ТРУДЫ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
ИНСТИТУТА ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА

www.journal.spb-niilh.ru
ISSN 2079-6080

DOI 10.21178/2079-6080.2017.2.67
УДК 630*583

Метод определения таксационных характеристик насаждений по аэрофотоснимкам сверхвысокого разрешения

© А.С. Алексеев[1], А.А. Михайлова[1], Д.М. Черниховский[1], В.И. Березин[2]

The methodology for tree stands parameters assessment based on the aerial photograph of extra high resolution

A.S. Alekseev, A.A. Mikhailova, D.M. Chernikhovsky, V.I. Berezin (Saint Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov; limited liability company "Lesproekt")

Last years after introduction in 2006 of new Forest Code the forest inventory data became older step by step and as a result sustainable forest management on all organizational levels from rented forest area up to the whole country became more and more problematic. According to estimations done by official experts actual inventory data which have the time after last inventory less than 10 years exist only for 18% of forest area, meanwhile for 71% of forest area age of inventory data is more than 20 years old. Up to now there are a lot of problems in arranging, planning and currying out the field inventory works.

If take into account the large size of the areas need to be inventoried the remote sensing methods for tree stands parameters assessment became of special interest.

The paper presents results of the development and experimental testing of tree stands growing stock, mean height and diameter assessment based on high resolution aerial photo which offer a calculation of trees number per hectare. The method theoretically based on self-thinning rule 3/2, Reineke rule and Hilmy rule which provide allometric connection between trees number per area unit and tree stands growing stock, mean height and diameter.

For testing of assessment results was used forest area of Lodeynoe pole forest district. Aerial photo of study area was done by Cessna 210 airplane in August 21-26, 2015 from the height 5200 meters with resolution 15 cm/pixel. The photo was done by camera A3 Edge of Israel Company Vision Map. After photo treatment ortophotoplan was obtained. On study area 7 ground sample plots was established and forest parameters on each of them was precisely measured including coordinates used for sample plots location on ortophotoplan. Tree numbers per hectare taken from aerial photo allows assessing sample

plots tree stands growing stock, mean height and diameter which was compared with ground true date. Comparison gives a positive result consist in good coincidence of tree stands parameters assessed by ground measurements and from specially treated aerial photo of high resolution.

Key words: self-thinning rule 3/2, Reineke rule, Hilmy rule, growing stock, mean height, mean diameter, high resolution image, number of trees per area unit

Метод определения таксационных характеристик насаждений по аэрофотоснимкам сверхвысокого разрешения

А.С. Алексеев, А.А. Михайлова, Д.М. Черниховский, В.И. Березин

Серьезной проблемой в Российской Федерации является старение материалов лесоустройства – материалы с давностью до 10 лет имеются для 18% площади лесов, в то время как для 71% этот срок составляет 20 и более лет. До настоящего времени имеются серьезные проблемы в планировании, организации и проведении лесоустроительных работ.

В таких условиях, учитывая площади, на которых необходимо проводить лесоустройство, применение дистанционных методов для определения таксационных характеристик насаждений приобретает особый интерес.

В статье изложены результаты развития и экспериментальной проверки предложенного ранее метода определения таксационных характеристик насаждений по снимкам сверхвысокого разрешения на основе определения по ним численности деревьев на единице площади и применения правил 3/2, Рейнеке и Хильми, связывающих это число и средние запас, высоту и диаметр насаждений. Для проверки метода были использованы пробные площади, расположенные на территории Лодейнопольского лесничества филиала ЛОГКУ «Ленобллес». Съемка территории осуществлялась с самолета Cessna 210 в период с 21 по 26 августа 2015 года. Высота съемки составляла 5200 м, пространственное разрешение 15 см/пиксель. Съемка проводилась аэрофотосъемочным комплексом A3 Edge израильской компании Vision Map. В результате фотограмметрической обработки полученных снимков был получен ортофотоплан. На изучаемой территории были заложены 7 пробных площадей, на которых проведена наземная перечислительная таксация насаждений, пробные площади были нанесены на ортофотоплан и по нему была определена численность деревьев на гектар для каждой из них. На основе этих данных с помощью аллометрических зависимостей были рассчитаны запас, средняя высота и диаметр насаждений и проведено их сравнение с данными наземной таксации. Получено хорошее совпадение результатов определения таксационных показателей насаждений по снимку и полученных методом перечислительной таксации.

