

## Исследование трёхмерной структуры растительного покрова ерниковых тундр с применением фотографической съёмки и методов автоматизированной обработки изображений

И. В. Мателенок, В. В. Мелентьев

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Россия  
E-mail: igor\_matelenok@mail.ru*

Моделирование распространения радиоволн в многослойных природных средах с использованием современных электродинамических моделей требует максимально полной информации о свойствах растительного покрова, в том числе о его трёхмерной структуре. В работе предложен подход к определению ориентации и взаимного расположения фитоэлементов в покрове, образованном кустарниками, по данным фотографической съёмки его фрагментов. Подход реализован в новой версии программно-аппаратного комплекса для исследования структуры растительного покрова. В рамках двухэтапных тестовых испытаний выполнены эксперименты по автоматизированному определению пространственного положения фитоэлементов в контролируемых условиях. В ходе полевых изысканий на участках южных тундр в границах Ненецкого автономного округа и Мурманской области и последующих камеральных работ получены данные об ориентации и взаимном расположении листовых пластинок ерника. При проведении сопоставительного анализа было продемонстрировано согласие результатов оценки параметров структуры, полученных с помощью предложенного и альтернативного подходов. Распределение фитоэлементов по углам наклона имеет черты, приближающие его к сферическому и плагифильному, и наилучшим образом аппроксимируется эллипсоидной функцией. Региональные различия в угловом распределении листовых пластинок растительного покрова исследуемого типа не выявлены. По данным о расположении и ориентации фитоэлементов построены трёхмерные графические модели фрагментов покрова. Форма представления этих данных позволяет использовать их как для моделирования распространения радиоволн, так и для оценки накопления биомассы и выполнения теплофизических расчётов.

**Ключевые слова:** ерниковые тундры, обработка изображений, распределение листьев по углам наклона, структура растительного покрова, угол наклона листовой пластинки, цифровая фотосъёмка, электродинамические модели

Одобрена к печати: 31.12.2017  
DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-100-111

### Введение

В 2000-х гг. стали активно использоваться модели распространения радиоизлучения в многослойных природных средах, учитывающие и когерентную, и некогерентную составляющую поля рассеяния (Chiu, Sarabandi, 2000; Macelloni et al., 2001). Их применение требует параметрического описания структуры растительного покрова и характеристик отдельных фитоэлементов. В целях упрощения задачи моделирования листовые пластинки аппроксимируются диэлектрическими дисками, стебли и ветви — цилиндрами. Каждый фитоэлемент характеризуется параметрами размера и ориентации, а его положение задаётся координатами центра масс в трёхмерной системе координат. Подобное описание структуры используется в современных работах, посвящённых оценке параметров почвогрунтов и растительности по данным радаров с синтезированной апертурой (Huang et al., 2016; Zhang et al., 2014). Для тонкой настройки моделей необходимы полевые исследования фрагментов растительного покрова с целью получения численных оценок параметров структуры. Наименее изученной в этом отношении является Арктика.

Типичными представителями растительности гипоарктических тундр, занимающих в Арктике обширные территории, являются кустарники и кустарнички. Ерниковый покров

в силу своей распространённости вносит весомый вклад в излучательные и отражательные свойства поверхности суши на севере Евразии и Северной Америки. В связи с этим важной задачей представляется получение данных о его структуре. Одними из немногих затрагивающих данный вопрос исследований являются работы (Juszak et al., 2014, 2017), посвящённые моделированию влияния особенностей структуры растительного покрова тундр на тепловые потоки и альбедо.

### Цель и задачи работы

Настоящая работа направлена на получение данных о структуре растительного покрова ерниковых тундр. К задачам исследования относится разработка подхода к определению взаимного расположения и ориентации листовых пластинок по фотоизображениям и его воплощение в программно-аппаратном комплексе (ПАК), обеспечивающем автоматическое создание в реальном времени трёхмерных моделей фрагментов покрова. Также решаются задачи испытания предлагаемых методических и программных решений в серии экспериментов в контролируемых условиях и оценки характеристик покрова на участках в подзоне южных тундр в ходе полевых изысканий и камеральных работ. Исследование является частью проекта, посвящённого изучению структуры растительного покрова в Арктике с целью получения априорной информации о характеристиках многослойных природных сред, необходимой для решения прямых и обратных задач дистанционного зондирования поверхности суши в сверхвысокочастотном диапазоне.

### Исследуемые участки

В летние сезоны 2016–2017 гг. были исследованы участки в подзоне южных тундр в западной части Российской Арктики. Программа полевых работ 2016 г. включала в себя изыскания на двух участках в Ненецком автономном округе, покрытых преимущественно ерником и обозначенных индексами У2016-2 и У2016-7. В 2017 г. были изучены участки с аналогичным покрытием в Мурманской области (обозначены индексами У2017-1, У2017-6). Участок 2016-2 на обширном возвышении на границе с поймой реки Пятумбой занимает мелкоерниковое кустарничковое зелёномошно-лишайниковое тундровое сообщество с мозаично-групповым распределением растений. Участок 2016-7, расположенный на равнине к востоку от г. Нарьян-Мар, занимает ерниковое травяно-кустарничково-мохово-лишайниковое болотное сообщество. Ерnikово-кустарничково-моховой покров занимает большую часть площади исследуемых в 2017 г. участков, выбранных на пологих склонах рядом с водоёмами на севере Кольского п-ова. Участок 2017-1 расположен вблизи озера Нижнее Собачье, 2017-6 — около Батарейского озера.

