

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

### ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНЫХ МОДУЛЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИИ И ЦИФРОВОЙ АЭРОФОТОСЪЕМКИ ЛЕСНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

© 2013 г. И. М. Данилин<sup>1\*</sup>, М. Н. Фаворская<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск

<sup>2</sup>Сибирский государственный аэрокосмический университет им. академика М.Ф. Решетнева, Красноярск

\*E-mail: danilin@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 14.02.2012 г.

Лазерная локация, совмещенная с цифровой аэрофотосъемкой, является одним из приоритетных направлений для дистанционного мониторинга лесных земель. Данное направление опирается на современные технологии цифровой фотограмметрии и геоинформационных систем, а также на методы цифровой обработки и моделирования многомерных отраженных лазерных сигналов. Одной из основных задач данного направления при мониторинге лесных территорий является моделирование структуры леса и рельефа местности. Существующие системы моделирования земных поверхностей не учитывают специфики моделирования лесного покрова. Предлагаемые в настоящей статье подходы и вычислительные алгоритмы позволяют адекватно воспроизводить трехмерную текстуру земных покровов и лесной растительности на основе данных лазерной локации и цифровой аэрофотосъемки, при необходимости выполнять визуализацию природных эффектов (наложение снежного покрова, дождя, тумана), а также моделировать режимы освещенности сцен лесных территорий.

**Ключевые слова:** моделирование, лесные территории, воздушная лазерная локация, цифровая аэрофотосъемка

DOI: 10.7868/S0205961413020024

#### ВВЕДЕНИЕ

Моделирование структуры леса является одним из важнейших направлений в развитии методов дистанционного мониторинга лесных территорий, позволяет оценивать морфологические показатели лесных насаждений, прогнозировать динамику их развития и экологических ситуаций при воздействии природных и антропогенных факторов. Построение лесных ландшафтных сцен предполагает обработку двух типов синхронизированных данных – лазерной локации и цифровой аэрофотосъемки, и выполняется в виде последовательных этапов, каждый из которых является сам по себе сложной задачей моделирования.

На первом этапе выполняется построение цифровой модели рельефа (ЦМР) участка земной поверхности на основе данных лазерной локации (Chen, 2007; Медведев и др., 2007; Wulder et al., 2007; Данилин, Медведев, 2011; Чунина, Данилин, 2011). В современных географических информационных системах (ГИС) используются несколько типов ЦМР в зависимости от формы представления данных: с регулярным расположе-

нием точек на прямоугольных, треугольных и гексагональных сетках; с нерегулярным представлением точек; с изолинейным заданием точек (расположенных равномерно на изолиниях или с учетом их кривизны). Для построения трехмерных моделей рельефа используются такие методы, как интерполяция на основе минимальной кривизны, ближайшего окружения, триангуляции, регрессионных зависимостей, сферических сплайнов и т.д.

На втором этапе происходит текстурирование ЦМР (построение нижнего яруса лесной растительности), а также осуществляется визуализация деревьев (верхний ярус) как с использованием данных лазерной локации, так и данных цифровой аэрофотосъемки (Korpela, 2007; Данилин, Медведев, 2011).

На третьем этапе реалистичность созданной трехмерной (3D) ландшафтной модели достигается за счет “наложения” таких природных явлений, как дождь, туман, снег, моделирование дневной освещенности и т.п. (Смоленцева, Фаворская, 2009; Favorskaya et al., 2010).

Вместе с тем следует отметить, что на сегодняшний день не существует программного продукта, который бы отвечал всем требованиям комплексного ландшафтного моделирования лесных земель по данным лазерной локации и цифровой аэрофотосъемки.

В статье обсуждается комплексный подход реалистичного воспроизведения структуры лесного покрова и рельефа земной поверхности с визуализацией природных эффектов и режимов освещенности с использованием современных технологий компьютерного 3D-моделирования в разработанном программном комплексе “Forest Modeling”.

### ОБЗОР МЕТОДОВ И СИСТЕМ ЛАНДШАФТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Наиболее распространенным векторным методом интерполяции рельефа земной поверхности является триангуляция. Следует отметить, что применение триангуляции вызывает артефакты из-за невозможности получения производных различных порядков аппроксимируемых поверхностей, не обеспечивает выделение конкретных форм земной поверхности с характерными геоморфологическими параметрами. Однако в данной задаче такие ограничения не играют существенной роли, поскольку не требуется точного воспроизведения поверхности произрастания лесной растительности.

Метод “сферической квадроангуляции” позволяет создавать математическое описание рельефа, наиболее приближенное к реальной действительности, и идентифицировать известные типы поверхностей и структурных линий. Метод активно используется в 3D-картографии. Базовой единицей описания является математическая модель элементарной поверхности, выделяемая по геоморфологическим параметрам, являющимся непосредственными геометрическими характеристиками криволинейных объектов. В пределах элементарных поверхностей в заданных интервалах неизменными являются крутизна, экспозиция, протяженность, форма склонов и их морфологические характеристики, обуславливающие процессы перемещения водных, воздушных масс, климатических факторов (Плисенко, 2005). Однако в данной постановке задачи такая точность визуализации излишня. Растровая физическая модель гравитационного переноса уточняет *B*-сплайную интерпретацию *m*-порядка, применяемую в методе “сферической квадроангуляции” (Пикин, 2005).

На рынке программного обеспечения имеются продукты, позволяющие выполнять автоматическое создание 3D-моделей по данным лазерного сканирования, например: “TreesVIS” (ФРГ),

“Altexis”, “ОПТОЛАЗЕР” (РФ), “EdgeWise”, “Geokosmos 3D Modeler” (наземное и воздушное лазерное сканирование), однако визуализация 3D ландшафтных объектов в них не производится. В лучшем случае осуществляется замена объекта упрощенной 3D геометрической моделью кроны деревьев (в виде шара для широколиственных деревьев и в виде конуса для хвойных пород).

Для придания естественного вида на созданные ЦМР необходимо наложить “текстуры” – графические изображения, которые передают структуру, цвет и фактуру моделируемого объекта. Без текстур нельзя добиться реалистичного внешнего вида объекта, в данном случае модели лесной поверхности. Метод текстурирования “тайлами” получил широкое распространение в компьютерной области из-за очевидных достоинств – простоты и невысокой требовательности к вычислительным ресурсам компьютера. Суть данной технологии заключается в том, что участок полигональной сетки покрывается текстурными фрагментами – тайлами (tile) или наборами тайлов – тайлсетами (tileset) (Шикин, Боресков, 2001).

