

На правах рукописи

**Ходжер Татьяна Андреевна**

**ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА  
ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
МИКРООБЪЕКТОВ ДЛЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ**

05.25.05 – информационные системы и  
процессы, правовые аспекты информатики

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иркутск – 2008

Работа выполнена в Лимнологическом институте Сибирского отделения Российской академии наук.

**Научный руководитель:** член-корреспондент РАН,  
Бычков Игорь Вячеславович

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
Трубина Людмила Константиновна  
кандидат физико-математических наук, доцент  
Молородов Юрий Иванович

**Ведущая организация:** Иркутский государственный  
технический университет

Защита состоится 5 сентября 2008 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета ДМ 003.046.01 при Институте вычислительных технологий СО РАН по адресу: г. Новосибирск, пр. академика М.А.Лаврентьева, 6.

С диссертацией можно ознакомиться в специализированном читальном зале вычислительной математики и информатики ГПНТБ СО РАН (пр. академика М.А.Лаврентьева, 6).

Автореферат разослан 4 августа 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета ДМ 003.046.01  
д.ф.-м.н., профессор

Л.Б. Чубаров

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Использование современных информационных технологий в биологии существенно расширяет возможности традиционных подходов при изучении микромира: позволяет получать новую информацию об объекте исследования, осуществлять моделирование микрообъектов живой природы с сохранением их истинных размеров и форм, проводить компьютерную видовую диагностику в 3-D режиме и накапливать информацию о их биоразнообразии. Одним из перспективных методов моделирования трехмерной формы микрообъектов является фотограмметрический метод, предлагающий бесконтактную, неразрушающую реконструкцию образца на основе снимков высокого разрешения. Несмотря на то, что первые исследования в этом направлении начались в 70-80 годах прошлого века, микроскопия до сих пор остается актуальной областью для использования фотограмметрических методов. Большой вклад в развитие этого направления внесли работы Е.И. Калантарова, В.Н. Мельник, В.Н. Соколова, Л.К. Трубиной, А. Boyde, M. Ritter и др.

Создание информационной системы фотограмметрического моделирования микрообъектов, позволяющей получать, хранить и анализировать информацию о форме, рельефе поверхности и пространственных параметрах, необходимо в первую очередь для исследований, связанных с приспособительной изменчивостью, функциональной морфологией, с поиском принципиально новых ключевых признаков и с экологией микромира.

Таким образом, актуальной является задача построения специализированной информационной системы для создания цифровых 3-х мерных моделей микрообъектов живой природы с возможностью анализа их формы, сравнительной характеристикой ныне живущих организмов с их предками, сохранением информации о биоразнообразии биологических микрообъектов, в том числе и эндемичных видов, обитающих в оз. Байкал.

**Целью диссертационной работы** стала разработка информационной системы фотограмметрического моделирования микрообъектов для биологических исследований.

Достижение цели потребовало решения следующих задач:

1. Разработать модель информационной системы создания 3-D модели микрообъекта (увеличение до 500х) основанную на методах фотограмметрического моделирования по стереопарам высокого разрешения;
2. Унифицировать и разработать методы получения стереопары микрообъекта на растровом электронном микроскопе (РЭМ) и определить входные параметры для построения цифровой матрицы рельефа микрообъекта;
3. Осуществить программную реализацию полуавтоматического восстановления цифровой модели рельефа микрообъекта;
4. Применить созданную информационную систему для решения ряда биологических и экологических задач.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Предложена оригинальная модель информационной системы, позволяющая создавать, хранить и анализировать 3-D модели микрообъектов (с увеличением до 500х) с последующим использованием полученной информации при решении биологических и экологических задач.
2. Унифицированы и разработаны методы получения стереопары микрообъекта на растровом электронном микроскопе и определения входных параметров для

фотограмметрического построения цифровой матрицы рельефа микрообъекта (увеличение до 500х).

3. Впервые получены цифровые 3-х мерные модели байкальских видов микрообъектов: коловратки, остракоды; реализован алгоритм решения задачи подсчета возраста байкальского омуля; получены цифровые 3-D модели байкальских аэрозолей.

**Практическая значимость.** Созданная информационная система на основе фотограмметрических методов и методов растрово-электронной микроскопии может быть использована специалистами, изучающими микрообъекты живой природы. В частности, система уже используется при решении задач функциональной морфологии, приспособительной изменчивости, систематики для определения видовой принадлежности при исследовании биоразнообразия оз. Байкал.

**Научная обоснованность и достоверность результатов соискателя** подтверждаются хорошим соответствием результатов многократных экспериментов на тестовых образцах с данными натуральных экспериментов, а также опытом успешного применения разработанной информационной системы при исследовании биоразнообразия микромира оз. Байкал (остракоды, коловратки, чешуя байкальского омуля) и байкальских аэрозолей.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Предложена информационная модель системы фотограмметрического моделирования биологических микрообъектов (увеличение до 500х) для получения, хранения и анализа информации о их 3-D формах и рельефах поверхностей.
2. Унифицированы и разработаны методы определения корректных параметров съемки на растровом электронном микроскопе для формирования стереопары микрообъекта и обеспечения опорными данными при ее обработке.
3. Выполнено проектирование и реализован комплекс прикладных программ, включающий базовый модуль – цифровую фотограмметрическую систему Z-Space 1.2 (lite-версия) и разработанные модули PROGRAM OF ANALYSIS 3D MODEL (PA-3DM), которые обеспечивают полуавтоматизированный процесс моделирования микрообъекта и анализ его цифровой 3-D модели.
4. Осуществлено применение информационной системы на байкальских микрообъектах.

**Личное участие автора.** В работе [1] автор участвовал в постановке задачи, разработке общей концепции моделирования микрообъектов, а также создал программный модуль для анализа цифрового рельефа чешуи байкальского омуля. В работе [2] автором был проведен сбор и анализ исследуемого материала. В работах [3, 4] автор участвовал в проектировании и создании базы данных и пакета прикладных программ. В работах [5-10, 12-14] автор принял непосредственное участие на всех этапах исследования от постановки задач до апробации разработанных методов на конкретных микрообъектах. В работе [11] автору принадлежит разработка методики получения стереопар образцов.

