

# Анализ влияния человеческого фактора на точность создания компьютерных 3D-моделей объектов культурного наследия

П. Д. Бадильо

Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
pbadillo@gmail.com

Я. Джабр

Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
yarajjabr96@gmail.com

В. А. Парфенов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
vadim\_parfenov@mail.ru

**Аннотация.** Технологии 3D-лазерного и оптического сканирования сегодня активно используются в различных областях науки и технике благодаря возможности создавать 3D-модели реальных объектов с очень высокой точностью. Главным достоинством данной технологии является возможность создания цифровых копий регистрируемых объектов неразрушающим способом. По этой причине технологии 3D лазерного и оптического сканирования уже давно применяются в сохранении культурного наследия. Однако создание высокоточных 3D-моделей произведений искусства при использовании оптического сканирования представляет собой сложную техническую задачу, решение которой требует привлечения к работе опытных высококвалифицированных экспертов, которые должны работать со сложными пакетами компьютерных программ. Очевидно, что квалификация оператора может оказывать существенное влияние на точность соответствия создаваемой 3D-модели исходному памятнику. Из-за влияния «человеческого фактора», а также из функциональности используемых программных средств, создаваемые разными операторами (и с помощью разных программ) 3D-модели могут отличаться между собой. Здесь следует заметить, что в задачах документирования объектов культурного наследия точность сканирования имеет особую важность. Поэтому исследование вопросов точности создания 3D-моделей произведений искусства имеет научную новизну и высокую практическую значимость. В данном докладе авторами рассмотрены аспекты проблемы человеческого фактора, который, как показали проведенные нами исследования, может оказывать влияние на точность создания 3D-моделей на каждом шаге постобработки данных, полученных в процессе сканирования. В докладе проведен сравнительный анализ результатов работы трёх операторов с различным уровнем квалификации при использовании ими различных компьютерных программ.

**Ключевые слова:** 3D-сканирование, культурное наследие, человеческий фактор, опыт оператора, точность 3D-модели, 3D-метрология, обработка данных 3D-сканирования, обработка сетки

## I. ВВЕДЕНИЕ

Технологии 3D-лазерного и оптического сканирования являются одними из наиболее важных инструментов, используемых сегодня в области метрологии. Это позволяет создавать цифровые 3D-модели реальных объектов, полезные для множества приложений, начиная от документирования, воспроизведения, реставрации и задач контроля качества. Их высокая точность и повторяемость обеспечивают результаты, соответствующие потребностям большинства инженерных и научных областей.

Благодаря своим характеристикам технологии 3D-сканирования и оптического сканирования были быстро внедрены в области культурного наследия (СН). Вместе с полученными высокоточными моделями их бесконтактный / неразрушающий принцип работы делает их бесценными устройствами для хранения точной информации об очень деликатных произведениях искусства, не влияя на их нынешнее состояние сохранности.

Однако для получения хороших результатов эти технологии требуют сложных и трудоемких этапов постобработки. Эти задачи в значительной степени зависят от уровня квалификации оператора, поскольку не существует единственного способа решения проблем, связанных с полученными процедурами сканирования, выполняемыми в полевых условиях (также известными как необработанные данные), а инструменты постобработки быстро меняются и совершенствуются. Кроме того, модели, созданные из объектов СН, требуют различной обработки в зависимости от приложения: модели, созданные для показа в виртуальных галереях, должны иметь наилучший внешний вид, который зависит от восприятия наблюдателя, обеспечивая высокую детализацию, низкий уровень шума и точность с точки зрения метрологии во второй плоскости по сравнению с тем, когда модель будет использоваться для текущего мониторинга состояния сохранения, в качестве примера.

Целью экспериментов, проведенных при подготовке этой статьи, является оценка влияния возможностей и подготовки оператора (обычно известного как человеческий фактор), пытаясь выяснить, как это влияет на полученные конечные результаты. Существуют существующие работы по этому вопросу в области одонтологии [1], но, насколько известно авторам, не было проведено никаких работ по этой проблеме о ее влиянии на деятельность СН. В этой статье мы опишем наиболее распространенные проблемы, которые можно увидеть в 3D-модели, созданной начинающим пользователем, и подчеркнем различия, обнаруженные между одной и той же работой, выполняемой пользователями с разным уровнем опыта. Основная идея состоит в том, чтобы найти лучшие и стандартизированные процессы, которые позволяют свести эти распространенные ошибки к минимуму, пытаясь уменьшить влияние человеческого фактора на окончательно полученную 3D-модель.