Для создания новой текстуры на основе существующих текстур, формирования плавного перехода между участками, покрытыми разными текстурами, и создания полупрозрачных текстур используется алгоритм альфа-смешивания (alpha-blending), при котором можно регулировать уровень прозрачности изменением значения альфа-канала текстуры. В результате получается требуемый эффект: новое изображение текстуры или комбинация имеющихся в наличии текстурных фрагментов. Такой прием дает возможность сделать изображение ландшафта уникальным в каждой области сцены, но он требует дополнительных вычислительных ресурсов. Также для увеличения быстродействия на экран выводится лишь малая часть ландшафта вокруг виртуальной камеры, что повышает производительность, но снижает дальность прорисовки и снижает общую реалистичность сцены.

Текстуры накладываются на объект с помощью так называемых текстурных координат. Текстурные координаты представляют собой пару чисел ( $u, v$ ), изменяющихся в пределах от 0 до 1, задаваемых в своей системе координат; при этом ось  $u$  направлена горизонтально вправо, ось  $v$  – вертикально вниз. Пара величин ( $u, v$ ) однозначно указывает на минимальный элемент текстуры, называемый “текселем” (texture element). Для каждой вершины минимального текстурного полигона определяются текстурные координаты и привязываются к некоторой области на текстурированном объекте в разработанном нами программном комплексе “Forest Modeling”.

Создание 3D-моделей лесных насаждений, также как и моделирование природных явлений, предполагает использование специфических приемов имитационного моделирования. Указанные два направления широко применяются в симуляторах, компьютерных играх. При этом следует учитывать, что реалистичность моделирования достигается сложными алгоритмами, требующими значительных вычислительных ресурсов (Шикин, Боресков, 2001; Favorskaya et al., 2010; Данилин, Медведев, 2011).

### МОДЕЛИРОВАНИЕ 3D-ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМНОГО ПОКРОВА ПО ДАННЫМ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИИ

Исследования, направленные на изучение возможностей и развитие дистанционных методов экологического мониторинга и прецизионного цифрового картографирования лесных территорий в режиме “реального времени” на основе лазерной локации и цифровой аэрофотосъемки, в последние годы активно развиваются и проводятся во многих странах мира (Remote Sensing ..., 2003; Korpela, 2007; Медведев и др., 2007; Næsset, 2007; Wulder et al., 2007; Straub et al., 2009; Favorskaya et al., 2010; Gatzolis et al., 2010; Suvanto, Maltamo, 2010; Данилин, Медведев, 2011; Чунина, Данилин, 2011).

Информация, получаемая лидарами, содержит дальностные характеристики ландшафтных сцен, включающие сведения о непроницаемых объектах и частично проницаемых (дисперсных) объектах. Лесной покров в нашем случае можно считать частично проницаемым объектом, т.е. дисперсной структурой. При лазерной и цифровой аэрофотосъемке местности возможно получение точек рельефа земной поверхности под пологом леса, на основе которых вначале строится, а затем интерполируется и визуализируется трехмерная топографическая поверхность (Næsset, 2007; Данилин, Медведев, 2011).

Данные лазерной локации представляются в виде облака точек с геодезическими или географическими координатами, привязанными к местности. Такое облако обладает определенными характеристиками (равномерность распределения точек, минимальное и максимальное поперечное и продольное расстояние между точками), которые могут настраиваться путем подбора параметров полета и выполнения съемки. Лазерный луч расширяется по мере распространения в воздушной среде, в связи с чем он отражается от непроницаемых преград не точечно, а в виде пятна отражения. При наличии частично проницаемых препятствий лазерные данные могут содержать

несколько точек отражения одного лазерного импульса (Медведев и др., 2007).

Самый простой способ представления ЦМР – использование набора трехмерных лазерных точек. Такие методы являются наиболее производительными, для них используются алгоритмы, аналогичные моделированию на основе других примитивов. Отличительная особенность заключается в том, что полученный набор трехмерных точек хранится как набор XYZ-точек. Для уточнения модели рельефа в дополнение к набору трехмерных точек могут загружаться структурные линии.

Цифровая модель рельефа может быть представлена в виде регулярной и нерегулярной сеток. В первом случае массивом исходных данных является матрица высот – цифровое картографическое представление поверхности Земли в виде регулярной сетки значений высот. Высоты записываются в узлах матрицы, положение которых отсчитывается от некоторой начальной точки на местности через равные интервалы вдоль осей  $OX$  и  $OY$ . Во втором случае (при использовании нерегулярной сетки) применяется триангуляционная нерегулярная сеть TIN (Triangulated Irregular Network). Высоты нерегулярной матрицы записываются в узлах, имеющих координаты  $(x, y)$ , расстояние между которыми изменяется. Цифровая модель рельефа может быть сгенерирована непосредственно из исходных данных, например, при использовании регулярной матрицы (квадратной сетки), регулярных треугольников, или через триангуляцию в случае беспорядочно расположенных данных.

Преимущество использования регулярной матрицы заключается в том, что для ее записи требуется значительно меньший объем машинной памяти, чем для нерегулярной матрицы. Однако она имеет принципиальный недостаток, связанный с тем, что при описании характера рельефа местности не отражаются сложные особенности (точки перегибов склонов, овраги и т.д.). Поэтому в настоящее время цифровую модель рельефа в основном представляют в виде нерегулярной матрицы (сеточное представление), узлы которой располагаются на характерных элементах рельефа.

Нетривиальной задачей также является разделение первичных и вторичных лазерных импульсов из обширного облака точек. Такое облако точек содержит не только точки поверхности земли, но и точки разнообразных растительных объектов (деревья, кустарники, травяной и мохово-лишайниковый покров) и их совокупностей.

Нами разработан и предлагается гибридный подход, при котором для некоторой области сетки формируется нерегулярное триангуляционное представление, а для более точного описания

сложного участка триангуляционной модели выполняется вставка данных из регулярной матрицы, полученных на основе аппроксимации данных. Реализацию метода можно представить в виде четырех основных этапов. На первом этапе происходит формирование первичной выборки трехмерных точек. Выборка осуществляет отбор всех существенных точек поверхности анализируемого лесного участка на плоскости  $XOY$ . Существенные точки должны обладать минимальными значениями по шкале высот. На втором этапе для однородно распределенных точек из первичной выборки формируются квадратные сеточные структуры, обладающие интерполированными (аппроксимированными) значениями, и вторичная выборка точек из облака. Вторичная выборка основана на расчете расстояния точки от первичной поверхности с учетом порогового значения, и в случае, если расстояние удовлетворяет условию, происходит выборка точки. На третьем этапе на основе полученного пространства точек второй выборки и первичной поверхности производится модификация модели на основе алгоритма построения триангуляции (Favorskaya et al., 2010). В ходе выполнения четвертого этапа производится доводка модели путем вставки дополнительных кривых описания и максимального разрежения модели для выполнения условий заданной точности и увеличения плотности в наиболее проблемных участках рельефа.