### Инструментальная и методическая основа

Инструментальные методы исследования структуры растительности, основанные на фотофиксации положения фитоэлементов и последующей обработке изображений, выгодно отличаются от других групп методов небольшими временными и материальными затратами на производство работ. Относящиеся к ним методы на базе зенитной широкоугольной съёмки хорошо себя зарекомендовали при определении листового индекса и оценке распределения листьев по углам наклона  $\theta$ , чаще всего выражаемого плотностью распределения  $f(\theta)$ . Однако они проигрывают по возможности позиционирования фитоэлементов методам, задействующим камеру с горизонтированной оптической осью. Последний подход использован в исследованиях (Juszak et al., 2014, 2017; Pisek et al., 2011), где  $f(\theta)$  оценивается посредством визуальной идентификации фитоэлементов, плоскость которых перпендикулярна плоскости кадра, и программного измерения их наклона. Выявление удовлетворяющих этому условию

фитоэлементов в автоматическом режиме и их трёхмерное позиционирование в рамках данного подхода труднореализуемо. Для формирования надёжной выборки разноориентированных листовых пластинок в фрагменте покрова необходимо большое количество снимков.

Более экономичным в плане затрат ресурсов представляется подход, предлагаемый в настоящей работе. Формы листовых пластинок, типичные для кустарниковых и кустарничковых тундр, дают возможность восстанавливать их ориентацию на основе малого числа снимков. Так, исследованная нами выборка сканированных листовых пластинок гербарных образцов берёзы карликовой (*Betula nana*) характеризуется средним значением длины большой оси аппроксимирующего лист эллипса  $1,044 \pm 0,113$  см и отношением длин малой и большой осей  $0,959 \pm 0,017$  см, что позволяет говорить о приближённости таких фитоэлементов по форме к кругу (диску). Пример изображения, полученного в ходе сканирования типичной листовой пластинки *Betula nana*, представлен на рис. 1а. На нём также показан результат аппроксимации фитоэлемента эллипсом.

Такая форма листовых пластинок открывает возможности для определения их ориентации в пространстве по единичным фотоизображениям. Имеются примеры решения похожих задач машинного зрения в других научно-практических областях (Катулин и др., 2015; Nutter, Brewer, 2009). Задача восстановления ориентации диска в трёхмерном пространстве по его единственной проекции имеет пару решений — сочетаний значений азимутального угла  $\varphi$  и угла наклона  $\theta$  (рис. 1б). В ходе анализа геометрии съёмки были получены следующие формулы, позволяющие вычислять  $\varphi$  и  $\theta$  фитоэлемента:

$$\theta = \arccos \left( \cos \alpha \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2} \right),$$

$$\varphi = \pm \arccos \left( \frac{\sqrt{1 - (b/a)^2} - \cos \alpha \cdot \cos \theta}{\sin \alpha \cdot \sin \theta} \right),$$

где  $a$  и  $b$  — соответственно длины большой и малой осей аппроксимирующего проекцию эллипса,  $\alpha$  — угол между положительным направлением горизонтальной оси координат  $X$  и  $a$  (рис. 1в). Для выбора одного из альтернативных значений  $\varphi$  предлагается использовать различие верхней и нижней поверхности листовой пластинки по цвету.

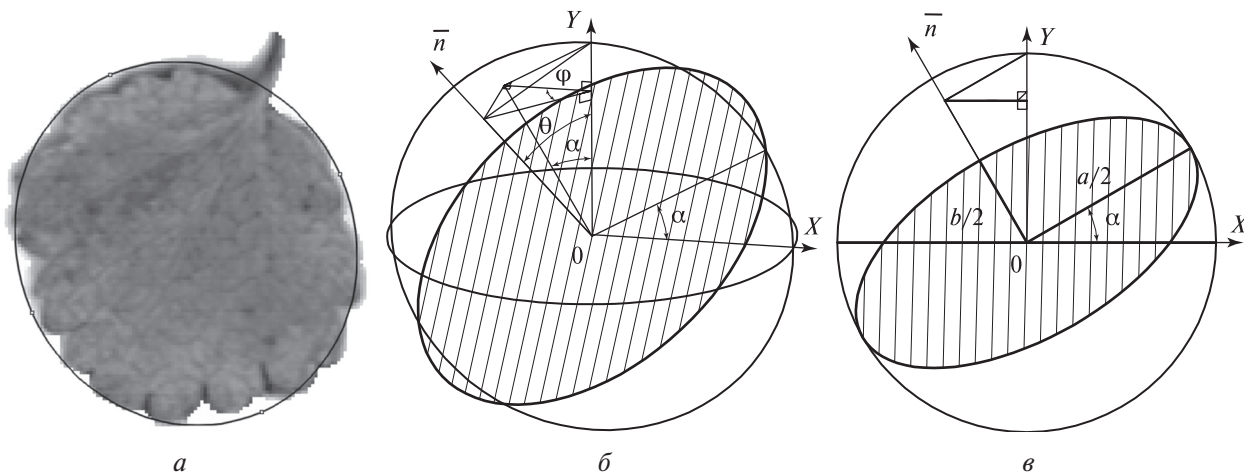


Рис. 1. Геометрические основы определения ориентации листовых пластинок: а — сканированное изображение листовой пластинки *Betula nana* с аппроксимирующим эллипсом; б — перспективное изображение круглого фитоэлемента с задающими его ориентацию углами; в — эллипс, полученный при проецировании круглого фитоэлемента на плоскость  $XOY$ , параллельную плоскости матрицы камеры;  $\theta$  — угол наклона фитоэлемента,  $\varphi$  — азимутальный угол (экспозиция),  $a$  и  $b$  — соответственно большая и малая оси эллипса,  $\alpha$  — угол наклона большой оси эллипса по отношению к оси  $X$ , ось  $Z$  перпендикулярна  $XOY$

Восстановление координат центроидов фитоэлементов в трёхмерном пространстве требует наличия не менее двух изображений фрагмента покрова, полученных с разных углов. Координаты определяются на основе теории проективных преобразований в ходе решения соответствующей обратной задачи.

