

**А.С. Алексеев, И.М. Чернов, И.В. Никифорчин, Е.А. Иванова**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ДРЕВОСТОЕВ  
СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ И ЕЛИ ЕВРОПЕЙСКОЙ  
С ПОМОЩЬЮ ПОЛУСФЕРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ КАМЕРОЙ  
ТИПА «РЫБИЙ ГЛАЗ» И ПОСЛЕДУЮЩЕГО АНАЛИЗА  
ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ.**

*Введение.* Существует большой перечень научных публикаций, посвященных изучению возможности применения полусферической съемки для изучения характеристик древесного полога лесной экосистемы по цифровым фотографиям. Полусферическая фотография (Hemispherical photography) – это техника фотосъемки, которая позволяет охарактеризовать растительный полог древесных или иных растений на основе анализа фотографий, сделанных сверхширокоугольным объективом [Anderson, 1964a, b].

Полусферические фотографии получают путем съемки вверх из-под полога леса или другого растительного полога, а геометрический анализ полученных фотографий используется для характеристики световой среды под пологом или атрибутов самого растительного полога [Rich, 1990]. Полусферическая линза создает круговое изображение, которое, по сути, является проекцией верхней полусферы на плоскую поверхность [Rich, 1990]. Иногда съемку с использованием полусферического объектива называют съемкой типа «рыбий глаз». Этот термин был введен американским физиком и изобретателем Робертом В. Вудом в 1906 г. [Kingslake, 1989].

Ранние работы с использованием полусферической съемки были сосредоточены, прежде всего, на изучении освещенности под растительным пологом [Anderson, 1964a; Rich, 1990].

Важным и широко используемым параметром структуры полога, вычисляемым при обработке фотоснимка, является Индекс листовой поверхности (ИЛП – индекс листовой поверхности; LAI – Leaf Area Index), который трудно измерить в полевых условиях другими способами. Он определяется как общая односторонняя площадь листьев на единицу площади поверхности земли (Уткин и др., 2008). Согласно этому определению, LAI – это безразмерная величина, характеризующая фотосинтезирующий полог лесной экосистемы. Индекс листовой поверхности определяет микроклимат под по-

логом леса, определяет и контролирует ветровой, водный, световой и газовый обмен и, таким образом, является ключевым компонентом биогеохимических циклов в лесных экосистемах. Изменение индекса листовой поверхности лесного полога в результате, например, заморозков, штормов, наличия вредителей и болезней, дефолиации, засухи, антропогенного влияния, сопровождается изменениями продуктивности насаждений.

Большая часть работ, сделанных в последние десятилетия в данном направлении, была посвящена методическому переходу от использования системы аналоговых фотографий и ручного анализа к использованию цифровых систем получения фотографий и программного обеспечения для обработки цифровых изображений [Frazer et al., 2001; Hale, Edwards, 2002]. При проведении многочисленных исследований в интересах ведения лесного хозяйства, устойчивого управления лесами и контроля за состоянием лесов и лесопользованием необходимо определять класс состояния деревьев. Особенно широко оценка жизненного состояния деревьев применяется при проведении мониторинга лесов по программе ICP – Forests [Алексеев, 2002, 2003; Eichhorn et al., 2016; Tikhonova et al., 2017].

Классы состояния (повреждения) деревьев определяются визуально (глазомерно) по 2 основным показателям – дефолиации (потерям хвои, листвы) и дехромации (изменениям окраски) крон деревьев, которые измеряются в процентах от полностью здоровой кроны деревьев – охвоенной (облиственной) и без изменений окраски хвои или листвы. На качество визуальных оценок состояния деревьев и древостоев влияют такие объективные факторы, как просматриваемость кроны деревьев в пологе древостоя, время суток, освещенность, угол, экспозиция и сторона света для обзора кроны, состояние погоды и др. Кроме этого, действуют и субъективные факторы, влияющие на определение класса повреждения деревьев такие, как уровень персональной подготовки и тренировки исполнителей, накопленный опыт, качество зрения, психологическое состояние и др.