В общем случае можно утверждать, что чем больше будет исходных точек локации, тем более точно будет выполнена интерполяция и тем с большей вероятностью построенная модель будет адекватно отображать истинную земную поверхность. Вместе с тем существует предел числу точек (дискретности), поскольку для любой поверхности излишнее количество точек в большинстве случаев может не улучшить качество результата, но значительно увеличивает объем данных и время, затрачиваемое на их обработку. В некоторых случаях избыточные данные в отдельных областях могут приводить к неравномерному представлению поверхности и, следовательно, к неодинаковой точности при моделировании. Однако следует понимать, что чем сложнее поверхность, тем больше исходных точек требуется для построения адекватной модели. Для сложных объектов, таких как впадины и долины рек, требуются дополнительные точки, чтобы гарантировать представление с достаточной детальностью, а для простых моделей, таких как равнинные участки местности, при аппроксимации будет достаточно, относительно небольшого количества точек.

Существенным моментом является ускорение работы алгоритмов за счет распараллеливания

или локальных упрощений, незначительно снижающих качество получаемых ЦМР.

## ТЕКСТУРИРОВАНИЕ ЦМР

Процесс синтеза оптических (цифровых аэрофотосъемочных и лазерно-локационных) изображений относится к области обратных задач. При этом решается вопрос, как по заданным значениям признаков синтезировать изображение земного покрова, соответствующие статистики которого будут близки к характеристикам аналогичного изображения естественной поверхности. Существует несколько подходов к решению задач синтеза текстурных полей — на основе линейного программирования, авторегрессионных рядов, условных математических ожиданий.

### *Статистическое моделирование текстур*

В нашем случае требуется решить достаточно сложную задачу синтеза ландшафтных текстур, когда большие текстурные области создаются из небольших текстурных фрагментов. Известны базы с естественными текстурами: “Textures Library Forrest” (400 изображений) и “Brodatz” (110 изображений). Сложность заключается в том, что к точкам поверхности должны быть привязаны элементы текстурных карт. Положение объекта, близкое к наблюдателю (текстура поверхности видна с высоким разрешением), требует высокого разрешения текстурной карты. Проблематичным является “стыковка” текстурных фрагментов друг с другом, для чего используются статистические методы дополнения пропущенных пикселей. Пропущенные пиксели вычисляются с применением равномерной случайной выборки из окружающего набора. Критерием сходства текстуры с пропущенными пикселями с эталонной текстурой может служить сумма квадратов разностей яркостей пикселей, не превышающая некоторого порогового значения. Дополнительная визуализация ландшафтных неровностей происходит путем наложения теней в предположении, что точечные источники освещения (имитирующие естественное освещение) находятся в верхней части моделируемой сцены.

В общем случае текстурируемые поверхности не являются цилиндрическими или сферическими. Для наложения текстуры на объекты произвольной формы применим метод двухступенчатого отображения. На первом шаге двумерная область текстуры отображается на простую трехмерную промежуточную поверхность, например, цилиндрическую ( $S$ -mapping)

$$T(u, v) \mapsto T'(x_i, y_i, z_i). \quad (3)$$

На втором шаге полученная трехмерная текстура проецируется на поверхность объекта (*O*-mapping)

$$T'(x_i, y_i, z_i) \mapsto O(x_i, y_i, z_i). \quad (4)$$

Комбинация этих операций позволяет текстурировать объекты “естественным” способом. В качестве промежуточной поверхности предлагается использовать произвольно ориентированную плоскость, кубическую, цилиндрическую или сферическую поверхности, выбор одной из которых зависит, прежде всего, от геометрической формы поверхность текстурируемого объекта. Также реализованы несколько вариантов операции *O*-mapping: при пересечении отраженного от поверхности объекта луча и промежуточной поверхности  $T'$ ; при пересечении нормали к поверхности в точке  $(x, y, z)$  с поверхностью  $T'$ ; при пересечении линии, проходящей через точку  $(x, y, z)$  и центр тяжести объекта, с поверхностью  $T'$ ; при пересечении линии, идущей из точки  $(x, y, z)$  к поверхности  $T'$ , ориентация которой задается нормалью к поверхности  $T'$  в точке  $(x_i, y_i, z_i)$ .

Достоинствами данного подхода являются относительная простота текстурирования и малое количество текстур, что соответственно обеспечивает значительную экономию объема данных. Тем не менее ограниченное количество текстур не всегда позволяет воссоздать нужный текстурный рисунок. Также существуют ограничения по геометрии, например, использование регулярных сеток. Синтез текстуры, рассмотренный выше, позволяет компенсировать указанные недостатки.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Одной из самых сложных задач в трехмерной графике является имитация природных объектов. В отличие от искусственно созданных инженерных объектов, форма объектов естественного происхождения редко имеет ровные края и характеризуется геометрическими примитивами. Так, для получения фотореалистичного изображения ландшафта требуется воспроизвести множество деталей с тщательно проработанными поверхностями (системность), но при этом необходимо привнести некоторый хаос — фрактальность (Марков, 1996). Природный ландшафт изобилует деталями, но все их многообразие сводится к различным комбинациям топографических (рельеф) и почвенно-растительных условий и сообществ, расположенных на различных видах подстилающих пород. Лес, в упрощенном представлении, являет собой множество деревьев, обычно нескольких видов, а его разнообразие достигается за

счет варьирования типов и форм деревьев, другой лесной растительности.

Известны два типа математических моделей пространственно-временной динамики леса, объясняющих возникновение неоднородного пространственного распределения и неустойчивости характера роста деревьев. Первый подход является аналитическим и строится на основе системы интегрально-дифференциальных уравнений. При построении данной модели учитывается взаимодействие растений, расположенных вблизи друг от друга и оказывающих влияние как на увеличение биомассы, так и на ограничение ее роста, вызванное конкуренцией за ресурсы, необходимые для жизнедеятельности (свет, вода, питательные элементы) (Фрисман и др., 2006). Второй подход представляет собой имитационную компьютерную модель динамики сообщества древесных лесных растений. Моделирование динамики древостоя складывается из моделирования роста каждого дерева, входящего в его состав, при этом учитываются его пространственное расположение и влияние со стороны окружающих деревьев. В нашей работе был использован второй подход моделирования, требующий минимальных компьютерных ресурсов (Чунина, Данилин, 2011). Моделирование деревьев (с точки зрения создания виртуальной реальности) выполняется на основе *L*-систем, но с учетом фактора стохастичности, имитирующего жизненный цикл природного объекта. Реализованы процедуры моделирования роста широколиственных деревьев с учетом сезонных факторов и природных явлений (ветер, освещенность, режим увлажнения и др.).

