2023. – Т. 23. – № 3. – С. 506–518.
7. Гордеев, Д.В. Сегментация модели лица на статические и динамические области по трехмерной видеопоследовательности [текст] / Д.В. Гордеев, Н.Ф. Дышкант // Математические методы распознавания образов. – 2009. – Т. 14. – № 1. – С. 329–332.
8. Гречишникова, Ю.В. Диагностические возможности компьютерной томографии с применением 3D-технологий при судебно-медицинской экспертизе [текст] / Ю.В. Гречишникова // Судебная медицина: вопросы, проблемы, экспертная практика. – 2020. – С. 144–149.

9. Гусев, А.В. Искусственный интеллект в медицине и здравоохранении [текст] / А.В. Гусев, С.Л. Добридюк // Информационное общество. – 2017. – № 4–5. – С. 78–93.
10. Дрыга Данила Олегович. Разработка методики съёмки объектов культурного наследия для информационных систем музеев Российской Федерации [текст]: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.34 / Дрыга Данила Олегович. – М., 2020. – 138 с.
11. Дубовик, Е.И. Современные представления об асимметриях лица и причинах их возникновения [текст] / Е.И. Дубовик // Альманах мировой науки. – 2015. – № 1–1. – С. 50–54.
12. Епифанов, С.А. Компьютерное моделирование в восстановительной хирургии средней зоны лица [текст] / С.А. Епифанов // Медицинский вестник Юга России. – 2014. – № 4. – С. 120–124.
13. Епифанцев, Б.Н. Об информативности признака асимметрии лица в задачах распознавания операторов эргатических систем [текст] / Б.Н. Епифанцев, А.А. Архипов // Автометрия. – 2015. – Т.51. – N. 4. – С. 31–39.
14. Епифанцев, Б.Н. Об эффективности признака асимметрии изображения лица в задачах идентификации оператора человеко–машинных систем [текст] / Б.Н. Епифанцев, А.А. Архипов // Динамика систем, механизмов и машин. – 2014. – № 4. – С. 21–24.
15. Зарецкий, А.П. Имитация динамики распределения поверхностной температуры лица при транзиторных ишемических атаках [текст] / А.П. Зарецкий, К.С. Митягин, И.Б. Прохоров // Материалы XII международной научной конференции "Системный анализ в медицине" (САМ 2018). – 2018. – С. 34–36.
16. Захаров, В.В. Возрастная динамика когнитивных функций у лиц 50–85 лет [текст] / В.В. Захаров // Успехи геронтологии. – 2017. – Т. 30. – № 3. – С. 450.
17. Калантаров, Е.И. Развитие процессов фотограмметрии проективными методами [текст] / Е.И. Калантаров, Д.А. Никитин // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2003. – № 1. – С. 95–104. – EDN VKABMF.

18. Калмина, О.А. 3D–реконструкция анатомических структур в системах виртуальной реальности [текст] / О.А. Калмина, О.В. Калмин, Р.А. Сингатулин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Медицинские науки. – 2010. – № 3. – С. 22–28.
19. Книгавко, Ю.В. Компьютерное планирование пластических вмешательств методом деформации полигональной модели лица человека [текст] / Ю.В. Книгавко // Восточно–Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 1. – № 2 (61). – С. 11–16.
20. Князьков, А.С. Использование технологий 3D-сканирования и моделирования при производстве портретных экспертиз в отношении лиц, изменивших анатомические признаки внешнего облика [текст] / А.С. Князьков, В.В. Овсянников // Алтайский юридический вестник. – 2022. – № 3 (39). – С. 107–113.
21. Кожевникова, М.И. Визуализация рельефа тела человека методом стереофотограмметрии и количественная оценка его параметров [текст] / М.И. Кожевникова, А.П. Михайлов, Т.Н. Скрыпицына, Е.Р. Иванова // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. – 2012. – Т. 154. – № 10. – С. 525–528.
22. Кожевникова, М.И. Возможности и особенности современного этапа применения компьютерных технологий в медицине [текст] / М.И. Кожевникова, Т.Н. Скрыпицына // Патогенез. – 2012. – Т. 10. – № 1. – С. 44–51.
23. Колесникова, А.С. Особенности асимметрии лица человека [текст] / А.С. Колесникова, Д.А. Гильметдинова // В мире научных открытий. – 2020. – С. 210–212.
24. Кровопусков, А.В. Порядок обработки и форма хранения данных в системе трехмерного лицевого сканирования камера–проектор на основе структурированных световых шаблонов [текст] / А.В. Кровопусков, А.А. Рындин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – Т. 6. – № 3. – С. 6–9.

25. Кулагина, Г.В. Исследование влияния билатеральной симметрии и асимметрии лица на фотореалистичность трёхмерной модели человека [текст] / Г.В. Кулагина // Неделя науки СПбПУ. – 2016. – С. 101–104.
26. Кускова, В.А. Применение метода трехмерной фотограмметрии при собирании следов на месте происшествия и решении некоторых экспертных задач [текст] / В.А. Кускова, А.С. Цибирева // Следственная деятельность: проблемы, их решение, перспективы развития. – 2022. – С. 324–330.
27. Кухарев, Г.А. Применение цифровой лицевой антропометрии [текст] / Г.А. Кухарев, Н. Казиева // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2019. – Т. 19. – № 2. – С. 255–270. DOI:10.17586/2226-1494-2019-19-2-255-270.
28. Лаврова, Е.А. Исследование метода автоматической оценки степени асимметрии лица человека на видеоизображении [текст] / Е.А. Лаврова // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии. – 2018. – С. 62–65.
29. Лесняков, А.Ф. Возможности применения технологии 3D-сканирования для объемной визуализации в пластической хирургии лица [текст] / А.Ф. Лесняков, М.А. Волох, М.А. Кирилловский // Вестник Северо-Западного государственного медицинского университета им. И.И. Мечникова. – 2016. – Т. 8. – № 1. – С. 7–12.
30. Максимова Юлия Сергеевна. Антропологическая виртуальная реконструкция [текст]: выпускная квалификационная работа бакалавра: 09.03.03 / Максимова Юлия Сергеевна. – К., 2023. – 78 с.
31. Манак, Т.Н. Применение 3D-модели лица с улучшенной внутренней структурой в комплексном лечении пациента с патологией фронтального отдела зубной дуги [текст] / Т.Н. Манак, М.И. Гагарина // Современная стоматология. – 2020. – № 4 (81). – С. 31–37.
32. Марянян, А.Ю. Современные подходы и методы диагностики фетального алкогольного синдрома и фетального алкогольного спектра нарушений [текст] /

