



УДК 551.4:556.124

## **Перспективы использования комплексов воздушного лазерного сканирования для картографирования лесов**

**И. А. РЫЛЬСКИЙ**

*Московский государственный университет*

**В. С. ТИКУНОВ**

*Московский государственный университет*

**Аннотация.** В настоящее время основным средством сбора данных для исследования лесов является многозональная космическая фотосъемка. Цифровая аэрофотосъемка в основном применяется для лесоустроительных работ. Однако уже ставший массовым метод воздушного лазерного сканирования до сих пор не нашел применения в исследованиях лесов. Основные причины: дороговизна, отсутствие методик, малая осведомленность исследователей о методе. Прогресс в области лазерного сканирования позволил очень значительно увеличить производительность систем, среди которых можно выделить ряд устройств, сопоставимых по производительности с аэрофотосъемочными комплексами. Стоимость получения данных у таких систем также может быть сопоставима со стоимостью получения космического сегмента данных. Применение подобной съемки совместно с аэрофото позволяет быстрее и точнее получить ряд характеристик растительности, недоступных для получения из космоса или классической аэрофотосъемкой. Для использования этих возможностей необходима разработка методик, учитывающих эту информацию. Подобный опыт уже имеется, так, в 2012–2013 гг. в интересах ФГУП «Рослесинфорг» была проведена научно-исследовательская работа, посвященная изучению возможностей осуществления лесоустроительных работ по данным лазерного сканирования. Принимая во внимание аппаратные особенности оборудования и дополнительных сенсоров, предлагается активизировать усилия по внедрению данного метода в практику географических исследований лесов наряду с решением практических задач.

**Ключевые слова:** аэрофотосъемка, лазерное сканирование, лесотаксация, космическая съемка.

### **Введение**

На момент написания статьи наиболее распространенным способом информационного обеспечения исследований растительности является космическая сканерная съемка в различных диапазонах длин волн видимого и ближнего инфракрасного излучения. Для лесоустройства и таксации также часто применяют цифровую аэрофотосъемку. В то же время широко распространенный способ воздушного лазерного сканирования (ВЛС) для анало-

гичных целей применяется очень редко. Считается, что данный метод дорог, методики его использования несовершенны, а сами данные сканирования – своего рода экзотика. Рассмотрим, так ли это.

Действительно, если производить сравнение стоимости новой космической съемки высокого разрешения (0,5 м) и аэрофотосъемки (с разрешением 0,2–0,3 м), то можно убедиться, что средняя себестоимость космосъемки на сегодняшний день составляет около 1 200 руб. за 1 км<sup>2</sup>, а себестоимость аэрофотосъемки с геопривязкой и уравниванием – около 2 500–4 000 руб. за 1 км<sup>2</sup> (в зависимости от региона). Нетрудно видеть, что аэрофотосъемка дороже, но получаемая при этом детальность данных в 4–6 раз выше, чем по космическим данным. Отметим, что с конца 2014 г. доступны заказы на космическую съемку с разрешением около 30 см по цене около 3 500 руб. за 1 км<sup>2</sup> (с использованием спутника WorldView 3), что, вероятно, составит конкуренцию данным аэрофотосъемки с разрешением 0,25–0,30 м как по информационной ценности, так и по цене. Однако большая загруженность данного аппарата вряд ли позволит в ближайшие годы производить массивные съемки лесов на территории РФ.

### **Основные проблемы и особенности лазерного сканирования: производительность, скорость, точность**

За последние 12–14 лет технология прошла путь от систем, имевших возможность съемки с охватом в 300–500 м и средней дистанцией между точками лазерных отражений в 1–1,5 м, до систем, обеспечивающих среднюю дистанцию между точками лазерных отражений (аналог размера пиксела для фотоснимков) на уровне 20–40 см при ширине охвата в несколько километров [1; 13].

