



УДК 630*231

В.А. Усольцев, Д.В. Норицин, А.А. Маленко
V.A. Usoltsev, D.V. Noritsin, A.A. Malenko

РЕГРЕССИОННЫЕ МОДЕЛИ И ТАБЛИЦЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТРУКТУРЫ ФИТОМАССЫ ДЕРЕВЬЕВ ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ СОСНЯКОВ РФ

REGRESSION MODELS AND TABLES FOR ESTIMATING TREE BIOMASS STRUCTURE AT REMOTE SENSING OF PINE FORESTS IN THE RUSSIAN FEDERATION

Ключевые слова: *Pinus sylvestris L.*, фитомасса деревьев, фракции фитомассы, дистанционные методы, лазерное зондирование, лесной полог, ГИС-технологии, регрессионные модели, морфометрические показатели.

Дистанционное зондирование Земли с применением ГИС-технологий сегодня используется при оценке различных параметров лесных насаждений, в том числе структуры их фитомассы. Традиционные методы дистанционного зондирования без учета породного состава могут давать существенные смещения. Для оценки фитомассы таких древостоев необходимы таксационные нормативы, полученные на основе аллометрических уравнений ее связи с морфометрическими показателями деревьев. Сформированная база данных о фитомассе модельных деревьев сосны обыкновенной включает более 1000 определений на территории от Архангельска до Красноярска. Если при лазерной оценке фитомассы на единице площади основными массообразующими показателями являются высота полога и густота (плотность) древостоя, то при разработке наших моделей фитомассы деревьев густота их стояния в большинстве случаев оказалась статистически незначимой, тогда как значимость двух морфометрических показателей – высоты дерева и диаметра кроны – оказалась на уровне вероятности P_{999} . Причина в том, что густота деревьев при прочих равных условиях тесно коррелирует с диаметром их кроны. Доля хвои в надземной массе варьирует в пределах от 3 до 35%. Отношение подзем-

ной части дерева к надземной варьирует в диапазоне от 12 до 20%.

Key words: *Pinus sylvestris L.*, tree biomass, biomass components, remote sensing methods, laser sensing, forest canopy, GIS technology, regression models, morphometric indices.

Remote sensing of the Earth by applying GIS technology is used today in estimating various indices of forests including the structure of their biomass. The traditional methods of forest remote sensing that do not include species composition may have substantial biases. To estimate the biomass of such forests, forest estimation standards are required that are obtained using allometric equations relating tree biomass with tree morphometric indices. The database of sample tree biomass of Scots pine compiled by the authors includes more than 1000 determinations distributed on the territory from Arkhangelsk to Krasnoyarsk. The laser estimation of forest biomass per ha involves the canopy height and density of the stand as main mass-forming indices, while in our biomass models the index of tree density in most cases is not statistically significant. The significance of two morphometric indices as tree height and crown diameter is at the level of probability of P_{999} . The reason is that tree density is closely correlated with crown diameter, if other things being equal. Needle percentage in aboveground biomass varies in the range from 3% to 35%. The ratio of tree underground biomass to aboveground biomass varies in the range from 12% to 20%.

Усольцев Владимир Андреевич, д.с.-х.н., проф., Засл. лесовод России, каф. менеджмента, Уральский государственный лесотехнический университет; гл. н.с., Ботанический сад УрО РАН; г. Екатеринбург. Тел.: (343) 354-61-59. E-mail: Usoltsev50@mail.ru.

Норицин Денис Витальевич, соискатель, Уральский государственный лесотехнический университет, г. Екатеринбург. E-mail: norritsin@mail.ru.

Usoltsev Vladimir Andreyevich, Dr. Agr. Sci., Prof., Chair of Management, Ural State Forestry Engineering University; Chief Staff Scientist, Botanical Garden, Ural Branch, Rus. Acad. of Sci., Yekaterinburg. Ph.: (343) 354-61-59. E-mail: Usoltsev50@mail.ru.

Noritsin Denis Vitalyevich, Candidate degree applicant, Ural State Forestry Engineering University, Yekaterinburg. E-mail: norritsin@mail.ru.

Маленко Александр Анатольевич, д.с.-х.н., зав. каф. лесного хозяйства, Алтайский государственный аграрный университет. Тел. (3852) 62-63-52. E-mail: malenko51@mail.ru.