## ИМИТАЦИЯ ПРИРОДНЫХ ЭФФЕКТОВ В 3D-СЦЕНЕ

Имитация природных эффектов подразумевает использование различных технологий визуализации в зависимости выбранного эффекта (Favorovskaya et al., 2010). Для примера рассмотрим две технологии — имитация тумана и дождя в 3D-сцене, — которые реализованы в нашем программном продукте. Современные технологии нанесения тумана на изображение учитывают удаленность затуманенных объектов от наблюдателя, а также степень густоты тумана — редкий, средний, густой. Известны два основных способа имитации тумана: с использованием “выбеливания” цветовой компонент функции, описывающей изображение, и генерация текстур на основе шумовых составляющих. В нашей работе используется комбинированный метод: на первой стадии — выполняющий “выбеливание” цветов, на второй — создающий эффект нечеткости и размытости изображения.

Обозначим цветовую характеристику пиксела  $p(x, y, z)$  как  $C_{in}$ , которая разбивается на две составляющих:  $C_{const}$  – постоянная часть цветовой характеристики, переходящая в выходное значение  $C_{out}$ , и  $C_{fog}$  – часть цветовой характеристики, отвечающая за степень густоты тумана, причем,  $C_{in} = C_{const} + C_{fog}$ . Выбеливание цветов происходит за счет входного параметра – “туманного фактора”  $K_{fog}$  по линейному закону

$$C_{out} = K_{fog}C_{in} + (1 - K_{fog})C_{fog}. \quad (5)$$

Отметим, что туманный фактор может вычисляться по экспоненциальному закону, по квадратичной экспоненте или по линейной зависимости.

Выбеливание цветов с учетом линейного туманного фактора зачастую используется для создания глубины проникновения объектов в туманную среду, по мере удаленности от зрителя. Эффект интенсивности как функции удаленности от зрителя достигается путем выбеливания исходных фрагментов более интенсивным цветом.

Природные эффекты не являются статическими явлениями, их поведение имеет стохастический характер. Туман также может изменять форму из-за изменения своей плотности и благодаря ветру и непостоянству воздуха. Поэтому функция генерации шума хорошо описывает данное явление. Входными параметрами такой функции могут быть двух- или трехмерные координаты в пространстве, а результатом являются псевдослучайные величины плотности тумана на этих координатах. Шум, сгенерированный такой функцией, имеет большую частоту и, следовательно, отображает резкие изменения между контрастными значениями, что не типично для распределения плотности тумана. Поэтому он должен быть скомпенсирован смягчающим шумом, созданным путем интерполяции некоторых заданных начальных значений.

Основная идея способа имитации тумана заключается в суммировании нескольких шумовых составляющих с различными частотами и амплитудами, в результате чего вычисляется турбулентность *turbulence* ( $p$ ) в точке  $p$  сцены

$$turbulence(p) = \sum_{i=0}^{N-1} noise_i(p)/2^i, \quad (6)$$

где  $noise_i(p)$  –  $i$ -я функция плотности тумана в точке  $p$  двух- или трехмерной сцены.

Эти функции называются октавами, каждая из них имеет частоту, увеличенную вдвое по сравнению с предыдущей октавой. Число октав  $N$  может быть различным, но для генерирования изображения  $N$  не должно быть слишком большим: чем

больше значение  $N$ , тем выше частота шума, который перестает отображаться на экране.

Для достижения максимальной реалистичности генерируется несколько отдельных изображений с разной степенью увеличения шумовой картины, сглаженных при помощи интерполяции. При их суммировании создается общий шум. Большое число таких изображений дает более детализированный шум, что и позволяет создать эффект размытости при наложении эффекта тумана на изображение. В результате достигается распределенная неоднородная плотность тумана. Именно такой подход позволяет достичь максимально реалистичного “наложения” тумана на изображения. Совместно с туманным фактором получают достаточно реалистичные слои тумана с видимым увеличением расстояния от наблюдателя.

Реалистичная имитация капель дождя с отраженным светом и изменением размера в зависимости удаленности от наблюдателя является сложной проблемой, так как капли изменяют свою форму во время движения. Из-за этих изменений луч, отраженный от капли, и луч, проходящий сквозь каплю, также будут изменять свое положение относительно наблюдателя или камеры. Часто предполагается, что капля имеет простую форму треугольника или эллипса, а блик капли является постоянным и неподвижным (Garg, Nayyar, 2006).

При нашем подходе используется алгоритм визуализации капель дождя с учетом отраженного света и изменения размера капли во время движения. Используется заранее созданная база данных капель, которые модифицируются по желанию пользователя. Форма капель создается по принципу наложения колебательных моделей, а колебательные свойства падающей капли описываются следующим уравнением:

$$r = [t, \Theta, \Psi], \quad (7)$$

где  $r$  – расстояние точки на капле от ее центра;  $\Theta$ ,  $\Psi$  – углы падения относительно координатных осей в плоскости  $XOY$  и плоскости  $XOZ$  соответственно (ось  $OZ$  направлена на наблюдателя);  $t$  – время.

Изменения формы капель во время падения объясняются законами аэродинамики и поверхностным натяжением. Колебательная модель капли составляется из двух моделей: исходной и преобразованной. Интересным является тот факт, что падение капли не имеет четко определенной траектории движения, в частности по горизонтали. Вид капли также зависит и от ее размеров и степени удаленности от видеокамеры. Имитация освещения капли также является непростым вопро-

сом. Расчет светового блика на капле напрямую зависит от ее размеров. В данной работе был использован более простой алгоритм реализации указанного эффекта. Реализация наложения эффекта дождя на статическое изображение заключается в перерисовке капель различных размеров на изображении. Используются капли с размерами  $2 \times 46$  пикселей и  $1 \times 24$  пикселя, сохраненные в файле формата png, что позволяет применить эффект прозрачности капли на фоне исходного изображения. Капли разных размеров перерисовываются на выбранном изображении в тысяче разных мест. Таким образом, имитация эффекта дождя максимально приближена к реальности за счет малого размера капель, поддержки эффекта прозрачности за счет формата изображения каплей и большого количества капель. Так, число генерируемых изображений капель должно быть эквивалентно  $M$  – числу пикселей в итоговом сгенерированном изображении, в наших экспериментах значение  $M$  принималось равным 1024 (Смоленцева, Фаворская, 2009).