- А.Ю. Марьян, Ф.С. Малков, А.В. Аталян // Современные проблемы науки и образования. – 2019. – № 4. – С. 146–146.
33. Меховский, В.А. Разработка методов автоматизации фотограмметрических процессов [текст]: дис. ... канд. техн. наук / В.А. Меховский. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2023. – 150 с.
34. Небаба, С.Г. Применение алгоритма формирования индивидуальной трехмерной модели человеческого лица в системе распознавания личности по изображению лица [текст] / С.Г. Небаба, А.А. Захарова // Информатика и автоматизация. Труды СПИИРАН. – 2016. – С. 310–313. DOI:10.15622/sp.52.8.
35. Панина, Н.Г. Современные представления об асимметрии лица [текст] / Н.Г. Панина, А.И. Перепелкин, А.И. Краюшкин // Уральский медицинский журнал. – Екатеринбург, 2014. – Т. 121. – № 7. – С. 20–25.
36. Полякова, А.В. К вопросу о перспективах применения 3D-технологий в судебно-экспертной деятельности [текст] / А.В. Полякова // Международные и национальные тенденции и перспективы развития судебной экспертизы. – 2020. – С. 226–232.
37. Полякова, М.В. Анализ точности совмещения виртуальных моделей лица и беззубых челюстей пациента различными способами [текст] / М.В. Полякова, А.Н. Ряховский // Институт стоматологии. – 2012. – № 3. – С. 64–67.
38. Постолаки, А.И. Симметрия и асимметрия в гармонии лица и зубных рядов [текст] / А.И. Постолаки // Успехи современного естествознания. – 2015. – № 9–3. – С. 461–466.
39. Радлански, Р. Лицо. Атлас клинической анатомии [текст] / Р. Радлански, К. Вескер. – М.: Квинтэссенция, 2014. – 348 с.
40. Рогозинский, Г.Г. Автоматизация процесса получения 3D-модели лица [текст] / Г.Г. Рогозинский, Д.А. Татаренков, А.Н. Бучатский // Актуальные вопросы развития индустрии кино и телевидения в современной России. – 2019. – С. 55–60.

41. Ряховский, А.Н. Новые стандарты клинического 3D моделирования [текст] / А.Н. Ряховский // Цифровая стоматология. – 2016. – Т. 5. – № 2. – С. 4–10.
42. Ряховский, А.Н. Система 3D–визуализации лица и зубных рядов [текст] / А.Н. Ряховский, В.В. Левицкий // Панорама ортопедической стоматологии. – 2008. – № 1. – С. 2–4.
43. Семенов, А.Е. Практическое применение технологий компьютерного зрения в решении задач распознавания, восстановления 3D, сшивки карт, точного целеуказания, счисления пути и навигации [текст] / А.Е. Семенов, Е.В. Крюков, Д.П. Рыкованов, Д.А. Семенов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 3 (104). – С. 92–102.
44. Скрыпицына, Т.Н. Особенности применения и оценка точности фотограмметрического метода в доказательной медицине [текст] / Т.Н. Скрыпицына, Д.О. Дрыга, И.Г. Журкин, А.В. Уколова, Г.А. Можаров, А.А. Соломин // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2023. – Т. 67. – № 4. – С. 32–44. DOI:10.30533/GiA-2023-019.
45. Скрыпицына, Т.Н. Стереофотограмметрические методы для оценки биометрических параметров тела человека [текст] / Т.Н. Скрыпицына, М.И. Кожевникова // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2016. – № 2. – С. 102–108.
46. Скрыпицына, Т.Н. Использование фотограмметрических данных для оценки морфометрических параметров поверхности тела человека [текст] / Т.Н. Скрыпицына, Е.Е. Спиридонова // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2018. – Т. 62. – № 5. – С. 507–513. DOI:10.30533/0536-101X-2018-62-5-507-513.
47. Снопков, А.В. 3D–сканеры на современном этапе [текст] / А.В. Снопков // Наука XXI века. – 2016. – С. 82–86.
48. Спижевой, А.С. Автоматическое определение статических и динамических выражений лица человека по изображениям и видео [текст] / А.С. Спижевой, Д.В. Баландин // Информационные системы и технологии ИСТ–2020. – С. 1078–1086.

49. Суровых Сергей Владимирович. Комбинированное хирургическое лечение больных с невропатией лицевого нерва [текст]: автореф. дис. ... канд. мед. наук: 14.01.13 / Суровых Сергей Владимирович. – М., 2008. – 25 с.
50. Сушенцов Владимир Леонидович. Автоматизация формирования облака точек на основе данных, полученных методом фотограмметрии с помощью программного обеспечения MESHROOM [текст]: магистерская диссертация: 09.04.01 / Сушенцов Владимир Леонидович. – б. и., 2023.
51. Тарасов, А.С. Реконструкция трехмерной модели человека по единственному изображению [текст] / А.С. Тарасов, В.В. Кугуракова // Электронные библиотеки. – 2021. – Т. 24. – № 3. – С. 485–504.
52. Уколова, А.В. Особенности мониторинга динамики лица человека методом стереофотограмметрии [Текст] / А.В. Уколова, Д.О. Дрыга, Т.Н. Скрыпицына // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. – 2024. – Т. 2. – № 9. – С. 149-155.
53. Ульянов, Р.Д. Компьютерное зрение. Методы распознавания лиц [текст] / Р.Д. Ульянов // Дни науки студентов Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых. – 2020. – С. 333–348.
54. Фарбер Феликс Михайлович. Патогенетические методы терапии при периферическом параличе лицевого нерва [текст]: автореф. дис. ... канд. мед. наук: 14.00.13 / Фарбер Феликс Михайлович. – Тарту, 1988. – 23 с.
55. Флоринский, И.В. Иллюстрированное введение в геоморфометрию [Электронный ресурс] / И.В. Флоринский // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. – 2016. – Т. 11. – Вып. 1: Система планета Земля. – Стационарный сетевой адрес: 2227-9490e-aprov_r_e-ast11-1.2016.71.
56. Хохрин, А.А. Системы построения 3D–модели лица на основе 2D изображения [текст] / А.А. Хохрин // ИТ Арктика. – 2017. – № 4. – С. 4–15.

57. Чернов, В.В. Устройство, способ и система для реконструкции 3D-модели объекта [текст] / В.В. Чернов, А.Г. Шамсуаров, О.Ф. Муратов, Ю.В. Слынько, М.М. Любимцева и др. // RU Patent 2642167C2, 2018.
58. Чибуничев, А.Г. Автоматическое построение плотного облака точек по множеству снимков на основе полуглобального метода отождествления соответственных точек [текст] / А.Г. Чибуничев, А.П. Михайлов, В.В. Старшов // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2015. – № 2. – С. 14–18.
59. Чибуничев, А.Г. Фотограмметрия: учебник для вузов [текст] / А.Г. Чибуничев. – Москва: МИИГАиК, 2022. – 328 с. – ISBN 978-5-91188-080-4.
60. Abbas, H.H. Biological landmark vs quasi-landmarks for 3D face recognition and gender classification [текст] / H.H. Abbas, A.A. Altameemi, H.R. Farhan // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). – 2019. – V. 9. – No. 5. – PP. 4069–4076. DOI:10.11591/ijece.v9i5.pp4069–4076.
61. Alagha, M.A. Objective grading facial paralysis severity using a dynamic 3D stereo photogrammetry imaging system [текст] / M.A. Alagha, A. Ayoub, S. Morley, X. Ju // Optics and Lasers in Engineering. – 2022. – V. 150. – PP. 106876. (doi:10.1016/j.optlaseng.2021.106876).
62. Ben Amor, B. 4-D facial expression recognition by learning geometric deformations [текст] / B. Ben Amor, H. Drira, S. Berrett, M. Daoudi, A. Srivastava // IEEE Transactions on Cybernetics. – 2014. – V. 44, № 12. – PP. 2443–2457.
63. Zhang, C. Efficient feature extraction for 2D/3D objects in mesh representation [текст] / C. Zhang, T. Chen // Proceedings of the International Conference on Image Processing. – 2001. – V. 3. – PP. 935–938. (doi:10.1109/ICIP.2001.958278)
64. Choi, J.W. Frontal soft tissue analysis using a 3 dimensional camera following two-jaw rotational orthognathic surgery in skeletal class III patients [текст] / J.W. Choi, J.Y. Lee, T.S. Oh // Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery. – 2014. – V. 42, № 3. – PP. 220–226. (doi:10.1016/j.jcems.2013.05.004)

