

УДК 629.78: 630*52:587/588

И.М. Данилин, Е.М. Медведев

Данилин Игорь Михайлович родился в 1957 г., окончил в 1980 г. Сибирский технологический институт, доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник Института леса СО РАН, профессор кафедры земельного кадастра Красноярского государственного аграрного университета. Имеет более 150 научных работ по проблемам лесной таксации, лесо- и землеустройства, аэрокосмических методов зондирования лесов, природопользования и охраны окружающей среды.



Медведев Евгений Михайлович родился в 1963 г., окончил в 1986 г. Московский энергетический институт, кандидат технических наук, генеральный директор компании «ГеоЛидар», доцент кафедры прикладной геодезии Московского государственного университета геодезии и картографии, член общественного совета Роскартографии. Имеет 57 печатных работ в области геоинформатики, аэрофототопографии, лазерной локации.



**НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МЕЖДУНАРОДНОГО ПРОЕКТА
ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЛАЗЕРНОЙ,
РАДАРНОЙ И ЦИФРОВОЙ АЭРОСЪЕМКИ ЛЕСОВ**

Обсуждаются возможности использования новейших методов дистанционного зондирования – лазерной, радарной и цифровой аэросъемки для целей инвентаризации и мониторинга лесов, разработанные в рамках международного (российско-канадско-австрийского) научно-исследовательского проекта.

Ключевые слова: лазерная, радарная, цифровая аэросъемка, инвентаризация и мониторинг лесов, международный проект.

Лазерная, радарная и цифровая виды аэросъемки, являющиеся составной частью новейших методов и технологий геоинформатики и цифровой фотограмметрии, все шире используются во многих отраслях, в том числе при решении задач информационного обеспечения инвентаризации и мониторинга лесов, разрабатываются во многих странах и по показателям точности и экономической эффективности превосходят другие, известные на сегодняшний день дистанционные методы изучения и измерения параметров лесной растительности [1–11].

Наши исследования позволили разработать эффективный метод фильтрации и классификации данных лазерного и радарного зондирования при цифровой топографической аэросъемке, основанный на аллометрии параметров лесного полога и автоматизированном дешифрировании изображений («лазерных цифровых портретов») лесных насаждений с использованием подходов математической морфологии, оперирующей понятиями теории множеств и нечетких множеств, теории информации, распознавания

образов и вероятности, а также современных достижений в обработке изображений, цифровой фотограмметрии и трехмерной компьютерной графики [2, 3, 6, 11].

В процессе реализации настоящего научно-исследовательского проекта была выдвинута гипотеза, что информация, получаемая с помощью лазерных сканеров и интерференционных радаров с синтетической апертурой (ИРСА), отражает морфоструктурные и пирологические характеристики лесного покрова, которые, в свою очередь, являются критическими входными данными для разрабатываемых математических моделей строения и роста лесных насаждений, развития и поведения пожаров в них. В процессе исследований установлено, что интенсивность обратного рассеяния в лазерных и радарных изображениях связана с влажностью листвы – другой переменной, которая также имеет большое значение в моделировании лесных пожаров [3, 6, 10].

В связи с этим было предложено интегрировать лазерную трехмерную геометрию, цифровую плановую аэрофотосъемку и радарную информацию интенсивности обратного рассеяния, получаемую ИРСА, с физическими характеристиками лесного полога. С этой целью использовали статистические и логические методы для оценки параметров, имеющих отношение к различным слоям растительности, включая глубину их распространения и плотность. Физические характеристики плотности крон деревьев и древостоев для заданного размера ячейки (кластера) определяли непосредственно по радарным и другим пространственным данным для моделирования распространения лесных пожаров в кронах деревьев. Результаты анализа радарных данных сравнивали с оценками переменных поведения огня в кронах, информацией, полученной с помощью датчиков оптического диапазона (лазерная, цифровая аэро- и спутниковая съемка) и традиционными методами наземных измерений на пробных площадях.

Установлено, что с экономической точки зрения получение радарных данных на обширных пространствах бореальной зоны значительно эффективнее и дешевле по сравнению с другими методами и технологиями дистанционного зондирования лесов, включая лазерное зондирование и цифровую аэросъемку. Сбор радарных данных может осуществляться с самолетных платформ на относительно больших высотах (6000 ... 12000 м), что позволяет покрывать значительные по площади территории за короткий промежуток времени (3600 ... 7200 км²/ч) в любое время суток и при любых погодных условиях.