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ СЦЕНЫ ЛЕСНОЙ ТЕРРИТОРИИ С УЧЕТОМ ОСВЕЩЕННОСТИ

При реалистичном моделировании поверхности земли и лесной растительности возникают две категории задач, для реализации которых применяются принципиально различные алгоритмы: задачи моделирования равномерной освещенности естественных сцен и задачи имитации солнца и прямого солнечного света на изображении в различных временных диапазонах (восход, полдень, закат). В случае равномерной освещенности сцены общепринятым является подход размещения нескольких неярких точечных источников. При этом от каждого источника света исходит бесконечное множество лучей, часть которых рассеивается в свободном пространстве, а другая часть попадает на объекты. Такие лучи отражаются, поглощаются и преломляются в зависимости от структуры реальных физических объектов (в нашем случае – лесная растительность и рельеф поверхности земли), при этом возникает множество вторичных лучей. В результате часть лучей света (точнее, энергетическая мощность светового потока) попадает в объектив цифрового аэрофотоаппарата или на сетчатку глаза наблюдателя, формируя тем самым изображение. Метод, моделирующий процесс прохождения лучей от источника света до некоторой точки сцены, называется прямой трассировкой лучей. Основная проблема при реализации такого метода заключается в ограниченных вычислительных возможностях компьютера, так как требуется рассчитать направления бесконечного количества лучей, из которых

очень малая часть непосредственно участвует в формировании изображения.

В соответствии с методом обратной трассировки, когда лучи трассируются в обратном направлении от наблюдателя к источнику света, в начале строится первичный луч обратной трассировки через центр схода лучей на некотором расстоянии от плоскости проецирования (например, экрана монитора) и через текущий пиксел плоскости проецирования. Если луч попадает на один или несколько объектов сцены, то выбирается ближайшая точка пересечения. Затем рассчитывается цвет пикселя изображения с учетом свойств объекта и излучения от других источников.

При формулировании задачи реалистичной визуализации рельефа с лесной растительностью считается, что заданы параметры некоторой трехмерной сцены, а именно карта рельефа, фрактальная текстура растительности, параметры земной поверхности, параметры воздушной среды, параметры водной поверхности (в частности, уровень водной поверхности), а также расположение, цвет и интенсивность источников света, координаты и направление обзора наблюдателя. Требуется построить изображение рельефа с позиции наблюдателя. При практической реализации метода обратной трассировки лучей вводятся некоторые ограничения с целью ускорения работы алгоритма и упрощения математической модели. В данном случае принимаются следующие ограничения:

- основной моделируемой поверхностью является поверхность земли, которая задается картой уровней высот с нанесенной фрактальной текстурой, имитирующей природные объекты и эффекты. Дополнительной моделируемой поверхностью является поверхность воды, задаваемая “уровнем моря”. Любая точка поверхности, лежащая ниже этого уровня считается покрытой водой;
- рассматриваются только точечные источники света, которые излучают свет, но не отражают и не преломляют его;
- рассматриваются два типа отражения: бликовое, создающее эффект бликов от источников света, и диффузное;
- если луч, направленный на данный источник света, закрывается другим объектом, то это значит, что данная точка поверхности находится в тени;
- вводится фоновая составляющая освещенности для учета освещенности объектов светом, рассеиваемым другими объектами.

Нами предложена следующая модификация метода обратной трассировки лучей. Разобьем изображение на блоки (в наших экспериментах блок составляет  $16 \times 16$  пикселей) и будем после-

довательно анализировать блоки, которые пересекает проекция луча на плоскость  $XOY$ , в порядке их удаления от наблюдателя. Для каждого блока можно определить, имеется ли пересечение луча с поверхностью в этом блоке, или такое пересечение отсутствует. Трассировка текущего луча прекращается, если найдено первое пересечение. Если текущий квадрат находится на некотором предельном удалении от наблюдателя, то предполагается, что луч находится в свободном пространстве. При пересечении луча с поверхностью строятся вторичные лучи (отраженный луч и преломленный луч), для которых также выполняется трассировка. Для того чтобы определить, пересекает ли заданный луч поверхность рельефа, а также координаты точки пересечения луча с ландшафтным объектом, необходимо знать высоту поверхности рельефа в любой точке. Поскольку при моделировании трехмерной поверхности достоверно определены координаты точек лазерной локации и проведена интерполяция поверхности, эти данные известны. Имеющаяся триангуляционная модель поверхности позволяет построить нормаль к анализируемой точке, что необходимо для построения вторичных лучей.

Цвет  $C'$  некоторой точки объекта определяется как сумма составляющих

$$C' = k_a I_a C + k_d I_d C + k_s I_s + k_r I_r + k_t I_t, \quad (8)$$

где  $C'$  – исходная яркость точки объекта (в цветовой  $RGB$ -модели  $C$  – одна из составляющих:  $R$  (red – красный),  $G$  (green – зеленый),  $B$  (blue – синий));  $k_a$  – коэффициент фоновой подсветки;  $k_d$  – коэффициент диффузного рассеивания;  $k_s$  – коэффициент бликового отражения;  $k_r$  – коэффициент зеркального отражения;  $k_t$  – коэффициент прозрачности;  $I_a$  – интенсивность фоновой подсветки;  $I_d$  – интенсивность диффузного рассеивания;  $I_s$  – интенсивность бликового отражения;  $I_r$  – интенсивность зеркального отражения;  $I_t$  – интенсивность излучения, приходящего по преломленному лучу. Для рассматриваемого нами случая изображений лесных территорий два последних слагаемых в (4) можно опустить.

Интенсивность фоновой подсветки  $I_a$  для некоторого объекта обычно полагается равной константе. Для расчета интенсивности диффузного отражения используется формула

$$I_d = \sum_{j=1}^N I_j \cos \theta_j, \quad (9)$$

где  $I_j$  – интенсивность излучения  $j$ -го источника света,  $j = 1, \dots, N$ ;  $\theta_j$  – угол между нормалью к поверхности объекта и лучом, задающим направление от анализируемой точки объекта на  $j$ -й источник света.