Ключевые слова: правило 3/2, правило Рейнеке, правило Хильми, запас древостоя, средняя высота, средний диаметр, снимок высокого разрешения, число деревьев на единице площади

Алексеев Александр Сергеевич – заведующий кафедрой лесной таксации, лесоустройства и ГИС, д-р географических наук, профессор

Михайлова Анна Аркадьевна – ассистент кафедры лесной таксации, лесоустройства

Черниховский Дмитрий Михайлович – доцент кафедры лесной таксации, лесоустройства и ГИС, канд. с.-х. наук

Березин Виктор Иванович – начальник отдела научных исследований ООО «Леспроект», канд. с.-х. наук

[1]ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова»
194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., 5
Телефон: 8 (812) 670-93-16
e-mail: a_s_alekseev@mail.ru

[2]ООО «Леспроект»
196084, Санкт-Петербург, Заставская улица, 33, литер «ж», 315
Телефон: 8 (812) 742-41-64

Введение

Актуальной проблемой последних лет, после введения в действие Лесного кодекса РФ 2006 года, является старение материалов лесоустройства, что затрудняет решение задач устойчивого управления лесами на всех уровнях его организации – от арендного участка до страны в целом. Материалы лесоустройства давностью до 10 лет имеются только на 18% площади российских лесов, в то время как для 71% площади этот срок составляет 20 и более лет. До настоящего времени имеются серьезные проблемы в планировании, организации и проведении лесоустроительных работ.

В таких условиях, особенно учитывая огромный объем работ по лесоустройству, который необходимо выполнить, обоснованное применение дистанционных методов определения таксационных характеристик насаждений приобретает особый интерес.

Нами был предложен метод определения таксационных характеристик насаждений по снимкам сверхвысокого разрешения на основе определения численности деревьев на единице площади и аллометрических связей между числом стволов и такими показателями, как запас среднего дерева, средние высоты и диаметры [1]. Такие связи составляют содержание правил 3/2, Рейнеке и Хильми [5, 9-10, 11-17]. Число деревьев на единице площади в данном методе представляет собой ключевой параметр, на основе которого возможно определение таксационных характеристик насаждений.

Современное дистанционное зондирование Земли объективно развивается в сторону улучшения пространственного разрешения получаемых изображений, когда появляется возможность различать отдельные деревья и даже их части, что дает возможность и определяет необходимость разработки новых способов измерения таксационных характеристик насаждений. На снимках сверхвысокого разрешения, с известным масштабом и привязкой к географическим координатам, число деревьев на единице площади является одной из наиболее объективных и легко оцениваемых количественных характеристик древостоев. Это позволяет развивать на ее основе методы оценки других показателей, таких как запас древесины, средние высота и диаметр. Дополнительным преимуществом этого подхода является возможность автоматизированного получения необходимых результатов.

В настоящее время количественное измерение характеристик насаждений по аэрофотоснимкам часто основано на определении высоты деревьев с помощью стереоэффекта по разности продольных параллаксов [2, 3]. У этого способа есть некоторые объективные недостатки. Во-первых, иногда сложно по стереоэффекту установить высоту отдельных деревьев для сомкнутых древостоев, занимающих большую площадь, поскольку бывает затруднительно положить метку на уровень земли. Во-вторых, практическая реализация и точность получаемых результатов в значительной мере зависят от индивидуальной квалификации, ответственности и личных качеств исполнителей – например, важно у скольких деревьев на выделе будет определена высота. В-третьих, стереоскопический метод не имеет автоматизированной версии.