Так, например, система Riegl Q1560 позволяет вести работу с высоты 2 800 м при скорости сканирования 800 000 точек в секунду, что при скорости носителя около 160 км/ч («Ан-2», «Ми-8») позволяет производить съемку в полосе шириной в 3 000 м, давая при этом плотность в 4 точки на 1 м<sup>2</sup> (средняя дистанция – 50 см), что достаточно для создания картографических материалов 1:1 000 и пригодно для лесоустроительных работ всех видов. Производительность работ при этом составляет около 450 км<sup>2</sup> в час.

При использовании более скоростного носителя – например, «Ан-30» – возможно ведение работ и с больших высот – до 4 000 м. При этом будет достигнута производительность до 1 000 км<sup>2</sup> в лётный час (плотность – 2 точки/м<sup>2</sup>, средняя дистанция – 70 см, под 1:2 000), и даже 1 500 км<sup>2</sup> – под 1:5 000 (0,7 точки/м<sup>2</sup>, средняя дистанция – 1,2 м).

При стоимости лётного часа «Ан-2» в 35 000–60 000 руб. (за это время можно снять до 450 км<sup>2</sup>) и «Ан-30» – около 150 000 руб. (можно снять 1 000–1 500 км<sup>2</sup>) нетрудно сделать выводы о возможной себестоимости таких материалов. Естественно, при этом имеет смысл вести параллельную цифровую фотосъемку в видимом и инфракрасном диапазонах, так как все системы воздушного лазерного сканирования комплектуются камерами

среднего формата, позволяющими получать снимки с использованием ближнего инфракрасного и видимого диапазонов. С указанных высот – от 2 800 до 4 000 м – разрешение фотоматериалов составит от 25 до 35 см без использования широкоформатных камер.

Очевидно, что производительность этих систем не уступает производительности классической аэрофотосъемки (при этом включает получение многозональных фотоматериалов), а по стоимости – не превосходит ее. Однако ценность этих данных существенно выше, чем данных классической аэрофотосъемки.

### **Объекты исследования с использованием данных лазерного сканирования**

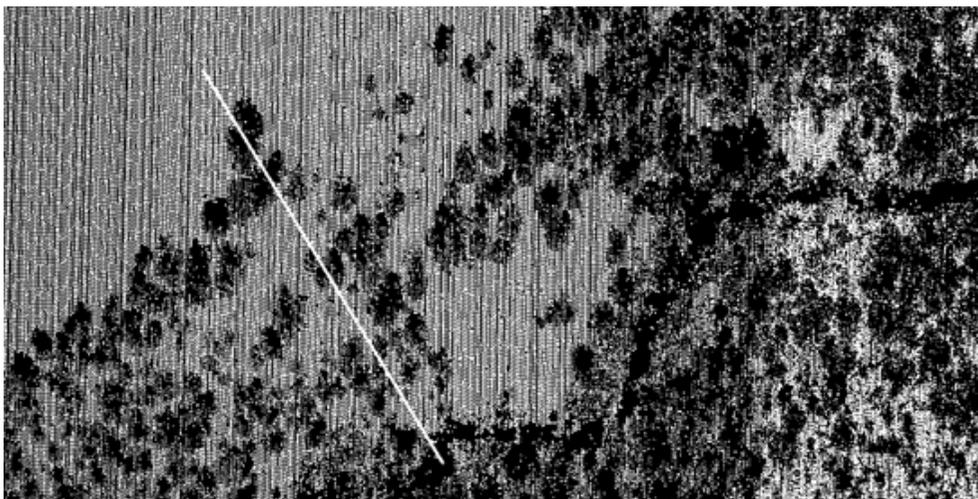
На материалах с плотностью 4 точки/м<sup>2</sup> (под 1:1 000) легко различимы в 3Д-режиме (т. е. просто по форме, без спектральных признаков) кроны лиственных и хвойных деревьев с учетом наиболее высоких точек дерева. Даже данные с плотностью 2 точки/м<sup>2</sup> (под 1:2 000, рис. 1) неплохо подходят для использования при обновлении материалов лесоустройства всех категорий таксации [8]. Данные под 1:5 000 (0,5–1,0 точки/м<sup>2</sup>) идеальны для использования при уточнении результатов, полученных по моделям хода роста [3; 9].