Визуальные оценки классов повреждения деревьев служат в дальнейшем для расчетов индексов состояния отдельных древостоев и лесов на территориях лесничеств, субъектов Российской Федерации и стран в целом. На их основе принимаются различной важности решения: от назначения санитарных мероприятий в отдельных насаждениях и назначения штрафов за повреждение древостоев до оценок качества ведения лесного хозяйства лесничествами, районами и регионами и разработки стратегий устойчивого управления лесами целых стран. Таким образом, качество оценок жизненного состояния деревьев имеет большое значение для организации и ведения лесного хозяйства на всех уровнях его организации и,

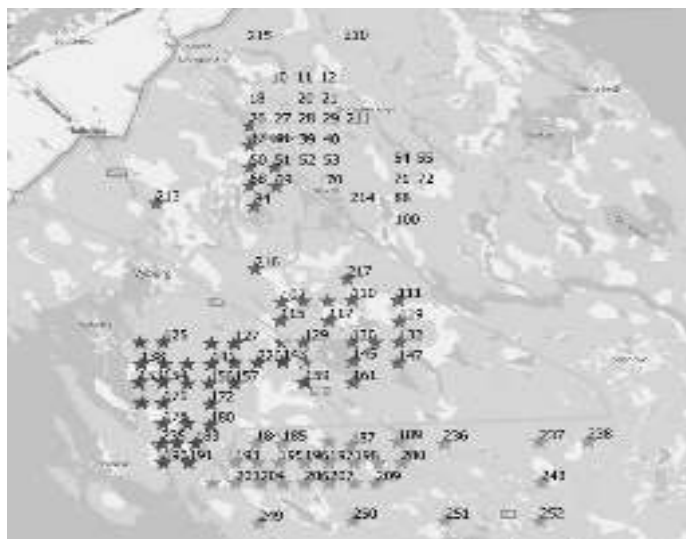
поэтому требуется разработка методов оценки состояния древостоев на объективной, измерительной основе, свободных от субъективизма исполнителей, который иногда вызывается и объективными причинами.

Целью настоящей работы является разработка метода оценки состояния древостоев на основе съемки его полога с поверхности Земли вверх камерой для полусферической съемки типа «Рыбий глаз».

*Объекты и методика исследований.* Объектами исследований были чистые и смешанные древостои с преобладанием сосны обыкновенной и ели европейской. Пробные площади, пункты постоянного учета (ППУ), заложенные по методике ICP-Forests [Алексеев, 2002, 2003; Alekseev, 2018] регулярно расположены на территориях в основном Рошинского лесничества Ленинградской области [Alekseev et al., 2020].

Расположение пробных площадей, на которых проводилась цифровая полусферическая съемка, показано на рис. 1.

Характеристика этих пробных площадей приведена в табл. 1.



*Рис. 1.* Регулярное расположение пробных площадей на территории Выборгского района Ленинградской области: зеленым цветом помечены пробные площади, на которых проводилась цифровая полусферическая съемка.

*Fig. 1.* Regular location of trial plots in Vyborgsky District, Leningradskaya Oblast. Green color is used to mark trial plots, where digital hemispherical survey was conducted

Таблица 1

**Характеристика пробных площадей, на которых производилась цифровая  
полусферическая съемка полога древостоев**

**Characteristics of the trial plots where digital hemispherical survey  
of the canopy of tree stands was conducted**

№ п/п	Номер ППУ	Состав древостоя	Тип леса	Бонитет	Возраст, лет	Относительная полнота	Запас, м <sup>3</sup> /га
1	184	10С	С-чернич.	2	90	0,4	170
2	186	9С 1Б	С-кислич.	1	50	0,6	190
3	187	10С	С-чернич.	2	80	0,6	250
4	189	10С	С-чернич.	3	100	0,7	260
5	193	10С	С-бруснич.	2	90	0,6	240
6	194	7Е2С1Б	Е-чернич.	1	70	0,8	330
7	195	10С	С-чернич.	3	100	0,7	250
8	196	10С	С-чернич.	3	90	0,6	230
9	197	10С	С-вереск.	3	60	0,5	130
10	198	8Е1С1Б	Е-кислич.	1	80	0,7	370
11	200	7Е3С	Е-чернич.	2	110	0,7	340
12	202	5Е4С1Б	Е-чернич.	2	90	0,7	360
13	203	10С	С-чернич.	3	140	0,7	240
14	204	6С2Б2Е	С-долгомош.	4	80	0,5	120
15	205	10Е	Е-кислич.	1	140	0,5	350
16	206	8Е2С	Е-чернич.	3	120	0,8	320
17	208	7С3Б	С-чернич.	1	50	0,6	210
18	209	10Е	Е-кислич.	2	130	0,5	290
19	236	10С	С-бруснич.	2	90	0,7	170
20	237	6Е2С2Б	Е-кислич.	2	100	0,7	310
21	243	8Е1С1Б	Е-кислич.	1	130	0,7	400
22	249	10С	С-чернич.	1	90	0,8	360
23	250	10Е	Е-чернич.	1	50	0,7	420
24	251	10С	С-чернич.	1	80	0,7	320
25	252	8Е2С	Е-чернич.	1	100	1	560