Предлагаемый нами метод лишен указанных недостатков, при его применении подсчитывается число деревьев на выделе (почти точное) и он допускает полную автоматизацию.

Объекты и методика исследования

Используемое в настоящем исследовании правило 3/2 может быть получено разными способами, и нами был приведен один из них [1]. Рассмотрим другой способ обоснования этого правила, в рамках которого предполагается пропорциональная зависимость прироста относительного объема среднего дерева – v от относительного прироста его площади питания – s:

$$\frac{dv}{v} = a * \frac{ds}{s},$$

где a – коэффициент пропорциональности.

Интегрируя это уравнение, получим следующую зависимость:

$$v = c * s^a,$$

где c – константа.

Запас среднего дерева имеет размерность м^3, а его площадь питания – измеряется в м^2, поэтому для того чтобы в уравнении справа и слева стояли величины одной размерности показатель степени должен быть равен a=3/2. Положим, что площадь питания s, приходящаяся на одно дерево, расположенное на единице площади, равна:

$$s = \frac{1}{N},$$

где N – число деревьев на единице площади.

Тогда получим искомое аллометрическое соотношение между объемом среднего дерева и числом стволов на единице площади:

$$V = v * N^{-3/2}$$

Для расчета общего (суммарного) запаса на единице площади – V последняя формула принимает вид:

$$V = v * N = c_1 * N^{-1/2},$$

где c_1 – новая постоянная.

Для определения средних высоты и диаметра насаждений в зависимости от числа стволов на единице площади используются теоретически подобные правилу 3/2 два дополнительных соотношения, которые можно назвать правилами Рейнеке (для среднего диаметра) и правило Хильми (для средней высоты) [9-10, 15].

Аллометрические зависимости средних высоты (h) и диаметра (d) насаждений от числа стволов, приходящихся на единицу площади (N), имеют следующий вид:

$$h = c_2 * N^{-1/2}, \; d = c_3 * N^{-1/2}$$

где c_2 и c_3 – соответствующие константы.

Для применения в расчетах полученных зависимостей запаса, средних высоты и диаметра насаждений от числа стволов на единице площади необходимо иметь константы c_1, c_2, c_3 этих зависимостей. Они были, как и ранее [1] получены на основе обработки данных таблиц хода роста нормальных (полных) древостоев основных лесообразующих пород [6] с одним дополнением: данные таблиц были предварительно детализированы путем интерполяции по возрастам с шагом 1 год. При обработке показатель степени в аллометрических уравнениях принимался равным 0,5. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры зависимости средних показателей нормальных древостоев от числа стволов на единице площади (показатель степени аллометрического уравнения – 0,5)

Класс бонитета	Порода	Запас[1)]		Диаметр[2)]		Высота[3)]	
		C_1	R^2	C_1	R^2	C_1	R^2
1	Сосна	10738,1	0,97	706,425	0,98	625,577	0,97
	Ель	11583,6	0,90	700,606	0,96	645,824	0,98
	Береза	7828,44	0,97	615,098	0,97	603,159	0,98
2	Сосна	9639,54	0,95	667,633	0,97	621,163	0,99
	Ель	10094,6	0,89	662,071	0,96	625,155	0,98
	Береза	7392,36	0,96	585,191	0,97	612,568	0,99
3	Сосна	8395,42	0,95	630,612	0,98	606,841	0,98
	Ель	8423,69	0,92	614,505	0,97	586,757	0,98
	Береза	6327,57	0,97	554,363	0,97	584,74	0,99
4	Сосна	6620,62	0,94	566,454	0,98	586,858	0,98
	Ель	6519,0	0,96	561,804	0,98	527,549	0,98
	Береза	5370,17	0,96	515,278	0,97	581,034	0,98
5	Сосна	4880,63	0,89	495,515	0,98	572,385	0,97
	Ель	5058,28	0,86	520,067	0,98	483,496	0,97
	Береза	3620,83	0,92	431,708	0,96	550,311	0,96

Примечания. [1)] – применялось правило 3/2; [2)] – применялось правило Рейнеке; [3)] – применялось правило Хильми.