Кроме воздушного лазерного сканирования, ни один из применяющихся на сегодняшний день методов в дистанционном зондировании земли не обладает одновременной возможностью получать и видимую поверхность крон (см. рис. 2), и поверхность рельефа [12]. Действительно, оптико-электронное наблюдение дает нам информацию о видимой поверхности (кроны), оставляя рельеф невидимым. Радарная съемка – наоборот. Только воздушное лазерное сканирование сочетает в себе лучшие черты каждого из методов, обладая при этом субдециметровыми точностями измерения высоты. Именно благодаря этому свойству воздушное лазерное сканирование – один из немногих методов, позволяющих получить точные геометрические параметры каждого дерева из основного яруса растительности, т. е. системообразующих компонентов лесного сообщества [15]: это высота и диаметр кроны (рис. 3), которые в сочетании с известным породным составом, бонитетом леса и местными особенностями может быть пересчитан в объем деловой древесины с высокой точностью. Этот подход уже несколько лет применяется в странах Скандинавии, известных своим бережным и хозяйским отношением к лесным ресурсам [6].

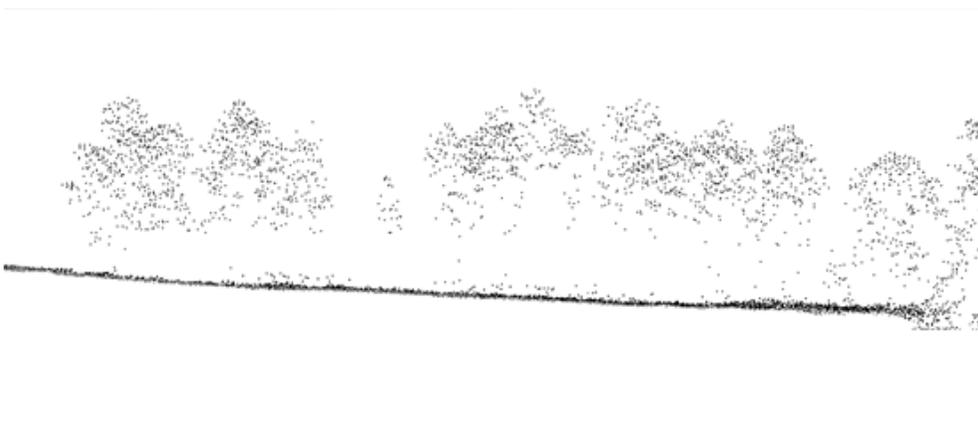
Однако в области научно-исследовательских задач наиболее интересные возможности воздушное лазерное сканирование дает не в сочетании с аэрофотосъемкой, а в сочетании с космической сверхдетальной съемкой, проводящейся в нескольких, а не в одном спектральном диапазоне [11; 14]. Примерами для подобного «тандема» могут служить:

1) под детальные работы (1:5 000–1:25 000) – WorldView 2 с его 8-спектральными каналами, включая 3 канала за пределами видимого диапазона; или WorldView 3 с его 10 каналами за пределами видимого диапазона, включая 8 каналов в среднем ИК с разрешением 4 м;

2) под работы регионального и федерального охвата (1:50 000–1:100 000) – Landsat 8 (4 канала вне видимого), Hyperion (220 каналов).