На всех пробных площадях производилась оценка состояния древостоев с определением степени дефолиации и дехромации крон деревьев, наличия механических и иных повреждений ствола, присутствия вредителей и болезней, в итоге определялся балл состояния деревьев и средний балл состояния древостоев.

Съемка полога древостоев на 25 пробных площадях производилась единообразно в одной точке пробной площади, расположенной на расстоянии 10 м в направлении на север от центрального дерева ППУ.

Съемка осуществлялась со специального штатива на смартфон с фронтальной камерой 16 мегапикселей, на которую был установлен полусферический объектив типа «Рыбий глаз». Съемочное оборудование и пример полусферического снимка полога древостоя представлены на рис.2.



Рис. 2. Оборудование для цифровой полусферической съемки полога древостоев снизу вверх (слева) и пример снимка полога древостоя на пробной площади № 202 (справа).

Fig. 2. Equipment for digital hemispherical survey of a tree canopy from bottom to top (left) and an example of a photo of a tree canopy in test area # 202 (right)

Полученные снимки обрабатывались с помощью программного обеспечения открытого доступа Gap Light Analyzer [Frazer et al., 1999; Stenborg et al., 1994; Welles, Norman, 1991], которое позволяет получить следующие характеристики древесного полога:

1. Площадь видимого неба, % – площадь верхней полусферы видимой сверх эффективного горизонта. Если эффективный горизонт включает всю

верхнюю полусферу (т. е. равен  $90^\circ$ ), то площадь видимого неба будет равна 100%. Если эффективный горизонт менее  $90^\circ$ , то верхняя полусфера будет видна не вся, и площадь видимого неба составит менее 100%.

2. Площадь невидимой части верхней полусферы, % – часть верхней полусферы скрытой окружающим рельефом.

3. Открытость лесного полога, % – процент площади открытого неба, видимого из-под полога леса. Вычисляется без учета невидимой части верхней полусферы.

4. Открытость места съемки, % – процент площади открытого неба с учетом невидимой части верхней полусферы, т. е. с учетом топографического затенения.

5. Индекс листовой поверхности (LAI 4 Ring), безразмерный – индекс вычисляется на основе данных о листовой поверхности деревьев в части верхней полусферы под углом  $0-60^\circ$ .

6. Индекс листовой поверхности (LAI 5 Ring), безразмерный – индекс вычисляется на основе данных о листовой поверхности деревьев в части верхней полусферы под углом  $0-75^\circ$ .

Статистический анализ результатов наземных измерений совместно с результатами анализа цифровых изображений проводился с помощью пакета прикладных программ STATGRAPHICS 18. Были использованы методы регрессионного и дисперсионного анализа.

*Результаты и их обсуждение.* В результате обработки цифровых изображений полога леса, сделанных с поверхности Земли камерой «Рыбий глаз» с помощью программы Gap Light Analyzer, получены объективные оценки его показателей, которые связаны с состоянием древесных растений. Это индексы листовой поверхности (показатели LAI 4 Ring и LAI 5 Ring) и открытость полога древостоев (показатель Canopy openness). Они оказались сильно коррелированы друг с другом.

Установлены достоверные связи индекса листовой поверхности LAI 5 Ring с тремя характеристиками состояния древостоев, определяемых визуально – средняя дефолиация верхней 1/3 крон древостоев, средняя дефолиация древостоев и средний класс повреждения древостоев.

Исходные данные для статистического анализа представлены в табл. 2.