Необходимо отметить, что использованные аллометрические функции описывают зависимость запаса, средней высоты и среднего диаметра от количества стволов на единицу площади с достаточно высокой достоверностью (коэффициент детерминации R^2 варьирует от 0,89 до 0,99). Также следует отметить, что величины постоянных c_1, c_2, c_3 закономерно снижаются у всех пород при увеличении класса бонитета.

В качестве объектов исследований были использованы пробные площади, расположенные на территории Лодейнопольского лесничества филиала ЛОГКУ «Ленобллес». Их краткая таксационная характеристика представлена в таблице 2.

На изучаемой территории была проведена аэрофотосъемка компанией «Агентство «БАЛТАЭРОСЕРВИС» с использованием собственного самолета Cessna 210 в период с 21 по 26 августа 2015 года. Высота съемки составляла 5200 м., пространственное разрешение снимка на местности составляло 15 см/пиксель, разрешение каждого снимка 4880×3248 пикселей, размер одного пикселя составил 7,4 мкм. Съемка проводилась аэрофотосъемочным

Таблица 2

Таксационная характеристика объектов исследований

Номер ПП	Номер квартала	Номер выдела	Площадь, га	Класс бонитета	Ярус/ высота, м	Состав	Возраст, лет	Высота, м	Диаметр, см	Отн. полнота/ сомкнутость	Запас, м^3
1	123	3	0,52	2	1 23,2	7,1Е 0,7С 0,7Б 1,5Ос	90 90 79 70	22,5 25,0 26,0 22,0	22,8 27,3 28,8 19,2	0,73 0,54	302
3	110	31	0,55	3	1 22,2	10С +Б +Е	90 70 70	22,2 12,0 14,1	23,5 12,0 15,0	0,69 0,49	246
5	112	41	0,49	2	1 24,6	7,1Б 2,9Е ед. Ос	90 90 90	25,7 22,0	25,2 20,4	0,85 0,56	314
6	112	31	0,56	2	1 25,7	5,0Е 1,0С 3,0Б 1,0Ос	95 100 90 90	25,0 27,0 26,0 27,0	23,1 31,0 27,6 22,8	0,83 0,68	380
7	110	30	0,73	2	1 26,2	9,8С 0,2Б +Е	110 80 80	26,2 21,0 21,0	32,7 18,7 20,7	0,78 0,56	333
8	124	24	0,52	2	1 20,1	6,6Б 2,7Ос 0,7С	55 55 55	19,3 24,6 22,8	16,2 28,4 35,1	0,93 0,77	274
9	113	39	0,50	1	1 22,5	5,7Е 1,4С 2,3Ос 0,6Б	67 70 70 70	22,2 24,0 22,4 21,8	18,9 26,8 18,6 17,2	1,12 0,65	442