**Представление работы.** Основные положения диссертации докладывались на российских и международных конференциях, симпозиумах, школах-семинарах: Биоразнообразие и динамика экосистем Северной Евразии (Новосибирск, 2000); III Верещагинская Байкальская международная конференция (Иркутск, 2000); Моделирование, базы данных и информационные системы для атмосферных наук (Modas 2001, Иркутск, 2001); «Междисциплинарные исследования в Байкальском регионе» (Иркутск, 2001); III Международный симпозиум «Видообразование в древних озерах» (SIAL'3, Иркутск, 2002); «Математическое моделирование и

информационные технологии» (Иркутск-Ангасолка, 2002); Всероссийская конференция «Инфокоммуникационные и вычислительные технологии и системы» (Улан-Удэ, 2003); Международная конференция «Аэрозоли естественного и антропогенного происхождения» (Санкт-Петербург, 2006); VIII Международная конференция «Распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии» (Йошкар-Ола, 2007).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, куда входят (в скобках в числителе указан общий объем этого типа публикаций, в знаменателе – объем, принадлежащий автору) 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК для представления основных научных результатов диссертации (0.64/0.28 печ. л.), 2 свидетельства РОСПАТЕНТа, 10 тезисов и статей в изданиях трудов конференций (2/1.1 печ. л.).

**Структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы и трех приложений. Общий объем работы составляет 125 страниц машинописного текста. Список литературы включает 118 наименований, в том числе 54 на иностранном языке.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, приведена структура работы, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

**Первая глава** посвящена анализу предметной области, описанию исследуемой проблемы, формулировке требований, предъявляемых к модели информационной системы сбора, анализа и хранения биологического материала, литературному обзору научных публикаций, посвященных фотограмметрической обработке РЭМ-стереопары.

Внедрение современных информационных технологий приводит к пересмотру многих традиционных систем обработки и анализа информации. Например, в биологических дисциплинах при изучении микрообъектов живой природы (как правило, такие исследования ведутся с помощью микроскопа) можно непосредственно моделировать объект наблюдения и проводить его всесторонний анализ с помощью 3-D модели, что позволяет исследователю осуществлять компьютерную диагностику видов в 3-D режиме и хранить информацию о биоразнообразии микрообъектов на цифровом носителе.

В традиционной системе проведения биологических исследований информация о микрообъектах хранится с помощью типовых коллекций проб биологического материала. Данная система требует наличия специализированной материально-технической базы, обеспечивающей необходимые условия для качественного хранения проб: средства контроля температурных режимов, наличие помещения, посуды, реактивов и т.д. Хранение препаратов в виде коллекций биологических микрообъектов является, в целом, типовым, но данный подход имеет ряд недостатков. Среди них можно выделить затрудненный поиск необходимого биологического материала, использование бумажных каталогов, не всегда позволяющих оперативно и в полном объеме получать требуемую информацию, отсутствие оперативного обмена информацией между исследователями. Кроме того, срок хранения подобных биологических препаратов ограничен из-за разложения фиксирующих препаратов, увеличения разницы массы фиксированных и живых особей, несоблюдения правильных режимов хранения (температурный, световой), возможной утерей коллекций образцов и т.д.

Основываясь на проведенном анализе существующей системы обработки информации о биологических микрообъектах, были предложены следующие

основные требования к модели информационной системы получения, хранения и обработки первичных биологических материалов:

1) модель должна обеспечивать возможность получения, хранения и анализа информации о формах и рельефах поверхностей биологических микрообъектов (увеличение до 500х);

2) модель должна обеспечивать неразрушающую реконструкцию микрообъектов, поскольку биологические образцы очень чувствительны к тактильной обработке;

3) информационная система должна быть ориентирована на пользователя, не имеющего навыков работы в области информационных технологий;

4) информация о трехмерной модели микрообъекта должна храниться в удобном формате данных, поддерживаемом большинством программных систем обработки и моделирования 3-D объектов;

5) коллекции цифровых 3-D моделей микрообъектов должны храниться в базе данных исследователя, с возможностью их восстановления, визуализации и анализа; при необходимости должна осуществляться оперативная передача информации об объекте или его трехмерной форме другим пользователям.

На основании сформулированных требований и анализе литературных данных было предложено оригинальное решение, заключающееся в применении фотограмметрических методов совместно с возможностями графической обработки цифровых 3-D моделей. Ранее проведенные исследования в этой области<sup>1</sup> показали перспективность применения фотограмметрических методов при восстановлении форм микрообъектов. С созданием растровых электронных микроскопов, обладающих значительной глубиной поля зрения (в 300 раз больше, чем у оптических), применение стереометода становится эффективным и представляет практический интерес<sup>2,3,4</sup>.

**Во второй главе** представлена разработанная автором модель информационной системы фотограмметрического моделирования микрообъектов, набор унифицированных методов и новый метод определения опорных данных для работы с РЭМ-стереопарой, результаты экспериментальных исследований применяемых методов.

Проведенный анализ существующих методов исследования микрообъектов с последующим их хранением в виде специально приготовленных проб показал отсутствие комплексного решения при работе с первичным биологическим материалом. Была предложена модель информационной системы фотограмметрического моделирования микрообъектов, предназначенная для получения, анализа и хранения цифровых трехмерных моделей биологических микрообъектов. Данная модель была создана с учетом всех требований, перечисленных в первой главе.

*1) Модель должна обеспечивать возможность получения, хранения и анализа информации о формах и рельефах поверхностей биологических микрообъектов.* На рис. 1 приведена модель информационных процессов системы фотограмметрического моделирования микрообъектов. Структурно процесс работы

---

<sup>1</sup> Boyde A. Quantitative photogrammetric analysis and qualitative stereoscopic analysis of SEM images // J. Microscopy, N 98(3), 1973.– P. 452–471.

<sup>2</sup> Финковский В.Н., Мельник В.Н. Фотограмметрическая обработка снимков, полученных на растровом электронном микроскопе // Геодезия и картография, N 9 1978 г. – С. 46 – 52.

<sup>3</sup> Соколов В.Н., Лебедев А.А., Юрковец Д.И., Риман Д.В. Мельник В.Н. Метод трехмерной реконструкции микрорельефа поверхности твердых тел по их РЭМ – стереоизображениям // Изв. АН. Сер. физ.. Т.59 N 2, 1995г.– С. 28 – 35.

<sup>4</sup> Трубина Л.К. Цифровая фотограмметрическая обработка снимков для получения геопространственных данных при оценке состояния экосистем // автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук, Новосибирск, 2002, 35 с.



по созданию и анализу цифровой трехмерной модели микрообъекта был разделен на два этапа. Первый этап заключался в проектировании основных блоков моделирования цифровой 3-D модели микрообъекта: подготовка препарата; исследование препарата в РЭМ; получение снимков высокого разрешения; определение входных параметров для фотограмметрической обработки снимков; фотограмметрическая обработка стереопар и получение 3-D модели микрообъекта. Второй этап связан с визуализацией 3-D модели микрообъекта и ее анализом.

2) *Модель должна обеспечивать неразрушающую реконструкцию микрообъектов, поскольку биологические образцы очень чувствительны к тактильной обработке.* Фотограмметрические методы, положенные в основу построения модели микрообъекта, обеспечивают неразрушающую реконструкцию биологического образца. В данной работе для сохранения тканевой структуры микрообъекта, максимально соответствующей исходному состоянию, промежутки времени, затрачиваемый на получение цифровой трехмерной модели, был минимальным. Образцы биологического материала фиксировались с помощью стандартных методик.

3) *Информационная система должна быть ориентирована на пользователя, не имеющего навыков работы в области информационных технологий.* Современные цифровые фотограмметрические системы (ЦФС) позволяют моделировать практически все процессы, выполняемые в классической фотограмметрии. Это значительно расширило сферы их применения во многих областях: археологии, строительстве, биологии, медицине, и дало возможность пространственно отображать окружающую среду достаточно близко к реальности. Системы стали обладать понятным и удобным интерфейсом, позволяющим работать с ним людям без специального образования.

На этапе проектирования информационной системы был проведен анализ наиболее известных ЦФС и принято решение использовать систему Z-Space 1.2, в которой реализованы основные стадии получения цифровой матрицы рельефа земной поверхности, и данная система оказалась наиболее приемлемой по соотношению цена–качество. Поскольку параметры 3-D модели, формируемой по РЭМ-стереопаре, существенно отличаются от реализованных в Z-Space 1.2, потребовались решить ряд методических и теоретических задач обеспечивающих адаптацию фотограмметрических методов классической аэрофотосъемки к созданию цифровой 3-D модели микрообъекта по стереопаре, полученной на РЭМ.

4) *Информация о трехмерной модели микрообъекта должна храниться в удобном формате данных, поддерживаемом большинством программных систем обработки и моделирования 3-D объектов.* В данной работе информация о 3-D модели исследуемого микрообъекта хранится в виде стандартного текстового файла.

5) *Коллекции цифровых 3-D моделей микрообъектов должны храниться в базе данных исследователя, с возможностью их восстановления, визуализации и анализа; при необходимости должна осуществляться оперативная передача информации об объекте или его трехмерной форме другим пользователям.* Хранение информационных ресурсов осуществляется с помощью базы данных РЭМ-снимков микрообъектов, базы данных проектов фотограмметрического восстановления 3 - D цифровых матриц рельефа микрообъектов и базы данных исследователей, ведущих работу с биологическим материалом.

Базовым условием для построения цифровой модели микрообъекта стало определение корректных входных данных – стереопары высокого разрешения, получить которую возможно только с помощью РЭМ. Это достигалось правильным выбором режима работы микроскопа, сохраняющим тождественность масштаба и уровня контрастности на стереопаре, а также получением изображения без какой-либо

предварительной обработки сигнала. В идеальном случае центральная ось и ось наклона пересекались в точке поверхности образца, так называемом eucentric tilt<sup>5</sup>. В представленной работе захват изображений осуществлялся в трех позициях: 1) исходная позиция (при 0°) перпендикулярно плоскости образца с определением входных параметров (увеличение –  $M$ , рабочее расстояние –  $D$ ), сохранение изображения; 2) сканирование для получения левого изображения стереопары: наклон образца с помощью гониометрического устройства на угол  $\alpha_{лев}$ , сохранение полученного изображения; 3) сканирование для получения правого изображения стереопары: наклон образца на угол  $\alpha_{прав}$ , сохранение полученного изображения. Как правило, в работе практиковалось получение симметричного изображения (разница  $2x\alpha$ ).

В начале работы фотографирование образцов осуществлялось на широкоформатную пленку Т-Мах с помощью фотоаппарата класса “Зенит”, встроенного в электронный микроскоп. Затем, совместно с сотрудниками Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (г. Новосибирск), разработаны и внедрены технические и программные средства, преобразующие выходной сигнал с РЭМ в цифровое изображение, поступающее непосредственно на компьютер. Прямое соединение значительно облегчило работу по восстановлению рельефа объекта по стереопаре, помогая оператору выбрать зону перекрытия для ее формирования.

Для проверки возможности воспроизведения стереоэффекта использовался анаглифический метод, заключающийся в воспроизведении стереоизображений, окрашенных в дополнительные цвета. При проведении исследований каждая стереопара была проверена этим методом и, с помощью возникающего в специальных очках стереоэффекта, оценивалась результативность дальнейшей работы со стереопарой.

В работе были унифицированы методы определения входных параметров для фотограмметрической обработки РЭМ-стереопары. В обобщенном виде функциональная зависимость между исходными параметрами стереопары и получаемыми по ней пространственными координатами объекта при фотограмметрическом восстановлении модели выглядит следующим образом:

$$F(C_n, A_G, x_n, y_n, X, Y, Z) = 0 \quad (1)$$

где  $n$  – индекс, принимающий значение 1 или 2, что соответствует левому и правому изображениям стереопары,  $C_n$  – координаты и углы ориентации съемочной (фотокамеры) системы;  $A_G$  – опорные данные;  $x_n, y_n$  – координаты соответствующих точек левого и правого изображений;  $X, Y, Z$  – пространственные координаты определяемых точек объекта. Пространственные координаты вычисляются как функции измеренных величин, при этом возможно использование различных математических зависимостей, реализованных в виде конкретных алгоритмов теми или иными программными средствами<sup>6</sup>.

К параметрам, характеризующим геометрию съемочной системы  $C_n$ , относятся: увеличение –  $M$ , при котором производилась съемка, рабочее расстояние  $D$  – расстояние между объектом и плоскостью изображения; углы ориентации съемочной системы при получении левого и правого изображений стереопары ( $\alpha_{лев}, \alpha_{прав}$ );  $f$  – фокусное расстояние (или «псевдофокусное», поскольку речь идет о РЭМ, а не о фотоаппарате). Для расчета корректного фокусного расстояния был реализован метод, заключающийся в самокалибровке модели по результатам взаимного ориентирования,

<sup>5</sup> Bethela E. W., Bastacky S. J., Schwartz K. S. Interactive Stereo Electron Microscopy Enhanced with Virtual Reality // LBNL-48336, 2001.–P. 252–261.

<sup>6</sup> Трубина Л.К. Стереомодели в изучении биологических объектов, монография – Новосибирск: СГГА, 2006. – 136 с.

выполняемого с помощью системы Z-Space 1.2 (lite-версия). Приближенное значение вычислялось по формуле<sup>7</sup>:

$$f_{\text{выч}} = MxD \quad (2)$$

где  $M$  – масштаб,  $D$  - рабочее расстояние съемки.

Расчет фокусного расстояния производился для каждой обрабатываемой РЭМ-стереопары. Для примера в таблице 1 приводится расчет фокусного расстояния для РЭМ - изображений образца чешуи, полученного при углах наклона  $\alpha_{\text{лев}} = -5:00$ ,  $\alpha_{\text{прав}} = 5:00$ ,  $M = 104x$ ,  $D = 10\text{мм}$ . Приближенное значение  $f_{\text{выч}} = 1040\text{ мм}$ ; корректное фокусное расстояние для дальнейших расчетов определено как  $f_{\text{кор}} = 980\text{ мм}$ .

Таблица 1. Сходимость вычислительного процесса при построении модели на этапе взаимного ориентирования в зависимости от фокусного расстояния.

$f$	Состояние модели этап взаимного ориентирования Z-Space 1.2.	Получаемые углы ориентации	
		$\alpha_{\text{прав}}$	$\alpha_{\text{лев}}$
600	вычислительный процесс расходящийся		
850		2:57	-2:46
900		4	-4:30
950		4:20	-5:00
980		5:04	-5:06
1000		5:10	-5:17
1040		5:17	-5:31
1100		5:28	-5:34
1500	вычислительный процесс расходящийся		

В работе был также проведен эксперимент, уточняющий вид проекции модели при работе с РЭМ (увеличение до 500x). Он заключался в создании серии снимков тестовых сеток (угол наклона от 5° до 35°) при различных увеличениях. В результате определена тенденция к сходимости на РЭМ-изображениях проекций параллельных между собой прямых в некоторой точке, так называемой точке схода, подтверждающая правомерность использования центрального проецирования при малых увеличениях. Проведенное исследование с тестовыми сетками показало возможность использования классических формул расчета пространственных координат местности, реализованных в современных цифровых фотограмметрических системах.

Предложен новый метод определения опорных данных  $A_T$  для внешнего ориентирования модели, формируемой по стереопаре, полученной на РЭМ. В отличие от классической фотограмметрии, где координаты опорных точек определяются в ходе наземных измерительных работ, на РЭМ - изображении высота микрообъекта неизвестна и, как правило, не может быть точно измерена. Для решения этой задачи был разработан метод заключающийся в нивелировании высоты столика, на котором располагается микрообъект, по отношению к высоте исследуемого образца. При расчетах принимается, что высота столика -  $Z_{\text{столика}}$ , есть некоторая константа. Последующие эксперименты показали пригодность данного метода для выполнения внешнего ориентирования модели РЭМ-стереопар. В работе проведена реконструкция нескольких тестовых образцов на разных увеличениях и сравнение высот точек полученной 3-D модели, и высот этих же точек тестовых образцов, измеренных

<sup>7</sup> Мельник В.Н. Фотограмметрическая обработка снимков, полученных на растровом электронном микроскопе // автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, Москва, 1981, 28 с.

методами оптической микроскопии. В качестве тестовых образцов использовались кристаллики сахара, а при реконструкции байкальских остракод применялись частицы карборунда, приближенные по размерам к исследуемому образцу. Относительная ошибка калибровки по высоте находилась в пределах 1 - 5%. Реконструкция данных образцов на разных увеличениях позволила построить корректную фотограмметрическую модель.

Для верификации модели по  $x$ -,  $y$  – направлениям были применены специальные столики с нанесенными сетками (nickel grid, copper grid for transmission microscope, 125 $\mu$ m,  $d=3,05$  mm, hole 95  $\mu$ m, open area size 55%). Перекрестия тестовых сеток промерялись на инвертированном микроскопе проходящего света Axiovert 200, а также на трансмиссионном микроскопе LEO 906E (Transmission Electron Microscope LEO 906E). Создано несколько векторных диаграмм геометрических искажений РЭМ Philips SEM 505M. В целом надо отметить, что эти искажения имели скорее случайный характер и не оказали существенного влияния на точность построения модели. Для получения высококачественных результатов проверка микроскопа должна выполняться непосредственно перед работой с микрообъектом. Важно, чтобы неизменными сохранялись все операционные параметры РЭМ: рабочее расстояние, увеличение, напряжение тока.

В работе были выполнены вычислительные и технологические эксперименты для выбора оптимальных параметров съемки на РЭМ и обеспечения опорными данными для дальнейшей обработки стереопары. Создана модель информационной системы фотограмметрического моделирования микрообъекта, удовлетворяющая всем перечисленным в первой главе требованиям.

**В третьей главе** представлена программная реализация полуавтоматического восстановления цифровой модели рельефа микрообъекта в виде комплекса прикладных программ. В качестве базового модуля была использована ЦФС Z-Space 1.2 (lite-версия), дополненная специально разработанными модулями, обеспечивающими фотограмметрическую обработку стереопар, получаемых на РЭМ, и пространственный анализ 3-D модели микрообъекта. Для использования Z-Space 1.2 с целью получения моделей микрообъектов, совместно с разработчиками программной системы были внесены изменения, реализованные в новой версии Z-Space 1.2 (lite-версия). Устанавливаемые параметры для моделирования стали определяться в микронах. Для учета специфики применения ЦФС при обработке стереопар, полученных на РЭМ, информационная система на базе Z-Space 1.2 (lite-версия) была дополнена двумя специально разработанными программными модулями системы «РА-3DM/Входные данные» и «РА-3DM/ Работа с 3D моделью» (рис. 2). Для разработки модуля работы с трехмерной моделью объекта использовались основные возможности графической библиотеки Open GL.

*Модуль РА-3DM / Входные данные* решает задачу определения корректных входных параметров РЭМ-стереопар: производится в печать краевых меток; задание списка опорных точек; сохранение данного входного файла опорных точек в требуемом виде для корректной работы в программе Z-Space 1.2 (lite-версия). В отличие от классической аэрофотограмметрии, где на аэрофотоснимок краевые метки впеваются во время съемки, при получении снимков на микроскопе этого не происходит. Для краевой разметки РЭМ-снимков пользователь осуществляет выбор схемы расположения краевых меток с помощью кнопок на панели инструментов. В программе реализовано два вида схем расположения краевых меток на стереопаре: а) 4 Fid's - четыре метки, расположение «прямой крест», б) 3 Fid's- три метки.

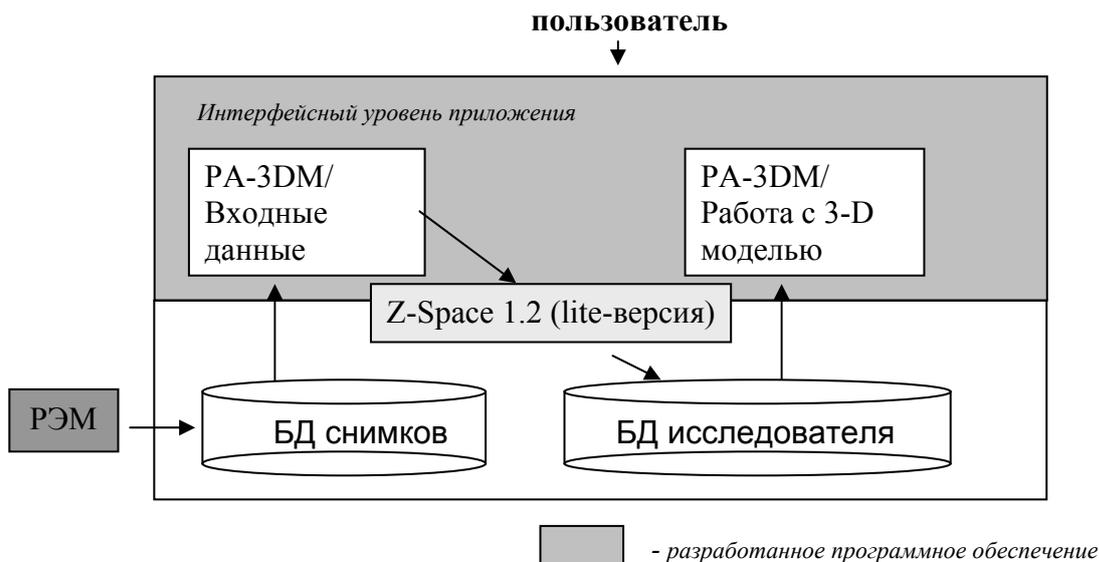


Рис. 2. Модули программной системы PA-3DM, потоки обменов данными между модулями.

Для этапа внешнего ориентирования модели, с помощью разработанного метода определения опорных данных  $A_T$  для РЭМ-снимков в модуле «РА-3DM/ Входные данные», создается файл опорных точек. При работе с РЭМ-изображением оператор вручную выполняет идентификацию соответствующих опорных точек на изображении, полученном в исходной позиции (перпендикулярно плоскости образца), с помощью опции меню «Внешнее ориентирование». Все точки нумеруются в порядке их нанесения. Номера точек и их координаты  $x_i$ ,  $y_i$ , определенные программой «РА-3DM/ Входные данные», а также их высоты  $z_i$ , которые принимаются равными для данных точек  $z_i = z_{\text{столика}}$ , заносятся в текстовый файл *geod.pnt* и сохраняются в определенной пользователем директории.

*Z-Space 1.2 (lite-версия)*. Обработанная с помощью модуля «РА-3DM/ Входные данные» РЭМ-стереопара, а также определенные входные параметры вводятся в качестве исходных данных для работы с цифровой фотограмметрической системой *Z-Space 1.2 (lite-версия)*. Проект восстановления 3-D модели микрообъекта включает в себя: ввод данных ( $M, f$ ); поиск точек на основании алгоритма соответствия (*Matching-Algorithmus*), позволяющего автоматически или в ручном режиме идентифицировать гомологические точки на двух стереоизображениях; генерация цифровой модели рельефа, которая строится на заданной оператором области. Проекты фотограмметрического восстановления хранятся в базе данных проектов.

*Модуль PA-3DM / Работа с 3D моделью*. Второй программный модуль «РА-3DM / Работа с 3D моделью» разработан для решения задач моделирования и визуального отображения на экране монитора 3-D модели микрообъекта с возможностью ее анализа исследователем.

Ввод данных для визуализации цифровой модели рельефа осуществляется из стандартного текстового ASCII-файла (\*.\*, \*.txt, \*.asc – текстовый файл в кодировке DOS). Файл с данным расширением экспортируется программой *Z-Space 1.2 (lite-версия)*. Экспортируемый файл имеет следующий формат: три столбца соответствуют координатным значениям точек  $x_i$ ,  $y_i$ ,  $z_i$ . Пример файла приведен ниже:

```

219.0  315.0  -10000.0
233.0  315.0   906.8      }      фрагмент файла setka6.asc.
235.0  315.0   907.3

```

Строки, в которых значение высоты равно  $z_i = -10\,000.0$ , относятся к участкам на стереопаре не восстановленным Z-Space 1.2 (lite-версия) - малоконтрастные темные или слишком светлые пятна на РЭМ-изображениях. Получив данный файл, программный модуль обеспечивает построение цифровой матрицы рельефа, участки малой контрастности аппроксимируются по высотам некоторой ближайшей окрестности данной точки. Затем осуществляется демонстрация пользователю построенного 3-D рельефа микрообъекта на экране компьютера. Визуализация 3-D модели микрообъекта в программном модуле «РА-3DM/Работа с 3D моделью» может быть выполнена в разных режимах: точечное представление, создание контура рельефа исследуемой поверхности и в виде полигонов. При работе с трехмерной моделью используется простой интерфейс с набором кнопок и панелью инструментов. В «РА-3DM/Работа с 3D моделью» реализован большой набор дополнительных средств преобразования поверхности и различных операций с ней: вращение; масштабирование; рассечение (использование плоскости среза); растягивание поверхности (изменение масштаба вдоль оси  $Z$ ) с использованием методов умножения на число; сохранение поверхности в виде файла формата bmp на любом шаге работы с трехмерной поверхностью; отображение координатных осей  $X, Y, Z$ . Использование инструментальных средств обеспечивает дополнительные возможности для анализа, например, цветового картографирования объекта (Палитра), профилирования (Срез). Срез – инструмент, позволяющий получить профили микрорельефа вдоль любого заданного пользователем направления с возможностью просмотра графика высот, а также при необходимости дальнейшей работой с оставшейся после отсечения частью.

**Четвертая глава** посвящена применению разработанной информационной системы при решении задач определения видовой принадлежности, морфологической изменчивости, сохранения биоразнообразия озера Байкал, а также при решении экологических задач – определения источников происхождения атмосферных аэрозолей в Байкальском регионе.

1. *Задача определения возраста байкальского омуля (*Coregonus autumnalis migratoris* Georgi) с помощью созданной цифровой модели поверхностного слоя его чешуи.* Распознавание закономерностей поверхностного рельефа чешуи байкальского омуля (самой многочисленной рыбы оз. Байкал, имеющей важную промысловую ценность) являлось одной из значимых задач байкальской ихтиологии. От правильной интерпретации формы гиалодентинового слоя чешуйной пластинки зависит точность определения возраста рыбы, принадлежность к морфоэкологической группе (МЭГ) и особенности экологических условий ее обитания (прогрев и циркуляция воды в дельтах рек, обеспеченность МЭГ кормовыми ресурсами). Поверхностный рельеф чешуи периодически повторяется, что объясняется сменой сезонов, благодаря чему существует возможность выделять в чешуйном рисунке годовые зоны. У разных исследователей, работающих с одним и тем же экземпляром чешуи, результат подсчета числа годовых зон различный, поскольку размеры чешуи байкальского омуля составляют от 2 до 8 мм и практически невозможно получить неискаженную структуру поверхности гиалодентинового слоя. В результате применения созданной информационной системы исследователь может получить и проанализировать интересующий его срез восстановленной 3-D модели чешуи, а также построить график высот вдоль любого заданного направления (рис. 3). С помощью данного графика, исследователь выделяет концентрические склериты, несущие информацию о возрасте рыбы.

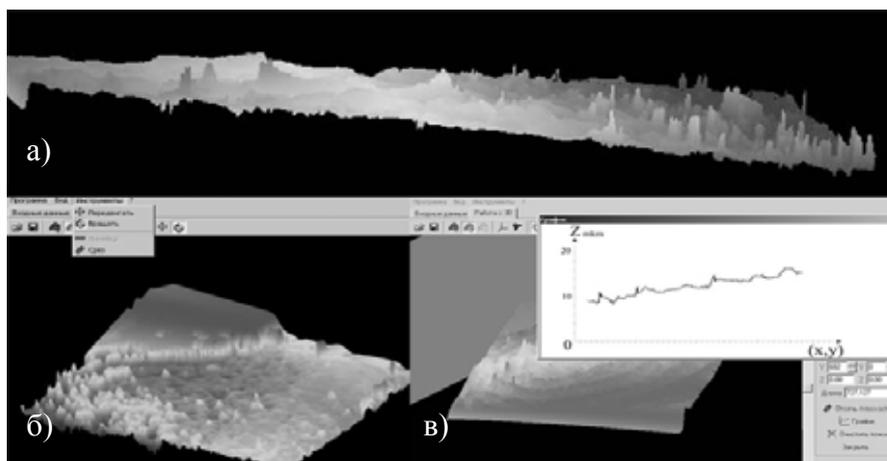


Рис. 3. Этапы создания профиля цифрового микрорельефа, определение годовых склеритов: а) создание профиля ЦМР; б) восстановленный участок чешуи байкальского омуля; в) график высот.

Полученные, с помощью биологических коллекций чешуи рыб, результаты подтвердили важный факт снижения темпа роста к половозрелому возрасту омуля, на основании которого совместно с биологами<sup>8</sup> установлено, что рыба переходит на другой корм питания. В возрастных группах (7-9 лет) вплоть до начала шестидесятих годов прошлого века омули интенсивно питались молодой бычка-желтокрылки (*Cottocomephorus grewenkii*), а доля ракообразных (*Epishura baikalensis*) и макрогептопуса (*Macrohektopus branickii*) в их желудках снижалась. В связи с постройкой Иркутской ГЭС и поднятием уровня воды Байкала произошло разрушение большей части нерестилищ бычка - желтокрылки и резкое снижение численности этого вида, что привело к перестройке питания омуля, снижению калорийности его корма, вследствие чего происходило замедление темпов развития особей.

2. *Определение пространственной структуры раковины байкальской остракоды для создания электронных коллекций.* Остракоды являются одним из важных компонентов морских и пресноводных экосистем. Имея двустворчатую раковину, сохраняющуюся в ископаемом состоянии, остракоды стали хорошим модельным объектом для построения трехмерных изображений их внешнего вида. С помощью разработанной информационной системы восстановлена ЦМР байкальской остракоды *Cytherissa pennata*, получены продольный и поперечный разрез ее цифровой модели, а также создана gif-анимация, выполняющая полный оборот на 180° 3-D модели ее створки. Положено начало создания коллекции трехмерных изображений байкальских остракод (коллекции микроскульптуры створок), позволяющей накапливать научную информацию для последующего морфологического сравнения с мировой фауной остракод, определять их схожесть и принципиальные различия.

3. *Моделирования байкальских коловраток на примере Keratella Cochlearis.* Коловратки являются одним из значимых компонентов экосистемы оз. Байкал. Благодаря своим небольшим размерам (десятки-сотни микрон), повсеместному распространению и четкой системе «линейных» морфологических параметров панциря<sup>9</sup>, они стали хорошим модельным объектом для построения трехмерных изображений, по которым проводилось исследование их функциональной морфологии. Получена цифровая матрица рельефа поверхности коловратки *Keratella*

<sup>8</sup> Тягун М.Л. Изучение структуры и роста чешуи байкальского омуля (*Coregonus autumnalis migratorius* Georgi). Автореферат диссертационной работы на соискание ученой степени канд. биол. наук. Иркутск, 2004. 12 с.

<sup>9</sup> Атлас и определитель пелагиобионтов Байкала/ Тимошкин О.А., Мазепова Г.Ф., Мельник Н.Г. и др. – Н.: Наука. 1995г. – 694с.

*cochlearis cochlearis*, а также определена характерная скульптура на спинной пластинке образца (рис. 4в). Параллельно с восстановлением скульптуры панциря образца коловратки, проведена работа по созданию макета образца с помощью программы 3-D моделирования (рис. 4а,б). Моделирование скульптуры панциря и формы коловраток направлены на автоматизацию выявления морфологической изменчивости и компьютерную видовую диагностику природных образцов.

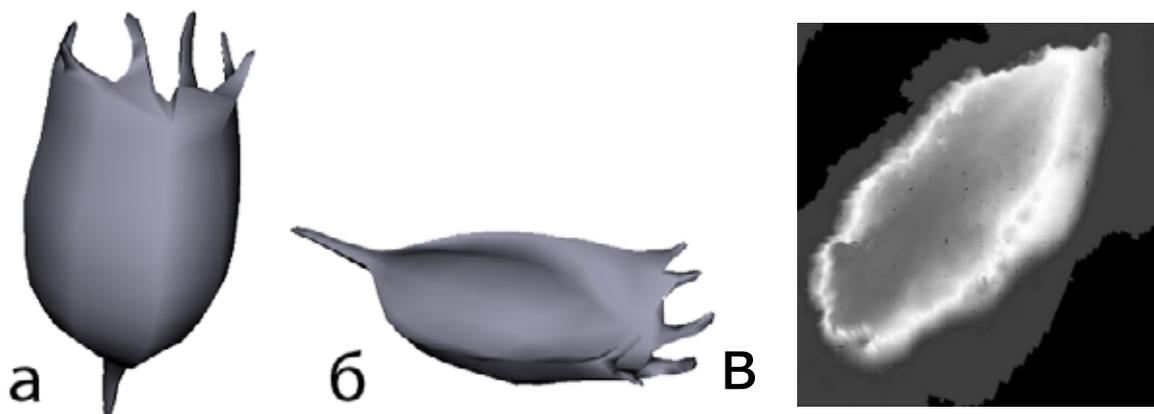


Рис. 4. Смоделированное изображение коловратки: а) дорсально, б) вентрально, в) восстановленный рельеф скульптуры панциря образца.

4. Решение задачи воссоздания ЦМР байкальских аэрозолей. Исследованию свойств атмосферных аэрозолей и их роли в различных биогеохимических циклах биосферы в настоящее время уделяется большое внимание. Это связано в первую очередь с изучением глобальных изменений климата и загрязнением окружающей среды, в которых аэрозоли играют одну из ведущих ролей. На долю аэрозолей антропогенного происхождения приходится примерно 20% от содержания естественных аэрозолей<sup>10</sup>. Полученные с помощью созданной информационной системы пространственные изображения аэрозолей помогают решать задачу вклада отдельных источников в общий состав аэрозольного вещества в атмосфере Байкальского региона. В байкальских аэрозолях найдены частицы биологической компоненты: цисты некоторых байкальских планктонных водорослей; пыльца различных видов растений; определены частицы минерального происхождения, а также частицы техногенного характера над акваторией Южного Байкала.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Предложена и описана модель информационной системы фотограмметрического моделирования микрообъектов для получения, сбора и хранения первичных биологических данных на основе фотограмметрических методов и методов растрово-электронной микроскопии.
2. Унифицированы методы определения корректных параметров съемки на растровом электронном микроскопе для формирования стереопары микрообъекта (метод получения стереопары на РЭМ с увеличением до 500х; метод вычисления фокусного расстояния) и предложен новый метод определения опорных данных для фотограмметрического восстановления цифровой модели микрообъекта по РЭМ-стереопаре.
3. Выполнено проектирование и реализован комплекс прикладных программ, включающий базовый модуль – цифровую фотограмметрическую систему Z-Space 1.2

<sup>10</sup> Бримблкомб П. Состав и Химия атмосферы, М: Мир, 1988г.– 351с.

(lite-версия) и разработанные модули «РА-3DM/ Входные данные», «РА-3DM/ Работа с 3-D моделью», обеспечивающие полуавтоматизированный процесс моделирования микрообъекта и анализ его цифровой 3-D модели.

4. Проведена апробация созданной информационной системы на конкретных примерах байкальских микрообъектов: воссоздание рельефа гиалодентинового слоя чешуи байкальского омуля (с возможностью определения возраста рыбы); создание трехмерной поверхности раковины байкальской остракоды (для создания электронных коллекций); моделирование байкальских коловраток (функциональная морфология; приспособительная изменчивость, поиск принципиально новых ключевых признаков); восстановление 3D модели байкальских аэрозолей (уточнение источников происхождения).

5. Создана первая версия биологической коллекции цифровых трехмерных изображений байкальских микрообъектов.

#### **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:**

##### ***Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК для представления основных научных результатов диссертации:***

1. Ходжер Т.А., Бычков И.В., Тягун М.Л. Использование методов цифровой фотограмметрии для воссоздания рельефа чешуи байкальского омуля// Вычислительные технологии. – 2005. – Том 10, № 4. – С. 104 – 110.
2. Голобокова Л.П., Ходжер Т.А., Ходжер Т.В. Современная оценка сухих осадений химических веществ на подстилающую поверхность в разных районах азиатской территории России// Оптика атмосферы и океана. – 2007. – Том 20, № 06. – С. 512 – 516.

##### ***Свидетельства РОСПАТЕНТа РФ:***

3. Ходжер Т.В., Голобокова Л.П., Нецветаева О.Г., Чубаров М.П., Потемкин В.Л., Сергеева В.Н., Лаврентьева Л.П., Ходжер Т.А. Атмосферные аэрозоли Сибири (БД 'Аэрозоли') // Свидетельство об официальной регистрации базы данных № 990012 от 10.03.1999г.
4. Дроздов В.Н., Ходжер Т.А. Программа для ЭВМ. Создание Интернет атласов животного и растительного мира оз. Байкал (ППП «Интернет-атлас оз. Байкал»)// Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2000611361 от 25.12. 2000г.

##### ***Публикации по материалам конференций:***

5. Ходжер Т.А., Дроздов В.Н., Тягун М.Л., Стягов Е.В., Перетолчин А.С., Осипов Э.Ю., Троицкая Е.С., Ханаев И.В. Использование математических, мультимедийных и геоинформационных технологий в исследованиях водных экосистем на примере озера Байкал // Третья Верещагинская Байкальская конференция: Тез.докл. – Иркутск, 2000. – С.260 – 262.
6. Ходжер Т.А., Тягун М.Л., Грачев М.А. Поверхностный рельеф чешуи байкальского омуля (*Coregonus autumnalis migratorius* Georgi) методом воссоздания трехмерного изображения по стереопаре// Сборник трудов конференции Modas – 2001, Моделирование, базы данных и информационные системы для атмосферных наук.– Томск, 2001, – С. 93.
7. Ходжер Т.А., Дроздов В.Н., Тягун М.Л., Осипов Э.Ю. Использование современных компьютерных технологий в лимнологических исследованиях на примере озера Байкал // Междисциплинарные исследования в Байкальском регионе. – Иркутск, 2001. – С.79 – 83.
8. Сергеева В.Н., Золотарев К. В. Воробьева С. С. Дроздов В. Н. Тьков А. В. Ходжер Т. А. Железнякова Т. О. Павлов В. Ю. О возможности автоматизированной

- обработки и количественного анализа изображений байкальских диатомей. // Сборник докладов 6-ой Международной конференции "Распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии" РОАИ-6,- 2002 – С.82 - 85.
9. Ходжер Т.А., Тягун М.Л., Тьков А.В. Использование фотограмметрических методов для воссоздания рельефа эласмоидной чешуи //Тез.докл. школы-семинара «Математическое моделирование и информационные технологии» 25-29 сент. 2002 г. – Ангасолка, 2002. – С.34 – 35.
  10. Khodzher T.A., Tyagun M.L. An application of photogrammetric methods for the reconstruction of relief of elasmoidic scales // Speciation in Ancient Lakes (SIAL-3): Abstract. – Novosibirsk: Nauka, 2002. – P.77.
  11. Тягун М.Л., Ходжер Т.А., Таничев А.И. Различия рельефных структур чешуи омуля и сига-пыжа оз. Байкал // Экологически эквивалентные и экзотические виды гидробионтов в великих и больших озерах мира: Тез. докл. (Материалы второго международного симпозиума). – Улан-Удэ, 2002. – С. 93 – 94.
  12. Бычков И.В., Ходжер Т.А. Анализ возможности применения фотограмметрических методов к воссозданию цифровой модели рельефа биологических объектов // Материалы Всероссийской конференции «Инфокоммуникационные и вычислительные технологии и системы». – Улан-Удэ, 2003. – С.85 – 88.
  13. Ходжер Т.А. Исследование байкальских аэрозолей с помощью сканирующего электронного микроскопа // Пятая международная конференция «Естественные и антропогенные аэрозоли» Тезисы докладов; Санкт-Петербург. Санкт – Петербург, 2006г., С.78.
  14. Kotsar O.V., Khodzher T.A., Drozdov V. N. Sapozhnikova Yu. P. Application of Computer Technologies to Analysis of Microscopic Organisms from lake Baikal// Conference Proceedings.8-th International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis: new Information Tecnologies. PRIA-8-2007. October 8-12, 2007. Yoshkar - Ola, Russia; 2007, P. 282 – 284.