Во всех случаях уравнение связи имеет следующий вид:

$$y = 1/(a*x), \quad (1)$$

где  $y$  – средняя дефолиация верхней 1/3 части крон древостоев, средняя дефолиация древостоев или средний класс повреждения древостоев,  $x$  – индекс листовой поверхности.

*Таблица 2*

**Исходные данные для изучения связей между показателями состояния древостоев и измерениями индекса листовой поверхности древесного полога**

**Input data for studying the relationship between the indicators of stands condition and measurements of the leaf surface index of a tree canopy**

№ п/п	Номер ППУ	Средняя дефолиация верхней 1/3 части крон, %	Средняя дефолиация крон, %	Балл состояния деревьев	Индекс листовой поверхности (LAI 5 Ring)
1	184	13	43	1,4	0,95
2	186	6,6	35,7	1,1	0,96
3	187	5	28,5	0,7	1,03
4	189	5	21	0,5	0,91
5	193	6,1	23,2	1,3	0,96
6	194	7,2	20	0,4	1,58
7	195	10,9	35,1	1,1	1,89
8	196	6,1	19,5	0,4	0,69
9	197	5	17,4	0,6	0,97
10	198	8,8	38,3	1,2	1,33
11	200	9,3	33,1	0,8	1,35
12	202	9,3	20,8	0,5	1,62
13	203	7,2	23,6	0,5	1,14
14	204	12,5	29,4	0,4	1,06
15	205	6,6	20,6	0,4	1,4
16	206	7,2	29,5	0,7	1,53
17	208	6,6	24,3	0,4	0,73
18	209	5	18	0,5	1,47
19	236	6,1	22,7	0,8	0,93
20	237	7,5	29,9	0,6	1,15
21	243	5,5	30,5	0,7	1,77
22	249	7,7	29,5	0,5	1,26
23	250	12,8	24,7	0,3	1,09
24	251	12,5	33,1	0,8	0,92
25	252	8,8	30,4	0,7	1,19

Таблица 3

**Статистические характеристики связи средней дефолиации верхней 1/3 части кроны и индекса листовой поверхности**

**Statistical characteristics of the relationship between the average defoliation of the upper 1/3 of the crown and the leaf surface index**

Коэффициент регрессионного уравнения  $y = 1/(a*x)$

Параметр	Оценка методом наименьших квадратов	Стандартная ошибка	Статистика Т	Значение критерия Р
а	0,107	0,0092	11,6325	0,0000

Дисперсионный анализ

Источник изменчивости	Суммы квадратов отклонений	Число степеней свободы	Средний квадрат отклонений	Критерий Фишера	Значение критерия Р
Модель	0,439332	1	0,439332	135,31	0,0000
Остатки	0,077922	24	0,003247		
Всего	0,517254	25			

Характеристика связи средней дефолиации верхней 1/3 части кроны и листового индекса полого древостоев представлена в табл. 3.

Коэффициент детерминации полученного уравнения с учетом числа степеней свободы равен 84,9%, что говорит о том, что около 85% изменчивости показателя средней дефолиации верхней 1/3 кроны древостоев объясняется вариацией листового индекса.

Характеристика связи средней дефолиации всей кроны и листового индекса полого древостоев представлена в табл. 4.

Коэффициент детерминации полученного уравнения с учетом числа степеней свободы равен 87,4%, что указывает на то, что более 87% изменчивости показателя средней дефолиации всей кроны древостоев объясняется вариацией их листового индекса.

Коэффициент детерминации полученного уравнения с учетом числа степеней свободы равен 79,8%, что указывает на то, что около 80% изменчивости показателя среднего класса состояния древостоев объясняется изменчивостью листового индекса.

Стандартная ошибка оценки среднего класса состояния древостоя по величине листового индекса полого составляет 0,84 балла, а средняя абсолютная ошибка – 0,63 балла.



Таблица 4

**Статистические характеристики связи средней дефолиации всей кроны и индекса листовой поверхности полога древостоев**

**Statistical characteristics of the relationship between the average defoliation of the entire crown and the leaf surface index of the canopy of trees**

Коэффициент регрессионного уравнения  $y = 1/(a*x)$

Параметр	Оценка методом наименьших квадратов	Стандартная ошибка	Статистика Т	Значение критерия Р
а	0,030	0,0023	12,9228	0,0000

Дисперсионный анализ

Источник изменчивости	Суммы квадратов отклонений	Число степеней свободы	Средний квадрат отклонений	Критерий Фишера	Значение критерия Р
Модель	0,034963	1	0,034963	167,00	0,0000
Остатки	0,005025	24	0,000209		
Всего	0,039988	25			

Характеристика связи среднего балла состояния древостоев и листового индекса их полога представлена в табл. 5.