Расчет интенсивности бликового отражения производится по формуле

$$I_s = \sum_{j=1}^N I_j \cos^p \alpha_j, \quad (10)$$

где  $p$  – показатель, учитывающий степень полировки поверхности (значение лежит в интервале от единицы до нескольких сотен);  $\alpha_j$  – угол между отраженным лучом (при обратной трассировке) на  $j$ -й источник света.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработанный программный комплекс “Forest Modeling” состоит из четырех основных модулей: модуля проектирования трехмерных поверхностей, модуля природных объектов, модуля визуализации природных эффектов и модуля освещенности сцены. Модуль проектирования трехмерных поверхностей позволяет создавать, а также редактировать и сохранять карту рельефа местности с использованием данных лазерной локации. Имеются функции интерполяции карты и наложения текстуры, отображающей лесную растительность. Модуль природных объектов включает моделирование отдельных деревьев и моделирование сообщества деревьев с учетом факторов, влияющих на их взаимный рост и дегенерацию. Модуль визуализации природных эффектов позволяет пользователю выбирать тип эффекта и настраивать его параметры для выбранной сцены. Основными моделируемыми природными эффектами являются наложение тумана, дождя, снежного покрова. В качестве дополнительных эффектов реализована визуализация снегопада и процесс таяния снега. Модуль освещенности сцены позволяет задавать и изменять положения и свойства источников света и виртуальной камеры (фокусное расстояние и направление обзора, а также максимальную дальность трассировки лучей), а также настраивать свойства поверхностей ландшафтных объектов. Программный комплекс содержит и ряд вспомогательных функций – таких, как предварительный просмотр трехмерной сцены, запись трехмерного изображения сцены в файл стандартного графического формата bmp, png, jpg.

Для разработки программного продукта была выбрана среда разработки “Borland Delphi 7” – универсальная среда разработки приложений, главным критерием выбора среды явилось наличие мощного графического двигателя “GLScene”, позволяющего быстро и качественно разрабатывать 3D-сцены. “GLScene” – графический движатель, написанный для использования на языке программирования Object Pascal и использующий библиотеку “OpenGL” в качестве интерфейса программирования приложений. “GLScene” яв-