## II. АНАЛИЗИРУЕМЫЙ ОБЪЕКТ И ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

В этой работе мы проанализируем процедуру постобработки объектов среднего размера, выполняемую разными пользователями.

Исследуемый объект представляет собой исторический объект (надгробную плиту XVIII века из Александро-Невской лавры в Санкт-Петербурге) из известняка, размеры которой составляют около 220 x 108 см. Передняя часть его украшена резьбой с изображением герба и надписей. Сканы, сделанные для этого произведения искусства, были выбраны потому, что на нем вырезаны детали, которые находятся в значительно меньшем масштабе по сравнению с основными характеристиками объекта, что делает его особенно сложным для сканирования, сохраняя точность во всех его составляющих элементах. Объект находится в хорошем состоянии сохранности из-за того, что он хранился в помещении в течение нескольких лет после его установки, однако на его надписях видны некоторые признаки износа.

Сканирующим устройством, использованным для захвата, было портативное оборудование на основе структурированного света производства Artec 3D (Artec 3D, Люксембург), модель Artec Eva Lite. Были созданы два разных набора сканирований, содержащих 22 и 43 снимка соответственно, содержащих около 200.000 вершин на каждом снимке. Особое внимание было уделено получению вырезанных частей надгробия, стараясь избежать так называемых “дыр” (пропущенной информации во время процедур захвата) на поверхности. Формат файла, используемый устройством во время захвата, был преобразован в формат STL для последующей обработки в различных программах, используемых во время его рабочего процесса.

Пользователь А – хорошо обученный и опытный оператор, более 10 лет работающий в области 3D-сканирования. Его работы охватывают различные области, от промышленного применения до художественных объектов. Для выполнения задачи пользователь А использовал различные инструменты, в том числе Geomagic Design X (3D Systems Corporation, США), ZBrush (Maxon Computer GmbH, Германия) и Photoshop (Adobe Inc., США). Первый этап включает в

себя выбор сканирований, которые будут использоваться, очистку поверхностей, выравнивание различных снимков и заполнение отверстий. После этого герб был изменен, чтобы увеличить текстуру и получить более четкую надпись; некоторые части были восстановлены. Наконец, изображение модели было использовано в качестве текстуры, чтобы придать работе фотореалистичный эффект.

Пользователь В начал работать в области 3D-оптического и лазерного сканирования год назад, наряду с областью CH Science. Сообщалось, что для создания модели использовались инструменты Geomagic Wrap (3D Systems Corporation, США) и Meshlab (ISTI-CNR, Италия) [2]. На первом этапе был сделан выбор снимков сканирования и очистка плавающих частей с последующим выравниванием для создания объекта. Как только объект был завершен в виде облака точек, границы были очищены, а отверстия заполнены. Наконец, используя опорные плоскости, была создана нижняя часть, вытягивающая границу сканируемой детали.

Пользователь С является новичком в использовании устройств 3D-сканирования, начиная менее 6 месяцев назад. В течение этого периода он был обучен использованию различных программных пакетов для выполнения таких задач, как выравнивание снимков сканирования и оценка различий между моделями. Пользователь С использовал Geomagic Design X (3D Systems Corporation, США) для выравнивания различных снимков сканирования и очистки фоновой информации вокруг объекта.

Для сравнения созданных моделей мы использовали Geomagic Design X (3D Systems Corporation, США).

## III. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОСТОБРАБОТКИ

В этом разделе мы анализируем различные аспекты качества полученных конечных результатов. Каждый из этих аспектов оценивается, чтобы попытаться найти возможное решение обнаруженной проблемы. Как мы представили во введении, некоторые из этих проблем носят чисто косметический характер и могут повлиять на использование модели в виртуальных экспозициях, а некоторые носят конструктивный характер, влияя на ее использование при мониторинге состояния сохранения и документировании.

### A. Статистика и анализ формы

Модель, созданная пользователем А, имеет 2.473.366 вершин и 4.946.732 грани. Размер файла составляет около 210 Мб. Грани имеют одинаковый размер по передней грани и сгенерированной боковой стороне, в то время как сгенерированное основание (полностью плоское) показывает большую длину лицевой стороны. Боковые стороны показывают некоторые неровности, которые принимают свою форму от передней отсканированной части, которая была очищена и выпрямлена из исходных необработанных данных.