Таблица 5

**Статистические характеристики связи среднего балла состояния древостоев и индекса листовой поверхности их полога**

**Statistical characteristics of the relationship between the average score of the state of stands and the index of the leaf surface of their canopy**

Коэффициент регрессионного уравнения  $y = 1/(a*x)$

Параметр	Оценка методом наименьших квадратов	Стандартная ошибка	Статистика Т	Значение критерия Р
а	1,328	0,1363	9,74569	0,0000

Дисперсионный анализ

Источник изменчивости	Суммы квадратов отклонений	Число степеней свободы	Средний квадрат отклонений	Критерий Фишера	Значение критерия Р
Модель	67,2287	1	67,2287	94,98	0,0000
Остатки	16,988	24	0,707831		
Всего	84,2167	25			

Наиболее тесно индекс листовой поверхности связан со средней дефолиацией крон древостоев, коэффициент детерминации уравнения связи равен 87,4% это немного больше, чем для связи листового индекса и средней дефолиации верхней 1/3 части крон деревьев (84,9%). Из этого следует, что нижняя часть кроны тоже вносит свой вклад в величину листового индекса древостоя, хотя этот вклад и небольшой, как это следует из небольшого различия коэффициентов детерминации равного 2,5%.

*Выводы.* Все три рассмотренные характеристики состояния древостоев средняя дефолиация верхней 1/3 крон деревьев, средняя дефолиация всей кроны и средний класс состояния статистически тесно связаны с расчетным индексом листовой поверхности

Наиболее интересна с практической точки зрения связь индекса листовой поверхности полога древостоев и среднего класса состояния деревьев с высоким коэффициентом детерминации (79,8%). Тот факт, что эта связь менее сильная, чем с показателями средней дефолиации 1/3 верхней части кроны и кроны в целом объясняется тем, что при определении класса повреждения деревьев, кроме дефолиации учитываются еще показатели состояния ствола деревьев, наличие повреждений от вредителей и болезней, механические повреждения и другие.

Таким образом, проведенное поисковое исследование показывает возможность объективного определения среднего класса состояния древостоев на основе использования съемки полога леса с поверхности Земли камерой типа «Рыбий глаз» и последующей обработки полученных цифровых изображений. Такой подход имеет ряд преимуществ над ныне применяемой методикой, к ним относятся объективность, технологичность, экономичность и точность. Объективность обеспечивается применением технических средств съемки полога леса и измерением его характеристик с помощью специального программного обеспечения, которые применяются к исследуемому древостою, без присутствия субъективных оценок. Технологичность измерений состояния древостоев предполагает единообразное и универсальное применение указанных технических средств в любых условиях. Экономичность подхода к оценке состояния древостоев основывается на экономии времени и снижении трудоемкости измерений. Точность обеспечивается возможностью статистической обработки результатов измерений и определения их ошибок и доверительных интервалов.

Полученные результаты могут служить основой для разработки специальной методики определения состояния древостоев, которая может найти

широкое применение благодаря своим положительным характеристикам. Дальнейшие исследования в данном направлении выглядят перспективными с точки зрения применения более совершенного съемочного оборудования, формализации и унификации мест съемки полого, нормирования и калибровки зависимостей между показателями повреждения древостоев и листовым индексом древесного полого для разных географических зон, пород, типов леса, типов условий местопроизрастания.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта «Инновационные информационные технологии для оценки негативного влияния на леса приграничного региона (KS 1309 InnoForestView)». Программа приграничного сотрудничества Юго-Восточной Финляндии и России на 2014–2020 годы.

### Библиографический список

*Алексеев А.С., Григорьева С.О., Егорова Г.Л., Трейфельд Р.Ф.* Оценка растительного разнообразия лесных экосистем. Санкт-Петербург. 2002. 72 с.

*Алексеев А.С.* Мониторинг лесных экосистем. СПб.: СПбГЛТА, 2003. 116 с.