Предложенный подход к определению взаимного расположения и ориентации листовых пластинок кустарника по фотоизображениям был воплощён в новой версии описанного в работе (Мателенок, Мелентьев, 2016) ПАК для исследования структуры растительного покрова. Он состоит из силового каркаса, фонового экрана, уровня, компаса, аппаратуры для фото/видеофиксации, персонального компьютера и программного обеспечения для обработки данных. Съёмка фрагмента покрова с разных углов осуществляется за счёт поворота камеры на подвижной штанге. Для установления соответствия между положением объектов на снимке и в пространстве проведена калибровка съёмочной аппаратуры по шахматному узору, определено взаимное расположение элементов конструкции в разных съёмочных позициях. Полученные матрицы преобразований используются для решения прямой и обратной задач проецирования.

Алгоритм оценки параметров структуры покрова по фотоизображениям выражается последовательностью шагов:

1. Предобработка изображений, включающая в себя геометрическую коррекцию, маскирование и переход к цветовому пространству тон, насыщенность, яркость.
2. Обнаружение на изображениях элементов, удовлетворяющих требованиям к форме, яркости и тону, путём поиска инвариантных к аффинным преобразованиям областей и их фильтрации по геометрическим характеристикам.
3. Оценка значений углов, задающих ориентацию листовых пластинок, на основе значений геометрических параметров элементов изображений и определение  $f(\theta)$ .
4. Восстановление трёхмерных координат центроидов фитоэлементов в ходе решения обратной задачи проецирования и построение трёхмерной графической модели фрагмента растительного покрова.

В рамках этапа геометрической коррекции производится устранение дисторсионных искажений, а также выравнивание горизонта на отдельных снимках, для которых зафиксировано нежелательное вращение камеры вокруг главной оптической оси. Маскирование прилегающих к внешним границам снимков областей требуется для исключения ложных срабатываний детектора фитоэлементов, возможных при появлении в поле зрения камеры за пределами фонового экрана элементов заднего плана с характерными для листовых пластинок значениями параметров формы, яркости и тона. За счёт перехода к цветовому пространству тон, насыщенность, яркость упрощается разделение стеблей и листовых пластинок, различающихся по цветовому тону.

Обнаружение на снимках инвариантных к аффинным преобразованиям областей осуществляется в соответствии с алгоритмом, предложенным в работе (Nistér, Stewénius, 2008). Выделение листовых пластинок среди обнаруженных областей выполняется по линейным размерам и отношению площади каждой конкретной области к площади сформированной для неё выпуклой оболочки. Значения  $\varphi$  и  $\theta$  фитоэлементов вычисляются по приведённым выше формулам. Процедура создания трёхмерной модели фрагмента покрова включает в себя формирование первичного облака точек на основе теории проективных преобразований, его классификацию методом наименьшего стандартизованного евклидова расстояния и восстановление положения выявленных на двумерных изображениях фитоэлементов в исследуемом объёме.

### Испытания программно-аппаратного комплекса

Новая версия ПАК прошла испытания в контролируемых условиях. Была создана имитация фитоэлемента в виде диска на жёстком основании, ориентируемая в пространстве произвольным образом и снабжённая указателями направлений нормалей к поверхности диска и поверхности Земли.

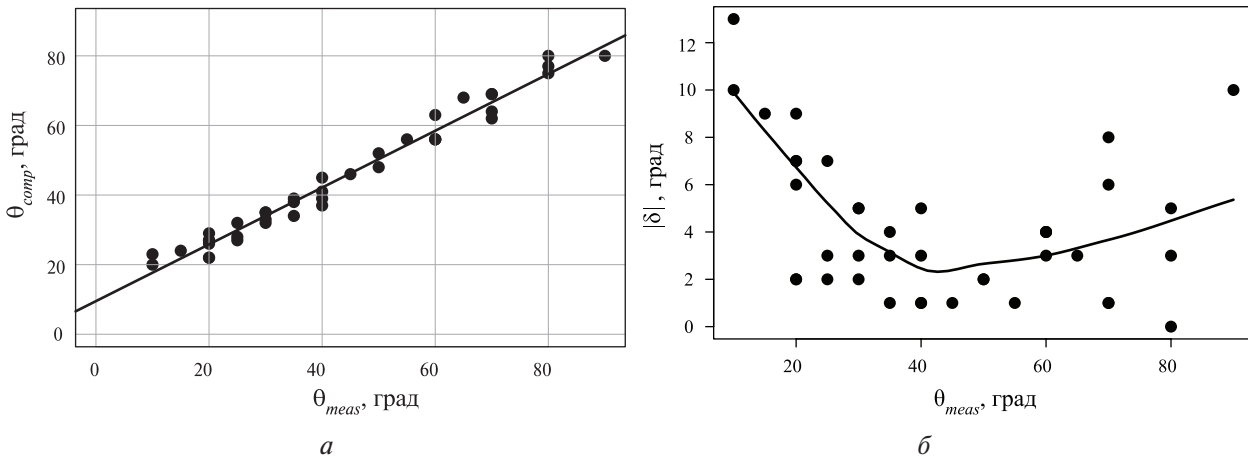


Рис. 2. Результаты оценки ошибки автоматизированного определения угла наклона  $\theta$  по данным экспериментов в контролируемых условиях: *a* — сопоставление восстановленных значений  $\theta_{comp}$  с измеренными  $\theta_{meas}$ ; *б* — вариация ошибки  $\delta$  определения  $\theta$  в диапазоне изменения углов  $\theta$

В ходе испытаний диск устанавливался под разными углами к плоскости матрицы фотокамеры, после чего производилась съёмка и автоматизированная оценка значений  $\phi$  и  $\theta$  с помощью ПАК. Результаты оценки сопоставлялись с измеренными с помощью угломерных инструментов значениями. Также анализировалось влияние на результаты оценки частичного перекрытия диска линейными элементами (центрального одинарного, центрального двойного и бокового).

Как показали эксперименты, максимальная ошибка  $\delta$  автоматизированного определения угла наклона  $\theta$  наблюдается в области малых углов  $\theta$  (рис. 2). Центральное одинарное перекрытие диска ведёт к существенному ( $20^\circ$  и более) увеличению ошибки определения углов при достижении перекрытием доли в 50% площади диска. При двойном перекрытии такой же суммарной площади ошибка остаётся в пределах  $2-10^\circ$ .