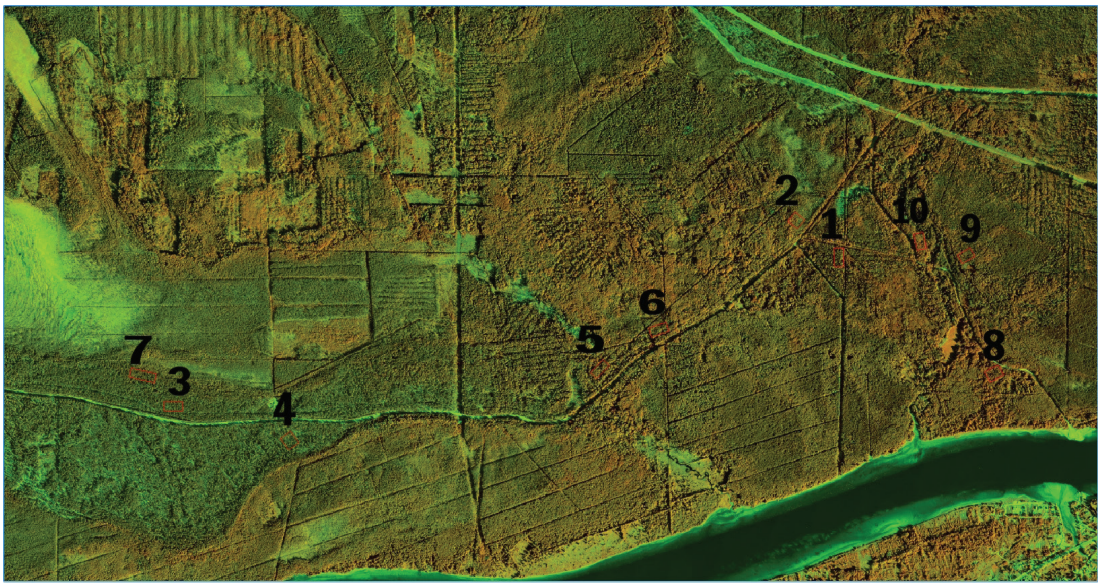

Рис. Ортофотоплан части Лодейнопольского лесничества и расположение пробных площадей

комплексом A3 Edge израильской компании Vision Map. В результате обработки полученных снимков был получен ортофотоплан (рис.).

На каждой пробной площади осуществлялось определение числа деревьев с последующим пересчетом их количества на единицу площади.

Так как вспомогательные для расчетов запаса, средних высоты и диаметра насаждений константы c_1, c_2 и c_3 (см. табл. 1) определены на основе таблиц хода роста нормальных (полных) древостоев, для проведения расчетов было необходимо определить по снимку относительную полноту для каждой пробной площади. Для этого был использован метод точечных отметок [4, 8]. На каждую пробную площадь накладывалась сеть точек и подсчитывалось их количество, попавшее на кроны деревьев. Сомкнутость видимой части полога в этом случае определяется по следующей формуле:

$$P_S = \frac{n}{N},$$

где n – количество точек, попавших на проекции крон;

N – общее количество точек.

Результаты определения сомкнутости полога пробных площадей представлены в таблице 3.

Таблица 3

Сомкнутость полога насаждений пробных площадей

Номер ПП	Номер квартала	Номер выдела	Площадь, га	Сомкнутость	Сомкнутость, определенная по снимкам
1	123	3	0,52	0,54	0,40
3	110	31	0,55	0,49	0,40
5	112	41	0,49	0,56	0,89
6	112	31	0,56	0,68	0,85
7	110	30	0,73	0,56	0,82
8	124	24	0,52	0,77	0,78
9	113	39	0,50	0,65	0,63

Как было ранее установлено [7], в чистых сосновых насаждениях с небольшой примесью других пород сомкнутость полога меньше полноты на 0,1-0,5, в еловых – на 0,1-0,4, в лиственничных – на 0,3, поэтому полученную сомкнутость в расчетах решено было поправлять в среднем на 0,2 единицы.

В дальнейшем для каждой пробной площади определяли общий запас насаждения с поправкой на полноту, а также средние диаметр и среднюю высоту по количеству стволов с учетом относительной полноты. В расчетах использовали данные таблицы 1 и правила 3/2, Рейнеке и Хильми.

Результаты и их обсуждение

Рассчитанные по предлагаемой методике величины общего запаса, средних диаметра и высоты насаждений на единице площади были сравнены с данными пробных площадей. Полученные результаты представлены в таблице 4. Как видим, значения показателей запаса, средних диаметра и высоты насаждений, определенные с помощью правил 3/2, Рейнеке и Хильми, в целом соответствуют данным пробных площадей.

