

Научная статья

УДК 582.475:581.45:57.087

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-5-51-63

## Иглоподобные листовые органы хвойных. Часть II. Моделирование площади поверхности иглы

С.И. Тарасов, канд. биол. наук; *ResearcherID*: [A-7112-2016](https://orcid.org/0000-0003-2081-5090),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-2081-5090>

Н.В. Герлинг<sup>✉</sup>, канд. биол. наук; *ResearcherID*: [Q-2273-2015](https://orcid.org/0000-0001-5224-8452),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-5224-8452>

Институт биологии Коми научного центра УрО РАН, ул. Коммунистическая, д. 28,  
г. Сыктывкар, Россия, 167982; tarasov@ib.komisc.ru, gerling@ib.komisc.ru<sup>✉</sup>

Поступила в редакцию 14.07.22 / Одобрена после рецензирования 10.10.22 / Принята к печати 12.10.22

**Аннотация.** В эколого-физиологических исследованиях растительного покрова преобладающее участие листьев в процессах фотосинтеза, транспирации и дыхания определяет ключевую роль такого морфометрического параметра, как площадь поверхности листа. Оценка площади иглоподобных листовых органов хвойных часто требует индивидуального подхода. Многообразие форм игл хвои детерминируется видовой принадлежностью, морфологической структурой, экологическими условиями и возрастом и, в свою очередь, определяет многообразие методов оценки площади поверхности хвои. Поэтому поиск простых стандартных методов установления площади поверхности листовых органов хвойных для физиологов растений является актуальной задачей. Цель работы – создать универсальную модель оценки площади поверхности иглы (хвоинки), не зависящую от видовой принадлежности. Для достижения цели использовалась предложенная авторами модель поперечного сечения иглы, основанная на трансформации периметра поперечного сечения в эквивалентную окружность, периметр которой связан с параметрами поперечного сечения иглы до трансформации. Для оценки площади поверхности иглы возможно аппроксимировать хвоинку геометрическим телом, представляющим собой комбинацию эллипсоида вращения, конуса и цилиндра, при этом радиус цилиндра оценивается с использованием модели поперечного сечения иглы. Модель позволяет оценивать площадь поверхности иглы по 4 ее морфометрическим параметрам: толщине, ширине, длине средней части и общей длине. Полная верификация предлагаемой в статье модели оказалась неосуществимой из-за того, что нет методов точной оценки площади поверхности иглы. На хвое пихты сибирской (*Abies sibirica* L.) и можжевельника обыкновенного (*Juniperus communis* L.), а также плодах банана (*Musa paradisiaca* L.) проведено сравнение разработанного метода с другими методами оценки площади поверхности иглоподобных образцов, показана хорошая предсказательная способность модели. Ее можно охарактеризовать как универсальную с теоретической относительной погрешностью не более 5 %.

**Ключевые слова:** хвойные, площадь поверхности иглы, периметр поперечного сечения иглы, эквивалентный радиус, моделирование

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках темы НИР «Зональные закономерности динамики структуры и продуктивности первичных и антропогенно измененных фитоценозов лесных и болотных экосистем Европейского Северо-Востока России» (регистрационный номер темы – 122040100031-8).

*Для цитирования:* Тарасов С.И., Герлинг Н.В. Иглоподобные листовые органы хвойных. Часть II. Моделирование площади поверхности иглы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 5. С. 51–63. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-51-63>

Original article

## Needle-Like Leaf Organs of Conifers. Part II. Modeling the Needle Surface Area

*Sergei I. Tarasov*, Candidate of Biology; ResearcherID: [A-7112-2016](https://orcid.org/0000-0003-2081-5090),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2081-5090>

*Natalya V. Gerling*<sup>✉</sup>, Candidate of Biology; ResearcherID: [Q-2273-2015](https://orcid.org/0000-0001-5224-8452),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5224-8452>

Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Kommunisticheskaya, 28, Syktyvkar, 167982, Komi Republic, Russian Federation; tarasov@ib.komisc.ru, gerling@ib.komisc.ru<sup>✉</sup>

Received on July 14, 2022 / Approved after reviewing on October 10, 2022 / Accepted on October 12, 2022

**Abstract.** In ecological and physiological studies of plant cover, the predominant participation of leaves in the processes of photosynthesis, transpiration and respiration determines the key role of such a morphometric parameter as leaf surface area. The estimation of the area of needle-like leaf organs of conifers often requires an individual approach. The diversity of needle shapes is determined by species affiliation, morphological structure, ecological conditions and age, and, in turn, determines the diversity of methods for estimating the needle surface area. Therefore, the search for simple standard methods for determining the surface area of leaf organs of conifers is an urgent task for plant physiologists. The aim of this work has been to create a universal model for estimating the needle surface area, independent of species. To achieve it, the needle cross-section model proposed by the authors has been used, based on the transformation of the perimeter of the cross-section into an equivalent circle, the perimeter of which is associated with the parameters of the needle cross-section before the transformation. To estimate the surface area of the needle, it is possible to approximate the needle with a geometric body, which is a combination of an ellipsoid of revolution, a cone and a cylinder, with the radius of the cylinder being estimated using the needle cross-section model. The model allows to estimate the surface area of the needle by its 4 morphometric parameters: thickness, width, length of the middle part and total length. Full verification of the model proposed in the article has turned out to be impossible due to the lack of methods for accurate estimation of the needle surface area. The developed method has been compared to other methods for estimating the surface area of needle-like samples by the examples of the needles of Siberian fir (*Abies sibirica* L.) and common juniper (*Juniperus communis* L.), as well as banana fruits (*Musa paradisiaca* L.), and the good predictive ability of the model has been demonstrated. It can be characterized as universal with a theoretical relative error of no more than 5 %.