Malenko Aleksandr Anatolyevich, Dr. Agr. Sci., Head, Chair of Forestry, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 62-63-52. E-mail: malenko51@mail.ru.

Введение

Дистанционные методы зондирования лесного покрова в виде крупномасштабной аэрофотосъемки давно используются при инвентаризации наших лесов [1]. В связи с развивающимися возможностями аэрокосмического изучения Земли методы дистанционного зондирования лесного покрова получают все более широкое применение. Дистанционное зондирование Земли с применением ГИС-технологий как эффективное средство контроля экологического состояния лесной растительности сегодня используется при оценке различных параметров лесных насаждений, в том числе структуры их фитомассы [2-6]. Последнее необходимо потому, что различные фракции фитомассы имеют разное содержание элементов питания и разный вклад в ее годовую продукцию. Например, хвоя и ветви содержат около 50% азота от общей фитомассы и дают 40% годичной продукции, но составляют лишь 10-15% фитомассы дерева [7].

При лазерном зондировании древесного полога бортовыми станциями в цифровом формате получают лазерную трехмерную фотографию древостоя и его плановое пространственное изображение высокой степени детализации (рис. 1). При этом определение стволового запаса по уравнению его связи с лазерной оценкой высоты древостоя объясняет 60%, а по двухфакторному уравнению связи с лазерными оценками высоты и густоты древостоя – 76% общего варьирования [8].

Однако доля чистых древостоев в лесном фонде невелика, и древостои смешанного породного состава занимают значительные площади. Традиционные методы дистанционного зондирования без учета породного состава могут давать существенные смещения. Для оценки фитомассы таких древостоев необходимы таксационные нормативы, полученные на основе аллометрических уравнений ее связи с морфометрическими показателями деревьев, распознаваемыми дистанционно.