Согласно результатам испытаний, минимальный размер объекта на изображении, при котором он определяется как листовая пластинка, выражаемый  $b$ , составляет 14 пикселей при  $b/a = 0,3$  и 12 пикселей при  $b/a = 0,25$ . Вкупе с высоким разрешением матрицы фотокамеры это позволяет обнаруживать одиночные листовые пластинки всех размеров.

Аналитически было получено выражение для оценки ошибки косвенного определения угла наклона фитоэлемента по данным об ошибке определения отношения длин полуосей эллипса  $\Delta_r$  и наклона эллипса в плоскости снимка  $\Delta_\alpha$ . Расчёты, выполненные с его использованием, показывают, что наибольшая неопределённость значений  $\theta$  соответствует листовым пластинкам, максимально обращённым плоскостью к фотокамере. Так, при  $\Delta_r = 0,1$  и  $\Delta_\alpha = 0,5^\circ$  ожидаемая ошибка определения  $\theta$  в зоне с  $b/a > 0,9$  и  $\alpha < 20^\circ$  превышает  $6,5^\circ$ . По указанной причине отклонение формы фитоэлементов от круга может оказывать существенное влияние на результаты оценки  $\theta$ .

Для выравнивания ошибки определения значений углов наклона было предложено выполнять коррекцию получаемых при автоматизированной оценке  $\theta$  с помощью линейной модели, описываемой уравнением  $\theta_{corr} = 1,195\theta_{comp} - 10,282$ , где  $\theta_{comp}$  — исходные восстановленные значения,  $\theta_{corr}$  — корректированные значения. В этом случае получаемые остатки не превосходят по модулю  $7,2^\circ$ , а  $R^2 = 0,975$ .

### Особенности проведения полевых работ

Полевые изыскания на указанных участках в 2016 и 2017 гг. проводились в начале августа, в период максимального развития растительного покрова. Выпадение осадков менее чем за 12 ч до работ на каждом из участков не было зафиксировано, а средняя скорость ветра



не превышала 3 м/с. Это позволило не принимать во внимание воздействие капельной влаги и движения воздушных масс (с учётом жёсткости и упругости побегов и листовых пластинок) на наклон фитоэлементов.

На каждом участке было обследовано не менее 12 фрагментов растительного покрова, равномерно распределённых по его площади. В рамках полевых изысканий проведены съёмочные работы, выполнен контроль качества снимков, получены первичные оценки значений углов и координат. Дальнейшая обработка данных с использованием мощностей ПАК проводилась на камеральном этапе согласно описанному выше алгоритму.

### Результаты исследования структуры покрова и их обсуждение

В ходе автоматизированной оценки значений параметров структуры для каждого фрагмента покрова на участках У2016-2, У2016-7, У2017-1, У2017-6 была построена трёхмерная графическая модель, получены координаты фитоэлементов в условной системе координат и значения  $\varphi$  и  $\theta$ . Из анализа были исключены фрагменты покрова, где было зафиксировано ошибочное детектирование более 20% фитоэлементов. Значения углов наклона были подвергнуты коррекции с использованием приведённой выше линейной модели.

Для двух фрагментов покрова с участков У2016-2, У2016-7 было выполнено сравнение результатов определения ориентации фитоэлементов с помощью разработанного подхода с информацией о  $f(\theta)$ , полученной альтернативным методом по (Pisek et al., 2011). Обнаружен сходный характер распределения фитоэлементов по углам наклона (рис. 3), а наибольшие различия зафиксированы в области малых ( $<20^\circ$ ) и больших ( $>70^\circ$ )  $\theta$ . Вероятно, различия связаны с тем, что сравниваемые фрагменты содержат относительно небольшое количество фитоэлементов, а листовые пластинки, анализируемые на конкретном изображении с помощью одного подхода, не совпадают с анализируемыми посредством другого. Расхождения в области больших  $\theta$  могут быть связаны с отклонениями формы фитоэлементов от круга. Небольшое число фитоэлементов в области  $\theta < 20^\circ$ , по мнению авторов, объясняется в первую очередь пропусками фитоэлементов на этапе детектирования при малом  $b/a$  эллипсов.

К ведущим факторам, замедляющим процесс анализа данных и являющимся источником неопределённости на разных этапах исследования растительного покрова, отнесены вариации освещённости фитоэлементов, их цветовые (тоновые) различия, группировка и взаимное перекрытие.

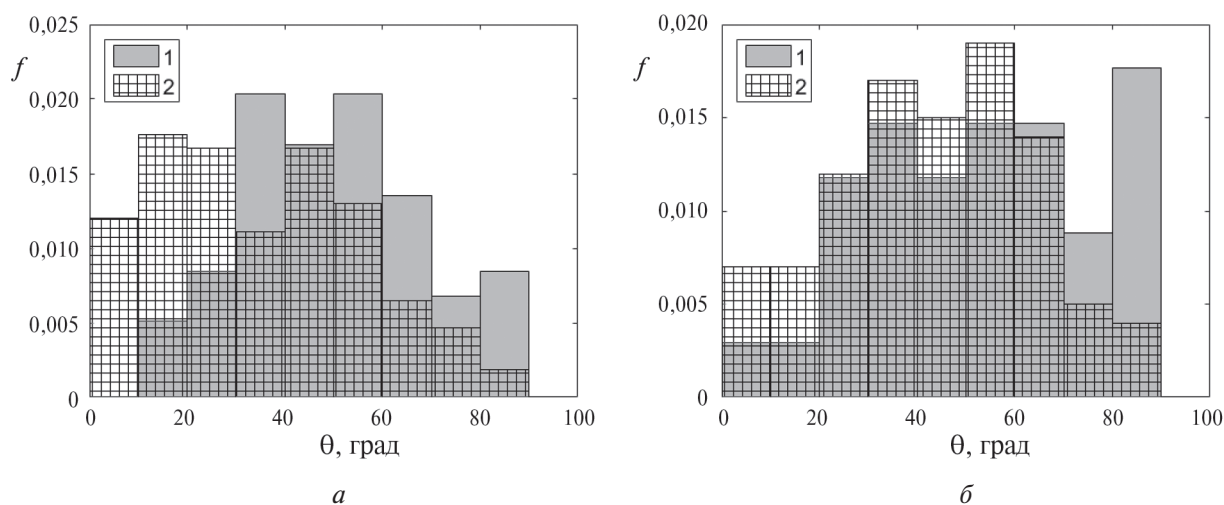


Рис. 3. Распределение листовых пластинок ерника по углам наклона  $\theta$  в тестовых фрагментах растительного покрова на участках У2016-2 (а) и У2016-7 (б), выраженное плотностью вероятности  $f$  и полученное с помощью разных подходов: 1 — разработанного в настоящей работе, 2 — предложенного в исследовании (Pisek et al., 2011)

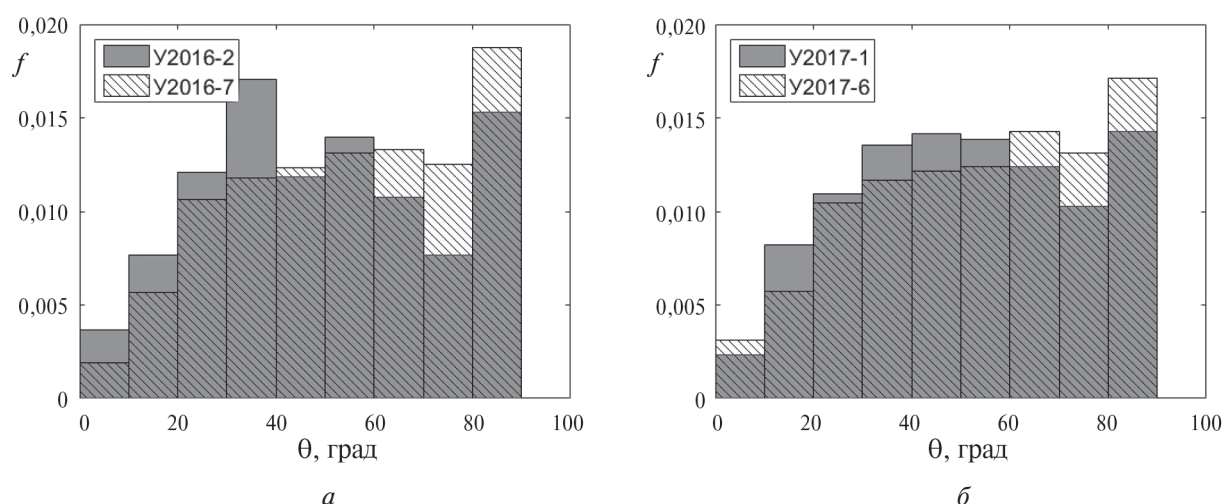


Рис. 4. Результаты автоматизированной оценки распределения листовых пластинок по углам наклона  $\theta$  в растительном покрове на участках, расположенных: *a* — в Ненецком автономном округе; *б* — в Мурманской области;  $f$  — плотность вероятности

Результаты автоматизированного анализа полного массива данных по четырём участкам (в сумме более 2700 идентифицированных фитоэлементов) позволяют заключить, что региональные различия в характере распределения листовых пластинок ерника по углам наклона практически не выражены (рис. 4). Полученные распределения по форме занимают промежуточное положение между сферическим и плагифильным.

Параметрическое описание выборок значений  $\theta$  для каждого участка и массива данных за два года приведено в таблице. Уменьшение медианных значений на участках У2016-2 и У2017-1 отражает проявление куполообразной формы (характерной для плагифильного распределения) и локального минимума  $f(\theta)$  в области углов 60–80°. По мнению авторов, на особенности распределения  $\theta$  листовых пластинок влияет экспозиция склонов, на которых расположены участки. У2016-2 (восточная экспозиция) и У2017-1 (северо-восточная экспозиция) оказываются в меньшей степени продуваемы ветрами господствующих в рассматриваемых районах направлений. Также на пути воздушных потоков с запада и юго-запада в случае У2016-2 расположены полосы древесной растительности. В противоположность этому, У2016-7 занимает склон, ориентированный на запад, а У2017-6 выбран на равнине, что делает их более подверженными действию ветров.

Статистические характеристики выборок значений угла наклона  $\theta$ , град, листовых пластинок ерника на исследуемых участках

Участок (объём выборки)	Среднее	Стандартное отклонение	Медиана
2017-1 (1323)	50,9	22,9	50,7
2017-6 (420)	54,0	23,6	55,4
2016-2 (522)	49,3	23,5	48,0
2016-7 (527)	54,6	22,9	55,4
Полная выборка (2792)	51,8	23,2	51,7

С использованием программной среды R и пакета LeafAngle (Duursma, 2014) был выполнен сравнительный анализ ряда функций, аппроксимирующих распределение фитоэлементов по углам наклона, и их ранжирование по значению критерия хи-квадрат. Наилучшим образом распределение описывает эллипсоидная функция (плотности распределения углов наклона), задаваемая аналитически следующим образом согласно (Campbell, 1990):

$$f(\theta) = \frac{2\chi^3 \sin(\theta)}{\Lambda(\cos^2\theta + \chi^2 \sin^2\theta)^2},$$

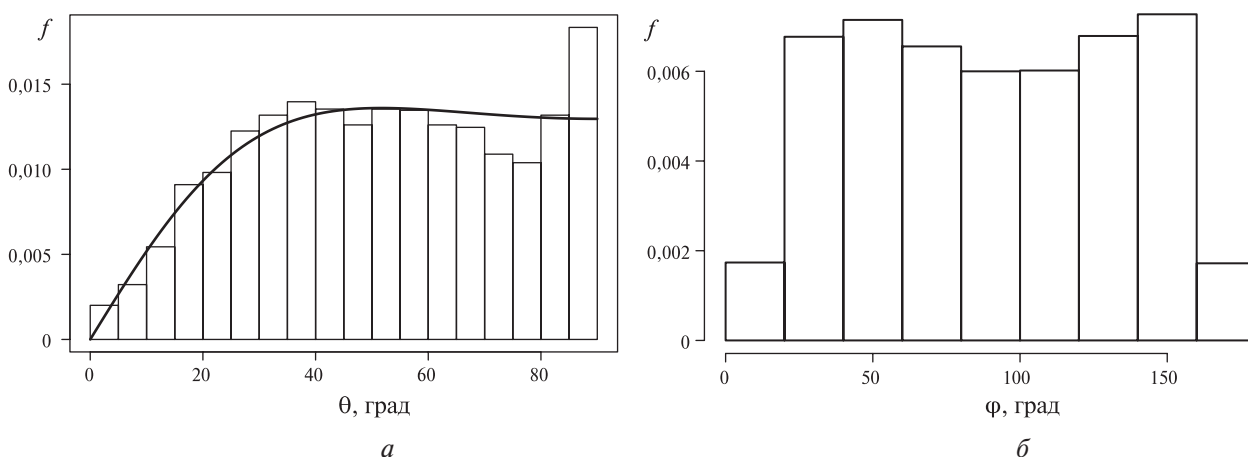
где  $\chi$  — отношение длин горизонтальной и вертикальной полуосей эллипсоида, в рассматриваемом случае равное 1,24;  $\Lambda$  — площадной параметр, равный 2,17. Кривая, представляющая результат аппроксимации, показана на *рис. 5а*.

Распределение азимутальных углов  $\varphi$ , проиллюстрированное на *рис. 5б*, соответствует равномерному, если исключить из рассмотрения крайние 20-градусные интервалы ( $<20^\circ$  и  $>160^\circ$ ). Меньшее количество отсчётов в данных интервалах связано, прежде всего, с пропусками фитоэлементов, расположенных перпендикулярно плоскости матрицы камеры или в сходной ориентации.

Зафиксированное распределение фитоэлементов по углам наклона  $\theta$  занимает промежуточное положение между сферическим, которое использовано при моделировании ерничкового покрова в (Juszek et al., 2014), и асимметричным, принадлежащим к семейству бета-распределений, из работы (Juszek et al., 2017).

Полученные данные о структуре покрова, как представленные в виде массива координат и углов, так и выраженные аналитически посредством функций распределения значений параметров, пригодны для описания распространения в растительном покрове видимого света, ИК-излучений, радиоволн и решения практических задач в области биометеорологии и физиологии растений. Примеры визуализации структуры покрова на основе данных двух указанных форм приведены на *рис. 6* (см. с. 108). В правой части изображения показано графическое представление данных о структуре рассматриваемого покрова в нотации YPlant, применяемой для моделирования использования солнечной радиации и накопления углерода (Pearcy et al., 2011).

Кустарники и кустарнички с другими формами листовых пластинок также могут быть исследованы с использованием предложенного подхода. В таком случае требуются дополнительные признаки для описания формы. Наиболее сложным вариантом задачи можно считать оценку ориентации листовых пластинок эллиптической формы с различным соотношением длины и ширины без выступов и вырезов. Данный вопрос планируется рассмотреть в рамках дальнейших исследований, равно как и сочетание в итоговой модели эллиптических и линейных фитоэлементов (побеги ерника, согласно (Juszek et al., 2014), дают существенный вклад в экранирование почвы и напочвенного покрова). Для исследования структуры мохово-лишайникового яруса требуется использование альтернативных подходов.



*Рис. 5.* Обобщённая характеристика ориентации листовых пластинок в ерничковом покрове по данным с четырёх исследованных участков;  $\theta$  — угол наклона,  $\varphi$  — азимутальный угол,  $f$  — плотность вероятности



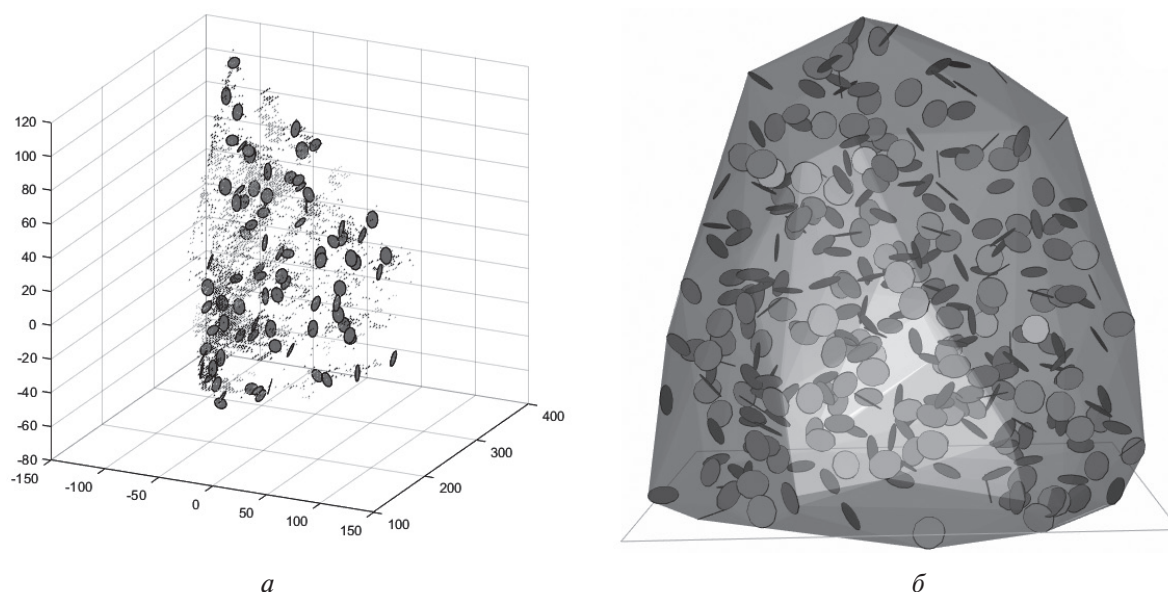


Рис. 6. Пример трёхмерной графической модели фрагмента ерникового покрова на участке У2017-1 (а) и симуляции пространственной структуры покрова с помощью эллипсоидной функции распределения листовых пластинок по углам наклона (б)