*Рис. 1.* Пример лазерного сканирования леса с плотностью 4 точки/м<sup>2</sup>.  
Линия – ось профиля (рис. 2)



*Рис. 2.* Профиль (линии на рис. 1). Хорошо видно различие крон каждого дерева и поверхность рельефа под кронами

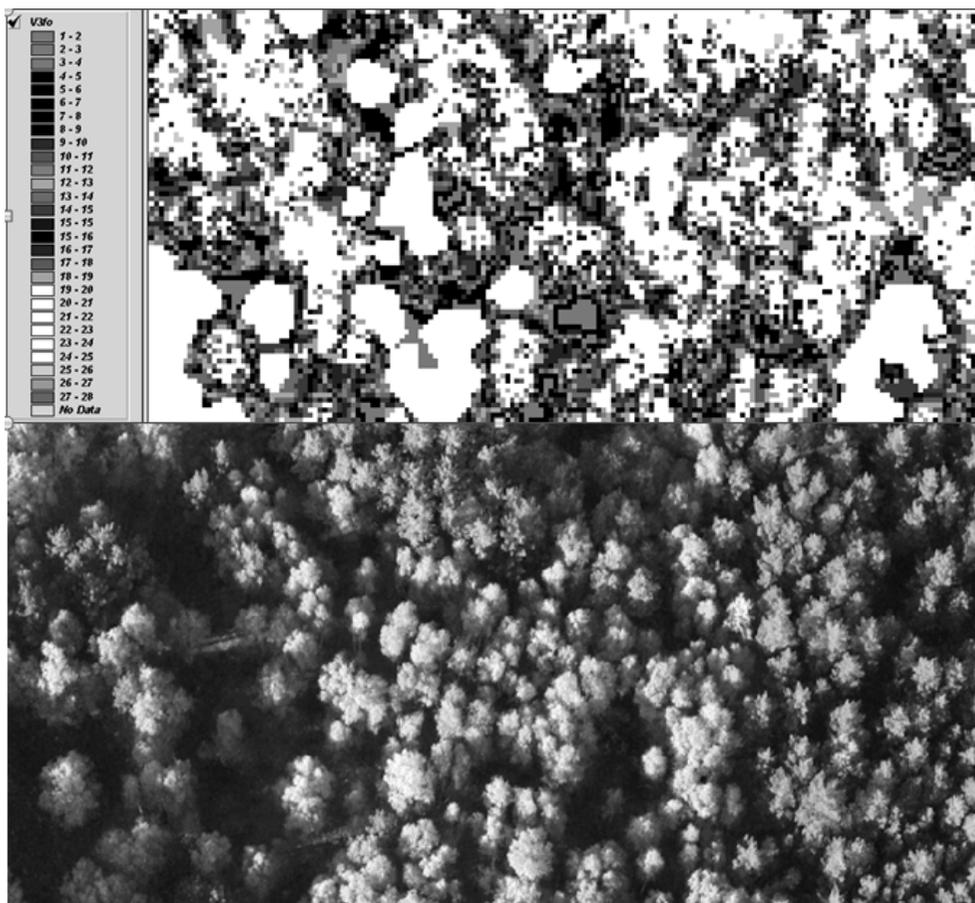


Рис. 3. Цифровая модель относительных высот кроны деревьев над рельефом (вверху) и материалы аэрофотосъемки того же участка (внизу)

Дело в том, что для выявления незначительных, но порой критически важных изменений в пологе леса зачастую необходимы:

- учет текстурного фактора распределения теней от кроны [10];
- качественная топонормализация снимков (т. е. исправление их яркости с учетом точной модели рельефа именно видимой поверхности кроны, а не поверхности рельефа, полученной по картам);
- привлечение сведений о высоте растительности и его статистических параметрах распределения по площадям (рис. 4) в качестве одного из дешифровочных признаков [16];
- использование цифровой модели рельефа и сведений о высоте растительности в системах автоматизированного дешифрирования с использованием алгоритмов евклидовой или нейронной логики [7; 12].