*Уткин А.И., Ермолова Л.С., Уткина И.А.* Площадь поверхности лесных растений. Сущность, параметры, использование. М.: Наука, 2008. 292 с.

*Alekseev A.S.* Assessment and Inventory of Forest Ecosystems Biodiversity: Case Study for Karelian Isthmus of Leningrad Region, Russia // *Open Journal of Ecology*. 2018. Vol. 8, no. 5. P. 305–323. DOI: 10.4236/oje.2018.85019

*Alekseev A.S., Vetrov L.S., Gurjanov M.O., Nikiforchin I.V., Chernikhovsky D.M., Chernov I.M.* Analysis of the tree stands health status in the near border area of Russia and Finland based on the regular grid of sample plots and GIS-technologies. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2020. 507. 012001. DOI: 10.1088/1755-1315/507/1/012001

*Anderson M.C.* Studies of the woodland light climate. I. The photographic computation of light condition. *Journal of Ecology*. 1964a. No. 52, P. 27–41.

*Anderson M.C.* Studies of the woodland light climate. II. Seasonal variation in the light climate // *Journal of Ecology*. 1964b. No. 52, P. 643–663

*Eichhorn J. et al.* Visual Assessment of Crown Condition and Damaging Agents. Manual Part IV. In: UNECE ICP Forests Program Coordinating Centre (ed.). Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Eberswalde: Thünen Institute of Forest Ecosystems. 2016. 54 p.

*Frazer G.W., Canham C.D., Lertzman K.P.* Gap Light Analyzer (GLA), version 2.0: imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-color fisheye photographs, users manual and program documentation. Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia, and the Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, New York. 1999. 52 p.

Hale S.E., Edwards C. Comparison of film and digital hemispherical photography across a wide range of canopy densities. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2002. No. 112. P. 51–56

Kingslake R. A history of the photographic lens. Academic Press, San Diego, 1989. 327 p.

Stenburg, P., Linder, S., Smolander, H., and Flower-Ellis, J. Performance of the LAI-2000 plant canopy analyzer in estimating leaf area index of some Scots pine stands // *Tree Physiology*. 1994. No. 14, P. 981–995. URL: <https://doi.org/10.1093/treephys/14.7-8-9.981>

Tikhonova E., Tikhonov G., Shevchenko N., Knyazeva S., Plotnikova A., Lukina N and Shashkov M. Tree diversity patterns along the latitudinal gradient in the north-western Russia // *Forest Ecosystems*. 2017. 4:27. P. 1–11.

Rich P.M. Characterizing plant canopies with hemispherical photographs // *Remote Sensing Review*. 1990. No. 5. P. 13–29

Fournier R.A., Hall R.J. Eds. *Hemispherical Photography in Forest Science: Theory // Methods, Applications*. Springer. 2017. 306 p.

Welles, J.M., Norman, J.M. Instrument for indirect measurement of canopy architecture // *Agronomy Journal*. 1991. No. 83. P. 818–825.

Zou J., Hou W., Chen L., Wang Q., Zhong P., Zuo Y., Luo S and Leng P. Evaluating the impact of sampling schemes on leaf area index measurements from digital hemispherical photography in *Larix principis-rupprechtii* forest plots // *Forest Ecosystems*. 2020. 7:52. P. 1–18.

## References

Alekseev A.S., Grigorieva S.O., Egorova G.L., Treyfeld R.F. Assessment of Forest Ecosystems Biodiversity. St. Petersburg. 2002. 72 p.

Alekseev A.S. Monitoring lesnykh ekosistem (Monitoring of Forest > Ecosystems), St. Petersburg: Lesotekh. Akad., 2003. 116 p. (In Russ.).

Utkin A.I., Ermolova L.S., Utkina I.A. Ploshchad' poverkhnosti lesnykh > rastenii. Sushchnost', parametry, ispol'zovanie (Surface Area of Forest Plants. Essence, Parameters and Use). Moscow: Nauka, 2008. 292 p. (In Russ.).