**Keywords:** conifers, needle surface area, needle cross-section perimeter, equivalent radius, modeling

**Acknowledgements:** The work was carried out within the framework of the research topic “Zonal Patterns of the Dynamics of the Structure and Productivity of Primary and Anthropogenically Modified Phytocenoses of Forest and March Ecosystems of the European North-East of Russia” (state registration no. 122040100031-8).



**For citation:** Tarasov S.I., Gerling N.V. Needle-Like Leaf Organs of Conifers. Part II. Modeling the Needle Surface Area. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 5, pp. 51–63. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-51-63>

### *Введение*

Любая система, в т. ч. биологическая, обменивается веществом и энергией с окружающей средой через граничные поверхности. Поверхность листьев, стеблей и корней является естественным барьером высших растений, через который реализуется и контролируется связь со средой обитания, поэтому площадь поверхности раздела является важным параметром в эколого-физиологических исследованиях растительных сообществ. Доминирующее участие листьев в процессах ассимиляции [12], транспирации [15] и дыхания, эмиссии летучих органических соединений [2] определяет повышенное внимание к такому морфометрическому параметру, как площадь поверхности листа. Ее точная оценка важна для биогеохимических моделей, приложений дистанционного зондирования и деятельности лесных экологов [4]. Адекватность установления площади поверхности листа определяет и верность оценки связанных с ней физиологических показателей.

В некоторых работах, в которых выполняется оценка физиологических параметров, зависящих от площади поверхности листовых органов, площадь поверхности не указывается [6, 8, 22] или не приводится методика ее оценки [11, 23]. Это затрудняет сравнение результатов. В настоящее время существует тенденция использования для оценки площади поверхности листовых органов оптических сканеров, например измерителя площади поверхности LI-3100C [7, 20], систем анализа изображений WinSEEDLE [26] и WinRHIZO [27]. Однако сканирование чувствительно к ошибкам в предположениях о геометрии поперечного сечения, поэтому рассчитанная площадь поверхности листьев может значительно отличаться от фактической, что в превосходящей степени характерно для листовых органов хвойных [4]. Оценки площади поверхности листовых органов растений на основе аллометрических моделей обычно являются наиболее точными, особенно для голосеменных [10]. Таким образом, разработка простых стандартных методов определения площади поверхности листьев остается для физиологов растений одной из важных задач.

Методы определения площади поверхности листовых органов высших растений разнообразны. Выбор конкретного метода определяется морфологическими особенностями листа, требуемой точностью измерения, оборудованием и временем, которыми располагает исследователь.

Установление площади поверхности листьев покрытосеменных растений не вызывает затруднений: есть большое количество методов оценки площади поверхности плоских листовых пластинок [9], которые не являются видоспецифичными.

Геометрия поверхности иглоподобных листовых органов хвойных, самых многочисленных представителей отдела голосеменных растений, значительно отличается от геометрии плоской поверхности листьев покрытосеменных. Определение площади поверхности игл хвойных часто требует индивидуального подхода [3–5, 13, 14, 17, 18, 24].

При всем разнообразии методы определения площади поверхности листовых органов хвойных остаются в рамках одной концепции: каждая иглолка конкретного вида рассматривается как независимый морфологический элемент, для которого разрабатывается индивидуальная модель. Однако значительная вариабельность формы игл хвойных делает такой подход непродуктивным, что обуславливает актуальность разработки общего метода оценки востребованных параметров листовых органов хвойных. Искомый метод может быть основан на общих для игл всех видов хвойных морфологических особенностях, в этом случае они будут применены для оценки интересующих исследователя параметров.

Цель данной работы – создать универсальную модель оценки площади поверхности иглы, опирающуюся на общие морфологические особенности листовых органов хвойных. Более конкретно данная цель может быть сформулирована так: используя относительно легко измеряемые параметры хвоинки (ширину, толщину и длину), оценить ее менее легко измеряемые параметры (площадь поверхности) независимо от видовой принадлежности.

#### *Объекты и методы исследования*

Отбор образцов хвои с целью оценки площади поверхности листовой пластинки проводили в чернично-сфагновом ельнике, расположенном в бореальной зоне Северо-Востока европейской части России (Республика Коми, Княжпогостский район,  $62^{\circ}16'03''$  с. ш.  $50^{\circ}41'07''$  в. д.). Из побегов 1–3-го годов развития было отобрано 30 экземпляров хвои пихты сибирской и 31 – можжевельника обыкновенного. Побеги пихты выбирались из средней части кроны 10 деревьев, входящих в 1-й ярус древостоя, можжевельника – из средней части кроны 10 здоровых кустов вида.