65. Deli, R. Three-dimensional methodology for photogrammetric acquisition of the soft tissues of the face: a new clinical-instrumental protocol [текст] / R. Deli, L.M. Galantucci, A. Laino, R. D'Alessio, E. Di Gioia, C. Savastano, F. Lavecchia, G. Percoco // *Progress in Orthodontics*. – 2013. – V. 14. – PP. 32. (doi:10.1186/2196-1042-14-32)
66. Desrosiers, P.A. Analyzing of Facial Paralysis by Shape Analysis of 3D Face Sequences [текст] / P.A. Desrosiers, Y.B. Bennis, M. Daoudi, B. Ben Amor, P. Guerreschi // *Image and Vision Computing*. – 2017.
67. Dindaroğlu, F. Accuracy and reliability of 3D stereophotogrammetry: A comparison to direct anthropometry and 2D photogrammetry [текст] / F. Dindaroğlu, P. Kutlu, G.S. Duran, S. Görgülü, E. Aslan // *Angle Orthod.* – 2016. – V. 86, № 3. – PP. 487–494. DOI: 10.2319/041415-244.1.
68. Favero, R. Accuracy of 3D digital modeling of dental arches [текст] / R. Favero, A. Volpato, M. De Francesco // *Dental Press Journal of Orthodontics*. – 2019. – № 1. – PP. 1–7.
69. Florinsky, I.V. Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology [текст] / I.V. Florinsky // 2nd ed. – Amsterdam: Elsevier / Academic Press, 2016. – 486 p. – ISBN 978-0-12-804632-6.
70. Fyffe, G. Driving high-resolution facial scans with video performance capture [текст] / G. Fyffe // *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. – 2014. – V. 34, № 1. – PP. 1–14.
71. Gamst-Klaussen, T. Assessment of outcome measures for cost-utility analysis in depression: mapping depression scales onto the EQ-5D-5L [текст] / T. Gamst-Klaussen, A.N. Lamu, G. Chen, J.A. Olsen // *B J Psych Open*. – 2018. – V. 4, № 4. – PP. 160–166.
72. Garrido, P. Reconstructing detailed dynamic face geometry from monocular video [текст] / P. Garrido // *ACM Trans. Graph.* – 2013. – V. 32, № 6. – PP. 158:1–158:10.
73. House, J.W. Facial nerve grading system [текст] / J.W. House, D.E. Brackmann // *Otolaryngol Head Neck Surg.* – 1985. – V. 93. – PP. 146–147.

74. Hirschmüller, H. Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information [текст] / H. Hirschmüller // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2008. – V. 30, № 2. – PP. 328–341. DOI: 10.1109/TPAMI.2007.1166.
75. James, M.R. 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys [текст] / M.R. James, S. Robson, M.W. Smith // Earth Surface Processes and Landforms. – 2017. – V. 42, № 12. – PP. 1769–1788. ISSN: 0197-9337.
76. Jia, S. 3D Face Anti-Spoofing With Factorized Bilinear Coding [текст] / S. Jia, X. Li, C. Hu [et al.] // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2021. – V. 31, № 10. – PP. 4031–4045. DOI: 10.1109/TCSVT.2020.3044986.
77. Jiang, L. 3D face reconstruction with geometry details from a single image [текст] / L. Jiang // IEEE Transactions on Image Processing. – 2018. – V. 27, № 10. – PP. 4756–4770.
78. Jung, J. Three-dimensional evaluation of soft tissue after orthognathic surgery [текст] / J. Jung, C.–H. Lee, J.–W. Lee, B.–J. Choi // Head Face Med. – 2018. – PP. 14–21.
79. Kemelmacher–Shlizerman, I. 3D face reconstruction from a single image using a single reference face shape [текст] / I. Kemelmacher–Shlizerman, R. Basri // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. – 2010. – V. 33, № 2. – PP. 394–405.
80. Khambay, B. Validation and reproducibility of a high–resolution three–dimensional facial imaging system [текст] / B. Khambay, N. Nairn, A. Bell, J. Miller, A. Bowman, A.F. Ayoub // Br J Oral Maxillofac Surg. – 2008. – V. 46. – PP. 27–32. DOI: 10.1016/j.bjoms.2007.04.017
81. Kim, J.I. A study of facial nerve grading system [текст] / J.I. Kim, H.K. Koh, C.H. Kim // Journal of Acupuncture Research. – 2001. – V. 18, № 2. – PP. 1–17.
82. Lague, D. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z) [текст] / D. Lague, N. Brodu, J. Leroux // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2013. – V. 82. – PP. 10–26. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009.

83. Lara–Diaz, V.J. IGF–1 modulates gene expression of proteins involved in inflammation, cytoskeleton, and liver architecture [текст] / V.J. Lara–Diaz, I. Castilla–Cortazar, I. Martín–Estal, M. García–Magariño, G.A. Aguirre, J.E. Puche, R.G. de la Garza, L.A. Morales, U. Muñoz // *J. Physiol. Biochem.* – 2017. – V. 73, № 2. – PP. 245–258. DOI: 10.1007/s13105-016-0545-x.
84. Li, H. 3D facial expression recognition via multiple kernel learning of multi-scale local normal patterns [текст] / H. Li, L. Chen, D. Huang, Y. Wang, J. Morvan // *Proceedings of the 21st International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2012)*, Tsukuba, Japan, 11–15 November 2012. – 2012. – PP. 2577–2580.
85. Munir, H.M.U. 3D single image face reconstruction approaches with deep neural networks [текст] / H.M.U. Munir, W.S. Qureshi // *Interactivity and the Future of the Human-Computer Interface.* – IGI Global, 2020. – PP. 262–281.
86. Nguyen, D.–P. Fast 3D face reconstruction from a single image using different deep learning approaches for facial palsy patients [текст] / D.–P. Nguyen, T.–N. Nguyen, S. Dakpé, M.–C. Ho Ba Tho, T.–T. Dao // *Bioengineering.* – 2022. – V. 9, № 11. – PP. 619. DOI: 10.3390/bioengineering9110619.
87. Nord, F. The 3dMD photogrammetric photo system in craniomaxillofacial surgery: validation of interexaminer variations and perceptions [текст] / F. Nord, R. Ferjencik, B. Seifert // *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery.* – 2015. – V. 43, № 9. – PP. 1798–1803. DOI: 10.1016/j.jcms.2015.08.017.
88. Ort, R. The reliability of a three-dimensional photo system (3dMDface)-based evaluation of the face in cleft lip infants [текст] / R. Ort, P. Metzler, A.L. Kruse // *Plastic Surgery International.* – 2012. – Article ID 138090. DOI: 10.1155/2012/138090.
89. Othman, S.A. Validity and reproducibility of the 3D VECTRA photogrammetric surface imaging system for the maxillofacial anthropometric measurement on cleft patients [текст] / S.A. Othman, L. Saffai, W.N. Wan Hassan // *Clinical Oral Investigations.* – 2020. – V. 24. – PP. 2853–2866. DOI: 10.1007/s00784-019-03150-1.

90. Pesce, M. 12-camera body scanning system based on close-range photogrammetry for precise applications [текст] / M. Pesce, L.M. Galantucci, F.A. Lavecchia // *Virtual and Physical Prototyping*. – 2016. – V. 11, № 1. – PP. 49–56.
91. Pojda, D. Integration and application of multimodal measurement techniques: relevance of photogrammetry to orthodontics [текст] / D. Pojda, A.A. Tomaka, L. Luchowski // *Sensors*. – 2021. – V. 21, № 23. – Article № 8026. DOI: 10.3390/s21238026.
92. Radlansky, R. Face. Atlas of clinical anatomy [текст] / R. Radlansky, K. Wesker // Quintessence Publishing House. – 2014. – PP. 348.
93. Sandbach, G. Recognition of 3D facial expression dynamics [текст] / G. Sandbach, S. Zafeiriou, M. Pantic // *Image and Vision Computing*. – 2012. – V. 30, № 10. – PP. 762–773.
94. Savoldelli, C. Accuracy, repeatability and reproducibility of a handheld three-dimensional facial imaging device: the Vectra H1 [текст] / C. Savoldelli, G. Benat, L. Castillo // *Journal of Stomatology, Oral and Maxillofacial Surgery*. – 2019. – V. 120, № 4. – PP. 289–296. DOI: 10.1016/j.jormas.2019.03.012.
95. Senthilnathan, M. Role of methylene blue in the maintenance of postinduction hemodynamic status in patients with perforation peritonitis: a pilot study [текст] / M. Senthilnathan // *Anesthesia Essays and Researches*. – 2017. – V. 11, № 3. – PP. 665–669.
96. Sforza, C. Three-dimensional facial morphometry: from anthropometry to digital morphology [текст] / C. Sforza, C. Dellavia, R. Rosati // *Handbook of Anthropometry: Physical Measures of Human Form in Health and Disease*. – Springer, 2012. – PP. 611–624. DOI: 10.1007/978-1-4419-1788-1_32.
97. Sforza, C. The effect of age and sex on facial mimicry: a three-dimensional study in healthy adults [текст] / C. Sforza, A. Mapelli, D. Galante // *Oral and Maxillofacial Surgery*. – 2010. – V. 39. – PP. 990–999. DOI: 10.1016/j.ijom.2010.05.011.

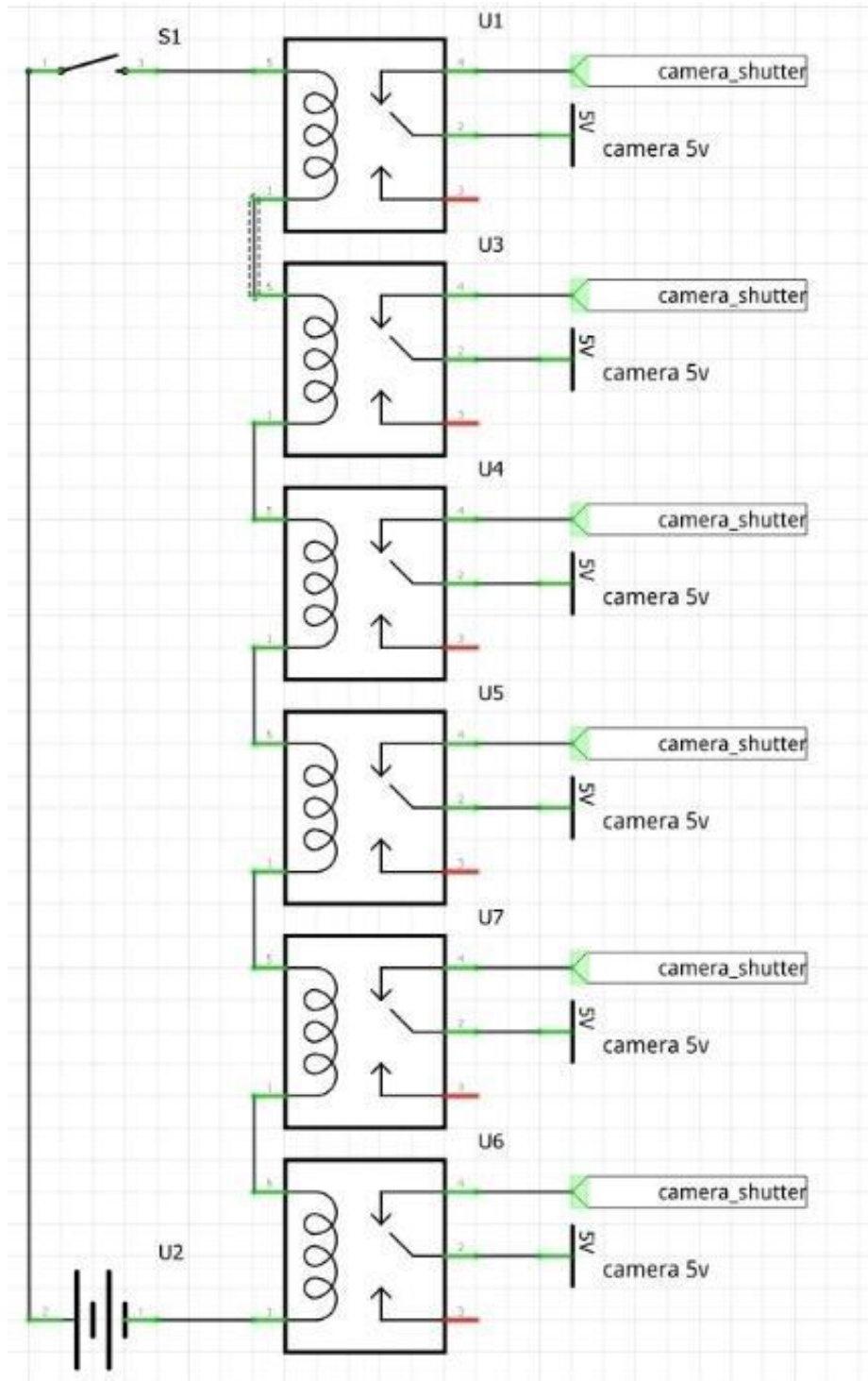
98. Sforza, C. Soft-tissue facial anthropometry in three dimensions: from anatomical landmarks to digital morphology in research, clinics and forensic anthropology [текст] / C. Sforza, V.F. Ferrario // *Journal of Anthropological Sciences*. – 2006. – V. 84. – PP. 97–124. – DOI: 10.4436/jass.84001.
99. Sitaropoulou, V. Three-dimensional evaluation of treatment results of the Alt-RAMEC and facemask protocol in growing patients [текст] / V. Sitaropoulou, H.N. Yilmaz, B. Yilmaz // *Orofacial Orthopedics*. – 2020. – V. 81, № 6. – PP. 407–418. – DOI: 10.1007/s00056-020-00240-8.
100. Skrypitsyna, T.N. Assessment of the asymmetry of the face by the photogrammetric method and its features [текст] / T.N. Skrypitsyna, D.O. Dryga, A.V. Ukolova // *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* – 2023. – V. XLVIII-2/W3-2023. – PP. 239–245. – <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W3-2023-239-2023>.
101. Skrypitsyna, T.N. Three-dimensional visualization in medicine: a new approach to assessing changes in facial relief to improve treatment outcomes for patients with deformities and asymmetries [текст] / T.N. Skrypitsyna, D.O. Dryga, A.V. Ukolova // *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* – 2024. – V. XLVIII-2/W5-2024. – PP. 129–134. – <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W5-2024-129-2024>.
102. Staller, S. Precision and accuracy assessment of single and multicamera three-dimensional photogrammetry compared with direct anthropometry [текст] / S. Staller, J. Anigbo, K. Stewart // *The Angle Orthodontist*. – 2022. – V. 92, № 5. – PP. 635–641. – DOI: 10.2319/101321-770.1.
103. Valgaerts, L. Lightweight binocular facial performance capture under uncontrolled lighting [текст] / L. Valgaerts // *ACM Transactions on Graphics*. – 2012. – V. 31, № 6. – PP. 187:1–187:11.
104. Winder, R.J. Technical validation of the Di3D stereophotogrammetry surface imaging system [текст] / R.J. Winder, T.A. Darvann, W. McKnight // *British Journal of Oral*

- and Maxillofacial Surgery. – 2008. – V. 46, № 1. – PP. 33–37. – DOI: 10.1016/j.bjoms.2007.09.005.
105. Yang, X. Automatic 3D Facial Expression Recognition Using Geometric Scattering Representation [текст] / X. Yang, D. Huang, Y. Wang // 11th IEEE International Conference and Workshops on Automatic Face and Gesture Recognition (FG 2015): Ljubljana, Slovenia, May 4–8, 2015. – 2015. – PP. 1–6. – DOI: 10.1109/FG.2015.7163090.
106. Zhang, S. High-speed 3D shape measurement with structured light methods: a review [текст] / S. Zhang // Optics and Lasers in Engineering. – 2018. – V. 106. – PP. 119–131.
107. Zhen, Q. Muscular Movement Model-Based Automatic 3D/4D Facial Expression Recognition [текст] / Q. Zhen, D. Huang, Y. Wang // IEEE Transactions on Multimedia. – 2016. – V. 18, № 7. – PP. 1438–1450. – DOI: 10.1109/TMM.2016.2557063.
108. Zhou, S. 3D Face Recognition: A Survey [текст] / S. Zhou, S. Xiao // Human-centric Computing and Information Sciences. – 2018. – V. 8, № 35. – DOI: 10.1186/s13673-018-0157-2.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Анализ основных способов оценки изменений лица в медицине

Методы	Визуализация 3D/2D	Дополнительные физические манипуляции для лица	Учет нестатичности лица	Возможность пролонгированного наблюдения	Точность, мм	Пример
Визуальный осмотр	нет	Палетка на лицо	нет	нет	5	
Математический анализ изменений на основе фотоизображений	2D	Маркирование точек, дермографическим карандашом	да	нет	5	
Монокулярная реконструкция	3D	нет	да	нет	5	
Оптическое сканирование	3D	нет	нет	нет	1	
Стереодетрическая фотограмметрическая	3D	нет	да	да	0,5	

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Принципиальная схема синхронизации процесса
фотографирования**



ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Скрипт (сценарий) – распознает подключенные устройства, определяет камеры, сканирует директории с изображениями и автоматом производит копирование и сортировку

```

import wmi
import os
import shutil
from datetime import datetime

start_time = datetime.now()
print('created by hopkuh')

c = wmi.WMI()

dir_py = os.path.dirname(os.path.realpath(__file__)) # Директория файла программы

#print(dir_py)

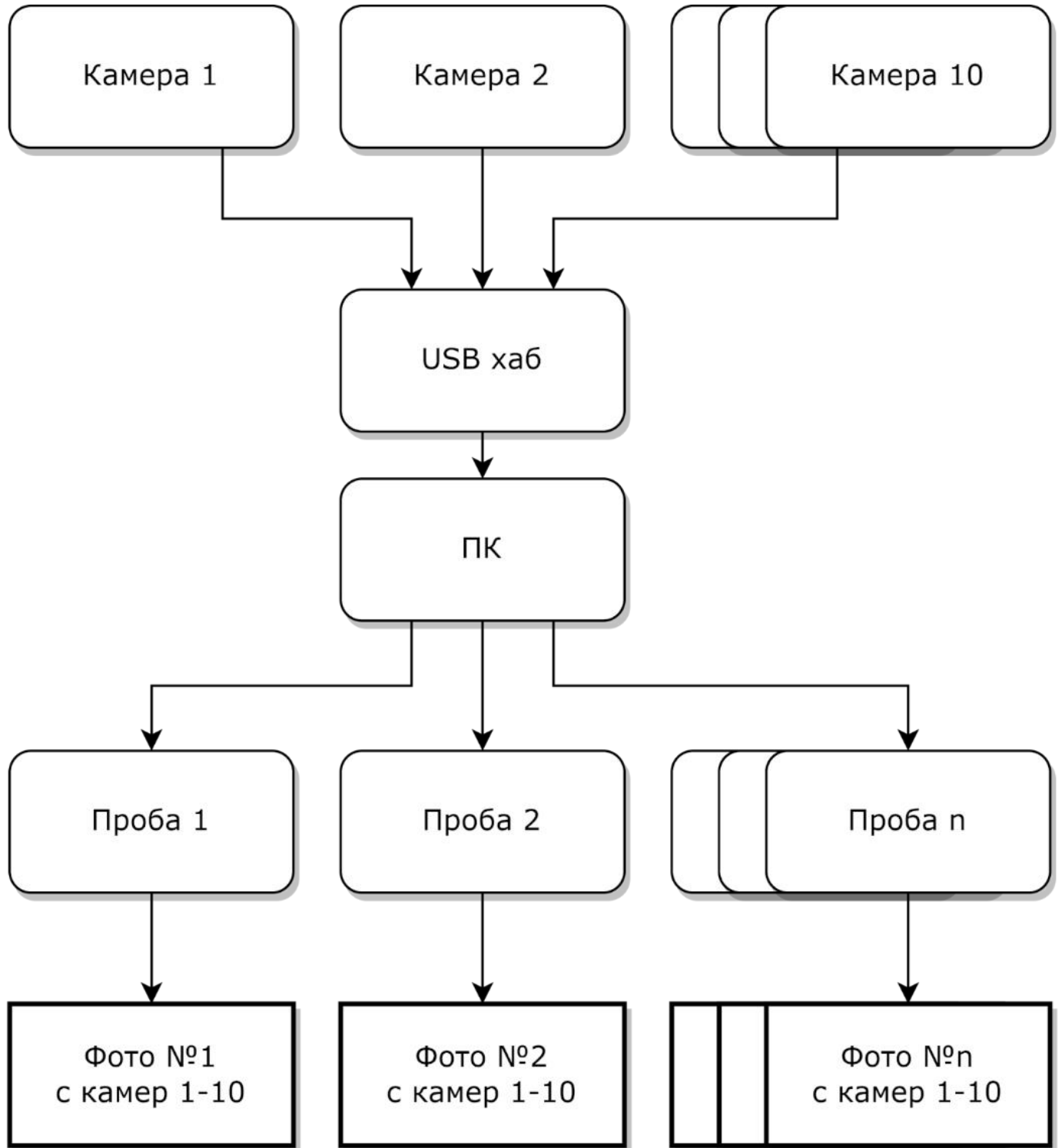
if (c.Win32_LogicalDisk(DriveType=2)) == []: # – 2 – флешки 3 – локальные диски
print("ФЛЕШКА НЕ УСТАНОВЛЕНА")

print('Копирование файлов началось')
for disk in c.Win32_LogicalDisk(DriveType=2):
    try:
os.chdir(disk.Name + '\DCIM') # папка исходников
except FileNotFoundError:
    print('ERROR!!!')
    break
    newname = disk.VolumeName + '.JPG'
newfoldercount = 0

    for file in os.listdir():
newfoldercount += 1
        print ((newfoldercount/len(os.listdir()))*100, '%') # панель прогресса!
newfolder = dir_py.replace('\App', '') + '\FINAL\POS_' + str(newfoldercount) # папка результатов
        if not os.path.exists(newfolder):
os.mkdir(newfolder)
            try:
shutil.copy2(file, newfolder)
os.rename(newfolder + '/' + file, newfolder + '/' + newname)
                except:
                    pass

end_time= datetime.now()
print('Время выполнения программы:',end_time–start_time,)
input('Нажмите ENTER для выхода:')

```

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Блок схема сортировки изображений по директориям

ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Каталог координат 12–битных кодированных марок

№ точки	X(m)	Y(m)	Z (m)	№ точки	X(m)	Y(m)	Z (m)	№ точки	X(m)	Y(m)	Z (m)
1	-0,334	0,477	-0,001	33	-0,144	0,095	-0,001	65	0,047	-0,286	-0,002
2	-0,238	0,477	-0,002	34	-0,048	0,095	-0,001	66	0,143	-0,286	-0,002
3	-0,334	0,382	-0,001	35	-0,144	0,000	-0,001	67	0,239	-0,096	0,000
4	-0,239	0,382	-0,002	36	-0,048	0,000	-0,001	68	0,335	-0,096	0,000
5	-0,334	0,287	-0,001	37	0,048	0,190	-0,001	69	0,239	-0,191	-0,003
6	-0,239	0,287	-0,001	38	0,144	0,190	-0,001	70	0,335	-0,191	-0,002
7	-0,143	0,476	-0,003	39	0,048	0,095	-0,001	71	0,239	-0,287	-0,003
8	-0,047	0,476	-0,003	40	0,144	0,095	-0,001	72	0,335	-0,287	-0,003
9	-0,143	0,381	-0,002	41	0,048	-0,001	0,000	73	-0,337	-0,380	-0,002
10	-0,048	0,381	-0,002	42	0,143	-0,001	0,000	74	-0,241	-0,381	-0,002
11	-0,143	0,286	-0,002	43	0,240	0,190	-0,001	75	-0,337	-0,476	-0,002
12	-0,048	0,285	-0,002	44	0,336	0,190	-0,002	76	-0,241	-0,476	-0,002
13	0,049	0,476	-0,002	45	0,239	0,094	-0,001	77	-0,337	-0,571	-0,003
14	0,145	0,476	-0,002	46	0,335	0,094	0,000	78	-0,241	-0,571	-0,003
15	0,049	0,380	-0,002	47	0,239	-0,001	-0,001	79	-0,145	-0,381	-0,001
16	0,145	0,380	-0,002	48	0,335	-0,001	0,000	80	-0,049	-0,381	-0,002
17	0,049	0,285	-0,002	49	-0,335	-0,095	0,000	81	-0,145	-0,476	-0,002
18	0,144	0,285	-0,002	50	-0,240	-0,095	-0,001	82	-0,049	-0,476	-0,002
19	0,240	0,475	-0,003	51	-0,336	-0,190	-0,001	83	-0,145	-0,571	-0,002
20	0,336	0,476	-0,002	52	-0,240	-0,190	-0,001	84	-0,049	-0,572	0,000
21	0,240	0,380	-0,002	53	-0,336	-0,285	-0,002	85	0,047	-0,381	-0,002
22	0,336	0,381	-0,001	54	-0,240	-0,285	-0,001	86	0,143	-0,382	-0,002
23	0,240	0,285	-0,002	55	-0,144	-0,095	-0,001	87	0,047	-0,476	-0,001
24	0,336	0,285	-0,002	56	-0,048	-0,096	-0,001	88	0,143	-0,477	-0,002
25	-0,335	0,192	0,000	57	-0,144	-0,190	-0,001	89	0,047	-0,572	-0,001
26	-0,239	0,191	-0,001	58	-0,049	-0,191	-0,001	90	0,142	-0,572	-0,001
27	-0,335	0,096	0,000	59	-0,145	-0,286	-0,001	91	0,239	-0,382	-0,003
28	-0,239	0,096	0,000	60	-0,049	-0,286	-0,002	92	0,334	-0,382	-0,003
29	-0,335	0,001	0,001	61	0,048	-0,096	-0,001	93	0,238	-0,477	-0,003
30	-0,240	0,001	-0,001	62	0,143	-0,096	-0,001	94	0,334	-0,477	-0,003
31	-0,143	0,191	-0,001	63	0,047	-0,191	-0,001	95	0,239	-0,572	-0,002
32	-0,048	0,190	0,000	64	0,143	-0,191	-0,001	96	0,334	-0,572	-0,002

**ПРИЛОЖЕНИЕ 6. Каталог элементов внешнего ориентирования камер
установки**

№ камеры	X, м	Y, м	Z, м	Omega, (°)	Phi, (°)	Kappa, (°)
11	-0,584	0,131	0,478	269,693	-60,196	18,550
12	-0,294	0,104	0,700	269,482	-29,090	16,706
13	0,023	0,136	0,854	269,394	1,995	19,040
14	0,341	0,101	0,711	269,994	31,671	16,446
15	0,654	0,114	0,501	269,821	62,127	15,827
21	-0,626	-0,211	0,496	270,256	-57,803	-7,750
22	-0,357	-0,179	0,796	269,863	-29,277	-5,865
23	0,023	-0,111	0,916	269,713	2,754	0,621
24	0,419	-0,176	0,807	269,086	33,680	-3,384
25	0,704	-0,220	0,524	269,068	63,116	-8,313
31	-0,533	-0,648	0,437	268,797	-59,184	-41,289
32	-0,292	-0,630	0,693	269,932	-31,709	-42,060
33	0,028	-0,581	0,797	266,259	0,541	-36,307
34	0,363	-0,549	0,704	268,915	29,709	-35,115
35	0,604	-0,512	0,471	262,345	61,451	-37,232

ПРИЛОЖЕНИЕ 7. Таблица контрольных промеров

№ п/п	отрезок между марками	Измерения, мм				
		по гипсовой голове	по стерео- модели	стереомодель -голова	по полигональной модели	полигональная модель -голова
1	13-P5	104,6	105,3	0,7	105,0	0,4
2	15-17	101,3	102,4	1,1	100,3	-1,0
3	1-6	72,4	72,8	0,5	72,6	0,3
4	18-30	188,7	190,9	2,2	189,0	0,3
5	2-30	30,2	30,5	0,3	30,5	0,3
6	20-22	27,7	27,9	0,2	28,0	0,3
7	1-24	43,3	43,8	0,6	43,6	0,3
8	8-19	38,6	39,1	0,5	39,0	0,4
9	14-21	31,1	31,8	0,7	31,5	0,4
10	11-28	47,0	47,6	0,6	47,4	0,4
11	14-16	33,3	33,9	0,6	33,8	0,5
12	1-12	37,5	38,1	0,7	38,0	0,5
13	6-25	76,9	77,6	0,6	77,5	0,6
14	15-21	62,7	63,6	0,9	63,3	0,6
15	5-23	58,6	59,4	0,8	59,2	0,6
16	6-26	43,9	44,4	0,6	44,5	0,6
17	P4-P7	58,9	59,7	0,9	59,5	0,6
18	19-P3	33,9	34,6	0,7	34,5	0,6
19	4-5	61,4	62,1	0,7	62,0	0,6
20	12-P2	51,9	52,6	0,7	52,6	0,7
21	10-17	45,9	46,5	0,6	46,6	0,7
22	10-15	56,4	57,1	0,8	57,1	0,7
23	26-P2	49,1	49,8	0,8	49,8	0,8
24	16-18	53,4	54,1	0,7	54,2	0,8
25	3-21	44,7	45,4	0,7	45,6	0,9
26	28-P4	104,1	105,2	1,2	105,0	0,9
27	14-25	40,3	41,3	1,0	41,2	0,9
28	2-P2	84,2	85,4	1,2	85,2	1,0

№ п/п	отрезок между марками	Измерения, мм				
		по гипсовой голове	по стерео- модели	стереомодель -голова	по полигональной модели	полигональная модель -голова
29	3-15	39,4	40,1	0,7	40,4	1,0
30	2-12	114,0	115,1	1,2	115,0	1,0
31	1-2	81,2	82,2	1,0	82,2	1,0
32	30-P3	48,4	49,2	0,8	49,4	1,1
33	12-26	70,8	71,8	1,0	71,9	1,1
34	16-23	30,6	31,4	0,8	31,7	1,1
35	26-30	120,8	122,2	1,4	122,0	1,2
36	7-30	114,8	116,2	1,4	116,0	1,2
37	13-18	41,4	42,3	0,9	42,6	1,2
38	6-30	84,0	85,2	1,2	85,3	1,3
39	2-7	103,7	104,8	1,1	105,0	1,3
40	7-26	141,7	143,4	1,7	143,0	1,3
41	22-29	60,4	61,3	0,9	61,8	1,4
42	16-P2	108,6	109,8	1,2	110,0	1,4
43	15-P2	109,5	111,1	1,5	111,0	1,5
44	P2-P7	127,5	129,2	1,7	129,0	1,5
45	7-P2	155,5	157,1	1,6	157,0	1,5
46	8-12	143,4	144,2	0,8	144,0	0,6
47	8-P2	167,4	168,3	0,9	168,0	0,6
48	18-P2	132,3	134,0	1,6	134,0	1,7
49	2-8	139,1	140,5	1,4	141,0	1,9
50	21-30	179,9	180,4	0,5	180,0	0,2
51	2-17	197,4	198,7	1,3	198,8	1,4
52	17-P2	169,7	171,2	1,5	171,2	1,5
			СКО	1,0	СКО	1,0

ПРИЛОЖЕНИЕ 8. Результаты экспериментов по оценке точности построения и повторяемости моделей лица

Таблица 5 – Величины отрезков между точками на лице после различных упражнений и в спокойном состоянии (первая модель).

В таблице голубым цветом выделены минимальные величины одноименных отрезков на разных моделях, а желтым цветом – максимальные величины одноименных отрезков

Отрезок	Модель, мм									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RPL – 11	69,36	69,46	69,02	69,11	68,85	68,72	68,98	68,75	68,66	68,72
RPL – 12	41,03	41,57	40,70	43,27	40,99	38,77	39,94	39,71	40,30	39,97
RPL – 13	35,21	35,49	35,25	35,31	34,77	34,83	35,12	35,31	34,57	34,79
RPL – 14	53,18	53,13	53,14	53,04	52,87	53,00	53,12	53,31	52,99	53,06
RPL – C1	21,81	21,93	21,77	21,62	21,95	21,86	21,97	21,89	21,88	21,82
RPL – C2	44,11	44,28	44,17	44,14	44,44	44,08	44,16	44,09	44,21	44,05
RPL – C3	93,69	93,46	94,40	94,63	93,74	93,59	92,83	93,33	92,22	92,50
RPL – RPR	27,26	27,33	27,12	27,30	27,23	27,29	27,23	27,26	27,26	27,33
RPR – 21	71,76	71,51	70,99	70,98	71,04	70,60	71,02	70,90	71,09	71,23
RPR – 22	38,68	38,51	37,90	39,98	39,30	36,60	38,26	37,45	38,66	38,38
RPR – 23	35,51	35,70	35,69	35,60	35,18	35,26	35,57	35,63	35,37	35,47
RPR – 24	58,49	58,33	58,41	58,31	58,39	58,43	58,49	58,20	58,16	58,18
RPR – C1	19,99	20,19	20,23	20,01	19,78	20,23	20,05	20,41	19,98	20,10
RPR – C2	43,71	43,96	43,96	44,07	44,01	43,91	43,83	44,09	43,97	44,00
RPR – C3	93,06	93,43	93,78	94,31	93,21	93,14	92,27	92,96	91,80	92,13
11 – 21	71,78	72,17	72,46	72,46	72,69	72,11	72,31	72,01	72,42	72,31
11 – 12	35,41	34,94	34,69	32,29	34,84	36,82	36,05	36,08	35,34	35,93
12 – 22	77,72	77,70	76,01	79,21	79,25	75,71	78,18	76,96	79,23	79,06
12 – 13	53,84	53,86	53,75	55,84	52,19	51,18	52,05	51,77	51,84	51,65
12 – 14	58,75	58,54	59,02	60,17	57,38	57,02	57,33	57,28	57,22	56,86
13 – 14	24,78	24,57	24,55	24,35	24,43	24,69	24,71	24,72	24,85	24,81
13 – ML	48,40	48,53	48,49	48,58	47,50	48,37	48,39	47,95	48,29	48,80

Отрезок	Модель									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
13 – C3	80,69	80,40	81,58	82,03	81,89	81,02	80,41	80,86	79,78	79,75
14 – 15	56,85	57,05	57,16	57,43	57,64	57,38	57,19	57,35	57,64	57,56
14 – 16	65,55	65,11	65,37	66,16	66,23	66,15	65,14	65,48	65,82	65,85
15 – 11	119,74	118,67	118,94	119,14	118,24	118,55	118,90	118,29	118,09	118,17
15 – 16	32,43	32,67	32,55	32,52	32,87	32,79	32,89	32,88	32,81	32,90
16 – C3	95,54	93,51	95,50	96,36	95,11	95,56	95,04	95,41	95,26	95,32
C1 – C2	34,86	35,22	35,36	35,21	35,20	34,95	34,98	34,88	34,99	35,00
C2 – C3	72,24	72,87	72,42	72,67	71,60	71,76	71,14	71,78	70,37	70,82
C3 – ML	34,97	35,07	35,84	36,11	35,90	35,70	34,94	35,65	34,39	33,69
C3 – MR	38,97	38,90	39,24	39,47	40,27	39,44	39,09	39,37	39,04	38,86
ML – MR	56,10	56,37	56,83	56,32	55,13	56,93	56,86	56,86	56,92	55,96
C3 – 23	85,19	85,80	85,48	86,09	85,51	85,30	84,72	85,29	84,64	84,58
21 – 22	41,57	41,34	41,17	39,64	41,06	42,55	42,06	42,30	42,21	42,58
22 – 23	49,80	50,37	49,97	51,03	49,20	47,81	48,52	48,71	48,19	48,53
22 – 24	62,23	62,83	62,78	62,81	61,53	61,42	61,25	61,56	60,53	60,85
23 – 24	29,68	29,41	29,30	29,44	29,61	29,71	29,46	29,36	29,45	29,45
23 – MR	51,66	52,62	51,60	51,47	50,24	51,49	51,51	51,50	52,16	52,01
24 – 25	54,42	54,40	54,63	54,66	54,71	54,86	54,78	54,48	54,38	54,21
24 – 26	61,25	60,22	60,38	60,77	61,33	60,73	60,78	60,39	60,45	60,03
25 – 21	126,30	126,50	126,31	125,67	126,30	125,88	126,13	126,17	125,89	126,35
25 – 26	30,92	31,29	31,15	31,30	31,03	31,44	31,28	31,05	31,11	30,96
26 – C3	97,00	95,97	96,53	97,26	96,41	96,34	96,23	95,99	96,14	96,01