Alekseev A.S. Assessment and Inventory of Forest Ecosystems Biodiversity: Case Study for Karelian Isthmus of Leningrad Region, Russia. *Open Journal of Ecology*, 2018, vol. 8, no. 5, pp. 305–323. DOI: 10.4236/oje.2018.85019

Alekseev A.S., Vetrov L.S., Gurjanov M.O., Nikiforchin I.V., Chernikhovskiy D.M., Chernov I.M. Analysis of the tree stands health status in the near border area of Russia and Finland based on the regular grid of sample plots and GIS-technologies. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 507. 2020. 012001. DOI: 10.1088/1755-1315/507/1/012001

Anderson M.C. Studies of the woodland light climate. I. The photographic computation of light condition. *Journal of Ecology*, 1964a, no. 52, pp. 27–41

Anderson M.C. Studies of the woodland light climate. II. Seasonal variation in the light climate. *Journal of Ecology*, 1964b, no. 52, pp. 643–663

Eichhorn J. et al. Visual Assessment of Crown Condition and Damaging Agents. Manual Part IV. In: UNECE ICP Forests Program Coordinating Centre (ed.). Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Eberswalde: Thünen Institute of Forest Ecosystems. 2016. 54 p.

Frazer G.W., Canham C.D., Lertzman K.P. Gap Light Analyzer (GLA), version 2.0: imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-color fisheye photographs, users manual and program documentation. Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia, and the Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, New York. 1999. 52 p.

Hale S.E., Edwards C. Comparison of film and digital hemispherical photography across a wide range of canopy densities. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, no. 112, pp. 51–56.

Kingslake R. A history of the photographic lens. Academic Press, San Diego, 1989. 327 p.

Stenburg, P., Linder, S., Smolander, H., and Flower-Ellis, J. Performance of the LAI-2000 plant canopy analyzer in estimating leaf area index of some Scots pine stands. *Tree Physiology*, 1994, no. 14, pp. 981–995. URL: <https://doi.org/10.1093/treephys/14.7-8-9.981>

Tikhonova E., Tikhonov G., Shevchenko N., Knyazeva S., Plotnikova A., Lukina N and Shashkov M. Tree diversity patterns along the latitudinal gradient in the northwestern Russia. *Forest Ecosystems*, 2017, 4:27, pp. 1–11.

Rich P.M. Characterizing plant canopies with hemispherical photographs. *Remote Sensing Review*, 1990, no. 5, pp. 13–29

Fournier R.A., Hall R.J. Eds. Hemispherical Photography in Forest Science: Theory, Methods, Applications. Springer. 2017. 306 p.

Welles, J.M., Norman, J.M. Instrument for indirect measurement of canopy architecture. *Agronomy Journal*, 1991, no. 83, pp. 818–825.

Zou J., Hou W., Chen L., Wang Q., Zhong P., Zuo Y., Luo S and Leng P. Evaluating the impact of sampling schemes on leaf area index measurements from digital hemispherical photography in *Larix principis-rupprechtii* forest plots. *Forest Ecosystems*, 2020, 7:52, pp. 1–18.

Материал поступил в редакцию 14.08.2020

---

**Алексеев А.С., Чернов И.М., Никифорчин И.В., Иванова Е.А.** Определение состояния древостоев сосны обыкновенной и ели европейской с помощью полусферической съемки камерой типа «Рыбий глаз» и последующего анализа

цифровых изображений // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020. Вып. 233. С. 95–110. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.233.95-110

На примере чистых и смешанных древостоев хвойных пород с преобладанием сосны обыкновенной и ели европейской было проведено поисковое исследование возможностей определения состояния древостоев на основе цифровой полусферической съемки полого леса снизу вверх объективом типа «Рыбий глаз» и последующей обработки полученных изображений. Исследования были проведены на 25 пробных площадях, заложенных по европейской методике мониторинга состояния лесов ICP-Forest с регулярным их размещением по территории. На пробных площадях традиционным наземным методом были визуально определены такие показатели состояния древостоев как средние дефолиация верхней 1/3 части кроны деревьев, дефолиация всей кроны деревьев и класс повреждения древостоев. На этих же пробных площадях были получены снимки древесного полого объективом для полусферической съемки «Рыбий глаз», которые были обработаны с помощью программы открытого доступа Gap Light Analyzer. Методами регрессионного и дисперсионного анализа были установлены статистически достоверные связи между показателями состояния древостоев и их индексом листовой поверхности, полученным при обработке цифровых изображений. Показатели состояния древостоев и их индекс листовой поверхности связаны обратной зависимостью с коэффициентами детерминации от 79,8 до 87,4%. Полученные результаты позволяют в принципе разработать измерительную методику оценки состояния древостоев, обладающую свойствами объективности, технологичности, экономичности и точности. Основной целью такой методики является удаление из оценок состояния древостоев субъективного подхода, свойственного всем визуальным определениям.