Модель, полученная пользователем В, сформирована из 5.445.368 вершин и 10.886.164 граней, что составляет размер файла около 1,2 Гб (в 6 раз больше). Размер лица в передней части неоднороден, где изогнутые области, такие как надписи, показывают более высокую плотность лица. Грани, принадлежащие боковой части

объекта, не имеют сторон одинакового размера и отличаются по размеру от граней, образующих переднюю часть. Грани в нижней части примерно одинаковы и примерно равны граням в плоских частях передней части.

Наконец, модель, полученная пользователем С, состоит из 560,465 вершин и 1,118,539 граней с конечным размером файла 338 Мб. Визуальный анализ сетки показывает одинаковый размер граней, обычно наблюдаемый в необработанных данных отсканированных деталей, что указывает на то, что дополнительная оптимизация геометрии поверхности не проводилась. Меньшее количество вершин и граней можно объяснить тем фактом, что для создания модели использовался только один из наборов сканирования. Кроме того, модель не была дополнена нижней частью, использовались только захваченные данные. Такого рода модель подходит для мониторинга состояния сохранности произведения искусства и документации, поскольку содержит только реальные данные об объекте, но она не очень подходит для использования в виртуальных экспозициях и цифровых презентациях, поскольку для случайного наблюдателя она может выглядеть как некачественное цифровое представление.

Краткий анализ этих статистических данных показывает, что модель, созданная пользователем В, больше и сложнее, что затрудняет ее редактирование и улучшение. Это более высокое разрешение также не означает, что оно имеет лучший уровень детализации. Одним из возможных способов решения этой проблемы является использование большего размера лица в областях плоской формы (особенно в нижней и боковых частях, которые не содержат важной информации, поскольку эти данные не были получены в процессе сканирования, а сгенерированы в задачах постобработки для полноты модели), как было сделано пользователем А. Большой размер также означает больше места, необходимого для архивирования и документации, что делает его большой проблемой для небольших музеев с низким бюджетом. Эта проблема также оказывает большое влияние на создание виртуальных коллекций, доступных через Интернет, требующих дополнительной постобработки.

#### *В. Разница в конечных размерах*

На рис. 1 на следующей странице показаны изображения с различиями в цветовой гамме между тремя сгенерированными моделями. Во всех случаях в качестве эталона используется модель, созданная пользователем А.

Сравнивая работы пользователей А и В, ошибки, видимые в передней части объекта (полученные данные в результате процедуры сканирования), отличаются на +

/- 3 мм; вероятно, это указывает на некоторые различия в выравнивании между моделями. Разница означает погрешность около 0,1% при использовании в качестве эталона размера объекта, который мы можем считать приемлемым. Важно отметить, что ошибки в границе объекта и боковой части больше, что показывает различные способы обработки и очистки границы; мы продолжим обсуждение этого вопроса позже. Нижняя часть модели, которая не была отсканирована из-за невозможности сделать снимок, также показывает важные различия, которые будут более подробно рассмотрены в одном из следующих разделов статьи. Различия с работой, выполненной пользователем С, больше, показывая заметное углубление (светло-голубого цвета) в центральной части объекта, идущее слева направо и вниз вверх. Эти различия могут быть объяснены некоторыми проблемами выравнивания в работе пользователя С, мы углубимся в этот вопрос позже. Детали различий в надписях и гербе между моделями также можно увидеть на рис. 1. Разница между тремя моделями с последующей обработкой может быть объяснена дополнительной ручной работой, выполненной пользователем А для уточнения вырезанных деталей в камне. Эта разница составляет в среднем около 0,8 мм, но дает лучшее косметическое представление объекта, что особенно полезно для виртуальных экспозиций.

#### *С. Выравнивание или регистрация сканирования*

Выравнивание между необработанными данными сканирования является одним из первых этапов задачи последующей обработки. Задача 3D-сканирования объекта обычно требует десятков снимков (даже сотен) с разных ракурсов, чтобы захватить всю поверхность.

После получения данных в полевых условиях и с помощью специального программного обеспечения оператор должен выровнять различные части, используя контрольные точки, которые отображаются в общих областях. Этот первый шаг обычно называется грубым выравниванием, и он используется только для приблизительного определения, чтобы помочь улучшить результаты дальнейших процедур выравнивания. Производители программного обеспечения обычно говорят, что точность выбора точки грубого выравнивания оператором не очень важна, но, по нашему собственному опыту, это может немного изменить конечные результаты, особенно когда сканируемые поверхности плоские. Первая локальная процедура автоматического выравнивания (называемая также точным выравниванием) используется для уменьшения разницы между двумя разными снимками и, наконец, глобальное выравнивание используется для уменьшения расстояний между всеми частями, образующими поверхность объекта.