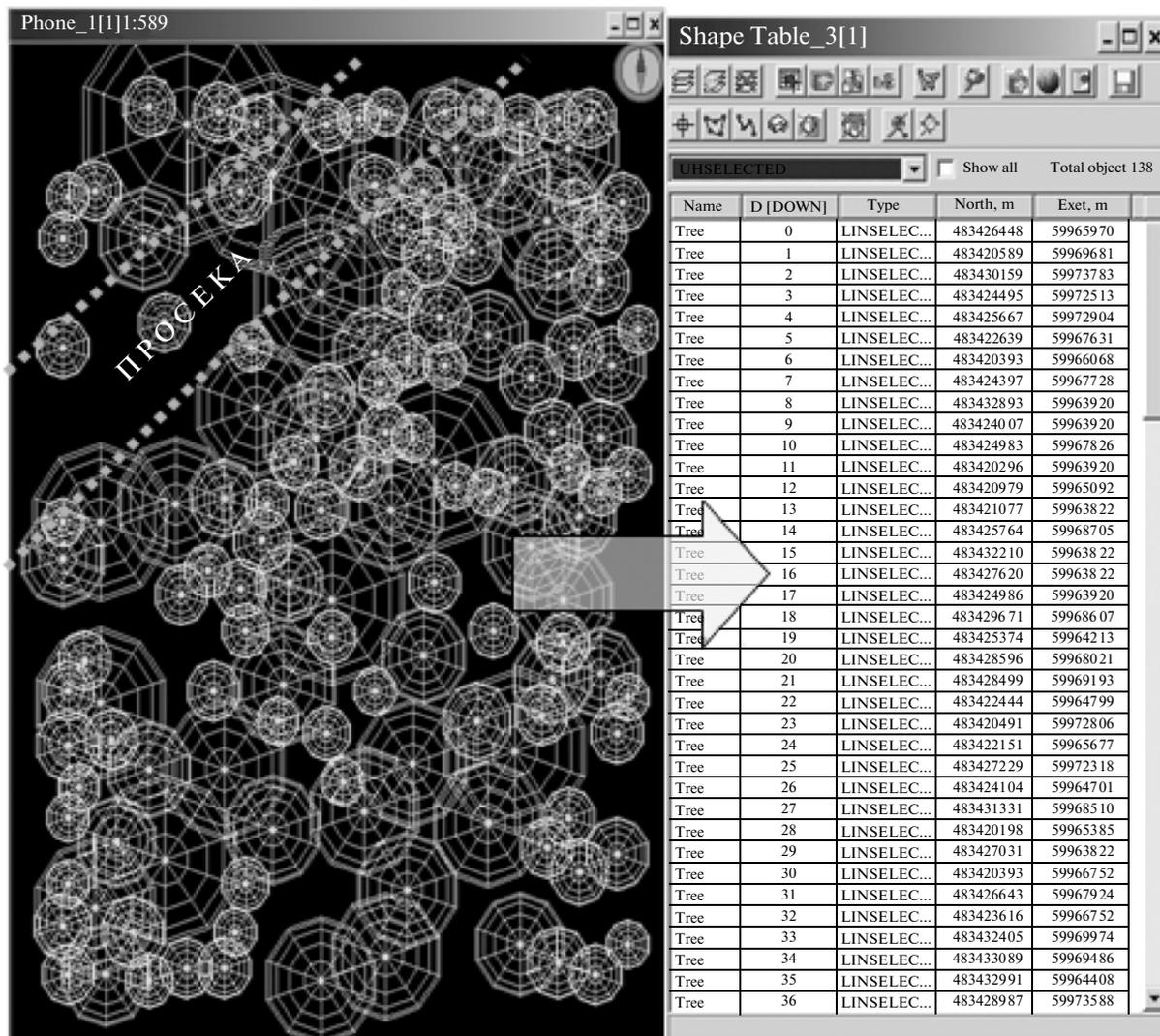


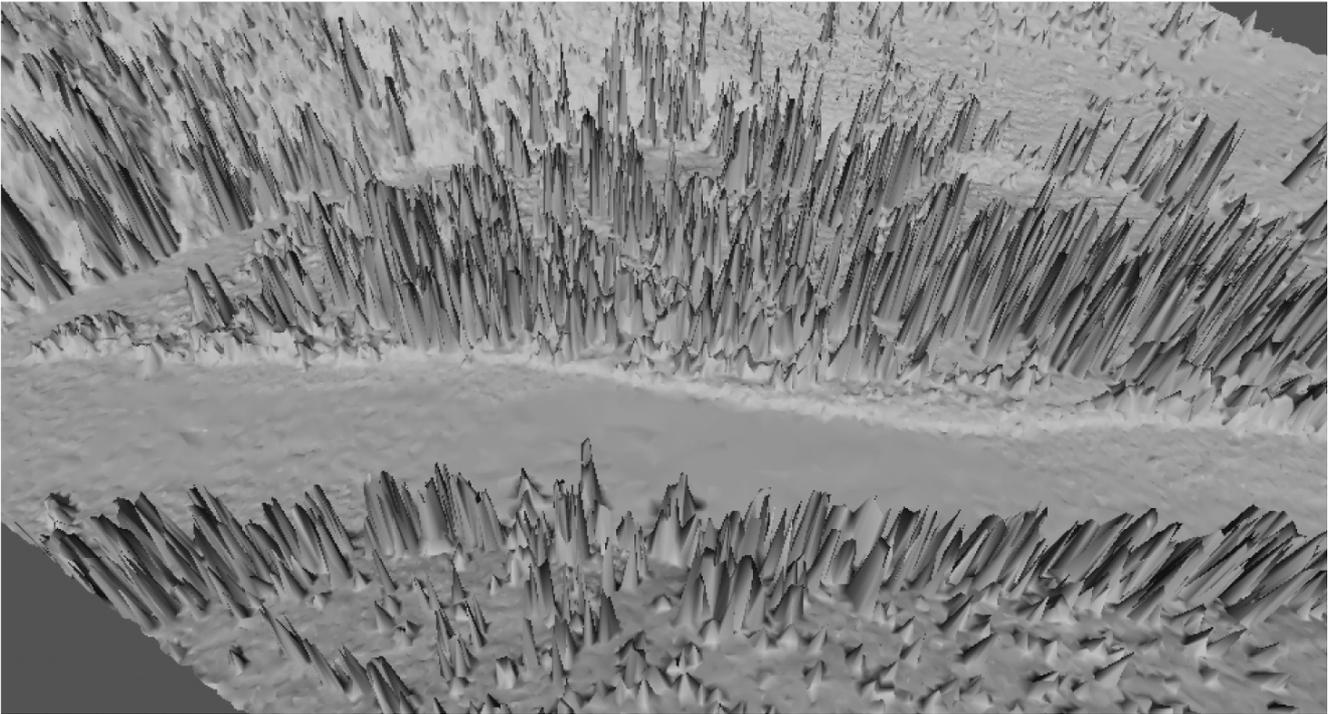
Рис. 1. Векторная модель лесного полога, состоящая из множества крон отдельных деревьев.

ляется свободным программным обеспечением и распространяется с лицензией “Mozilla Public License”. С его помощью программирование трехмерной графики становится более простым и быстрым.

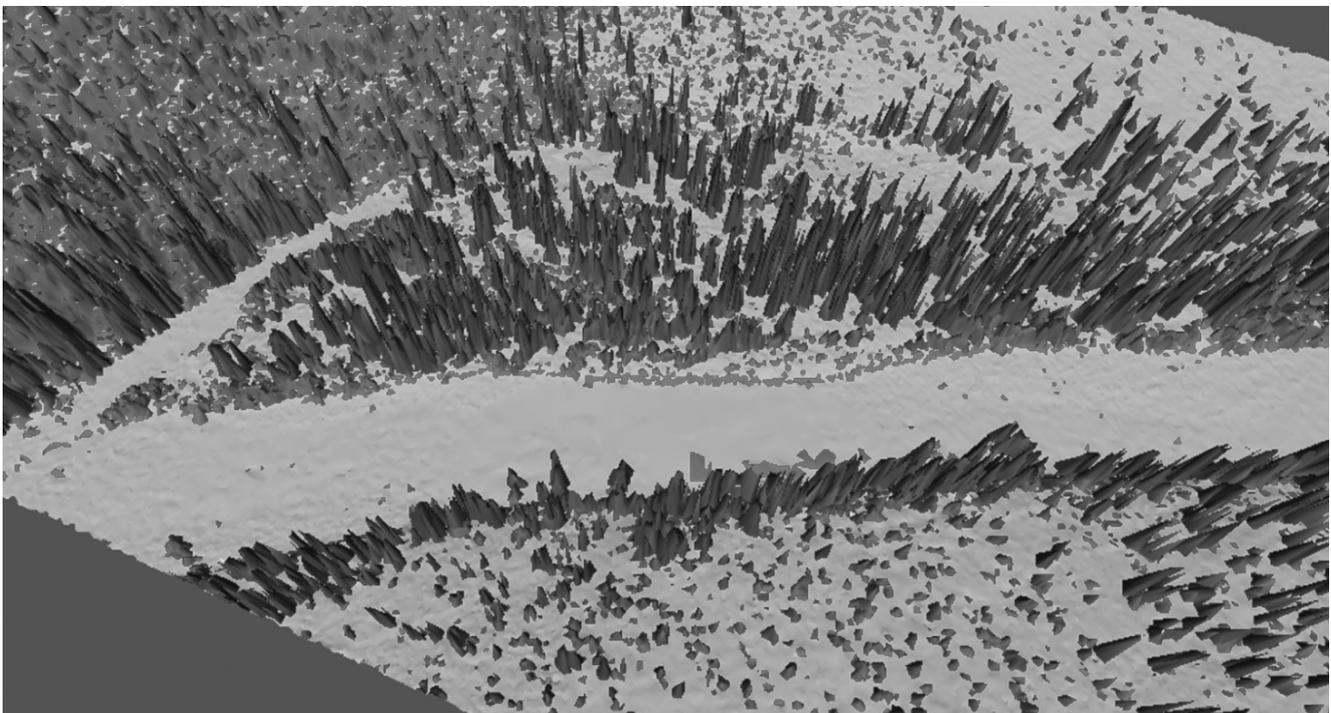
Программные модули визуализации природных эффектов и освещенности реализованы в виде плагинов по технологии “Net Framework 2.0”. Платформа NET обеспечивает одновременную поддержку проектирования и реализации программного обеспечения с использованием различных языков программирования, она включает не только среду разработки для нескольких языков программирования Visual Studio.NET, но и множество других средств, например, механизмы поддержки баз данных, электронной почты, файлообменов. Технология NET Framework – это дополнительная операционная среда, устанавлива-

емая в операционной среде Windows в качестве автономного программного компонента.

С помощью разработанного программного комплекса были проведены эксперименты по моделированию лесных ландшафтов, прогалин, водотоков. На основе набора точек лазерной локации и цифровой аэрофотосъемки строились двухмерные и трехмерные сцены лесных территорий, к которым затем применялись различные варианты визуализации природных эффектов и режимов освещенности. Сведение объектов в сопряженную базу данных позволяет рассчитывать статистические характеристики древостоя – диаметры и протяженность крон, высоты и диаметры стволов, координаты местоположения деревьев. В общей сложности было сгенерировано около 200 модельных сцен лесных территорий (рис. 1–3).