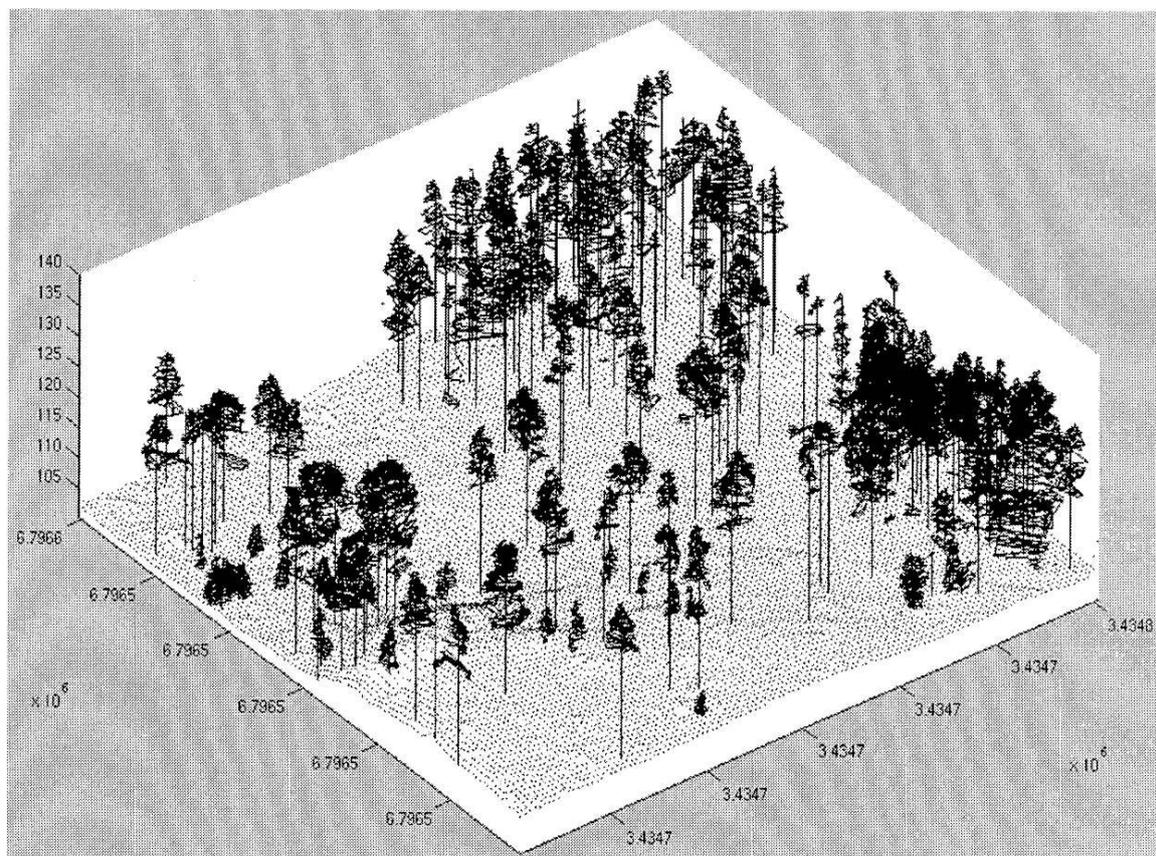


Рис. 1. Трехмерная (3D) реконструкция морфоструктуры древостоя по данным лазерной локации. По результатам наземных обмеров крон 50 деревьев установлено, что лазерное сканирование дает более точную картину профиля лесного полога по сравнению с наземной съемкой [9]

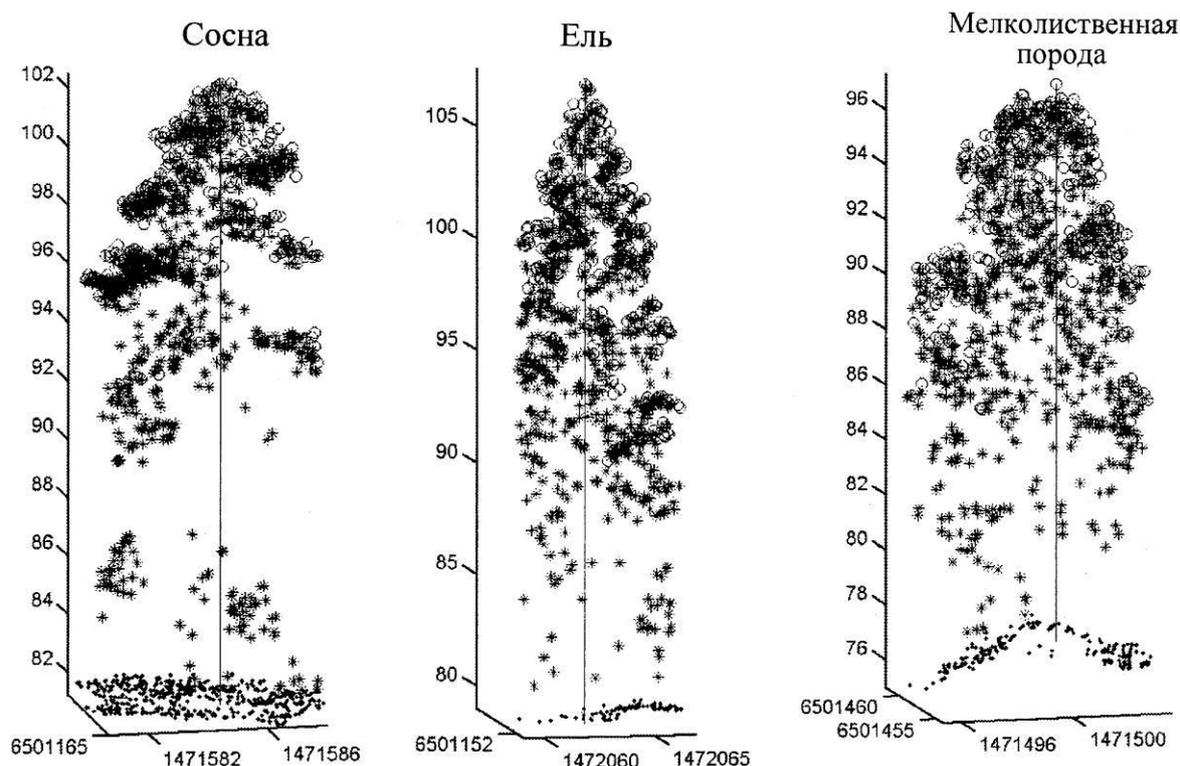


Рис. 2. Множественная регистрация бортовым носителем отраженных лазерных импульсов формирует вертикальный профиль деревьев на примере трех древесных пород [10]

С помощью лазерной техники, размещаемой на бортовых носителях, такие показатели деревьев, как высота и диаметр кроны, определяются более точно, чем при наземных измерениях (рис. 1). Деревья разных древесных пород обладают специфичной конфигурацией вертикального профиля, и эта специфика сегодня распознается дистанционно. При множественной регистрации бортовым носителем отраженных лазерных импульсов по характеру группировки точек профиля и его очертанию можно с вероятностью 95% различать сосну, ель и мелколиственные породы (рис. 2). Сосна отличается от березы характерными сгущениями точек, а ель от прочих – формой кроны [10].