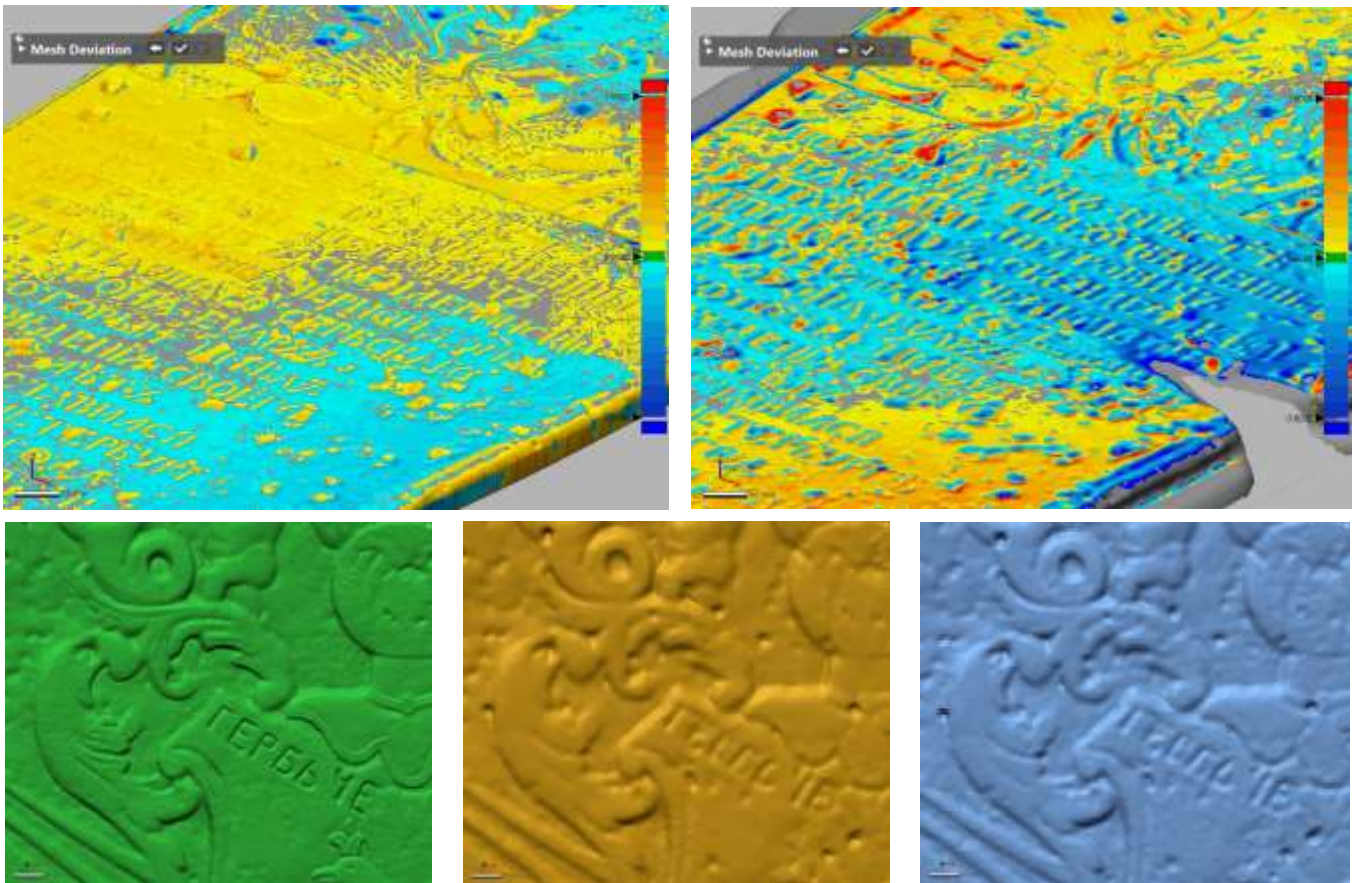


Рис. 1. Вверху: Различия в передней части объекта. Ниже: Деталь герба на надгробной плите