**Рис. 2.** Трехмерная полигональная модель сцены лесной территории с отображением природного эффекта “снег”.



**Рис. 3.** Трехмерная полигональная модель сцены лесной территории с отображением природного эффекта “освещение в полдень”.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изложены основные подходы к реалистичному моделированию структуры лесного покрова и топографии. Отличительными особенностями данного подхода являются: использование гибридного метода построения трехмерных поверхностей, использование синтеза текстур, нанесение текстурных карт на объекты сцены на основе вероятностной стыковки фрагментов. Существенной составляющей реалистичного воспроизведения трехмерной сцены является визуализация природных эффектов таких, как туман, дождь, снежный покров, а также воспроизведение режимов освещенности сцен лесных территорий.

Результаты экспериментов, проведенных с помощью разработанного программного комплекса, показали работоспособность и эффективность основных алгоритмов. Вместе с тем установлено, что реалистичное воспроизведение сцен лесных территорий требует значительных временных затрат и нуждается в распараллеливании сложных вычислительных процессов в будущем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Данилин И.М., Медведев Е.М.* Технология мониторинга и инвентаризации лесных ресурсов на основе лазерной локации, цифровой аэрофотосъемки и спутникового геопозиционирования (Technology for monitoring and inventory of forest resources based on laser location, digital aerial photography and satellite geopositioning) // Журн. Сиб. фед. ун-та. Сер. Техника и технологии. 2011. Т. 4. № 3. С. 326–336 (на англ.).
- Марков Е.П.* Фрактальная модель космических оптико-электронных изображений // Исслед. Земли из космоса. 1996. № 1. С. 56–61.
- Медведев Е.М., Данилин И.М., Мельников С.Р.* Лазерная локация земли и леса. М.: Геокосмос; Красноярск: ИЛ СО РАН, 2007. 229 с.
- Пикин С.Ф.* Гравитационно-кинетическая модель рельефа // ИнтерКарто/ИнтерГИС 11: Устойчивое развитие территорий: Теория ГИС и практический опыт. Ставрополь: СГУ, 2005. С. 228–230.
- Плисенко О.А.* Цифровая модель местности как основа для вычислительных экспериментов в ГИС // ИнтерКарто/ИнтерГИС 11: Устойчивое развитие территорий: Теория ГИС и практический опыт. Ставрополь: СГУ, 2005. С. 48–53.
- Потапов А.А., Пахомов А.А., Никитин С.А., Гуляев Ю.В.* Новейшие методы обработки изображений. М.: Физматлит, 2008. 496 с.
- Смоленцева С.С., Фаворская М.Н.* Система наложения визуальных природных эффектов на статическое изображение (Natural effects imitation) // Свид. № 2009612794. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ, Москва, 30 июля 2009 г.
- Фрисман Е.Я., Тузинкевич А.В., Чернышова Н.Б., Файман П.А.* Биологическое разнообразие и динамика экосистем: Информационные технологии и моделирование. Новосибирск: СО РАН, 2006. С. 393–401.
- Чунина А.А., Данилин И.М.* Анализ подходов к моделированию лесной растительности // Мат. XV Межд. науч. конф. “Решетневские чтения”. Ч. 2. Красноярск, 2011. С. 646–647.
- Шикин А.В., Боресков А.В.* Компьютерная графика. Полигональные модели. М.: Диалог-МИФИ, 2001. 464 с.
- Chen Q.* Airborne lidar data processing and information extraction // Photogram. Eng. & Rem. Sens. 2007. V. 73. № 2. P. 109–112.
- Favorskaya M.N., Zotin A.G., Danilin I.M., Smolentseva S.N.* Realistic 3D-modeling of forest growth with natural effect In: Advances in Intelligent Decision Technologies. Proc. Second KES Int. Symp. IDT 2010 / Eds.: G. Phillips-Wren, L.C. Jain, K. Nakamatsu, R.J. Howlett. Smart Innovation, Systems and Technologies. V. 4. B., Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. P. 191–199.
- Garg K., Nayar Sh.K.* Photorealistic rendering of rain streaks // ACM SIGGRAPH. 2006. V. 25. № 3. P. 996–1002.
- Gatzliolis D., Fried S.J., Monleon V.S.* Challenges to estimating tree height via LiDAR in closed-canopy forests: a parable from Western Oregon // For. Sci. 2010. V. 56. № 2. P. 139–155.
- Korpela I.* 3D treetop positioning by multiple image matching of aerial images in a 3D search volume bounded by LiDAR surface models // Photogram., Fernerkund., Geoinform. 2007. V. 1. P. 35–44.
- Næsset E.* Airborne laser scanning as a method in operational forest inventory: Status of accuracy assessment accomplished in Scandinavia // Scand. J. Forest Res. 2007. V. 19. № 6. P. 482–499.
- Pentland A.P.* Fractal-based description of natural scenes // IEEE Trans. 1984. V. PAMI-6. № 6. P. 661–674.
- Remote Sensing of Forest Environments. Concepts and case studies / Eds. M.A. Wulder, S.E. Franklin. Dordrecht, Boston, L.: Kluwer Acad. Publ., 2003. 519 p.
- Straub C., Dees M., Weinacker H., Koch B.* Using airborne laser scanner data and CIR orthophotos to estimate the stem volume of forest stands // Photogram., Fernerkund., Geoinform. 2009. № 3. P. 277–287.
- Suvanto A., Maltamo M.* Using mixed estimation for combining airborne laser scanning data in two different forest areas // Silva Fennica. 2010. V. 44. № 1. P. 91–107.
- Wulder M.A., Han T., White C.J., Sweda T., Tsuzuki H.* Integrating profiling LiDAR with Landsat data for regional boreal forest canopy attribute estimation and change characterization // Rem. Sens. Environ. 2007. V. 110. P. 123–137.

## **Description of the Software Modules for the Use of Laser Location and Digital Aerial Photography Data of Forest Territories**

**I. M. Danilin<sup>1</sup>, M. N. Favorskaya<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup> V.N. Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk*

*<sup>2</sup> Academician M.F. Reshetnev Siberian State Aero Space University, Krasnoyarsk*

Laser location integrated with digital aerial photography is one of the priority tendencies in remote sensing monitoring of forestlands. This direction of research is based on the high-end technique of digital photogrammetry and geographic information systems, as well as on processing of digital multidimensional reflected laser signals. Modeling of forest structure and terrain is one of the priority tasks at forest monitoring process. Existing systems for modeling of forest structure and terrain do not consider specifics of a forest cover modeling. The proposed approach and computing algorithms allows using a laser location and aerial photography data for 3D-modeling of terrain and fractal textures of forest vegetation, also simulating natural effects such as snow cover rain and fog, as well as illumination regimes for the scenes of forest territories.

**Keywords:** modeling, forest territories, aerial laser location, digital aerial photography