Целью исследования является разработка регрессионных моделей и таксационных нормативов для оценки структуры фитомассы деревьев сосны обыкновенной, произрастающей на территории России, с помощью лазерного дистанционного зондирования.

Объекты и методы исследования

Сформированная база данных о фитомассе модельных деревьев сосны обыкновенной включает более 1000 определений на территории от Архангельска до Красноярска. Данные по естественным соснякам и культурам сведены в общий массив, поскольку при одних и тех же значениях как высоты дерева, так и диаметра крон различия в структуре фитомассы тех и других статистически не значимы.

Предложена структурная форма регрессионной модели:

$$\ln Pi = a_0 + a_1 (\ln H) + a_2 (\ln Dcr), \quad (1)$$

где Pi – фитомасса дерева в абсолютно сухом состоянии: хвои, ветвей, ствола с корой, надземная и корней (соответственно, Pf , Pbr , Pst , Pa и Pr), кг;

H – высота дерева, м;

Dcr – диаметр кроны, м.

Результаты и их обсуждение

Результаты расчета констант уравнений (1) сведены в таблицу 1. Отметим, что если при лазерной оценке фитомассы на единице площади основными массообразующими показателями являются высота полога и густота (плотность) древостоя, то при разработке наших моделей фитомассы деревьев густота их стояния в большинстве случаев оказалась статистически незначимой, тогда как значимость двух морфометрических показателей – высоты дерева и диаметра кроны – на уровне вероятности P_{999} . Причина в том, что густота деревьев при прочих равных условиях тесно коррелирует с диаметром их кроны.

Для анализа фракционной структуры фитомассы деревьев уравнения (1) представлены в виде таблицы 2, полученной путём их табулирования по задаваемым значениям высоты дерева и диаметра кроны. Значения надземной фитомассы приведены по результатам суммирования массы хвои, ветвей и ствола дерева.

Таблица 1

Характеристика уравнений (1)

| Зависимые переменные | Константы и независимые переменные | | | R ² | SE* |
|----------------------|------------------------------------|----------------------|------------------------|----------------|------|
| | a ₀ | a ₁ (lnH) | a ₂ (lnDcr) | | |
| ln(Pf) | -2,7934 | 0,8611 | 1,6925 | 0,902 | 0,83 |
| ln(Pbr) | -3,5883 | 1,3214 | 1,7924 | 0,942 | 0,74 |
| ln(Pst) | -3,3601 | 2,4413 | 0,6578 | 0,975 | 0,47 |
| ln(Pa) | -2,5444 | 2,1296 | 0,8899 | 0,967 | 0,54 |
| ln(Pr) | -4,5770 | 2,3293 | 0,6899 | 0,911 | 0,61 |

* R² – коэффициент детерминации; SE – стандартная ошибка уравнения.

Таблица 2

Зависимость фитомассы деревьев сосны обыкновенной от высоты дерева и диаметра кроны