В целом, большинство программного обеспечения, используемого для этой задачи, использует алгоритм, называемый ICP (итеративная ближайшая точка или какая-либо его собственная модификация) [3], который пытается найти набор точек, которые находятся ближе на каждом из снимков. Важно отметить, что даже самые передовые устройства 3D-сканирования, которые генерируют огромное количество точек (обычно миллионы) на очень малых расстояниях друг от друга, обычно имеют различия между каждым снимком или также недостающие части, что может привести к локальному минимальному эффекту: поскольку алгоритм пытается минимизировать расстояние между точки, в которых он может найти локальный минимум, а не глобальный, что приводит к неправильному выравниванию. Эта проблема особенно важна на плоских участках без достаточно значимых объектов, поскольку алгоритм может запутать кажущееся равенство точечных выборок, создаваемых гладкостью поверхности. Как было изучено в предыдущих работах [4], существуют различия между программным обеспечением, используемым оператором, которые могут выходить за пределы допусков используемого устройства 3D-сканирования. В случае, описанном в цитируемой работе, основной причиной проблемы может быть шум, а также параметры, используемые для выполнения алгоритма (размер выборки, количество итераций, максимально допустимое расстояние) и сам алгоритм.

Важной изученной проблемой является наличие плохих захваченных данных. Иногда из-за вибрации или произвольного движения во время процесса захвата необработанные данные могут иметь некоторый эффект ореола. Этот эффект может привести к проблеме, когда алгоритм ошибочно находит предполагаемую точку сходимости между частями, как показано на рис. 2. Этот эффект может быть незаметным, и оператор постобработки может его не заметить, что приведет к неточным конечным результатам. Чтобы избежать этой проблемы, важно искать снимки с недостаточно четкими деталями и стараться избегать их использования, если данные уже существуют в других снимках; кроме того, оператор должен удалять данные, которые не соответствуют исследуемому объекту (например, на некоторых снимках нога оператора может быть видна) и некоторые зашумленные данные, которые обычно отображаются в границах или плавают рядом с кадром. Работа с объектами, образованными большим количеством снимков, иногда требует создания частичных объектов и, наконец, объединения их для создания уникального объекта. Одна новая деталь, подлежащая выравниванию по уже составленной зоне, может находиться между несколькими перекрывающимися частями, и алгоритм может не найти способ сохранить точность выравнивания во всех разных частях одновременно.

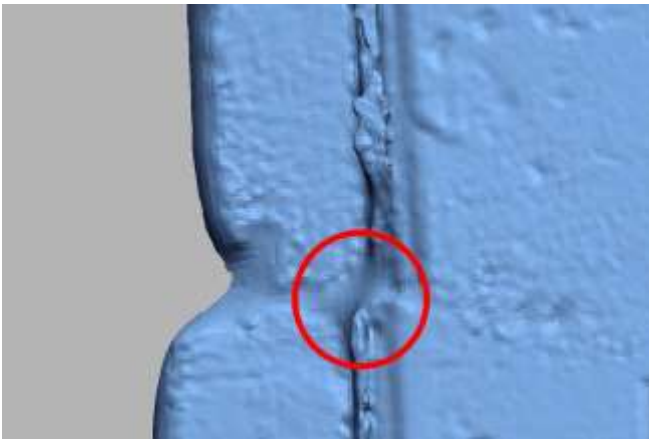


Рис. 2. Результат процедуры выравнивания с использованием данных с ошибками захвата. Мы можем оценить нарушенную границу вверху и недостающие детали в надписях посередине

В целом, мы могли бы сказать, что на этом первом этапе важно удалить данные с ошибками захвата, зашумленные данные и обратить внимание на результаты частичного выравнивания между снимками. Установка точных точек грубого выравнивания в криволинейных областях помогает получить лучшие результаты в последующем процессе автоматического выравнивания. Процедура глобального выравнивания с увеличенным размером выборки также может помочь уменьшить разницу между различными выборками за счет увеличения времени обработки.

#### *Д. Шум и детали*

Шум присутствует в каждом процессе, и 3D-сканирование не является исключением. Количество шума, появляющегося в исходных данных, зависит от множества факторов: оптических свойств материала (особенно в прозрачных и высокоотражающих материалах, таких как стекло или светопоглощающие материалы, такие как черная кожа, но также и в полупрозрачных материалах, таких как мрамор), окружающего света, теней, отражений, ошибки оператора во время процедуры захвата. Большинство используемых программ постобработки имеют различные инструменты для исправления шума, появляющегося на поверхности, автоматически или вручную. Однако эта фаза обычно снижает уровень детализации конечного результата. Это особенно важно для поверхностей с малозаметными, но важными особенностями, такими как та, которая изучалась в этой статье. Такой уровень детализации может быть достигнут только ручным вмешательством пользователя, и уровень опыта в полевых условиях играет очень важную роль, что особенно важно для улучшения внешнего вида модели без потери точности и поддержания ее в пределах допустимых параметров используемого измерительного прибора.