Таблица 6 – Оценка расхождений отрезков на моделях

Отрезок	макс. мм	мин. мм	Ср. мм	СКО, мм	КВ %	Отрезок	макс. мм	мин. мм	Ср. мм	СКО, мм	КВ %	
RPL – 11	69,46	68,66	68,96	0,232	0,33	13 – С3	82,03	79,75	80,84	0,715	0,88	
RPL – 12	43,27	38,77	40,63	1,198	2,95	14 – 15	57,64	56,85	57,32	0,192	0,34	
RPL – 13	35,49	34,57	35,06	0,284	0,81	14 – 16	66,23	65,11	65,68	0,41	0,624	
RPL – 14	53,31	52,87	53,08	0,117	0,22	15 – 11	119,74	118,09	118,67	0,338	0,28	
RPL – C1	21,97	21,62	21,85	0,101	0,46	15 – 16	32,90	32,43	32,73	0,132	0,40	
RPL – C2	44,44	44,05	44,17	0,106	0,24	16 – C3	96,36	93,51	95,26	0,709	0,74	
RPL – C3	94,63	92,22	93,44	0,694	0,74	C1 – C2	35,36	34,86	35,07	0,152	0,43	
RPL – RPR	27,33	27,12	27,26	0,056	0,21	C2 – C3	72,87	70,37	71,77	0,731	1,02	
RPR – 21	71,76	70,60	71,11	0,238	0,33	C3 – ML	36,11	33,69	35,23	0,559	1,59	
RPR – 22	39,98	36,60	38,37	0,929	2,42	C3 – MR	40,27	38,86	39,27	0,382	0,97	
RPR – 23	35,70	35,18	35,50	0,177	0,50	ML – MR	56,93	55,13	56,43	0,552	0,98	
RPR – 24	58,49	58,16	58,34	0,1	0,17	C3 – 23	86,09	84,58	85,26	0,444	0,52	
RPR – C1	20,41	19,78	20,10	0,174	0,86	21 – 22	42,58	39,64	41,65	0,845	2,03	
RPR – C2	44,09	43,71	43,95	0,077	0,18	22 – 23	51,03	47,81	49,21	1	2,03	
RPR – C3	94,31	91,80	93,01	0,708	0,76	22 – 24	62,83	60,53	61,78	0,762	1,23	
11 – 21	72,69	71,78	72,27	0,204	0,28	23 – 24	29,71	29,30	29,49	0,118	0,40	
11 – 12	36,82	32,29	35,24	1,209	3,43	23 – MR	52,62	50,24	51,63	0,601	1,16	
12 – 22	79,25	75,71	77,90	1,277	1,64	24 – 25	54,86	54,21	54,55	0,164	0,30	
12 – 13	55,84	51,18	52,80	1,366	2,60	24 – 26	61,33	60,03	60,63	0,31	0,51	
12 – 14	60,17	56,86	57,96	0,997	1,72	25 – 21	126,50	125,67	126,15	0,245	0,19	
13 – 14	24,85	24,35	24,65	0,15	0,61	25 – 26	31,44	30,92	31,15	0,137	0,44	
13 – ML	48,80	47,50	48,33	0,329	0,68	26 – C3	97,26	95,97	96,39	0,365	0,38	
						Среднее					0,47	0,90

Таблица 7 – Сравнение моделей лица

Показатель, мм	Модели разности								
	2-1	3-1	4-1	5-1	6-1	7-1	8-1	9-1	10-1
макс	47,0	35,4	10,4	44,9	45,9	43,4	46,0	46,4	54,1
мин	-15,1	-54,1	-53,6	-18,6	-21,6	-25,2	-21,2	-18,0	-17,0
среднее по модулю	31,0	44,7	32,0	31,7	33,8	34,3	33,6	32,2	35,6
диапазон	62,1	89,0	64,0	63,5	67,6	68,7	67,3	64,4	62,3
СКО	1,2	1,2	1,3	1,2	0,9	1,0	1,0	1,1	1,1
вариативность	3,9	2,7	4,1	3,7	2,7	2,9	3,0	3,4	3,1

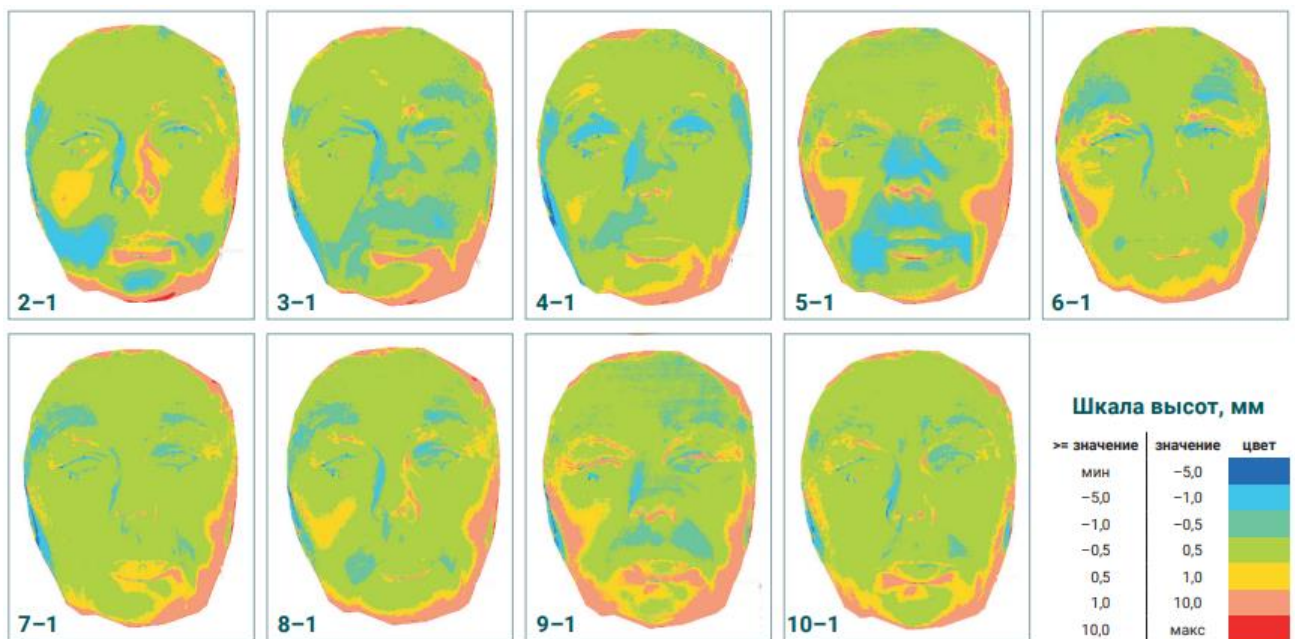


Рисунок 29 – Картограммы матриц разностей ЦМР лица всей серии съемок относительно первой модели

**ПРИЛОЖЕНИЕ 9. Технологическая схема создания и сравнения
разновременных цифровых моделей лица человека, полученных
стереофотограмметрическим способом**