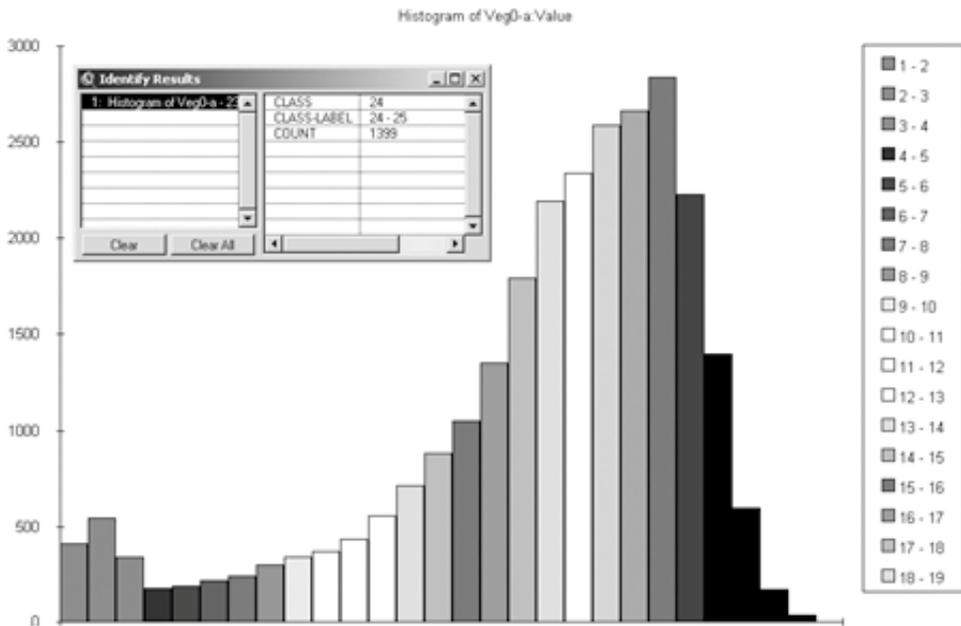


Рис. 4. Статистика численности деревьев различной высоты в пределах однородного выдела на существующих материалах лесоустройства



Рис. 5. Пример использования данных WorldView 2 для уточнения границ выделов и их породного состава для совместного использования с данными воздушного лазерного сканирования

Информация о высоте растительности и рельефа может занять отдельное место в методиках мониторинга лесопокрываемых территорий и при корректировке региональных моделей прироста растительности. Особенную актуальность данная тематика приобретает в связи с климатическими изме-

нениями, которые могут драматически сказаться на скорости прироста древостоя и вообще «перекроить» сложившиеся представления о динамике лесных сообществ: районов лесостепи, северной тайги, интразональных ландшафтов [4; 12].

### Результаты внедрения метода и опыт применения

В области инженерных изысканий метод ВЛС был по достоинству оценен около 10 лет назад ведущими российскими корпорациями. «Транснефть» и «Газпром» уже к 2007 г. обзавелись собственными корпоративными стандартами выполнения данных работ и отточили методику съемки и обработки данных. В области исследований лесов и растительности в целом ситуация существенно хуже.

Первые опыты в данной области сделаны компанией «Геокосмос» [1] в сотрудничестве с Институтом леса СО РАН (г. Красноярск), результатом чего стал труд под названием «Лазерная локация земли и леса» (Е. М. Медведев, И. М. Данилин, С. Р. Мельников). В связи с резко ухудшившейся экономической ситуацией в стране исследования не проводились до 2012 г. В 2012–2013 гг. в интересах ФГУП «Рослесинфорг» с участием компаний «Арк-он» (г. Москва), «ПроектСтрой» (г. Омск) и Института леса СО РАН в сотрудничестве с «ВостСибЛесПроект» (филиал ФГУП «Рослесинфорг», г. Красноярск) была проведена научно-исследовательская работа, посвященная изучению возможностей осуществления лесоустроительных работ по данным лазерного сканирования и прототипированию данной методики для широкого практического внедрения [2].