К преимуществам предложенного подхода к определению ориентации и взаимного расположения фитоэлементов относится возможность решения задачи на основе одной пары снимков, на которых запечатлён фрагмент покрова. Эта особенность, а также обеспечиваемая высокая степень автоматизации оценки параметров структуры и построения трёхмерной модели покрова позволяет сократить временные затраты на проведение полевых и камеральных работ по сравнению с альтернативными подходами, которые базируются на визуальной идентификации фитоэлементов. Развитие подхода с целью уменьшения ошибки пропуска фитоэлементов, обращённых перпендикулярно к плоскости матрицы камеры, может включать в себя введение дополнительных точек съёмки с наклонным положением оптической оси камеры относительно горизонта. Это позволит уточнить форму левого крыла распределения  $f(\theta)$ , хотя и увеличит объём вычислений.

## Заключение

В ходе исследования разработан, практически реализован и испытан подход к оценке ориентации и взаимного расположения фитоэлементов в растительном покрове кустарниковых и кустарничковых тундр в целях моделирования распространения радиоволн. Получены выражения для оценки углов наклона и азимутальных углов листовых пластинок в фрагментах покрова по их фотоизображениям. Предложено разделять листовые пластинки и побеги ерника в цветовом пространстве тон, насыщенность, яркость.

Для получения данных о структуре растительного покрова с использованием разработанного подхода, воплощённого в программно-аппаратном комплексе, в 2016–2017 гг. исследованы тундровые участки в Ненецком автономном округе и Мурманской области. Выявленный характер распределения листовых пластинок по углам наклона в покрове с доминированием *Betula nana* является промежуточным между сферическим и плагифильным. В ходе анализа данных не обнаружено региональных различий в ориентации фитоэлементов, что позволяет сделать вывод о возможности использования единых настроек моделей распространения радиоизлучения для ерниковых тундр.

Построенные трёхмерные модели фрагментов покрова могут быть использованы как для описания распространения излучения в многослойных природных средах, так и для анализа микроклимата, выполнения теплофизических расчётов, оценки накопления углерода.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-35-00255 мол\_а).

## Литература

1. *Катулин М. С., Перевошиков Л. Л., Шумков С. Г.* Создание аппаратно-программного комплекса для подводной навигации с использованием машинного зрения // Известия ТулГУ. Техн. науки. 2015. № 11-2. С. 90–100.
2. *Мателенок И. В., Мелентьев В. В.* Программно-аппаратный комплекс для исследования пространственной структуры напочвенного покрова лесов // Доклады 6-й Всерос. конф. «Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении, лесном хозяйстве и экологии». Москва, 20–22 апреля 2016. М.: ЦЭПЛ РАН, 2016. С. 138–143. URL: [http://cepl.rssi.ru/wp-content/uploads/2016/04/АКС\\_ГИС\\_Сборник\\_2016.pdf](http://cepl.rssi.ru/wp-content/uploads/2016/04/АКС_ГИС_Сборник_2016.pdf).
3. *Campbell G. S.* Derivation of an angle density function for canopies with ellipsoidal leaf angle distributions // Agricultural and forest meteorology. 1990. V. 49. No. 3. P. 173–176.
4. *Chiu T., Sarabandi K.* Electromagnetic scattering from short branching vegetation // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2000. V. 38. No. 2. P. 911–925.
5. *Duursma R.* LeafAngle v1.2-1. 2014. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=LeafAngle>.
6. *Huang H., Liao T. H., Tsang L., Njoku E. G., Colliander A., Jackson T., Yueh S.* Combined active and passive microwave remote sensing of soil moisture for vegetated surfaces at L-band // Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2016 IEEE Intern. 2016. P. 1626–1629.
7. *Hutter M., Brewer N.* Matching 2-D ellipses to 3-D circles with application to vehicle pose identification // Image and Vision Computing New Zealand: Proceedings of 24<sup>th</sup> Intern. Conf. 2009. P. 153–158.
8. *Juszek I., Erb A. M., Maximov T. C., Schaepman-Strub G.* Arctic shrub effects on NDVI, summer albedo and soil shading // Remote Sensing of Environment. 2014. V. 153. P. 79–89.
9. *Juszek I., Iturrate-Garcia M., Gastellu-Etchegorry J. P., Schaepman M. E., Maximov T. C., Schaepman-Strub G.* Drivers of shortwave radiation fluxes in Arctic tundra across scales // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 193. P. 86–102.
10. *Macelloni G., Paloscia S., Pampaloni P., Marliani F., Gai M.* The relationship between the backscattering coefficient and the biomass of narrow and broad leaf crops // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2001. V. 39. No. 4. P. 873–884.
11. *Nistér D., Stewénius H.* Linear time maximally stable extremal regions // Computer Vision — ECCV 2008: 10<sup>th</sup> European Conf. Computer Vision: Proc. Pt. 2. Marseille, France, Oct. 12–18, 2008. 2008. P. 183–196.
12. *Pearcy R. W., Duursma R. A., Falster D. S.* Studying plant architecture with Y-plant and 3D digitising. PrometheusWiki. 2011. URL: <http://prometheuswiki.publish.csiro.au/tiki-index.php?page=Studying+plant+architecture+with+Y-plant+and+3D+digitising>.
13. *Pisek J., Ryu Y., Alikas K.* Estimating leaf inclination and G-function from leveled digital camera photography in broadleaf canopies // Trees. 2011. V. 25. Iss. 5. P. 919–924.
14. *Zhang Y., Liu X., Su S., Wang C.* Retrieving canopy height and density of paddy rice from Radarsat-2 images with a canopy scattering model // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2014. V. 28. P. 170–180.