В рамках разработанной методики для оценки площади поверхности одной хвоинки измеряли ширину в средней части ( $W$ ), толщину и длину ( $L$ ) хвоинки. Ширину устанавливали измерительной лупой ЛИ-3-10× (ГОСТ 25706–83) с погрешностью  $\pm 0,05$  мм, длину – измерительной линейкой (ГОСТ 427–75) с погрешностью  $\pm 0,5$  мм.

В связи с отсутствием специализированных приборов для измерения площади поверхности листовых органов растений для проверки применимости методики дополнительно было рассмотрено 37 плодов растения рода банан, форма которых близка к форме листовых органов хвойных и легко поддается измерению. Оценку площади поверхности плодов банана осуществляли методом линейной аппроксимации: плод очищали, шкурку распрямляли, затем ее площадь приближали к геометрическим фигурам (прямоугольникам и треугольникам), площадь которых вычисляется по известным формулам, площади суммировали. Линейные размеры геометрических фигур устанавливались измерительной линейкой с погрешностью  $\pm 0,5$  мм.

Если известен средний периметр иглы, то площадь поверхности иглы оценивается как произведение этого показателя на длину иглы. Однако в силу того, что форма иглы отличается от цилиндра и, как правило, имеет сужения на концах, определение среднего периметра связано с очевидными трудностями.

Напротив, максимальные ширину и толщину иглы определить просто. Зная максимальную ширину и толщину поперечного сечения иглы, можно найти максимальный эквивалентный радиус  $R_{\max cs}$ . Так как теория,

развитая при моделировании периметра поперечного сечения иглы, справедлива и для ее продольного сечения, естественно применить ее для оценки площади поверхности иглы, используя максимальный эквивалентный радиус.

Однако анализ показал, что непосредственное применение данного подхода к оценке площади поверхности иглы и уравнение, получающееся в результате, не очень удобны с практической точки зрения. Поэтому для оценки площади поверхности иглы был разработан другой метод, в основу которого положен эквивалентный радиус в среднем сечении иглы.

Как правило, у иглы всегда можно выделить в средней части участок, на протяжении которого средний эквивалентный радиус остается постоянным (или почти постоянным). Для данного участка средний эквивалентный радиус  $R_{cs}$  любого поперечного сечения будет приблизительно равен эквивалентному радиусу в середине участка. При трансформации каждого поперечного сечения иглы в окружность со средним эквивалентным радиусом данный участок трансформируется в цилиндр. Рассмотрим, какие формы примут при этом части иглы, прилегающие к этому цилиндру – верхушка и основание.

Формы вершук и оснований иголок разнообразны [16], однако, как и форма поперечного сечения иглы, они могут быть сведены к нескольким простым фигурам. Будем рассматривать эллипсоид вращения и конус в качестве предельных форм всего разнообразия форм оснований и вершук игл. При описании вершук и основания иглы с помощью эллипсоида вращения и конуса возможны 3 модели формы иглы: 1) эллипсоид–цилиндр–эллипсоид (рис. 1); 2) конус–цилиндр–конус (рис. 2); 3) эллипсоид–цилиндр–конус (рис. 3).

В первом случае (модель 1) площадь поверхности иглы может быть найдена как сумма 1/2 площади поверхности эллипсоида вращения с полуосями  $h_1$  и  $R_{cs}$ , 1/2 площади поверхности эллипсоида вращения с полуосями  $h_2$  и  $R_{cs}$  и площади цилиндра длиной  $l$  и радиусом  $R_{cs}$  (рис. 1).

Рис. 1. Эллипсоид вращения как основа модели иглы ( $l$  – длина цилиндрической части иглы;  $h_1$  – длина вершины иглы;  $h_2$  – длина основания иглы)

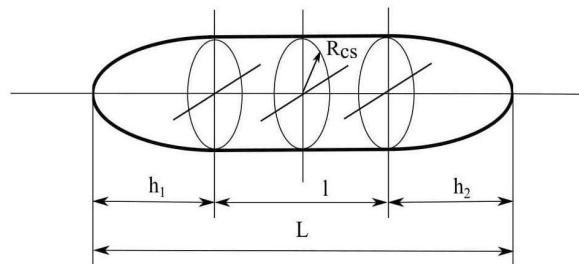


Fig. 1. The ellipsoid of revolution as the basis of the needle model ( $l$  – length of the cylindrical part of the needle;  $h_1$  – length of the needle apex;  $h_2$  – length of the needle base)

Уравнение для расчета общей площади поверхности иглы имеет вид

$$S_{total} = \frac{1}{2} S_{ell1} + \frac{1}{2} S_{ell2} + S_{cyl} = \pi R_{cs} \left( R_{cs} + \frac{h_1^2}{\sqrt{h_1^2 - R_{cs}^2}} \arcsin \frac{\sqrt{h_1^2 - R_{cs}^2}}{h_1} \right) + \pi R_{cs} \left( R_{cs} + \frac{h_2^2}{\sqrt{h_2^2 - R_{cs}^2}} \arcsin \frac{\sqrt{h_2^2 - R_{cs}^2}}{h_2} \right) + 2\pi R_{cs} l,$$

где  $S_{ell1}$ ,  $S_{ell2}$  – площади поверхности эллипсоидов вращения;  $S_{cyl}$  – площадь поверхности цилиндра.