| Высота дерева, м | Фракции фитомассы | Диаметр кроны дерева, м | | | | | | | |
|------------------|-------------------|-------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 2 | Хвоя | 0,11 | 0,36 | 0,71 | - | - | - | - | - |
| | Ветви | 0,07 | 0,24 | 0,49 | - | - | - | - | - |
| | Ствол | 0,19 | 0,30 | 0,39 | - | - | - | - | - |
| | Надземная | 0,37 | 0,90 | 1,59 | - | - | - | - | - |
| | Корни | 0,05 | 0,08 | 0,11 | - | - | - | - | - |
| 6 | Хвоя | 0,29 | 0,93 | 1,84 | 2,99 | 4,36 | - | - | - |
| | Ветви | 0,30 | 1,02 | 2,11 | 3,54 | 5,28 | - | - | - |
| | Ствол | 2,76 | 4,35 | 5,68 | 6,86 | 7,95 | - | - | - |
| | Надземная | 3,35 | 6,30 | 9,63 | 13,4 | 17,6 | - | - | - |
| | Корни | 0,67 | 1,08 | 1,43 | 1,74 | 2,03 | - | - | - |
| 10 | Хвоя | 0,44 | 1,44 | 2,85 | 4,64 | 6,78 | 9,22 | - | - |
| | Ветви | 0,58 | 2,01 | 4,15 | 6,95 | 10,4 | 14,4 | - | - |
| | Ствол | 9,59 | 15,1 | 19,8 | 23,9 | 27,7 | 31,2 | - | - |
| | Надземная | 10,6 | 18,6 | 26,8 | 35,5 | 44,9 | 54,8 | - | - |
| | Корни | 2,20 | 3,54 | 4,68 | 5,71 | 6,66 | 7,56 | - | - |
| 14 | Хвоя | 0,59 | 1,92 | 3,81 | 6,21 | 9,05 | 12,3 | 16,0 | - |
| | Ветви | 0,90 | 3,13 | 6,48 | 10,9 | 16,2 | 22,4 | 29,6 | - |
| | Ствол | 21,8 | 34,4 | 44,9 | 54,3 | 62,9 | 70,9 | 78,5 | - |
| | Надземная | 23,3 | 39,5 | 55,2 | 71,4 | 88,1 | 105,7 | 124,0 | - |
| | Корни | 4,81 | 7,76 | 10,3 | 12,5 | 14,6 | 16,5 | 18,4 | - |
| 18 | Хвоя | - | 2,38 | 4,73 | 7,70 | 11,2 | 15,3 | 19,9 | 24,9 |
| | Ветви | - | 4,36 | 9,03 | 15,12 | 22,6 | 31,3 | 41,2 | 52,4 |
| | Ствол | - | 63,6 | 83,0 | 100,3 | 116,2 | 130,9 | 144,9 | 158,2 |
| | Надземная | - | 70,3 | 96,8 | 123,1 | 150,0 | 177,5 | 206,0 | 235,5 |
| | Корни | - | 13,9 | 18,4 | 22,5 | 26,2 | 29,7 | 33,0 | 36,2 |
| 22 | Хвоя | - | - | 5,63 | 9,16 | 13,4 | 18,2 | 23,6 | 29,6 |
| | Ветви | - | - | 11,8 | 19,7 | 29,4 | 40,8 | 53,7 | 68,3 |
| | Ствол | - | - | 135,5 | 163,7 | 189,6 | 213,7 | 236,5 | 258,2 |
| | Надземная | - | - | 152,9 | 192,6 | 232,4 | 272,7 | 313,8 | 356,1 |
| | Корни | - | - | 29,4 | 35,8 | 41,8 | 47,4 | 52,7 | 57,8 |
| 26 | Хвоя | - | - | - | 10,6 | 15,4 | 21,0 | 27,3 | 34,2 |
| | Ветви | - | - | - | 24,6 | 36,7 | 50,8 | 67,0 | 85,1 |
| | Ствол | - | - | - | 246,1 | 285,0 | 321,3 | 355,6 | 388,3 |
| | Надземная | - | - | - | 281,3 | 337,1 | 393,1 | 449,9 | 507,6 |
| | Корни | - | - | - | 52,9 | 61,7 | 70,0 | 77,8 | 85,3 |

Доля хвои в надземной массе варьирует в пределах от 3 до 35% и уменьшается с увеличением высоты дерева при одном и том же диаметре кроны и с уменьшением диаметра кроны при одной и той же высоте дерева. Отношение подземной части дерева к

надземной варьирует в диапазоне от 12 до 20% и, напротив, возрастает с увеличением высоты дерева при одном и том же диаметре кроны и с уменьшением диаметра кроны при одной и той же высоте дерева.

Заключение

Таким образом, впервые для деревьев сосны обыкновенной, произрастающей на территории России, получены регрессионные зависимости и таблицы, отражающие связь разных фракций их фитомассы с высотой дерева и диаметром кроны и необходимые при оценке фитомассы деревьев и древостоев средствами дистанционного зондирования.

Библиографический список

1. Самойлович Г.Г. Применение аэрофотосъемки и авиации в лесном хозяйстве. – М.; Л.: Гослесбуиздат, 1953. – 476 с.
2. Wulder M.A., White J.C., Fournier R.A., Luther J.E., Magnussen S. Spatially Explicit Large Area Biomass Estimation: Three Approaches Using Forest Inventory and Remotely Sensed Imagery in a GIS // *Sensors*. – 2008. – Vol. 8 (1). – P. 529-560.
3. Данилин И.М., Черкашин В.П., Михайлова И.А. Компьютерное картографирование и дистанционное зондирование в геоинформационных системах: учеб. пособие. – Красноярск: СибГТУ, 1998. – 98 с.
4. Усольцев В.А. Формирование банков данных о фитомассе лесов. – Екатеринбург: УрО РАН, 1998. – 541 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3224>).
5. Усольцев В.А. Вертикально-фракционная структура фитомассы деревьев. Исследование закономерностей. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2013. – 603 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/2771>).
6. Данилин И.М. Морфологическая структура, продуктивность и дистанционные методы таксации древостоев Сибири: автореф. дис. ... докт. с.-х. наук. – Красноярск: СибГТУ, 2003. – 35 с.
7. Usoltsev V.A. Sample tree biomass data for Eurasian forests. CD-version. – Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2015. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/4931>).
8. Watt M.S., Adams T., Marshall H., Pont D., Lee J., Crawley D., Watt P. Modelling variation in Pinus radiata stem volume and outerwood stress-wave velocity from LiDAR metrics // *New Zealand Journal of Forestry Science*. – 2013. – Vol. 43 (1). – P. 1-7.
9. Pyysalo U. A method to create a three-dimensional forest model from laser scanner data // *Photogramm. J. Finland*. – 2000. – Vol. 17. – P. 34-42.

10. Næsset E., Gobakken T., Holmgren J., Hyyppä H. et al. Laser scanning of forest resources: the Nordic experience // *Scandinavian Journal of Forest Research*. – 2004. – Vol. 19. – P. 482-499.

References

1. Samoilovich G.G. *Primenenie aerofotos'emki i aviatsii v lesnom khozyaistve*. – M.-L.: Goslesbumizdat, 1953. – 476 s.
2. Wulder M.A., White J.C., Fournier R.A., Luther J.E., Magnussen S. Spatially Explicit Large Area Biomass Estimation: Three Approaches Using Forest Inventory and Remotely Sensed Imagery in a GIS // *Sensors*. – 2008. – Vol. 8 (1). – P. 529-560.
3. Danilin I.M., Cherkashin V.P., Mikhailova I.A. *Komp'yuternoe kartografirovanie i distantsionnoe zondirovanie v geoinformatsionnykh sistemakh / ucheb. posobie*. – Krasnoyarsk: SibGTU, 1998. – 98 s.
4. Usol'tsev V.A. *Formirovanie bankov dannykh o fitomasse lesov*. – Ekaterinburg: UrO RAN, 1998. – 541 s. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3224>).
5. Usol'tsev V.A. *Vertikal'no-fraktsionnaya struktura fitomassy derev'ev. Issledovanie zakonornostei*. – Ekaterinburg: UGLTU, 2013. – 603 s. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/2771>).
6. Danilin I.M. *Morfologicheskaya struktura, produktivnost' i distantsionnye metody taksatsii drevostoev Sibiri: avtoref. dis. ... dokt. s.-kh. nauk*. – Krasnoyarsk: SibGTU, 2003. – 35 s.
7. Usoltsev V.A. *Sample tree biomass data for Eurasian forests. CD-version*. – Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2015. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/4931>).
8. Watt M.S., Adams T., Marshall H., Pont D., Lee J., Crawley D., Watt P. *Modelling variation in Pinus radiata stem volume and outerwood stress-wave velocity from LiDAR metrics // New Zealand Journal of Forestry Science*. – 2013. – Vol. 43 (1). – P. 1-7.
9. Pyysalo U. *A method to create a three-dimensional forest model from laser scanner data // Photogramm. J. Finland*. – 2000. – Vol. 17. – P. 34-42.
10. Næsset E., Gobakken T., Holmgren J., Hyyppä H. et al. *Laser scanning of forest resources: the Nordic experience // Scandinavian Journal of Forest Research*. – 2004. – Vol. 19. – P. 482-499.