Таблица 1

Расчетные тренды зависимостей между средними диаметром, высотой крон, полнотой древостоев опытного полигона Красноярского края

Древесная порода	Класс бонитета	Уравнение связи	$\eta$	F	S	$\sigma$
Кедр	III	$D_{ср.} = 3,270 + 1,772H_{ср.} - 0,003H_{ср.}^2 - 12,485P + 1,157P^2$	0,96	16,96	6,38	2,52
	IV	$D_{ср.} = 1,335 + 1,982H_{ср.} - 0,011H_{ср.}^2 - 7,299P - 1,031P^2$	0,96	16,23	6,85	2,62
Сосна	II	$D_{ср.} = 4,791 + 0,749H_{ср.} + 0,022H_{ср.}^2 - 4,616P - 1,353P^2$	0,97	17,14	4,33	2,08
	III	$D_{ср.} = 6,843 + 0,556H_{ср.} + 0,026H_{ср.}^2 - 7,475P + 1,169P^2$	0,97	18,46	4,64	2,15
	IV	$D_{ср.} = 5,419 + 0,744H_{ср.} + 0,025H_{ср.}^2 - 5,050P + 0,086P^2$	0,98	12,15	3,72	1,93
Лиственница	III	$D_{ср.} = 8,799 + 0,109H_{ср.} + 0,049H_{ср.}^2 - 10,685P + 1,062P^2$	0,97	16,94	5,91	2,43
	IV	$D_{ср.} = 9,917 + 0,219H_{ср.} + 0,046H_{ср.}^2 - 13,338P + 3,270P^2$	0,97	16,80	6,24	2,50
Ель	III	$D_{ср.} = 1,789 + 1,574H_{ср.} - 0,013H_{ср.}^2 - 4,167P + 2,160P^2$	0,96	15,63	7,40	2,72
	IV	$D_{ср.} = 4,137 + 1,346H_{ср.} - 3,432P - 2,167P^2$	0,96	16,19	7,08	2,65
Пихта	III	$D_{ср.} = 5,388 + 0,899H_{ср.} + 0,008H_{ср.}^2 - 0,803P - 5,091P^2$	0,96	16,28	6,93	2,63
	IV	$D_{ср.} = 8,187 + 0,688H_{ср.} + 0,015H_{ср.}^2 - 2,008P - 3,709P^2$	0,97	16,18	6,80	2,61
Береза	I–III	$D_{ср.} = 3,949 + 0,546H_{ср.} + 0,022H_{ср.}^2 - 2,674P - 0,903P^2$	0,96	16,23	6,89	2,62
Осина	I–III	$D_{ср.} = 15464 - 0,811H_{ср.} + 0,054H_{ср.}^2 + 9,000P - 10,272P^2$	0,98	21,87	3,83	1,96

Примечание: расчеты проведены для дешифрирования данных космической съемки и лазерной локации.  $D_{ср.}$  – средний диаметр древостоя;  $H_{ср.}$  – средняя высота древостоя;  $P$  – относительная полнота;  $\eta$  – множественное корреляционное отношение;  $F$  – критерий Фишера;  $S$  – остаточная дисперсия;  $\sigma$  – средняя квадратическая ошибка уравнения.

Исследование проводилось на территории двух лесничеств общей площадью около 17 тыс. га, сопровождалось значительным объемом наземных полевых работ, тестовыми рубками, параллельным сравнением методик с использованием и космического сегмента данных дистанционного зондирования, и моделей прироста (табл. 1) [5], и с результатами оценок по классическим (рис. 6) и «ручным» методиками. Общим результатом научно-исследовательской работы стал прототип методологии обработки данных. Однако по ряду причин экономического характера в настоящее время работы по данной тематике не ведутся.