Из сказанного следует, что хотя радарный метод и уступает лазерной локации и цифровой аэросъемке по разрешающей способности примерно на 25 % в силу большей степени рассеивания радарных импульсов, все же имеет существенные преимущества по сравнению с оптическими системами дистанционного зондирования в тех случаях, когда сбор данных производится при неблагоприятных атмосферных условиях (облачность, задымленность).

Методические и технологические аспекты использования лазерных сканеров, интерференционных радаров с синтетической апертурой и цифровых аэро- и космических снимков высокого и сверхвысокого (субметрового) разрешения являются критичными с точки зрения точной и объективной оценки структуры и биомассы лесов, достоверности оценки потоков углерода, в свете реализации международных договоров и соглашений, подписанных Россией, в том числе и Киотского протокола [2, 3, 10].

Результаты и обсуждение

В рамках настоящего исследовательского проекта дистанционное зондирование лесов выполняли с использованием бортовых лазерных, радарных и цифровых аэросъемочных комплексов на полигонах в Красноярском крае, Ханты-Мансийском и Ямало-Ненецком автономных округах, Якутии, а также в Канаде на общей площади более 3000 км² [1–4, 6]. При техническом взаимодействии с компаниями Optech Inc., ITRES Research Ltd. (Канада) и Microsoft-Vexcel (Австрия) были практически задействованы и протестированы для целей дистанционного лесозоологического мониторинга и лесоинвентаризации такие бортовые системы авиационного лазерного сканирования, как: ALTM–2050/3100; бортовые воздушные интерференционные радары с синтетической апертурой IFSAR и SAR PALSAR; цифровая топографическая аэрофотокамера Vexcel UltraCAM X; спутниковые снимки субметрового разрешения, полученные в системах IKONOS и QuickBird II [7–9].

Работы по проекту включали следующие основные блоки и разделы.

Исследование данных спутниковой съемки:

- Предварительная обработка данных (геометрическая и радиометрическая коррекция).
- Классификация по параметрам лесного покрова с использованием существующих методов обработки данных, основанная на спектральных сигнатурах и текстурных характеристиках изображений.
- Верификация результатов классификации.

Исследование данных лазерного сканирования:

- Применение существующих статистических методов для оптимизации и достоверного разделения «первичных» и «вторичных» лазерных импульсов на основе исходных данных сканирования.
- Расчет параметров трехмерных моделей кроновых структур и древостоев на основе исходных соответственно «первичных» и «вторичных» импульсов.
- Интерполяция исходных данных сканирования.
- Разработка эффективных алгоритмов сегментации и сепарации деревьев и древостоев и их структурных элементов.
- Расчет лесотаксационных показателей по данным лазерного сканирования.
- Верификация результатов математического моделирования на координатных пробных площадях и тестовых участках.

Синергетическое использование различных типов сенсоров:

– Интегрирование результатов классификации лазерного сканирования, радарной и цифровой воздушной и спутниковой съемки.

– Изучение методических и технологических преимуществ и недостатков синергетического использования различных типов сенсоров.

– Лабораторное моделирование и визуализация операционных возможностей перспективных приборов и инструментов дистанционного зондирования для целей лесозоологического мониторинга и лесоинвентаризации на примере систем: ALTM, IFSAR, SAR PALSAR, UltraCAM X.

Контроль качества работы системы:

– Оценка стоимостных показателей разработанного метода в сравнении с существующими методами таксации и мониторинга леса в целях содействия процессу принятия решений органами и структурами управления лесами, лесопользователями и частными компаниями по использованию нового подхода и его дальнейшего совершенствования.

– Оценка возможностей полноценной замены традиционных подходов и способов наземных полевых измерений и мониторинга инновационными методами и технологиями дистанционного зондирования.

– Оценка полученных результатов конечными пользователями.

При оценке конечных результатов исследования установлено, что относительно высокая стоимость гиперспектральных спутниковых снимков IKONOS и QuickBird II (2,500 ... 5,000 долл. за одну сцену, размер 11 × 11 и 16 × 16 км соответственно) на сегодняшний день является существенным ограничивающим фактором для их использования в системе дистанционного мониторинга и инвентаризации леса. Значительно больший интерес с точки зрения перспективного и эффективного использования разрабатываемой методики, на наш взгляд, представляют бортовые системы воздушного лазерного (ALTM-3100) и радарного (SAR PALSAR) сканирования, интегрированные с цифровой многоканальной аэросъемкой сверхвысокого разрешения (Ultra Cam X – 14430 × 9420 активных пикселей на кадр), позволяющие получать трехмерные сцены земной поверхности высокой степени детализации, с геодезической точностью и в 2–3 раза дешевле по сравнению со спутниковыми снимками субметрового разрешения.