Наиболее точно определяются величины запаса древостоев. Отклонения в абсолютных и относительных значениях по

Таблица 4

Сравнение запасов, средних диаметров и высот, рассчитанных на основе правил 3/2, Рейнеке и Хильми с данными пробных площадей

№ выдела	Данные	Запас,		Средний диаметр		Средняя высота	
		м³/га	%	см	%	м	%
3	Фактические, ПП1	302		23,3		23,2	
	Результаты расчетов	285		24,1		22,8	
	Отклонения	-17	-5,7	0,8	3,5	-0,4	-1,8
31	Фактические, ПП3	246		23,4		22,2	
	Результаты расчетов	244		23,7		22,8	
	Отклонения	-2	-0,7	0,3	1,3	0,6	2,7
41	Фактические, ПП5	314		23,3		24,6	
	Результаты расчетов	312		26,2		27,4	
	Отклонения	-2	-0,7	2,9	12,3	2,8	11,4
31	Фактические, ПП6	380		25,8		25,7	
	Результаты расчетов	383		27,2		25,7	
	Отклонения	3	0,8	1,4	5,6	0,0	0,0
30	Фактические, ПП7	333		27,2		26,2	
	Результаты расчетов	366		28,0		26,1	
	Отклонения	33	10,0	0,8	3,0	-0,1	-0,2
24	Фактические, ПП8	274		19,1		20,1	
	Результаты расчетов	298		23,8		24,9	
	Отклонения	24	8,7	4,7	24,7	4,8	23,9
39	Фактические, ПП9	442		19,4		22,5	
	Результаты расчетов	408		27,1		25,0	
	Отклонения	-34	-7,8	7,7	39,5	2,5	10,9

общему запасу невелики и составляют от 1 до 34 м^3/га, или от 0,7 до 10,0%. Относительные различия по средним диаметру и высоте варьировали значительно больше – от 0,0 до 39,5%. Однако в подавляющем большинстве случаев погрешности не превышают нормативов точности определения таксационных показателей для дешифровочного способа таксации лесов, установленных лесоустроительной инструкцией 2012 года.

Общий запас на единицу площади рассчитывался по предлагаемому методу наиболее корректно – во всех случаях относительные погрешности составляют менее 10%. Наблюдаемые несовпадения в расчетах средних высоты и диаметра насаждений можно объяснить неточным установлением густоты насаждения (так как результаты оценки числа стволов на пробной площади затем пересчитывались на 1 га), невозможностью учесть деревья, находящиеся под пологом, расхождением в определении относительной полноты по снимкам и в натуре, различными способами расчета запаса насаждений на пробных площадях, а также тем, что использованные аллометрические закономерности были калиброваны по данным таблиц хода роста для чистых нормальных древостоев.

Для анализа устойчивости результатов определения запаса по правилу 3/2 используем основное уравнение:

$$V = c_1 * N^{-1/2},$$

Из этого уравнения следует, что ошибки в определении запаса могут происходить из-за неточностей в величинах c_1 и N. Первая из них основана на данных таблиц хода роста, вторая определяется по снимкам высокого и сверхвысокого разрешения. Отсюда следует, что для успешного применения предлагаемого метода важно использовать региональные (локальные) таблицы хода роста насаждений или их специальную адаптацию к местным условиям, а также применять высокоточные автоматизированные методы расчета числа стволов на единице площади [1].

Из приведенного выше основного уравнения для правила 3/2 можно получить зависимость относительных отклонений (ошибок) определения запаса от относительных отклонений (ошибок) в определении c_1 и N:

$$\frac{dV}{V} = \frac{dc_1}{c_1} - 0.5 * \frac{dN}{N}$$

Из последнего выражения следует, во-первых, что ошибки в определении c_1 и N разнонаправленно влияют на расчет запаса насаждения: увеличение ошибки c_1 приводит к росту погрешности в его определении, в то время как увеличение ошибки N ее уменьшает, что может приводить к их взаимной компенсации. Во-вторых, относительное отклонение в определении N влияет на расчет запаса с понижающим коэффициентом 0,5. Например, если число стволов на единице площади определено с относительной погрешностью 20%, то при определении запаса она составит 10%.