Соответственно, во втором случае (модель 2) площадь поверхности может быть найдена как сумма площадей 2 конусов с радиусами основания  $R_{cs}$  и образующими  $\sqrt{h_1^2 + R_{cs}^2}$  и  $\sqrt{h_2^2 + R_{cs}^2}$  и площади цилиндра длиной  $l$  и радиусом  $R_{cs}$  (рис. 2).

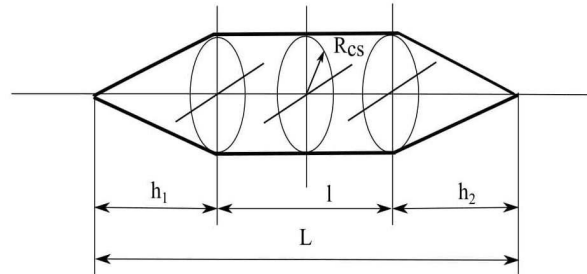


Рис. 2. Конус как основа модели иглы

Fig. 2. The cone as the basis of the needle model

Уравнение для расчета общей площади поверхности иглы в этом случае примет вид

$$S_{total2} = S_{cone1} + S_{cone2} + S_{cyl} = \pi R_{cs} \sqrt{h_1^2 + R_{cs}^2} + \pi R_{cs} \sqrt{h_2^2 + R_{cs}^2} + 2\pi R_{cs} l,$$

где  $S_{cone1}$ ,  $S_{cone2}$  – площади поверхности конусов.

Возможен 3-й вариант модели формы иглы (модель 3), включающий элементы эллипсоида вращения и конуса (рис. 3).

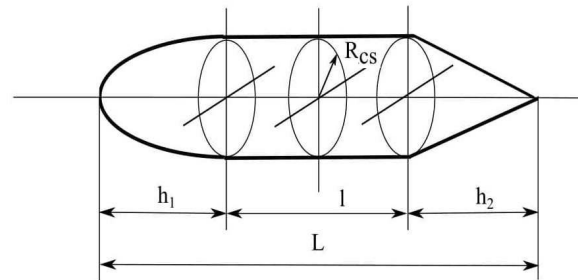


Рис. 3. Комбинация эллипсоида вращения и конуса как основа модели иглы

Fig. 3. The combination of an ellipsoid of revolution and a cone as the basis of the needle model

Уравнение для расчета общей площади поверхности иглы в этом случае будет следующим:

$$S_{total3} = \frac{1}{2} S_{ell1} + S_{cone2} + S_{cyl} = \pi R_{cs} \left( R_{cs} + \frac{h_1^2}{\sqrt{h_1^2 - R_{cs}^2}} \arcsin \frac{\sqrt{h_1^2 - R_{cs}^2}}{h_1} \right) + \pi R_{cs} \sqrt{h_2^2 + R_{cs}^2} + 2\pi R_{cs} l.$$

Модели 1 и 2 являются гипотетическими, найти в природе формы игл на основе только эллипсоида вращения или только конуса маловероятно. Форма иглы на основе эллипсоида вращения и конуса (модель 3) занимает промежуточное положение между первыми двумя формами. По аналогии с поперечным сечением иглы введем ограничение: будем считать, что большинство возможных форм игл являются промежуточными между формами моделей 1 и 2 и, соответственно, рассмотрим только те иглы, форма которых занимает промежуточное положение между этими моделями. По данному ограничению в качестве универсальной модели формы иглы примем модель 3. Площадь поверхности, рассчитанная по уравнению для этой модели, занимает промежуточное

положение между площадью поверхности моделей 1 и 2 и равна среднему этих площадей. То есть площадь поверхности для модели 3 может быть принята в качестве оценки площади поверхности иглы любой (или почти любой) формы, удовлетворяющей принятому ограничению.

Оценим ошибку при расчете площади поверхности иглы с использованием модели 3. Максимальная ошибка будет получена, если форма иглы соответствует модели 1 или 2, но площадь поверхности иглы рассчитывается как для модели 3:

$$\delta_{\max 1} = \frac{S_{total1} - S_{total3}}{S_{total3}};$$

$$\delta_{\max 2} = \frac{S_{total2} - S_{total3}}{S_{total3}}.$$

Очевидно,  $\delta_{\max 1} = \delta_{\max 2} = \delta_{\max}$ . Если  $l = 0$ , то  $\delta_{\max} = 22\%$ , что неприемлемо для научных исследований.

Однако у реальных игл  $l$  всегда больше 0. Рассмотрим, как будет меняться  $\delta_{\max}$  в зависимости от  $l$ ,  $h_1$ ,  $h_2$  и  $R_{cs}$ .