В процессе разработки, тестирования и апробации методики съемки и анализа получаемых материалов изучали различные подходы к обработке данных авиационного зондирования. Определены базовые методические и технологические элементы, необходимые при съемке леса лазерными сканерами, радарами и цифровыми аэрофотоаппаратами.

Установлено, что лазерный и радарный методы сканирования, интегрированные с цифровой аэрофотосъемкой, обеспечивают получение облака точек с известными координатами x , y , z . Это облако является основой для построения цифровой модели земной поверхности (ЦМЗП), которая включает точки земли, растительности и точки, отраженные от зданий и сооружений. При обработке данных и классификации (разделении) точек земли и растительности становится возможным построение цифровой модели

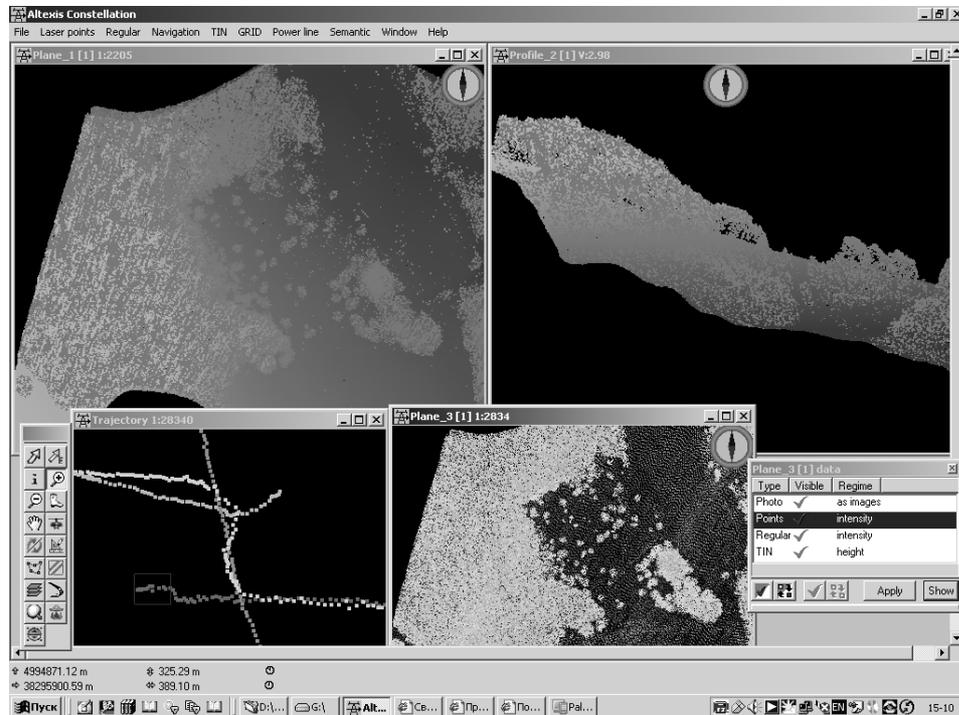


Рис. 1. Трехмерная визуализация лазерно-локационных данных сканирования лесной растительности и GPS-маршрутизация съемки в проекциях Altaxis 2.0

земной поверхности и цифровой модели растительности (ЦМР) в режиме реального времени (непосредственно на борту авиационного носителя или сразу после завершения аэросъемочных работ) с использованием программного комплекса Altaxis [5] (рис. 1, 2).

Сегментом между ЦМР и ЦМЗП является цифровая модель структуры древостоя (ЦМД), которая представляет собой основной базовый элемент лазерной локации, радарного сканирования и цифровой аэрофотосъемки леса. Цифровая модель древостоя служит основой для определения морфометрических параметров деревьев и их совокупностей с использованием статистических методов.

Предлагаемый нами метод обеспечивает построение детализированной цифровой модели структуры древостоя и отдельных частей деревьев (кроны, отдельные ветви, стволы), которые в последующем используются для точной биометрической оценки как отдельных деревьев, так и древостоев в целом (рис. 3).

Исследованиями установлено, что точность определения ЦМЗП, по данным лазерного сканирования, изменяется от 15 см до 1 м в зависимости от рельефа земной поверхности и высоты съемки. Вместе с тем, для построения модели высоты древостоя (ЦМД) – это более чем адекватный



Рис. 2. Интегрированный анализ цифровых аэросъемочных, лазерно-локационных и радарных данных и их представление в ГИС-приложениях

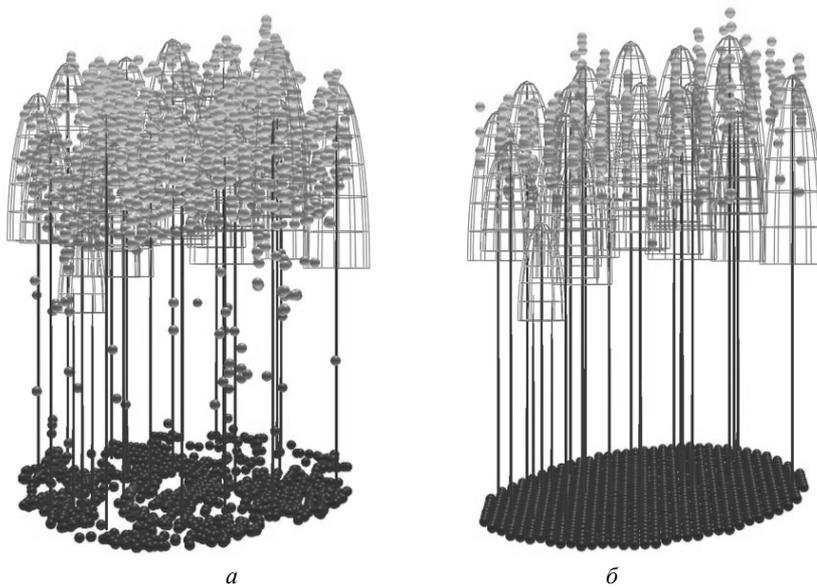


Рис. 3. «Сочлененная» трехмерная реконструкция морфологической структуры лиственничного древостоя по данным лазерного (а) и радарного (б) сканирования

показатель. Отдельные деревья в бореальной зоне могут быть измерены с точностью 10 ... 15 см при частоте импульсной локации 30 кГц и выше.

Выявлено, что при определении высоты деревьев главными факторами являются частота сканирования и густота (проницаемость) лесного полога. В бореальной зоне на покрытых лесом территориях в большинстве случаев существуют прогалины в лесном пологе. К примеру, на лазерных трансектах в Красноярском крае и Якутии более 30 % лазерных импульсов первого порядка (first pulse data) отражаются и фиксируются непосредственно от земли без какого-либо взаимодействия с лесным пологом. При увеличении частоты сканирования до 50 ... 100 кГц становится возможным получить детальные морфометрические параметры отдельных деревьев с точностью, сопоставимой с наземными инструментальными измерениями [2, 3].

Полученные результаты показывают высокие корреляции и соответствия между лазерными измерениями и наземной биометрией структурных и весовых компонентов лесных насаждений, выполненной на координатных пробных площадях (высота древостоя – $R^2 = 0,98$; высота основания кроны – $R^2 = 0,87$; сомкнутость полога – $R^2 = 0,85$; фитомасса древостоя и кроновой части – $R^2 = 0,87 \dots 0,98$).

Стандартные ошибки при определении средней высоты, суммы площадей поперечных сечений стволов, объемов стволов и их биомассы по данным авиационного лазерного зондирования оказались равными соответственно 3, 9, 7 ... 10 и 5 ... 10 %. В целом точность лазерно-локационных определений биометрических и таксационных показателей деревьев и дре-

востоев с помощью аллометрических функций была выше, чем при использовании традиционных методов лесоинвентаризации [1, 2].

При лазерной, радарной и цифровой аэросъемке оценка запасов древесины и фитомассы леса в каждом конкретном случае сводится к установлению базовых закономерностей изучаемого объекта и определению соотношений между объемами стволов, фитомассой, высотой и диаметрами стволов и крон, которые, в свою очередь, составляют 87 ... 99 % объясненной изменчивости различных фракций фитомассы (стволы деревьев, скелет крон и хвои) и объемов стволовой древесины [1–4, 6].

Выводы

Реализация настоящего проекта позволила разработать методологию обработки, дешифрирования и эффективного использования трехмерных данных дистанционного зондирования высокого и сверхвысокого разрешения в системе мониторинга лесного покрова, касающихся закономерностей пространственного распределения структурных компонентов и биомассы лесных экосистем, в том числе динамики растительных горючих материалов. Ожидается, что дальнейшее развитие данной методологии позволит создавать достоверные и высокоточные лесные карты и базы данных различного тематического содержания, которые найдут применение во многих сферах использования, включая оперативный мониторинг лесных экосистем, стратегическое и тактическое планирование лесопользования, объективную оценку параметров состояния и динамики лесных насаждений, в том числе их биомассу, моделирование развития и распространения катастрофических лесных пожаров и оценку различных природных рисков.

Результаты практической апробации метода авиационного лазерного и радарного сканирования леса в сочетании с цифровой аэро- и космической съемкой высокого и сверхвысокого разрешения, спутниковой навигацией и геопозиционированием, интегрированных в геоинформационных системах, свидетельствуют о высокой перспективности его использования для целей анализа и моделирования структуры и динамики лесного покрова, статистической лесоинвентаризации и оперативного лесоэкологического мониторинга бореальной зоны, что тесным образом связано с выполнением условий Киотского протокола (подписанного Россией) по точности глобальных и национальных оценок потоков углерода в экосистемах Земли. Метод позволяет проводить дистанционную инвентаризацию и мониторинг лесов в режиме реального времени, с высокой эффективностью, при минимуме наземных работ и значительной экономии времени и финансовых средств.

Авторы надеются, что результаты проекта будут способствовать получению новых знаний и выявлению закономерностей структурно-функциональной организации и биологической продуктивности лесных экосистем бореальной зоны, окажут существенное воздействие на развитие различных областей науки и новых технологий. Полученные результаты послужат основой для разработки принципиально новой методологии и технологии дистанционного зондирования лесного покрова и формирования

геоинформационных систем природно-ресурсного и природоохранного содержания и в перспективе будут иметь высокую потенциальную коммерческую ценность на рынке дистанционного зондирования и геоинформационных услуг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилин, И.М. Лазерное профилирование лесного полога [Текст] / И.М. Данилин, Т. Сведа // Лесоведение. – 2001. – № 6. – С. 64–69.
2. Данилин, И.М. Морфологическая структура, продуктивность и дистанционные методы таксации древостоев Сибири [Текст]: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук / И.М. Данилин; Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН. – Красноярск, 2003. – 35 с.
3. Медведев, Е.М. Лазерная локация земли и леса [Текст]: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. / Е.М. Медведев, И.М. Данилин, С.Р. Мельников. – М.: Геолидар, Геокосмос; Красноярск: ИЛ СО РАН, 2007. – 229 с.
4. Медведев, Е.М. С лазерным сканированием на вечные времена [Текст] / Е.М. Медведев, А.В. Григорьев // Геопрофи. – 2003. – № 1. – С. 5–10.
5. Программный комплекс Altexis [Электронный ресурс]. – 2007. – Режим доступа: <http://www.geokosmos.ru/technologies/airborne/altexis/>.
6. Danilin, I.M. Forest inventory and biomass assessment by the use of airborne laser scanning method (example from Siberia) [Text] / I.M. Danilin, E.M. Medvedev // Int. Arch. Photogram. Rem. Sens. & Spat. Inf. Sci. – 2004. – Vol. 36, N 8/W2. – P. 139–144.
7. ITRES Research Limited [Электронный ресурс]. – 2007. – Режим доступа: <http://www.itres.com>.
8. Microsoft-Vexcel Imaging GmbH [Электронный ресурс]. – 2007. – Режим доступа: <http://www.vexcel.com>.
9. Optech Incorporated [Электронный ресурс]. – 2007. – Режим доступа: <http://www.optech.ca>.
10. Remote Sensing of Forest Environments. Concepts and Case Studies [Text] / Ed. by M.A. Wulder, S.E. Franklin; Kluwer Academic Publ. – 2003. – 519 p.
11. Soille, P. Morphological Image Analysis: Principles and Applications [Text] 2-nd ed. / P. Soille. – Berlin: Springer-Verl. – 2003.

Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН
Компания «ГеоЛидар»

Поступила 25.06.07

I.M. Danilin, E.M. Medvedev

Some Results of International Project on Investigation of Possibilities for Laser, Radar and Digital Aerial Survey of Forests

Possibilities of using recent remote sensing methods – laser, radar and digital aerial survey - for forest inventory and monitoring developed within the framework of international (Russian-Canadian-Austrian) scientific-research project are discussed.