

SYSTEMATIC AND RANDOM ERRORS ANALYSIS OF A PINE FOREST HEIGHT DETERMINATION ACCORDING TO RADAR INTERFEROMETRY

*Irina I. Kirbizhekova, Tumen N. Chimitdorzhiev, Aleksey V. Dmitriev,
Arcadii K. Baltukhaev, Pavel N. Dagurov*
Institute of Physical Materials Science, SB RAS

The results are presented of a research of systematic and random errors in determining the height of the pine forest, obtained by calculation the difference between the interferometric phases of radar echoes in X - and L-bands.

Keywords: radar interferometry, forest height, statistical analysis.

АНАЛИЗ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ И СЛУЧАЙНЫХ ОШИБОК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ СОСНОВОГО ЛЕСА ПО ДАННЫМ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Кирбижекова И.И., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Балтухаев А.К., Дагуров П.Н.

Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ

Представлены результаты исследования систематических и случайных ошибок определения высоты соснового леса, полученной на основе разности интерферометрических фаз радиолокационных данных X- и L-диапазона.

Ключевые слова: радиолокационная интерферометрия, высота леса, статистический анализ.

Введение. В настоящее время для Российской Федерации актуальной является разработка технологий определения таксационных показателей леса на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Согласно Лесному кодексу Российской Федерации (ЛК РФ) с 2006 г. используется система лесоучетных работ – государственная инвентаризация лесов (ГИЛ). ГИЛ должна проводиться на основе статистической выборки и базироваться на результатах измерений и расчетов на пробных площадях, заложенных в пределах кластеров – участков лесного фонда [1]. При реализации ее задач должны использоваться как наземные, так и дистанционные методы оценки. Разработка методов ДЗЗ имеет стратегическое значение в организации и ведении лесного хозяйства, в частности для изучения и мониторинга изменений, происходящих в лесах в процессе проведения лесохозяйственных мероприятий и соответствие результатов этих мероприятий лесным планам субъектов РФ.

К таксационным показателям относят количественные и качественные параметры, оценки биологических и физических особенностей структуры лесной среды, производительности насаждения в пределах занимаемой им территории: происхождение, форма, состав, средняя высота, средний диаметр, возраст, класс бонитета, полнота, запас древесины, класс товарности лесного насаждения, подрост, подлесок, тип леса и др. [2]. Характеристики леса можно разделить на две группы: первичные (непосредственно физически измеряемые) и производные рассчитываемые на основе эмпирических соотношений. Спутниковые определения являются в большинстве случаев производными на основе исследований закономерностей и связей параметров лесной среды со спектральными и текстурными характеристиками оптических и радиолокационных изображений объектов исследования. Методы радиолокационной интерферометрии и поляриметрии позволяют количественно оценить ключевые характеристики лесной среды такие как высота и биомасса.

В ИФМ СО РАН в настоящее время проводятся исследования возможности комбинирования оптических и радиолокационных интерферометрических и поляриметрических данных для определения характеристик хвойных и смешанных лесов Байкальского региона и создания технологии дистанционного определения количественных таксационных характеристик [3]. В данной статье представлены промежуточные результаты исследований по определению высоты лесного полога на основе разности интерферометрических фаз X- и L-диапазонов (TanDEM-TerraSAR-X и ALOS PALSAR). Основной целью данного блока исследований является анализ систематических и случайных ошибок интерферометрических измерений высоты.

Характеристика территории и объекта исследования. Территория исследования Верхняя Березовка располагается на севере г. Улан-Удэ и представляет собой пригородную зеленую зону в отрогах горного хребта Улан-Бургасы. Географические координаты полигона: $51^{\circ}54'$ с.ш. и $106^{\circ}11'$ в.д. Местность в основном покрыта сосновым лесом, с небольшими включениями лиственницы, березы, осины, ольхи и др. на дерново-лесных и супесчаных почвах. Средние высоты в данной зоне не превышают значений 800–1000 м, превышение высот над долинами р. Селенга и Уда составляет до 310 м. Поверхность склонов, впадин и гребней холмов относительно гладкая, местами присутствуют противопожарные рвы, изрезанные овраги глубиной 3–5 м и более.