Анализ формы и размеров 78 игл из родов *Abies*, *Pinus*, *Picea*, *Larix*, *Cedrus* и *Juniperus* [16, 21, 25], которые не являются плоскими и могут рассматриваться как многогранники произвольной формы, показал, что максимальная длина иглы составляет 450 мм, минимальная – 6 мм; максимальная ширина – 2,5 мм, минимальная – 0,5 мм; максимальная толщина – 0,6 мм, минимальная – 0,3 мм. Максимальный  $R_{cs}$ , соответствующий максимальной ширине и толщине иглы, равен 0,9 мм, минимальный, соответствующий минимальным ширине и толщине, – 0,2 мм. Далее мы предположили, что у большинства игл  $h_1 = h_2 = h$  и что  $h$  может принимать значения от  $2R_{cs}$  до  $4R_{cs}$ , соответственно,  $l$  определяли как  $l = L - 2h$ . Нужно отметить, что точные  $h_1$  и  $h_2$  у реальных игл установить сложно или даже невозможно, т. к. не существует явно выраженной границы перехода верхушки (или основания) в цилиндрическую часть. Взяв минимальный и максимальный  $R_{cs}$ , рассматривали зависимость относительной ошибки оценки площади поверхности иглы  $\delta_{\max}$  от  $h$  и  $L$ , при изменении последних от минимального до максимального значений. Полученные зависимости в графическом виде представлены на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что в диапазоне допустимых (т. е. встречающихся в природе) соотношений  $L$ ,  $h$ ,  $l$  и  $R_{cs}$  относительная погрешность результата оценки площади поверхности не превышает 5%, при увеличении длины иглы ошибка уменьшается.

Таким образом, с учетом принятых допущений при оценке площади поверхности иглы с использованием модели 3 относительная ошибка составляет не более 5%. Следует отметить, что при практическом применении формулы для модели 3 единицы измерения  $h_1$ ,  $h_2$  и  $R_{cs}$  необходимо выбирать так, чтобы аргумент арксинуса был меньше 1.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Отсутствие возможности определить площадь поверхности иглы с точностью, которая соответствовала бы эталонным измерениям, исключает оценку практической применимости метода оценки площади поверхности иглы с использованием модели 3. Однако мы располагаем данными о площадях поверхности хвой пихты и можжевельника, полученными нами в ходе других исследований.

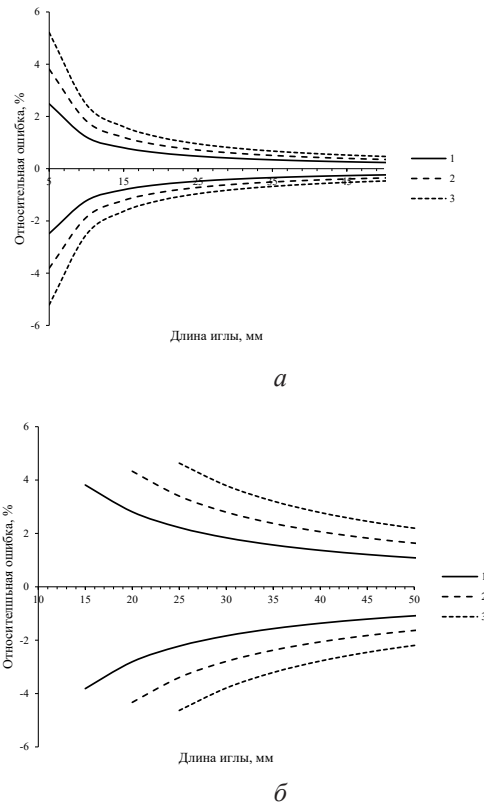


Рис. 4. Зависимость относительной ошибки результата оценки площади поверхности иглы от  $L$  и  $h$  при  $R_{cs}^-$ , равном:  $a - 0,2$  мм;  $b - 0,9$  мм ( $1 - h = 2R_{cs}^-$ ;  $2 - h = R_{cs}^-$ ;  $3 - h = 4R_{cs}^-$ )

Fig. 4. The dependence of the relative error of the needle surface area estimation result on  $L$  and  $h$  at  $R_{cs}^-$  equal to:  $a - 0.2$  mm;  $b - 0.9$  mm ( $1 - h = 2R_{cs}^-$ ;  $2 - h = 3R_{cs}^-$ ;  $3 - h = 4R_{cs}^-$ )

Мы оценили площади поверхности 30 хвоинок пихты и 31 хвоинки можжевельника, рассчитывая их как произведение среднего периметра сечения иглы и ее длины. Для игл пихты средний периметр устанавливался по ширине хвоинки в ее средней части на основе корреляционного соотношения  $\bar{P} = 304,02 + 2,29W$  [1], для можжевельника –  $\bar{P} = 197,6 + 2,2W$  (неопубликованные данные).

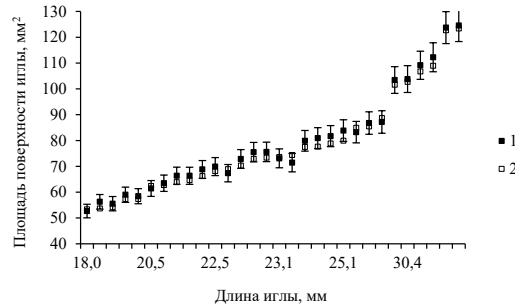
При сравнении метод, основанный на модели 3, обозначали как метод 1, с которым сравнивали, – метод 2. Сопоставление абсолютных площадей поверхности хвои пихты приведено на рис. 5, а. Из него видно, что порядок величин совпадает, разница между оценками площади поверхности иглы, полученными разными методами, для пихты в среднем составляет 1,7 %. Площади поверхности, рассчитанные по методу 2, находятся внутри 5%-го интервала, определяющего относительную погрешность метода 1. Средние значения  $h_1 = 2,1 R_{cs}^-$ ,  $h_2 = 2,8 R_{cs}^-$ .