## Investigation of 3D structure of vegetation cover in yernik tundra using photography and automated image processing techniques

I. V. Matelenok, V. V. Melentyev

State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg 190000, Russia  
E-mail: [igor\\_matelenok@mail.ru](mailto:igor_matelenok@mail.ru)

Simulation of radio wave propagation in multilayer media using current electrodynamic models requires the most complete information about vegetation properties including 3D structure. A new approach to evaluation of orientation and relative position of plant elements in vegetation cover formed

by shrubs and dwarf-shrubs was proposed in the paper. It is based on multi-view photography of vegetation cover fragments. The approach is implemented in a new version of the instrument for surveying vegetation cover structure. Experiments for automatized retrieving spatial positions of plant elements in controlled conditions were carried out in frame of two-step testing. A field survey on sites in the Nenets Autonomous Area and Murmansk Region and succeeding cameral work have resulted in estimates of the orientation and collocation of the dwarf birch leaves. Comparative analysis showed an agreement between the values of the structure parameters obtained with the proposed approach and one of the alternative approaches. The obtained leaf angle distribution resembles spherical and plagiophile standard distributions, and ellipsoid density function is more appropriate to describe the data. Regional differences in leaf angle distribution for the studied vegetation cover are not detected. Three-dimensional graphic models of vegetation cover fragments are constructed on the basis of the data. Data representation allows to use it for modeling radio wave propagation, evaluating biomass accumulation and performing thermophysical calculations.

**Keywords:** digital photography, dwarf-shrub tundra, image processing, leaf angle distribution, leaf inclination angle, vegetation cover structure, electrodynamic models

Accepted: 31.12.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-100-111

## References

1. Katulin M. S., Perevoshchikov L. L., Shumkov S. G., Sozдание apparatno-programmnogo kompleksa dlya podvodnoi navigatsii s ispol'zovaniem mashinnogo zreniya (Prototyping of hardware and software application to underwater navigation using computer vision), *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*, 2015, No. 11-2, pp. 90–100.
2. Matelenok I. V., Melentyev V. V., Programmno-apparatnyi kompleks dlya issledovaniya prostranstvennoi struktury napochvennogo pokrova lesov (Instrument for investigating of the spatial structure of forest ground covers), *Aerokosmicheskie metody i geoinformatsionnye tekhnologii v lesovedenii, lesnom khozyaistve i ekologii* (Aerospace Methods and GIS-Technologies in Forestry, Forest Management and Ecology), Proc. 6<sup>th</sup> All-Russian Conference, Moscow, 20–22 April 2016, Moscow: TsEPL RAN, 2016, pp. 138–143, available at: [http://cepl.rssi.ru/wp-content/uploads/2016/04/АКС\\_ГИС\\_Сборник\\_2016.pdf](http://cepl.rssi.ru/wp-content/uploads/2016/04/АКС_ГИС_Сборник_2016.pdf).
3. Campbell G. S., Derivation of an angle density function for canopies with ellipsoidal leaf angle distributions, *Agricultural and forest meteorology*, 1990, Vol. 49, No. 3, pp. 173–176.
4. Chiu T., Sarabandi K., Electromagnetic scattering from short branching vegetation, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, Vol. 38, No. 2, pp. 911–925.
5. Duursma R., *LeafAngle v1.2-1*, 2014, available at: <https://CRAN.R-project.org/package=LeafAngle>.
6. Huang H., Liao T. H., Tsang L., Njoku E. G., Colliander A., Jackson T., Yueh S., Combined active and passive microwave remote sensing of soil moisture for vegetated surfaces at L-band, *Geoscience and Remote Sensing Symposium 2016*, IEEE, 2016, pp. 1626–1629.
7. Hutter M., Brewer N., Matching 2-D ellipses to 3-D circles with application to vehicle pose identification, *Image and Vision Computing New Zealand: Proceedings of 24<sup>th</sup> International Conference 2009*, IEEE, 2009, pp. 153–158.
8. Juszak I., Erb A. M., Maximov T. C., Schaepman-Strub G., Arctic shrub effects on NDVI, summer albedo and soil shading, *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 153, pp. 79–89.
9. Juszak I., Iturrate-Garcia M., Gastellu-Etchegorry J. P., Schaepman M. E., Maximov T. C., Schaepman-Strub G., Drivers of shortwave radiation fluxes in Arctic tundra across scales, *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 193, pp. 86–102.
10. Macelloni G., Paloscia S., Pampaloni P., Marliani F., Gai M., The relationship between the backscattering coefficient and the biomass of narrow and broad leaf crops, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, Vol. 39, No. 4, pp. 873–884.
11. Nistér D., Stewénius H., Linear time maximally stable extremal regions, *Computer Vision — ECCV 2008: 10<sup>th</sup> European Conference on Computer Vision*, Proc. Conf., Marseille, 2008, pp. 183–196.
12. Pearcy R. W., Duursma R. A., Falster D. S., Studying plant architecture with Y-plant and 3D digitising, *PrometheusWiki*, 2011, available at: <http://prometheuswiki.publish.csiro.au/tiki-index.php?page=Studying+plant+architecture+with+Y-plant+and+3D+digitising>.

13. Pisek J., Ryu Y., Alikas K., Estimating leaf inclination and G-function from leveled digital camera photography in broadleaf canopies, *Trees*, 2011, Vol. 25, Issue 5, pp. 919–924.
14. Zhang Y., Liu X., Su S., Wang C., Retrieving canopy height and density of paddy rice from Radarsat-2 images with a canopy scattering model, *International J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, Vol. 28, pp. 170–180.