Климат является умеренным резко континентальным, засушливым. Диапазон значений температуры за период метеонаблюдений 1847–2018 гг. составил 95°C : от $-54,4^{\circ}\text{C}$ в 1931 г., до $+40,6^{\circ}\text{C}$ в 2016 г.. Среднемесячные температуры варьируются от $-23,3^{\circ}\text{C}$ в январе до $+19,8^{\circ}\text{C}$ в июле [4]. Среднегодовая температура варьируется от $-3,5^{\circ}$ в 1850 г. до $+1,7^{\circ}$ в 2007 г., в среднем $-1,23^{\circ}\text{C}$, наблюдается положительный тренд, прирост составляет $+0,0215^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Количество осадков невелико. Среднемесячные значения варьируются от 3 мм в феврале-марте до 68 мм в августе, среднегодовое количество осадков – 265 мм. Снежный покров устанавливается на 130 дней/год, среднемесячная толщина в ноябре-марте достигает 4–12 см, максимально – 30 см. Влажность воздуха варьируется от 49% в мае до 77–78% в декабре-январе. Уровень солнечной радиации высок, варьируется от 93 ч/мес. в декабре до 288 ч/мес. в мае–июле, что составляет более 2400 часов/год.

Подспутниковые и спутниковые измерения произведены сначала на 36 тестовых участках площадью 900–1200 кв.м. Затем это число было доведено до 84. Из них $n_1=21$ пункт на относительно плоских участках с уклоном менее 5° , $n_2=42$ – на восточных склонах с уклоном $10\text{--}15^{\circ}$, и $n_3=21$ на западных и юго-западных склонах с уклоном $10\text{--}15^{\circ}$. На рисунке 1 представлена трек Garmin и схема расположения 36 тестовых участков во время первых экспедиций в апреле-мае 2018 г. В качестве подложки использован снимок Ресурс-П Геотон от 30 марта 2018 г. с пространственным разрешением 2 м. Породный состав преимущественно представлен сосной, на отдельных участках редкие вкрапления березы, ольхи, акации, кустарников. По данным полевых измерений: для спелых деревьев диаметр стволов варьируется от 15 до 41 см, высота от 9 до 26 м. Для молодняка диаметр стволов 6–10 см, высота 6–10 м. Высота кустарников менее 2 м.



Рис.1. Трек Garmin и схема расположения тестовых участков подспутниковых и спутниковых измерений на полигоне верхняя Березовка во время двух первых экспедиций 2018 г.

Методика и результаты подспутниковых измерений. Для верификации спутниковых определений высоты леса, анализа и последующего учета ошибок помимо высоты деревьев также были проведены полевые измерения диаметров стволов на высоте 1,2 м и суммы площадей сечений стволов в древостое S . Используются следующие средства измерения:

- 1) GPS-навигатор Garmin – для определения местоположения (широты, долготы и высоты над уровнем моря);
- 2) цепной полнотометр Биттерлиха – для измерения суммы площадей сечений стволов в древостое, S кв.м./га;
- 3) высотомер-эклиметр ЭТ-1П и рулетка – для измерения высоты $H_{\text{полев}}$ (м) и расстояния до деревьев r (м), а также уклона участков α (в градусах);
- 4) линейка – для измерения диаметра деревьев (d , см).

На каждом тестовом участке произведено по три измерения каждой характеристики с последующим усреднением. Затем по стандартной таблице ЦНИИЛХА 1933 г. (Орлов М.М., 1931) для соснового леса данного региона на основе средней высоты и S определены полнота P , видовое число H_f и запас насаждений. Результаты сведены в таблицу. В таблице 1 для примера представлены основные характеристики: высота (x_1), запас древостоя (x_2), полнота (x_3) и диаметр деревьев (x_4) первых $n=36$ измерений. В конце таблицы для каждого параметра также представлены средние значения \bar{x} , среднеквадратичные отклонения (ско σ) и вариации (Var) по данной выборке ($n=36$):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_i^n x_i; \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}; \quad Var = \frac{\sigma}{\bar{x}} * 100\%; \quad (1)$$

Таблица 1. – Результаты подспутниковых измерений характеристик соснового леса на тестовых участках Верхней Березовки в апреле-мае 2018 г.

№ п/п	Высота, м	Запас древо-стоя, куб.м./га	полно-та	Диаметр, см	№ п/п	Высота, м	Запас древо-стоя, куб.м./га	полно-та	Диаметр, см
1	17,67	170	0,6	28,67	19	19,67	310	1	28,00
2	14,33	210	1	23,67	20	16,50	260	1	26,67
3	22,67	260	0,7	39,00	21	14,33	160	0,8	20,33
4	24,33	350	0,9	28,67	22	16,33	190	0,8	18,50
5	19,00	240	0,8	28,00	23	13,17	130	0,7	14,50
6	18,67	290	1	27,00	24	12,83	150	0,8	16,33
7	17,00	260	1	25,00	25	15,67	120	0,5	32,67
8	18,83	210	0,7	33,67	26	13,00	90	0,5	17,67
9	17,00	210	0,8	20,33	27	14,50	110	0,5	22,00
10	17,67	220	0,8	30,33	28	14,67	130	0,6	25,00
11	17,33	260	1	21,33	29	16,17	140	0,6	21,33
12	19,50	250	0,8	25,33	30	19,33	180	0,6	24,00
13	19,33	290	1	25,33	31	21,00	230	0,7	29,33
14	20,00	310	1	28,33	32	18,17	190	0,7	30,00
15	15,33	200	0,9	20,67	33	18,67	210	0,7	35,33
16	19,67	250	0,8	33,00	34	19,00	240	0,8	31,67
17	21,00	300	0,9	26,00	35	16,67	150	0,6	30,00
18	18,67	290	1	31,33	36	13,00	130	0,7	33,67
Объем выборки n=36									
Среднее значение (mean)						17,52	213,61	0,79	26,46
Среднеквадратичное отклонение (ско или σ)						2,76	65,82	0,16	5,67
Вариация (Var)						16%	31%	21%	21%

Методика и результаты спутниковых измерений высоты на основе разности интерферометрических фаз X- и L-диапазонов. Для определения высоты лесного полога используется комбинация радиолокационных интерферометрических данных L-диапазона (25 см) ALOS PALSAR (интерферометрическая пара 20090728-20090912 на восходящей орбите) и X-диапазона (3 см) TANDEM-X от 27 октября 2012 г. и 26 сентября 2016 г. На основе данных X- и L-диапазонов рассчитана разность интерферометрическая фаз с пространственным разрешением $R = 5 \text{ м/пс}$ или $0,000083^\circ = 0,005' = 0,3'' \text{ пс}^{-1}$ до конвертации снимков в картографическую систему UTM WGS84. Предварительно была выполнена частичная коррекция рельефа местности с помощью данных SRTM (с разрешением 50 м). Разность интерферометрических фаз в двух выбранных диапазонах соответствует отражению радиолокационных сигналов от нижней подстилающей (L-диапазон) и верхней огибающей (X-диапазон) поверхностей лесной среды или толщине лесной среды. Данные представлены в комплексной форме, которые были конвертированы и разложены на 5 составляющих: 1) амплитуда (Pw); 2) амплитуда в логарифмическом виде (Mg); 3) реальная составляющая (Re); 4) мнимая составляющая (Im); 5) фазовая составляющая (ΔPh).

Для типовых объектов (водная поверхность рек Селенга и Уда, участки городской и сельской застройки, участки без растительности, участки леса и т.п.) были определены статистические и текстурные характеристики растровых изображений P_w , M_g , R_e , I_m , ΔPh , такие как среднее значение, диапазон значений DN , вариация, коэффициент асимметрии (*skew*). Для них были установлены пороговые значения и комбинации условий, построено дерево решений и выполнена классификация. На рисунке 2 приведен фрагмент результата классификации для полигона Верхняя Березовка. В частности, класс 9 соответствует участкам лесной растительности. Условия кластеризация лесных массивов соответствуют средним значениям яркости, незначительными вариациями DN всех показателей, отрицательными значениями реальной части: $\{(-2.35 < P_w < -2.00) \text{ OR } (0.14 < M_g < 0.40)\} \text{ AND } (R_e < 0)\}$.

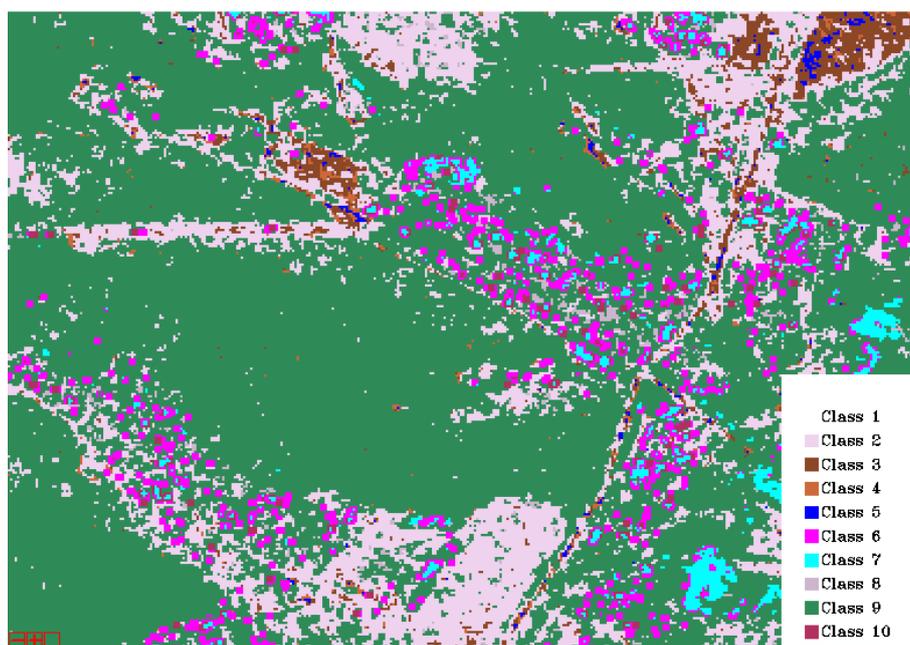


Рис.2. Результат классификации с применением дерева решений. Классы: фон – 1; водные объекты – 5; участки открытой почвы – 2, 3, 4, 8; лес – 9; сельская застройка – 6; городская застройка – 10; горы (передние склоны) – 7.

Последняя компонента разложения ΔPh дает возможность оценить толщину лесного покрова ΔH_{int} . Для оценки высоты леса ΔH_{int} производится инверсия интерферометрической разности фаз и преобразование с учетом того, что разности фаз $\Delta \varphi = 2\pi$ соответствует разность высот равная для тандемных съемок 2012 г. и 2016 г. соответственно $\Delta H_{TDX-2012} = 18,667$ м и $\Delta H_{TDX-2016} = 26,676$ м:

$$\Delta H_{int} = \frac{\pi - Ph}{2\pi} * \Delta H_{TDX} \text{ м.} \quad (2)$$

При этом диапазон значений $\Delta H_{int} \in [0; \Delta H_{TDX}]$ м. Очевидно, при достижении максимального значения ΔH_{TDX} , происходит обнуление высоты, что необходимо учитывать при наличии участков леса с более высокими деревьями. На полигоне Верхняя Березовка высота деревьев менее 25 м (по выборке $n=84$).

На рисунке 3 демонстрируется сравнение подспутниковых (Низм – линии красного цвета) и спутниковых измерений высоты леса в 36 пунктах (Нинтерф – крестики) по данным

TDX-2012 (а) и TDX-2016 (б). В каждом пункте производился расчет усредненного диапазона значений высот (преобразованной разности интерферометрических фаз) на участках 30x30 или 30x40 м. При усреднении брались только пиксели, соответствующие верхней границе лесного полога с помощью маски $\{\text{skew}(\Delta H_{\text{int}}) < 0\}$. Без применения маски ошибки более значительны, в частности на относительно ровных участках занижение составляет до 5-7 м. При построении графиков данные ранжированы в соответствии с ростом подспутниковых высот.

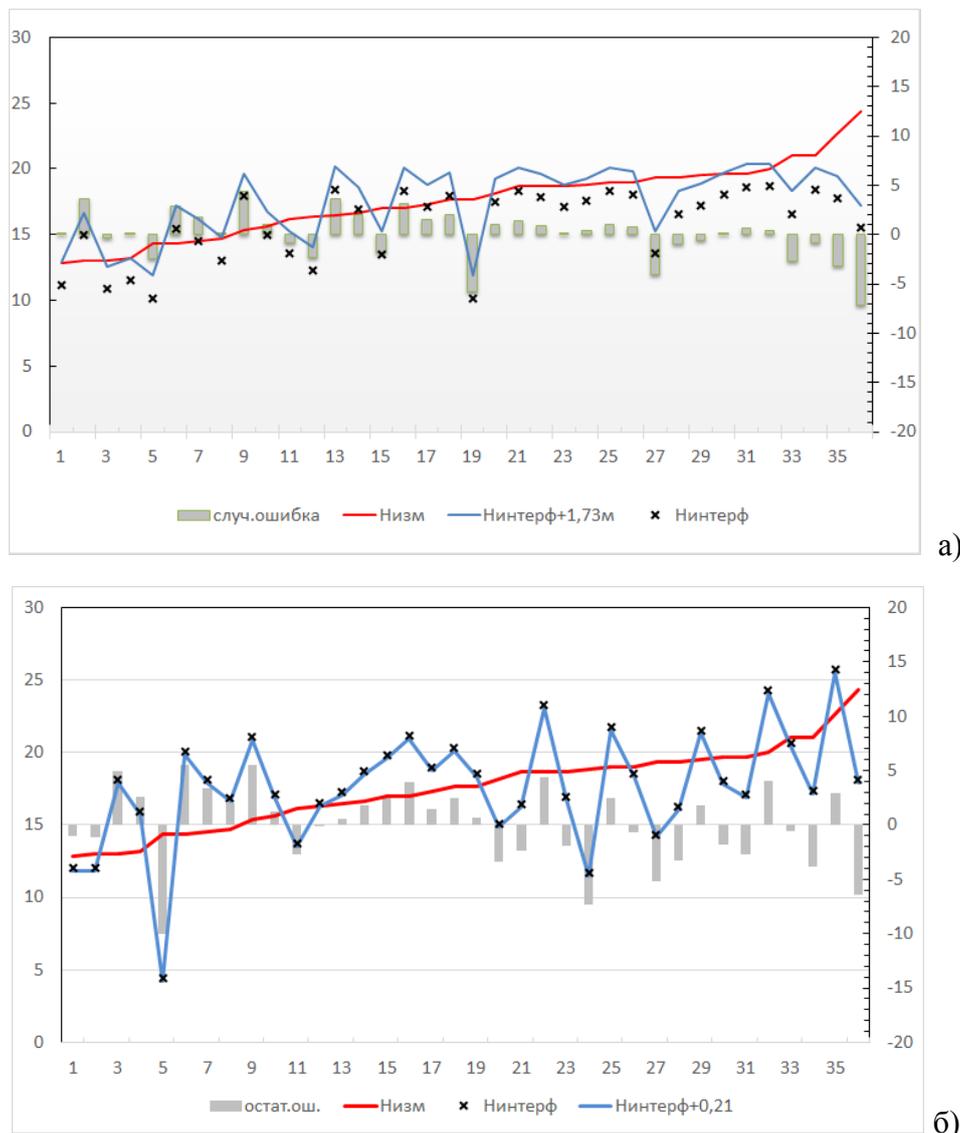


Рис 3. Сравнение подспутниковых и спутниковых измерений высоты леса на полигоне Верхняя Березовка по данным TDX-2012 (а) и TDX-2016 г. (б).

Ошибки определения высоты леса вызваны систематическими и случайными причинами:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{сист}} + \varepsilon_{\text{случ}} \quad (3)$$

Систематические ошибки обусловлены технологией производства интерферометрических и подспутниковых измерений высоты и определяются как средние значения по выборке ошибок ε_i или как разность средних спутниковых и подспутниковых значений высот:

$$\varepsilon_{\text{сист}} = \frac{1}{n} \sum \varepsilon_i = \overline{H_{\text{нт}}} - \overline{H_{\text{изм}}} \quad (4)$$

Систематические ошибки $\varepsilon_{\text{сист}}$ для TDX-2012 и TDX-2016 составили соответственно – 1,73 и +0,21 м. Скорректированные с учетом систематических ошибок спутниковые значения высоты леса приведены на рисунках 3 линиями синего цвета. Разница в значениях $\varepsilon_{\text{сист}}$ вызвана отчасти четырехлетним интервалом между тандемными съемками 2012 и 2016 г., отчасти разницей ΔH_{TDX} , обусловленной различиями базового расстояния. Последний фактор проявляется на рис. 3. На рис.3а для участков леса с высотой более 18 м наблюдается систематическое занижение спутниковых измерений, в то время как на рис.3б этот эффект «потолка» отсутствует.

Остаточные случайные ошибки обусловлены локальными различиями как характеристик лесной среды, так и физических и геометрических условий съемки. Они представлены на графиках прямоугольниками серого цвета. Справа приведена отдельная шкала значений ошибок определения высоты. СКО($\varepsilon_{\text{случ}}$), значения которых характеризуют абсолютную точность спутниковых измерений высоты, равны соответственно 2,50 и 3,70 м. Относительная точность соответственно равна 14 и 21 %, при нормативной точности определения высоты при дешифровочном способе таксации 15 % [5].

Проведен корреляционно-регрессионный анализ зависимости ошибок (у) от четырех факторов: высоты деревьев (полевые измерения) – x1; запаса древостоя – x2; полноты – x3; диаметра деревьев – x4. Были составлены линейные уравнения парной и множественной регрессии, вычислены коэффициенты корреляции и детерминации (см. табл.2).

Таблица 2. Корреляционная матрица и уравнения линейной парной регрессии ошибок спутниковых определений высоты леса.

R	Коэффициенты линейной корреляции					R ²	Уравнение регрессии
	x1	x2	x3	x4	y		
x1	1	0,7962	0,3012	0,5696	-0,4753	0.2259	Y=7.5404-0.4304*x1
x2	0,7962	1	0,8067	0,3371	-0,2419	0,0585	Y=1.9622-0.0092*x2
x3	0,3012	0,8067	1	0,0295	0,0448	0.002	Y=0.6893*x3-0.5419
x4	0,5696	0,3371	-0,0295	1	-0,1356	0.0184	Y=1.5807-0.0597*x4

С учетом эмпирических поправок к высоте наблюдается улучшение точности спутниковых определений высоты: за счет фактора x1 – на 30 см (12 %), x2 – на 7 см (3 %), x3 – на 0,3 см (0,1 %), x4 – на 2 см (0,9 %)

Заключение. В результате исследований разработаны основы методики определения и коррекции высоты лесного полога на основе разности интерферометрических фаз X- и L-диапазонов (TanDEM-TerraSAR-X и ALOS PALSAR). В частности, по подспутниковому полигону Верхняя Березовка установлено, что:

- предварительная классификация и формирование маски для пикселей соответствующих верхней границе леса значительно уменьшают ошибки определения усредненных высот;
- определены систематические ошибки (–1,73 и +0,21 м), абсолютные (2,5 и 3,7 м) и относительные (14 и 21 %) показатели точности определения высот по данным

TanDEM-X 2012 и 2016 г ; различия обусловлены временной разницей и разницей размеров базовой линии тандемных съемок;

- корреляционно-регрессионный анализ показал слабую возможность коррекции спутниковых определений высоты за счет эмпирических линейных уравнений зависимости случайной ошибки от таких факторов как высота (x1), запас древостоя (x2), полнота (x3) и диаметр стволов (x4).

Полученные результаты будут использованы для продолжения исследований, в частности предполагается изучение влияния особенностей рельефа посредством привлечения дополнительных спутниковых данных на восходящих и нисходящих орбитах, получение эмпирических поправок для коррекции высот и др.

Работа выполнена в рамках госзадания и при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-47-030001 р_а.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] "Лесной кодекс Российской Федерации" от 04.12.2006 N 200-ФЗ (с изменениями и дополнениями, вступившими в силу с 01.01.2019)
- [2] *Мартынов А.Н., Мельников Е.С., Ковязин В.Ф., Аникин А.С.* Основы лесного хозяйства и таксация леса. СПб: Лань. 2012. 3-е изд. 432 с.
- [3] *Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Кирбижекова И.И., Шерхоева А.А., Балтухаев А.К., Дагуров П.Н.* Дистанционные оптико-микроволновые измерения параметров леса: современное состояние исследований и экспериментальная оценка возможностей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 9-26.
- [4] Справочно-информационный портал «Погода и климат»: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/30823.htm> (дата обращения 22.06.2019).
- [5] Технический регламент по проведению контроля за качеством лесоучетных работ ФГУП «Рослесинфорг». Приложение №1 к приказу от 13 марта 2013 г.