Регрессионный анализ Пассинга–Баблока [19], выполненный для двух методов оценки площади поверхности хвои пихты при уровне значимости 0,05, показал следующий результат. CUSUM-тест подтвердил линейную зависимость между оценками площади поверхности хвои, полученными разными методами ( $h_{\text{стат}} = 1,25$ ;  $p = 0,08787$ ), что указывает на возможность применения данного вида анализа к исходным данным. Диаграмма рассеяния приведена на рис. 5, б. Уравнение регрессии:  $y = -0,67468 + 0,98603x$ ; 95%-е доверительные интервалы для пересечения  $(-2,83675; 2,40345)$  и для наклона  $(0,94599; 1,01514)$  указывают на хорошее согласие методов. 95%-й доверительный интервал для пересечения включает значение 0, следовательно, можно полагать, что нет существенной

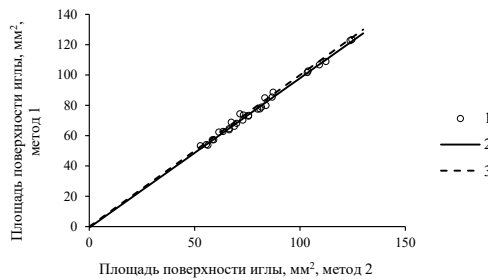


разницы между полученным значением пересечения и 0, а также систематического смещения между двумя методами. 95%-й доверительный интервал для наклона включает 1, т. е., вероятно, нет существенной разницы между полученным наклоном и 1, как и пропорционального смещения между двумя методами. В целом можно предположить, что методы не имеют существенных различий.

Рис. 5. Сравнение методов оценки площади поверхности хвои пихты: *a* – зависимость площади поверхности иглы от ее длины (1, 2 – методы 1 и 2 соответственно); *б* – регрессионный анализ Пассинга–Баблока для двух методов (1 – исходные данные; 2 – линия регрессии; 3 – линия идентичности)



*a*



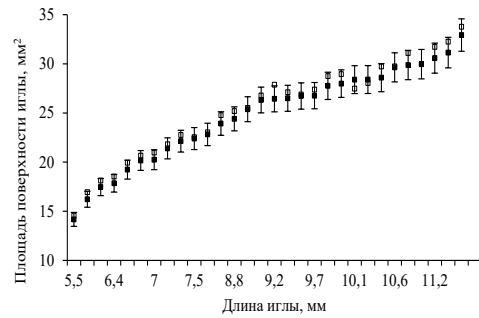
*б*

Fig. 5. The comparison of the methods for estimating the surface area of fir needles: *a* – dependence of the needle surface area on its length (1, 2 – methods 1 and 2, respectively); *б* – Passing–Bablok regression analysis for two methods (1 – initial data; 2 – regression line; 3 – identity line)

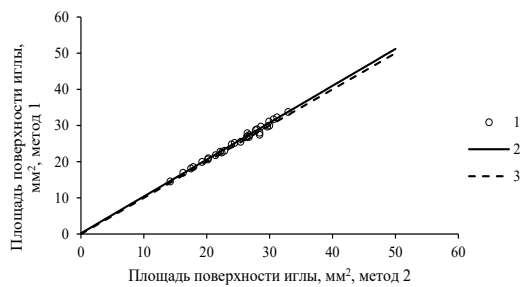
Сравнение абсолютных значений площади поверхности хвои можжевельника приведено на рис. 6, *a*. Порядок величин совпадает, разница между оценками площади поверхности иглы, полученными разными методами, для можжевельника в среднем составляет 2,4 %. Площади поверхности, определенные по методу 2, находятся внутри 5%-го интервала. Средние значения  $h_1 = 1,2 R_{cs}$ ,  $h_2 = 2,2 R_{cs}$ . Подстановка средних значений  $h_1$  и  $h_2$  в расчетное уравнение дает значительное расхождение оценок.

Регрессионный анализ Пассинга–Баблока двух методов оценки площади поверхности хвои для можжевельника при уровне значимости 0,05 дал такие результаты. CUSUM-тест:  $h_{stat} = 1,25$ ;  $p = 0,08787$ ; зависимость между оценками площади поверхности хвои можжевельника линейна. Диаграмма рассеяния приведена на рис. 6, *б*. Уравнение регрессии:  $y = 0,19136 + 1,0198x$ ; 95%-е доверительные интервалы для пересечения  $(-0,38742; 1,06253)$  и для наклона  $(0,97986; 1,04732)$  указывают на хорошее согласие методов. Отсюда следует вывод, что между методами нет существенной разницы.

Эксперимент по оценке площади поверхности 37 плодов банана показал, что  $h_1 \approx h_2 = h$ , в среднем  $h = 2,065 R_{cs}$ . Результаты оценки площади поверхности плодов банана двумя методами приведены на рис. 7, *a*.