#### *Е. Границы*

Границы являются особенно важной проблемой для создания точной 3D-модели. Устройства 3D-сканирования, как правило, генерируют больше шума и нерегулярных данных вокруг границ, стремясь уменьшить фоновую информацию. Иногда границы можно убрать и попытаться исправить их вручную, что приводит к уже упомянутой проблеме зависимости способностей пользователя.

Как мы знаем, 3D-модели формируются вершинами и гранями, образующими сетку. Одной из проблем, наблюдаемых в 3D-моделях, является появление неправильно сформированной топологии, и эта проблема обычно проявляется в границах и жестких краях. Плохая топология означает не только отверстия в сетке, но и грани переменных размеров (неравномерные), плохо ориентированные грани (перевернутые грани по сравнению с остальной поверхностью), грани без многообразия (грани и вершины, которые не представляют реальную геометрию), перекрытия (слои граней один над другим). Наличие таких ошибок может привести к проблемам с открытием сгенерированных моделей с помощью некоторых программ и сделать невозможным воспроизведение с помощью устройств 3D-печати без соответствующих исправлений. Некоторые инструменты могли бы помочь устранить эти проблемы, но они не всегда эффективны, и иногда их необходимо исправлять вручную.

Чтобы избежать этих проблем, мы предлагаем тщательно очистить границы необработанных данных, прежде чем объединять их в один объект, как лучший способ держать проблему под контролем. Кроме того, автоматизированные инструменты помогают устранить некоторые из наиболее распространенных проблем, таких как заполнение небольших отверстий и некоторые типы проблем с перекрытием. Наконец, для устранения самых сложных проблем требуется тщательная ручная работа.

#### *Ф. Добавление поверхностей, не захваченных в процессе сканирования*

Как мы уже говорили ранее, нижняя часть имеет важные отличия. В этой части нет важной информации для документации объекта искусства, однако в поиске, чтобы придать изделию более законченный вид, пользователи А и В добавили нижнюю плоскость. Задав вопросы обоим операторам, они убедились, что используют различную справочную информацию (в одном случае это были плоские части верхней части объекта, а в другом – пол). Данные, содержащиеся в этой искусственно созданной части, не важны для полноты информации о сканируемом объекте, однако они могут дать косвенную информацию о высоте части над полом, поскольку боковая часть также не сканировалась и не удалялась в обоих случаях. В зависимости от приложения наличие опорных маркеров и плоскостей поможет восстановить эту информацию без необходимости иметь данные сканирования.

## IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой работе мы попытались обобщить наиболее распространенные проблемы, возникающие при сравнении работ, выполненных двумя разными операторами постобработки. Важно отметить, что существуют разные подходы к решению одной и той же проблемы, и иногда решение проблемы зависит от потребностей приложения или клиента. Оценка различий между двумя пользователями с разным опытом и уровнем опыта показала нам, что наиболее сложными проблемами в этой области являются те, которые требуют ручного редактирования и сложных процедур с использованием узкоспециализированного программного обеспечения. Набор стандартных

процедур мог бы помочь свести к минимуму существующие нарушения и повысить качество и точность при создании цифровых 3D-моделей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Resende C.C.D., Barbosa T.A.Q., Moura G.F., Tavares L.D.N., Rizzante F.A.P., George F.M., Neves F.D.D., Mendonça G. Influence of operator experience, scanner type, and scan size on 3D scans // *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2021. Вып. 125. № 2. С. 294-299.
- [2] Cignoni P., Callieri M., Corsini M., Dellepiane M., Ganovelli F., Ranzuglia G. MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool // *Sixth Eurographics Italian Chapter Conference*. 2008. С. 129-136.
- [3] Besl P.J., McKay N.D. A method for registration of 3-D shapes // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1992. Вып. 14, № 2. С. 239-256.
- [4] Badillo P.D., Parfenov V.A. Accuracy of Alignment Procedures Used for the Creation of 3D Models // *2022 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, Saint Petersburg, Russia, 2022.