**Ключевые слова:** древостои сосны и ели, пробная площадь, дефолиация кроны, класс повреждения, полусферическая съемка, объектив «Рыбий глаз», регрессионный анализ, дисперсионный анализ.

**Alekseev A.S., Chernov I.M., Nikiforchin I.V., Ivanova E.A.** Tree stands of Scots pine and Norway spruce state assessment using hemispherical photography by Fish-eye lens and subsequent analysis of the digital images. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoi Akademii*, 2020, is. 233, pp. 95–110 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2020.233.95-110

On the example of pure and mixed stands of coniferous species with a predominance of Scots pine and Norway spruce, a search study was conducted to determine the state of stands based on digital hemispherical shooting of the forest canopy from bottom to top with a Fish-eye lens and subsequent processing of the images obtained. The research was carried out on 25 test areas laid down according to the European method of monitoring the state of forests ICP-Forests. On the test areas land-based method to identify indicators of the status of the forest as the average defoliation

of upper 1/3 part of the trees, defoliation of all trees and the class of damage of forest stands. At the same test areas, images of the tree canopy were obtained with a Fish-eye hemispherical lens, which were processed using the Gap Light Analyzer open access program. Using regression and variance analysis methods, statistically significant relationships were established between indicators of the state of stands and their leaf area index with determination coefficient from 79,8 to 87,4%. The results obtained allow us to develop a methodology for assessing the state of stands, which are usually determined visually with a high degree of subjectivity, by measuring.

**Keywords:** Scots pine and Norway spruce stands, sample plot, crown defoliation, damage class, hemispherical survey, Fish-eye lens, regression analysis, variance analysis.

---

**АЛЕКСЕЕВ Александр Сергеевич** – заведующий кафедрой лесной таксации, лесоустройства и ГИС Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор географических наук, профессор. ORCID: 0000-0001-8795-2888, SPIN-код: 8115-9103, Researcher ID: F-6891-2010, Scopus Author ID: 558 9222 4800.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: a\_s\_alekseev@mail.ru.

**ALEKSEEV Aleksandr S.** – DSc (Geography), Professor, Head of the Department of Forest Inventory, Management and GIS, St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0000-0001-8795-2888, SPIN-code: 8115-9103, Researcher ID: F-6891-2010, Scopus Author ID: 558 9222 4800.

194021. Institutsky per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: a\_s\_alekseev@mail.ru.

**ЧЕРНОВ Игорь Михайлович** – заведующий лабораторией кафедры лесной таксации, лесоустройства и ГИС Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор географических наук, профессор. ORCID: 0000-0002-3316-9182.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: igor.mt@gmail.com.

**CHERNOV Igor M.** – DSc (Geography), Professor, Head of the Laboratory within the Department of Forest Inventory, Management and GIS, St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0000-0002-3316-9182.

194021. Institutsky per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: igor.mt@gmail.com.

**НИКИФОРЧИН Иван Васильевич** – доцент кафедры лесной таксации, лесоустройства и ГИС Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат сельскохозяйственных наук.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: nikiforchin@mail.ru

**NIKIFORCHIN Ivan V.** – PhD (Agricultural), Associate Professor of the Department of Forest Inventory, Management and GIS, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021, Institutsky per. 5, St. Petersburg, Russia. E-mail: [nikiforchin@mail.ru](mailto:nikiforchin@mail.ru)

**ИВАНОВА Евгения Александровна** – бакалавр лесного дела, выпускница кафедры лесной таксации, лесоустройства и ГИС Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: [jene4cka.ivanova@yandex.com](mailto:jene4cka.ivanova@yandex.com)

**IVANOVA Evgeniia A.** – Bachelor of Forestry, graduate of the Department of Forest Inventory, Management and GIS, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021, Institutsky per. 5, St. Petersburg, Russia. E-mail: [jene4cka.ivanova@yandex.com](mailto:jene4cka.ivanova@yandex.com)