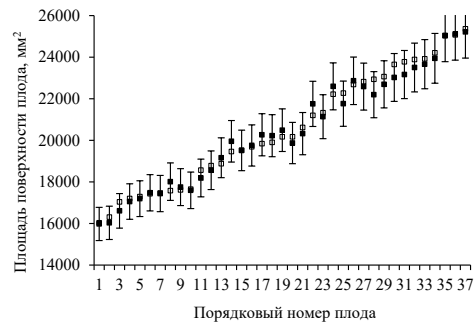
а



б

- 1 Рис. 6. Сравнение методов оценки площади поверхности хвои можжевельника: а – зависимость площади поверхности хвоинки от ее длины; б – регрессионный анализ Пассинга–Баблока для двух методов (условные обозначения 1–3 – см. рис. 5)

Fig. 6. The comparison of the methods for estimating the surface area of juniper needles: а – dependence of the needle surface area on its length; б – Passing–Bablok regression analysis for two methods (for symbols 1–3 see fig. 5)



а



б

- 1 Рис. 7. Сравнение методов оценки площади поверхности плодов банана: а – зависимость площади поверхности плода банана от его геометрии; б – регрессионный анализ Пассинга–Баблока для двух методов (условные обозначения 1–3 – см. рис. 5)

Fig. 7. The comparison of the methods for estimating the surface area of banana fruits: а – dependence of the banana fruit surface area on the geometry of a particular fruit; б – Passing–Bablok regression analysis for two methods (for symbols 1–3 see fig. 5)

Средняя разница между оценками площади поверхности плода, полученными разными методами, в среднем составляет 0,4 %. Площади поверхности по данным непосредственных измерений (метод 2) находятся внутри 5%-го интервала, определяющего относительную погрешность метода 1.

Регрессионный анализ Пассинга–Баблока двух методов при уровне значимости 0,05 дал следующий результат:  $h_{\text{стат}} = 1,147$ ;  $p = 0,143836$ , зависимость между оценками площади поверхности плодов линейна. Диаграмма рассеяния приведена на рис. 7, б. Уравнение регрессии:  $y = 257,7316 + 0,98034x$ ; 95%-е доверительные интервалы для пересечения (1048,0024; –679,354) и для наклона (0,94249; 1,028613) указывают на хорошее согласие методов. Таким образом, между методами нет существенной разницы.

Поскольку альтернативные методы не верифицировались с помощью эталонных, только на основании проведенного анализа нельзя определить практическую точность оценки площади поверхности с помощью метода 1. Тем не менее очевидно, что предсказательная способность метода на основе модели 3 соответствует требованиям поставленной задачи. Возможность адекватной оценки площади поверхности образцов, отличных от хвои, является аргументом в пользу универсальности метода 1.

### Заключение

На основе модели поперечного сечения иглы для хвойных разработана модель, позволяющая оценивать площадь поверхности иглы по 4 ее морфометрическим параметрам: толщине, ширине, длине средней части и общей длине. Модель показала хороший результат при сравнении с другими методами оценки площади поверхности игл. Сопоставление оценок площади поверхности игл, полученных с использованием модели, с эталонными оценками площади поверхности не проводилось. С учетом принятых при разработке модели допущений при оценке площади поверхности иглы с помощью предлагаемой модели теоретическая относительная ошибка составляет не более 5 %. Основное преимущество предлагаемой модели – универсальность, т. к. она разработана для игл, форма которых меняется в широких пределах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Тарасов С.И., Герлинг Н.В. Новый подход к оценке площади поверхности хвои пихты сибирской // Лесоведение. 2021. № 2. С. 217–224.  
Tarasov S.I., Gerling N.V. A New Approach to the Assessment of the Surface Area of the Siberian Fir Needles. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 2021, no. 2, pp. 217–224. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0024114821020078>
2. Bäck J., Hari P., Hakola H., Juurola E., Kulmala M. Dynamics of Monoterpene Emissions in *Pinus sylvestris* During Early Spring. *Boreal Environment Research*, 2005, vol. 10, no. 5, pp. 409–424.
3. Benecke U. Surface Area of Needles in *Pinus radiata* – Variation with Respect to Age and Crown Position. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 1979, vol. 9, no. 3, pp. 267–271.
4. Bond-Lamberty B., Wang C., Gower S.T. The Use of Multiple Measurement Techniques to Refine Estimates of Conifer Needle Geometry. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, vol. 33, no. 1, pp. 101–105. <https://doi.org/10.1139/x02-166>
5. Brand D.G. Estimating the Surface Area of Spruce and Pine Foliage from Displaced Volume and Length. *Canadian Journal of Forest Research*, 1987, vol. 17, no. 10, pp. 1305–1308. <https://doi.org/10.1139/x87-203>