При определении числа стволов на единице площади по аэрофотоснимку наиболее вероятным является занижение этой величины, ввиду того, что некоторая их часть может быть скрыта или плохо различима под (рядом) кронами деревьев первого яруса. Наличие понижающего коэффициента 0,5 способно смягчить такую погрешность. Уравнения для расчетов средних высот и диаметров насаждений имеют аналогичную структуру и поэтому результаты проведенного выше анализа полностью распространяются на них.

В целом, предложенный метод позволяет наиболее точно определять основные таксационные показатели для одноярусных сомкнутых насаждений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеев, А.С. Новый метод определения таксационных характеристик насаждений по снимкам сверхвысокого разрешения с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) / А.С. Алексеев, А.А. Никифоров, А.А. Михайлова, М.Р. Вагизов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2016. – Вып. 215. – С. 6-18.
2. Архипов, В.И. Современная технология таксации лесов дешифровочным способом «от съемки – к проекту» / В.И. Архипов, Д.М. Черниховский, В.И. Березин, В.А. Белов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2014. – Вып. 208. – С. 22-42.
3. Архипов, В.И. Опыт таксации лесов дешифровочным способом на основе современного программно-аппаратного обеспечения и цифровых аэроснимков нового поколения / В.И. Архипов, Д.М. Черниховский, В.И. Березин // Сибирский лесной журнал. – 2014. – № 5. – С. 29-37.
4. Дмитриев, И.Д. Лесная аэрофотосъемка и авиация: учебное пособие / И.Д. Дмитриев, Е.П. Данюлис, П.А. Кропов Л.: РИО ЛТА, 1976. – 168 с.
5. Кофман, Г.Б. Рост и форма деревьев / Г.Б. Кофман. Новосибирск: Наука, 1986. – 209. – С. 6.
6. Лесотаксационный справочник по Северо-Западу СССР [Подгот. А.Г. Мошкалевым и др.], Л.: ЛТА. 1984. – 320 с.
7. Сухих, В.И. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве: учебник / В.И. Сухих. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. – 392 с.
8. Сухих, В.И. Аэрометоды в лесоустройстве / В.И. Сухих, Н.Н. Гусев, Е.П. Данюлис М.: Лесная промышленность, 1977. – 192 с.
9. Хильми, Г.Ф. Теоретическая биогеофизика леса / Г.Ф. Хильми. М.: Изд-во АН СССР, 1957. – 205 с.
10. Хильми, Г.Ф. Основы физики биосферы / Г.Ф. Хильми. Л.: Гидрометеоиздат, 1966. – 300 с.
11. Kira, T. Intraspecific competition among higher plants, I. Competition-yield-density interrelationship in regularly dispersed populations / T. Kira, H. Ogawa, H. Sakazaki // Journal of the Institute of Polytechnics, 1953, vol. 4, no. 1, Series D, pp. 1-16.
12. Pretzsch, H. A unified low of spatial allometry for woody and herbaceous plants / H. Pretzsch // Plant biology, 2002, no. 4, pp. 159-166.
13. Pretzsch, H. Link between the self-thinning rules for herbaceous and woody plants / H. Pretzsch // Scientia Agriculturae Bohemica, 2005, vol. 36, no. 3, pp. 98-107.
14. Pretzsch, H. Forest Dynamics, Growth and Yield. From Measurement to Model. / H. Pretzsch. Springer, 2009, 664 p.
15. Reineke, L.H. Perfecting a stand-density index for even-aged forests / L.H. Reineke // Journal of Agricultural Research, 1933, no. 46, pp. 627-638.
16. Yoda, K. Intraspecific competition among higher plants, IX. Further analysis of competitive interactions between adjacent individuals / K. Yoda, T. Kira, K. Hozumi // Journal of the Institute of Polytechnics, 1957, vol. 8, pp. 161-178.
17. Yoda, K. Self-thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions (Intraspecific competition among higher plants, XI) / K. Yoda, T. Kira, H. Ogawa, K. Hozumi // Journal of the Institute of Polytechnics, 1963, vol. 14, Series D, pp. 107-129.

REFERENCES

1. Alekseev A.S., Nikiforov A.A., Mihajlova A.A., Vagizov M.R. Novyj metod opredelenija taksacionnyh harakteristik nasazhdenij po snimkam sverhvysokogo razreshenija s bespilotnogo letatel'nogo apparata (BPLA). *Izvestija Sankt-Peterburgskoj lesotehnicheskoj akademii,* 2016, vyp. 215, pp. 6-18. (In Russian)
2. Arhipov V.I., Chernihovskij D.M., Berezin V.I., Belov V.A. Sovremennaja tehnologija taksacii lesov deshifrovochnym sposobom "ot s'emki – k proektu". *Izvestija Sankt-Peterburgskoj lesotehnicheskoj akademii,* 2014, vyp. 208, pp. 22-42. (In Russian)
3. Arhipov V.I., Chernihovskij D.M., Berezin V.I. Opyt taksacii lesov deshifrovochnym sposobom na osnove sovremennogo programmno-apparatnogo obespechenija i cifrovyh ajerosnimkov novogo pokolenija. *Sibirskij lesnoj zhurnal,* 2014, no. 5, pp. 29-37. (In Russian)

4. Dmitriev I.D., Danjulis E.P., Kropov P.A. Lesnaja ajerofotos'emka i aviacija: uchebnoe posobie. Leningrad, 1976, 168 p. (In Russian)
5. Kofman G.B. Rost i forma dereviev. Novosibirsk, 1986, 209 p. (In Russian)
6. Lesotaksacionnyj spravochnik po Severo-Zapadu SSSR. A.G. Moshkalev et al. Leningrad, 1984, 320 p. (In Russian)
7. Suhih V.I. Ajerokosmicheskie metody v lesnom hozjajstve i landshaftnom stroitel'stve: Uchebnik. Joshkar-Ola, 2005, 392 p. (In Russian)
8. Suhih V.I., Gusev N.N., Danjulis E.P. Ajerometody v lesoustrojstve. Moscow, 1977, 192 p. (In Russian)
9. Khilmy G.F. Teoreticheskaya biogeofizika lesa. Moskow, 1957, 205 p. (In Russian)
10. Khilmy G.F. Osnovy fiziki biosfery. Leningrad, 1966, 300 p. (In Russian)
11. Kira T., Ogawa H., Sakazaki H. Intraspecific competition among higher plants, I. Competition-yield-density interrelationship in regularly dispersed populations. *Journal of the Institute of Polytechnics*, 1953, vol. 4, no. 1, Series D, pp. 1-16.
12. Pretzsch H. A unified low of spatial allometry for woody and herbaceous plants. *Plant biology*, 2002, no. 4, pp. 159-166.
13. Pretzsch H. Link between the self-thinning rules for herbaceous and woody plants. *Scientia Agriculturae Bohemica*, 2005, vol. 36, no. 3, pp. 98-107.
14. Pretzsch H. Forest Dynamics, Growth and Yield. From Measurement to Model. *Springer*, 2009. 664 p.
15. Reineke L.H. Perfecting a stand-density index for even-aged forests. *Journal of Agricultural Research*, 1933, no. 46, pp. 627-638.
16. Yoda K., Kira T., Hozumi K. Intraspecific competition among higher plants, IX. Further analysis of competitive interactions between adjacent individuals. *Journal of the Institute of Polytechnics*, 1957, vol. 8, pp. 161-178.
17. Yoda K., Kira T., Ogawa H., Hozumi K. Self-thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions (Intraspecific competition among higher plants, XI). *Journal of the Institute of Polytechnics*, 1963, vol. 14, Series D, pp. 107-129.

Статья поступила в редакцию 4.04.2017