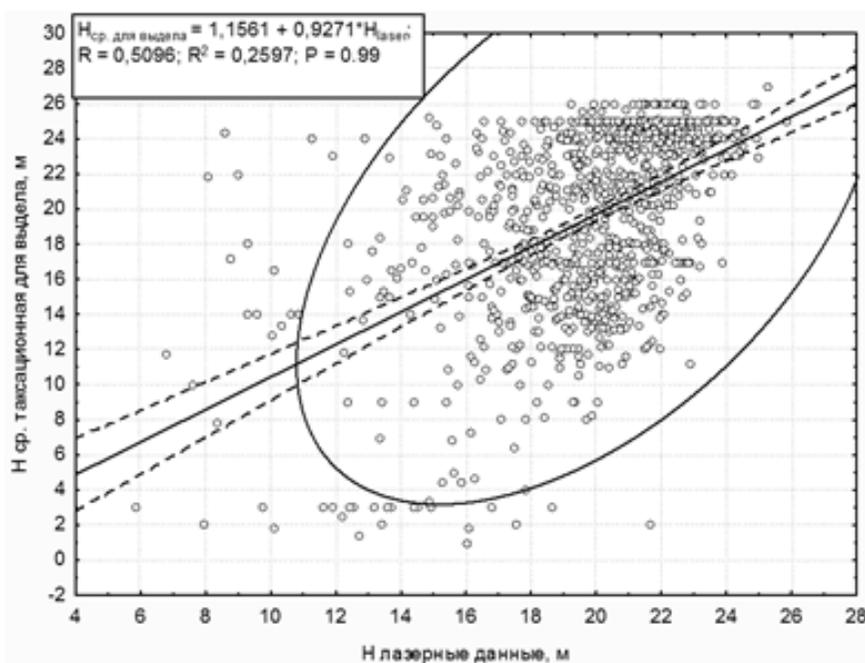


Рис. 6. Зависимость между значениями высот древостоев, определенных по данным таксации и по данным воздушного лазерного сканирования (использовано 978 таксационных выделов)

Следует отметить, что в период проведения указанной научно-исследовательской работы системы с вышеприведенными характеристиками еще не были разработаны, что в текущий период открывает «окно экономических возможностей» для продолжения исследований по данной тематике.

## Выводы

Несомненно, методы лазерного сканирования найдут широкое применение для исследований лесов и растительности как таковой по мере дальнейшего роста характеристик производительности систем и удельной стоимости данных. Хотелось бы, чтобы использование данного метода в работах по исследованию растительности не повторило судьбу генетики и кибернетики в СССР.

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 13-05-12011 и 15-06-02279.*

### Список литературы

1. *Медведев Е. М.* Лазерная локация земли и леса / Е. М. Медведев, И. М. Данилин, С. Р. Мельников. – М. : Геокосмос, 2007. – 219 с.
2. *Рыльский И. А.* Инвентаризация и мониторинг лесов на основе лазерной локации, цифровой аэро- и космической фотосъемки и спутникового геопозиционирования / И. А. Рыльский, К. А. Варьгин // Материалы 3-й Междунар. практ. конф. по лесоустройству. – Новосибирск, 2013. – С. 87–91.
3. 3D-landscape metrics to modelling forest structure and diversity based on laser scanning data / T. Blaschke [et al.] // The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – Freiburg, 2004. – Vol. 36-8/W2. – P. 129–132.
4. A full GIS-based workflow for tree identification and delineation using laser scanning / D. Tiede [et al.] // The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, – Vienna, 2005. – Vol. 36, Part 3/W24. – P. 9–14.
5. *Burnett C.* A multi-scale segmentation/object relation-ship modeling methodology for landscape analysis / C. Burnett, T. Blaschke // Ecological Modeling. – 2003. – Vol. 168. – P. 233–249.
6. Forest transitions in Eastern Europe and their effects on carbon budgets / T. Kuemmerle [et al.] // Global Change Biology. – 2015. – Vol. 21. – P. 3049–3061.
7. *Herold A.* Stand stability in the Swiss National Forest Inventory: assessment technique, reproducibility and relevance / A. Herold, U. Ulmer // Forest Ecology and Management. – 2001. – Vol. 145. – P. 29–42.
8. *Holmgren J.* Identifying species of individual trees using airborne laser scanner / J. Holmgren, A. Persson // Remote Sensing of the Environment. – 2004. – Vol. 90, N 4. – P. 415–423.
9. Integrity, stability and management of protection forests in the European Alps / L. K. A. Dorren [et al.] // Forest Ecology and Management. – 2004. – Vol. 195. – P. 165–176.
10. *Kumar V.* Extraction of forest inventory parameters and 3D modelling from airborne LIDAR // Materials of ESRI international user conference. – San Diego, 2014. – P. 321–327.
11. Object-based semi-automatic mapping of forest stands with Laser scanner and Multispectral data / D. Tiede [et al.] // The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – Freiburg, 2004. – Vol. 36-8W2. – P. 328–333.
12. *Pinto N.* Mapping Forest 3D Structure with Lidar and Radar Remote Sensing // NASA-Jet Propulsion Laboratory. – Pasadena, 2014. – P. 111.
13. *Schwarz B.* LIDAR: Mapping the world in 3D // Nature Photonics. – 2010. – N 4. – P. 429–430.
14. Supervised and forest type-specific multi-scale segmentation for a one-level-representation of single trees / D. Tiede [et al.] // 1st International Conference on Object-based Image Analysis. – Salzburg, 2006. – P. 87–90.
15. *Tiede D.* Process oriented object-based algorithms for single tree detection using laser scanning data / D. Tiede, Ch. Hoffmann // EARSeL-Proceedings of the Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry, 14<sup>th</sup>–15th Feb 2006. – Vienna, 2006. – P. 9–14.
16. *Wehr A.* Airborne Laser scanning – an introduction and overview / A. Wehr, U. Lohr // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 1999. – Vol. 54. – P. 68–82.

## Perspective of Using Airborne Laser Scanning Sets for Vegetation Mapping

I. A. Rylskiy

*Moscow State University*

V. S. Tikunov

*Moscow State University*

**Abstract.** Nowadays the multispectral satellite imagery is the main source of remote sensing data for scientific researches of forests. Digital airborne surveys are mainly used only for forest inventory. The LIDAR (airborne laser scanning) method is not used widely for these purposes, though it was being used during last 15-18 years in GIS industry and is still improving rapidly. The main reason of this situation is the price, different methodology, and insufficient awareness of the researchers about this method. During last years the development of technologies and new hardware solutions increased the surveying a lot. Now high-end LIDAR solutions are very close to professional big format aerial cameras in terms of productivity and area surveyed per hour. The price of LIDAR data also decreased and is comparable with the price of satellite imagery data. Laser point clouds data, mixed with airborne mid-size camera imagery allows us to extract some information about the vegetation that can't be obtained using any other method (information about relative height of trees or relief under the canopies). New methods and analysis techniques must be developed for correct use of this information. In 2012–2013 similar researches were done on behalf of RosLesInforg, focusing on the improvement of the methodology of forest inventory using the LIDAR data. Taking into account the precision and productivity of new hardware and potential additional sensors, the additional researches are needed for implementation of LIDAR methods into the scientific and industrial tasks.

**Keywords:** aerial imagery, airborne laser scanning, LIDAR, forest inventory, satellite imagery.

*Рыльский Илья Аркадьевич  
кандидат географических наук, старший  
научный сотрудник, Центр мировой  
системы данных по географии  
Московский государственный университет  
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1  
тел.: (495) 939-23-54  
e-mail: rilskiy@mail.ru*

*Rylskiy Ilya Arkanievich  
Candidate of Sciences (Geography),  
Senior Research Scientist,  
World Data Center for Geography  
Moscow State University  
1, Leninskie Gory, Moscow, 119991  
tel.: (495) 939-23-54  
e-mail: rilskiy@mail.ru*

*Тикунوف Владимир Сергеевич  
доктор географических наук, профессор,  
директор, Центр Мировой системы данных  
по географии  
Московский государственный университет  
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1  
тел.: (495) 939-13-39  
e-mail: tikunov@geogr.msu.su*

*Tikunov Vladimir Sergeevich  
Doctor of Sciences (Geography),  
Professor, Director, World Data Center  
for Geography  
Moscow State University  
1, Leninskie Gory, Moscow, 119991  
tel.: (495) 939-13-39  
e-mail: tikunov@geogr.msu.su*