6. Carter G.A., Smith W.K. Influence of Shoot Structure on Light Interception and Photosynthesis in Conifers. *Plant Physiology*, 1985, vol. 79, iss. 4, pp. 1038–1043. <https://doi.org/10.1104/pp.79.4.1038>
7. Černý J., Pokorný R., Haninec P., Bednář P. Leaf Area Index Estimation Using Three Distinct Methods in Pure Deciduous Stands. *Journal of Visualized Experiments*, 2019, vol. 150, art. no. e59757. <https://doi.org/10.3791/59757>
8. Coursolle C., Prud'homme G.O., Lamothe M., Isabel N. Measuring Rapid A–Ci Curves in Boreal Conifers: Black Spruce and Balsam Fir. *Frontiers in Plant Science*, 2019, vol. 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01276>
9. Daughtry C.S.T. Direct Measurements of Canopy Structure. *Remote Sensing Reviews*, 1990, vol. 5, iss. 1, pp. 45–60. <https://doi.org/10.1080/02757259009532121>
10. Gower S.T., Kucharik C.J., Norman J.M. Direct and Indirect Estimation of Leaf Area Index,  $f_{\text{APAR}}$ , and Net Primary Production of Terrestrial Ecosystems. *Remote Sensing Environment*, 1999, vol. 70, iss. 1, pp. 29–51. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(99\)00056-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00056-5)
11. Hari P., Nöjd P. The Effect of Temperature and PAR on the Annual Photosynthetic Production of Scots Pine in Northern Finland During 1906–2002. *Boreal Environment Research*, 2009, vol. 14 (suppl. A), pp. 5–18.
12. Ishii H., Hamada Y., Utsugi H. Variation in Light-Intercepting Area and Photosynthetic Rate of Sun and Shade Shoots of Two *Picea* Species in Relation to the Angle of Incoming Light. *Tree Physiology*, 2012, vol. 32, iss. 10, pp. 1227–1236. <https://doi.org/10.1093/treephys/tps090>
13. Jonckheere I., Fleck S., Nackaerts K., Muys B., Coppin P., Weiss M., Baret F. Review of Methods for *in situ* Leaf Area Index Determination. Part I. Theories, Sensors and Hemispherical Photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, vol. 121, iss. 1–2, pp. 19–35. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.08.027>
14. Kerner H., Gross E., Koch W. Structure of the Assimilation System of a Dominating Spruce Tree (*Picea abies* (L.) Karst.) of Closed Stand: Computation of Needle Surface Area by Means of a Variable Geometric Needle Model. *Flora*, 1977, vol. 166, iss. 5, pp. 449–459. [https://doi.org/10.1016/S0367-2530\(17\)32165-5](https://doi.org/10.1016/S0367-2530(17)32165-5)
15. Kozlowski T.T. Transpiration Rates of Some Forest Tree Species During the Dormant Season. *Plant Physiology*, 1943, vol. 18, iss. 2, pp. 252–260. <https://doi.org/10.1104/pp.18.2.252>
16. Krüssmann G. *Die Nadelgehölze: Eine Nadelholzkunde für die Praxis, auf. 3, neubearb.* Berlin, Hamburg, Parey Publ., 1979. 264 p. (In Germ.).
17. Lin J., Sampson D.A., Deckmyn G., Ceulemans R. Significant Overestimation of Needle Surface Area Estimates Based on Needle Dimensions in Scots Pine (*Pinus sylvestris*). *Canadian Journal of Botany*, 2002, vol. 80, no. 9, pp. 927–932. <https://doi.org/10.1139/b02-081>
18. Madgwick H.A.I. Estimation of Surface Area of Pine Needles with Special Reference to *Pinus resinosa*. *Journal of Forestry*, 1964, vol. 62, art. no. 636.
19. NCSS, *Statistical Software*. Available at: <https://www.ncss.com/software/ncss/ncss-documentation/#Regression> (accessed 24.01.22).
20. Pepin S., Livingston N.J., Whitehead D. Responses of Transpiration and Photosynthesis to Reversible Changes in Photosynthetic Foliage Area in Western Red Cedar (*Thuja plicata*) Seedlings. *Tree Physiology*, 2002, vol. 22, iss. 6, pp. 363–371. <https://doi.org/10.1093/treephys/22.6.363>
21. *PLANTS Database*. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. Available at: <https://plants.sc.egov.usda.gov/home> (accessed 24.01.22).
22. Pliura A., Jankauskiene J., Lygis V., Suchockas V., Bajerkevičienė G., Verbylaite R. Response of Juvenile Progeny of Seven Forest Tree Species and Their Populations to Si-

mulated Climate Change-Related Stressors, Heat, Elevated Humidity and Drought. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 2018, vol. 11, iss. 3, pp. 374–388. <https://doi.org/10.3832/ifer2340-011>

23. Rayment M.B., Loustau D., Jarvi P.G. Measuring and Modeling Conductances of Black Spruce at Three Organizational Scales: Shoot, Branch and Canopy. *Tree Physiology*, 2000, vol. 20, iss. 11, pp. 713–723. <https://doi.org/10.1093/treephys/20.11.713>

24. Swank W.T., Schreuder H.T. Comparison of Three Methods of Estimating Surface Area and Biomass for a Forest of Young Eastern White Pine. *Forest Science*, 1974, vol. 20, pp. 91–100.

25. *The Gymnosperm Database*. Available at: <https://www.conifers.org/zz/gymnosperms.php> (accessed 24.01.22).

26. Wyka T.P., Zytkowskiak R., Oleksyn J. Seasonal Dynamics of Nitrogen Level and Gas Exchange in Different Cohorts of Scots Pine Needles: a Conflict Between Nitrogen Mobilization and Photosynthesis? *European Journal of Forest Research*, 2016, vol. 135, pp. 483–493. <https://doi.org/10.1007/s10342-016-0947-x>

27. Yang F.O., Ou Y., Zhu T., Ma J., An S., Zhao J., Wang J., Kong L., Zhang H., Tigabu M. Growth and Physiological Responses of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst) Supplemented with Monochromatic Red, Blue and Far-Red Light. *Forests*, 2021, vol. 12, no. 2, art. no. 164. <https://doi.org/10.3390/f12020164>

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest