

УДК 630\*582.475:581.45:57.087(470.13)

## НОВЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ПЛОЩАДИ ПОВЕРХНОСТИ ХВОИ ПИХТЫ СИБИРСКОЙ<sup>1</sup>

© 2021 г. С. И. Тарасов<sup>а</sup>, \*, Н. В. Герлинг<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, ул. Коммунистическая, 28, г. Сыктывкар, 167982 Россия

\*E-mail: tarasov@ib.komisc.ru

Поступила в редакцию 26.11.2018 г.

После доработки 17.04.2019 г.

Принята к публикации 08.12.2020 г.

В настоящей работе представлены результаты исследования морфометрических особенностей хвои пихты сибирской, проведенного с целью разработки методики оценки площади поверхности листовой пластинки пихты. Актуальность данной темы связана с отсутствием исследований, посвященных именно методам определения площади поверхности хвои пихты сибирской. В ходе исследования получена соответствующая математическая модель. Показано, что в результате ряда геометрических преобразований площадь поверхности хвоинки может рассматриваться и оцениваться как площадь трапеции. Параметры для оценки площади трапеции являются производными от длины и ширины хвоинки. Образцы побегов и хвои пихты сибирской, которые были использованы для определения морфометрических параметров хвои, необходимых для верификации модели, отбирали со здоровых деревьев пихты сибирской первого яруса ельника чернично-сфагнового, произрастающего в среднетаежной зоне (Княжпогостский район, Республика Коми) в 2016–2017 гг. Относительная погрешность оценки площади поверхности отдельной хвоинки с использованием полученной модели не превышает 3%. Приведенный подход моделирования площади поверхности отдельной хвоинки пихты может применяться и для других хвойных пород. Дается алгоритм, позволяющий использовать полученную модель для оценки средней суммарной площади поверхности любого количества хвоинок, например, одного или нескольких побегов. При определении суммарной площади поверхности в качестве параметров модели используются выборочные характеристики морфометрических показателей хвои. Получена корреляционная зависимость, связывающая абсолютно сухую массу и среднюю суммарную площадь поверхности хвоинок побега пихты сибирской. Это дает возможность оценивать площадь поверхности хвои побегов пихты.

*Ключевые слова:* пихта сибирская, площадь поверхности хвои, моделирование.

DOI: 10.31857/S0024114821020078

Поверхности раздела (или граничные поверхности) — естественный барьер, участвующий в регуляции потоков вещества и энергии между любой биологической системой и окружающей ее средой. Для высших растений связь со средой обитания реализуется в основном через поверхности листьев, стеблей и корней. 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.

При ботаническом описании листьев важным признаком является соотношение длины и ши-

рины листовой пластинки и расположение наиболее широкой части листовой пластинки относительно ее середины. Для хвои, как правило, длина листовой пластинки намного превышает ее ширину, наиболее широкая часть расположена ниже середины листовой пластинки. Если описывать листья по сходству с очертаниями каких-либо предметов, то, учитывая, соотношение длины и ширины, а также расположение широкой части листовой пластинки, чаще всего, листья хвойных описывают как игольчатые (Лотова, 2001).

Несмотря на огромное разнообразие строения листьев покрытосеменных растений, для них характерна плоская листовая пластинка. Определенная площадь такой поверхности, как правило, не вызывает серьезных затруднений. Разработано большое количество методов оценки площади поверхности плоских листовых пластинок (Daughtry, 1990; Уткин и др., 2008). Поскольку листовая пла-

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках бюджетной темы «Пространственно-временная динамика структуры и продуктивности фитоценозов лесных и болотных экосистем на европейском Северо-Востоке России», номер гос. регистрации АААА-А17-117122090014-8.

стинка с точки зрения определения площади поверхности может рассматриваться как объект двумерного пространства, все эти методы являются той или иной разновидностью планиметрических методов. Выбор конкретного метода определяется морфологическими особенностями листа, требуемой точностью измерения, оборудованием и временем, которыми располагает исследователь.

Листовые органы голосеменных имеют вид игл и в рамках рассматриваемой проблемы классифицируются как объекты трехмерного пространства. Их поверхность значительно отличается от плоской поверхности листа покрытосеменных растений. Форма поперечного сечения хвоинок голосеменных варьирует от почти овальной до треугольной (Эзау, 1980), в результате поверхность хвоинки представляет собой комбинацию нескольких поверхностей, которые не всегда являются плоскими. Кроме того, поперечное сечение может меняться как по длине хвоинки, так и в зависимости от расположения хвои в кроне.

С математической точки зрения иглы голосеменных видов растений можно рассматривать как замкнутые правильные многогранники произвольной формы, ограниченные гладкими гранями, имеющими две вершины, или полиэдры. Максимальное число граней в общем случае не превышает 5, у пихты равно 3. Форма граней разнообразна и не отличается правильной геометрией; наиболее распространена игольчатая форма — близкая к треугольной, у пихты напоминающая трапецию (рис. 1а). Расстояние между вершинами иглы значительно превышает расстояние между ее ребрами. Если линию, соединяющую вершины иглы, принять за главную ось, то поперечное сечение такого многогранника, также как и продольное, будет значительно отличаться от правильных геометрических фигур.

Существует ряд апробированных методик определения площади поверхности игл голосеменных (Swank, Schreuder, 1974; Brand, 1987; Bencke, 1979; Lin et al., 2002; Bond-Lamberty et al., 2003; Jonckheere et al., 2004). Однако в основе всех методов оценки площади поверхности отдельной хвоинки лежит общий принцип — это определение площади как произведения длины хвоинки на периметр ее поперечного сечения. Периметр может быть измерен непосредственно, однако чаще поперечное сечение аппроксимируется простой геометрической фигурой, периметр которой рассчитывается по известным формулам, включая легко измеряемые параметры хвоинки — ширину и толщину. Как правило, поперечное сечение хвоинки непостоянно вдоль ее длины, поэтому она разделяется на несколько частей, площади поверхностей которых затем суммируются (Цельникер, 1982; Katsuno, 1987; Цельникер, Ельчина, 1996).

Описанные методики трудоемки и не предназначены для оперативного использования в полевых условиях. Поэтому для практического применения находят корреляцию площади поверхности хвоинки с каким-либо ее легко определяемым параметром: абсолютно сухой массой или длиной хвоинки. Подобные корреляции найдены для многих видов хвойных растений, однако надежных оценок площади поверхности хвои именно пихты сибирской не существует.

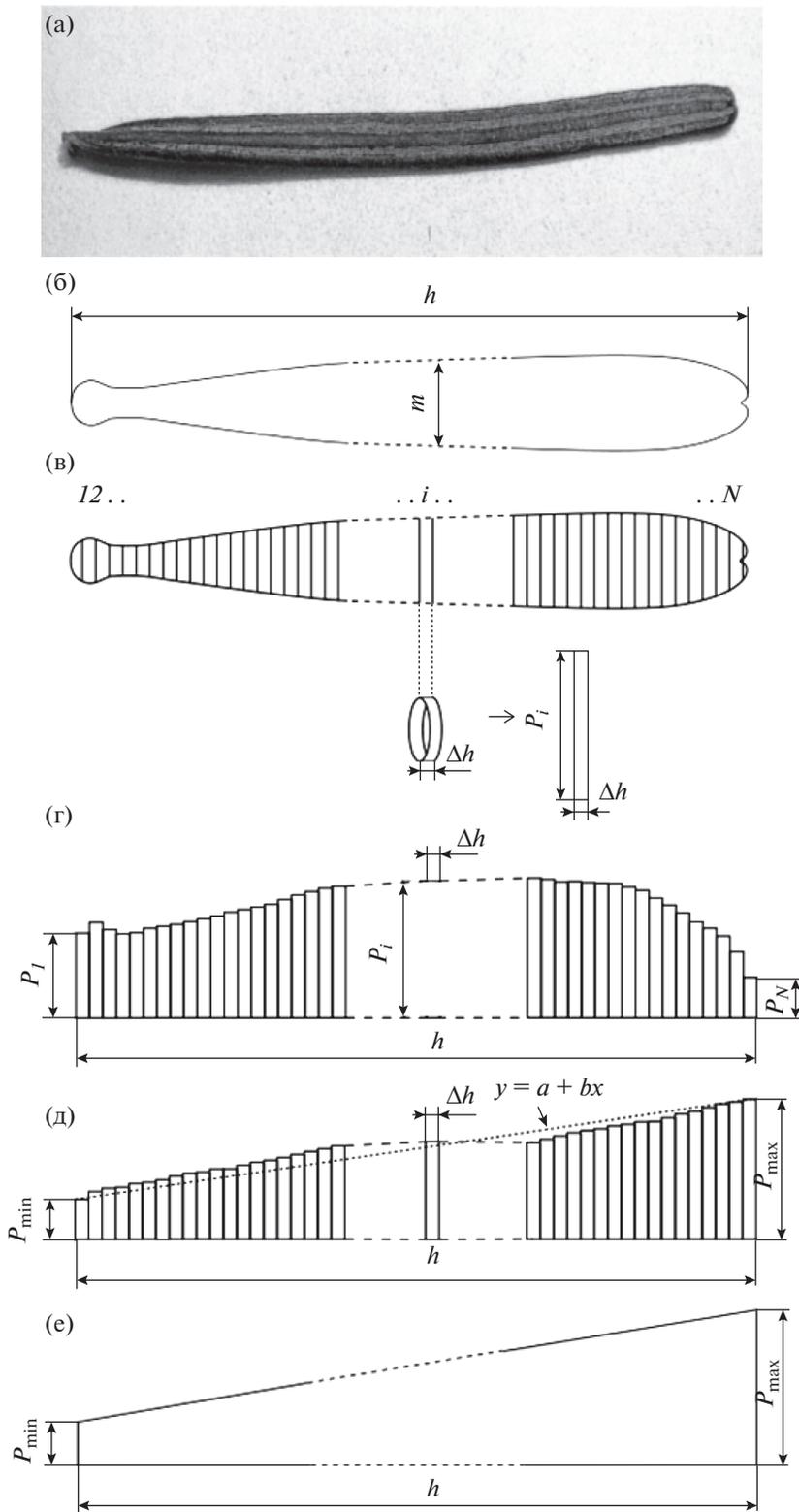
Целью данной работы является оценка площади поверхности отдельной листовой пластинки пихты сибирской, оценка суммарной площади поверхности нескольких хвоинок и нахождение корреляционной зависимости между абсолютно сухой массой нескольких хвоинок и площадью их поверхности.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Изучение хвои пихты сибирской с целью оценки площади поверхности листовой пластинки проводили в 2016–2017 гг. в ельнике чернично-сфагновом в подзоне средней тайги (Княжпогостский район, Республика Коми; 62°16'03" с.ш., 50°41'07" в.д.).

Образцы хвои (30 экз.) отбирались из побегов 1–3-х годов развития средней части кроны у 10 здоровых деревьев пихты сибирской, входящих в первый ярус древостоя. Смешанную выборку хвоинок получали по следующей схеме: побеги отбирали в течение года, хвою для препарирования с этих побегов выбирали случайным образом. За хвою первого года принимали сформированную хвою текущего года. В рамках разработанной методики для оценки площади поверхности единичной хвоинки измеряли среднюю ширину ( $m$ ) и длину ( $h$ ) хвоинок. Ширина измерялась окуляром-микрометром ЛИ-3-10 (ГОСТ 25706-83), погрешность измерения  $\pm 0.05$  мм, длина — линейкой измерительной (ГОСТ 427-75), погрешность измерения  $\pm 0.5$  мм. Далее каждую хвоинку разрезали на сегменты, поперечные срезы хвои готовили на микротоме МЗП-01 (Техном, Россия). Длина сегмента равнялась толщине гистологического среза (50 мкм). Каждый двадцатый сегмент отдельной хвоинки использовали для дальнейших измерений: всего было отобрано 686 гистологических срезов. Готовые препараты просматривали в световом микроскопе "Axiovert 200 M" (Carl Zeiss, Германия). Фотосъемку производили цифровой камерой AxioCam ERc 5s (Carl Zeiss, Германия). Измерение морфометрических параметров (ширины ( $m$ ) и периметра ( $P$ ) сегмента) проводили с использованием программы Carl Zeiss Vision (Carl Zeiss, Германия), погрешность измерения  $\pm 0.05$  мкм.

Для нахождения взаимосвязи между суммарной площадью поверхности хвоинок отдельного



**Рис. 1.** Аппроксимации поверхности отдельной хвоинки пихты сибирской геометрической фигурой. а – фотография хвоинки; б – схематическое изображение хвоинки; в – схема деления хвоинки на сегменты и трансформации поверхности  $i$ -го сегмента в прямоугольник; г – вид общей площади поверхности хвоинки после трансформации всех сегментов; д – вид общей площади поверхности хвоинки после ранжирования сегментов; е – итоговая модель площади поверхности отдельной хвоинки пихты сибирской.  $h$  – длина хвоинки;  $\Delta h$  – длина отдельного сегмента хвоинки;  $N$  – число сегментов;  $m$  – ширина хвоинки в среднем сечении;  $P_i$  – периметр  $i$ -го сегмента;  $P_{\min}$  – минимальный периметр сегмента,  $P_{\max}$  – максимальный периметр сегмента.

побега и их абсолютно сухой массой были отображены 32 побега 1–3-го года жизни. Определяли среднее значение длины и ширины хвоинок каждого побега (объем выборки хвоинок для каждого побега  $n = 30$ ), измеряли абсолютно сухую массу всех хвоинок каждого побега (весы лабораторные электронные Adventurer, Швейцария, погрешность измерения  $\pm 0.02$  г).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Непосредственное измерение периметра поперечного сечения хвоинки дает более точную его оценку, чем аппроксимация подходящей геометрической фигурой. Однако непостоянство формы сечения по длине хвоинки ограничивает возможность использования этой оценки. Для преодоления указанного ограничения была разработана и использовалась методика, описанная ниже.

Рассмотрим схематичную модель отдельной хвоинки (рис. 1б). Разделим хвоинку сечениями, ортогональными главной оси хвоинки, на  $N$  частей длиной  $\Delta h$  (рис. 1в). При большом числе сечений ( $N \rightarrow \infty$ ) длина отдельного сегмента минимальна ( $\Delta h \rightarrow 0$ ). Тогда полученные  $N$  сегментов могут рассматриваться как тела, ограниченные цилиндрической боковой поверхностью. Другими словами, при  $N \rightarrow \infty$  и  $\Delta h \rightarrow 0$  периметры оснований отдельного сегмента можно считать равными. Обозначим периметр плоскости основания  $i$ -го сегмента как  $P_i$ . Тогда площадь боковой поверхности  $i$ -го сегмента равна:

$$S_i = P_i \Delta h. \quad (1)$$

Геометрические построения и теоретические обоснования в двумерном пространстве упрощаются. Для того, чтобы совершить переход в двумерное пространство, жестко трансформируем поверхность сегмента в плоскость. Жесткая трансформация означает, что между площадью поверхности сегмента и площадью поверхности получившегося в результате преобразования прямоугольника существует взаимно-однозначное соответствие, т.е. они эквивалентны (Муньос, 2014). Следовательно, площадь поверхности  $i$ -го сегмента эквивалентна площади прямоугольника со сторонами, равными  $P_i$  и  $\Delta h$  (рис. 1в). Соответственно, общая площадь поверхности хвоинки  $S$  может быть рассчитана как предел суммы площадей поверхностей  $N$  сегментов или  $N$  прямоугольников при  $\Delta h \rightarrow 0$ :

$$S = \lim_{\Delta h \rightarrow 0} \sum_{i=1}^N S_i = \lim_{\Delta h \rightarrow 0} \sum_{i=1}^N P_i \Delta h = \int_0^h P_i(h) dh. \quad (2)$$

Однако, в силу непостоянства сечения хвоинки, периметр  $P_i$ , изменяется по длине хвоинки т.е. периметр является функцией длины хвоинки  $P = f(h)$ , явный вид которой неизвестен. Это приводит к

тому, что геометрическая фигура, полученная в результате трансформации поверхности хвоинки, не является правильным геометрическим телом, площадь поверхности которого рассчитывается просто (рис. 1г). Чтобы придать геометрической фигуре необходимую правильную форму, нужно осуществить еще одно преобразование.

Для этого ранжируем прямоугольники по возрасту (или убыванию) большей стороны ( $P_i$ ). В результате получим геометрическую фигуру, которая для хвои пихты хорошо аппроксимируется трапецией, основания которой равны  $P_{\min}$  и  $P_{\max}$  ( $P_{\min}$  – минимальное  $P_i$ ,  $P_{\max}$  – максимальное  $P_i$ ), одна боковая сторона перпендикулярна основаниям трапеции и равна  $h$ , а координаты множества точек другой боковой стороны удовлетворяют линейному уравнению (рис. 1д).

Таким образом, для хвои пихты проведенные преобразования позволяют сопоставить площади поверхности хвоинки площади трапеции (рис. 1е). Следовательно, площадь поверхности хвоинки может быть рассчитана как площадь трапеции:

$$S = \frac{P_{\min} + P_{\max}}{2} h, \quad (3)$$

где  $P_{\min}$  – минимальный периметр,  $P_{\max}$  – максимальный периметр,  $h$  – длина хвоинки.

Выражение  $\bar{P} = \frac{P_{\min} + P_{\max}}{2}$  представляет собой средний периметр, и, следовательно, площадь поверхности может быть найдена как:

$$S = \bar{P} h. \quad (4)$$

Верификацию гипотезы о линейности боковой стороны геометрической фигуры, полученной при трансформации хвоинки, осуществляли следующим образом. Для каждой из 30 сегментированных хвоинок был построен вариационный ряд: проведено ранжирование сегментов по возрастанию величины периметра (сегменты апикальной части, имеющей вогнутость, не учитывались). По результатам ранжирования для каждой хвоинки были найдены регрессионные уравнения зависимости периметра сегмента от его расположения на оси хвоинки. Во всех случаях лучшей моделью оказалось линейное уравнение  $y = a + bx$ , коэффициент детерминации не менее 0.73. Анализ моделей подтвердил их качество. В качестве примера на рис. 2 представлена аппроксимация зависимости ранжированных по величине значений периметров сегментов от номера варианты для одной из хвоинок, входящих в выборку. Таким образом, боковая сторона геометрической фигуры, полученной в результате преобразования исходной поверхности хвоинки, хорошо аппроксимируется прямой, соответственно в качестве модели площади поверхности хвоинки может быть принята площадь трапеции.

Практическое применение модели площади отдельной хвоинки (4) предполагает знание двух ее параметров: длины и среднего периметра. Измерение длины хвоинки является стандартной процедурой, оценка величины среднего периметра является результатом ряда сложных косвенных измерений. Упростить оценку периметра можно, используя его корреляцию с каким-либо параметром хвоинки, измеряемым простым прямым способом. Логично предположить наличие корреляции между величиной среднего периметра и значением средней ширины хвоинки. Количественную оценку предполагаемой взаимосвязи исследовали методами регрессионного анализа. В качестве переменных величин рассматривались периметр и ширина 686 поперечных срезов 30 хвоинок, измеренных в микрометрах. Взаимосвязь между шириной ( $m_i$ ) и периметром сегмента ( $P_i$ ), аппроксимировалась линейной функцией:

$$P_i = a_0 + b_0 m_i. \quad (5)$$

Анализ качества модели показал, что ее параметры статистически значимы, модель описывает имеющиеся данные адекватно. Основные показатели, характеризующие модель и ее параметры, представлены в табл. 1, график подбора регрессионного уравнения приведен на рис. 3.

Оценкой границ доверительного интервала значения периметра  $\hat{P}_i$ , рассчитанного по уравнению (5), является величина  $t_{\alpha/2, N-2} S_{\hat{P}_i}$ , где  $t_{\alpha/2, N-2}$  – коэффициент Стьюдента при заданном уровне значимости  $\alpha$  и числе степеней свободы,  $S_{\hat{P}_i}$  – оценка стандартного отклонения  $\hat{P}_i$  (Дрейпер, 1986). В диапазоне наиболее вероятных значений, которые может принимать ширина сформировавшейся хвоинки пихты (1.1–1.5 мм), максимальное значение оценки стандартного отклонения  $S_{\hat{P}_i} = \pm 0.045$  мм. При  $\alpha = 0.05$  и  $N = 686$  величина  $t_{\alpha/2, N-2} S_{\hat{P}_i} = 0.088$  мм. Приняв это значение за оценку верхней и нижней границ 95% доверительного интервала, результат оценки периметра хвоинки по уравнению (5) можно записать как  $\hat{P}_i \pm \pm 0.088$  мм.

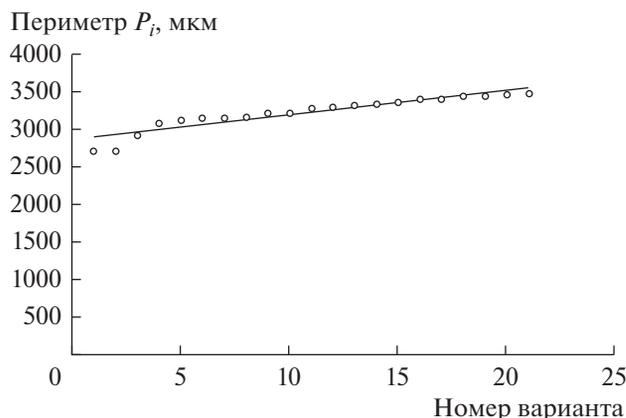


Рис. 2. График уравнения регрессии: модель зависимости величины периметров сегментов хвоинки от номера в вариационном ряду. Маркер в виде круга – экспериментальные данные, сплошная линия – уравнение регрессии,  $R^2 = 0.87$ .

Как правило, при проведении эколого-физиологических исследований требуется знание площади поверхности всех хвоинок на побеге. Методика расчета суммарной площади поверхности хвоинок основана на выборочных оценках длины и ширины хвоинки. Выборочное среднее значение ширины хвоинки использовали для оценки среднего периметра.

Выражение для вычисления суммарной площади поверхности хвоинок побега имеет вид:

$$S_{\Sigma} = \bar{P} \bar{h} N, \quad (6)$$

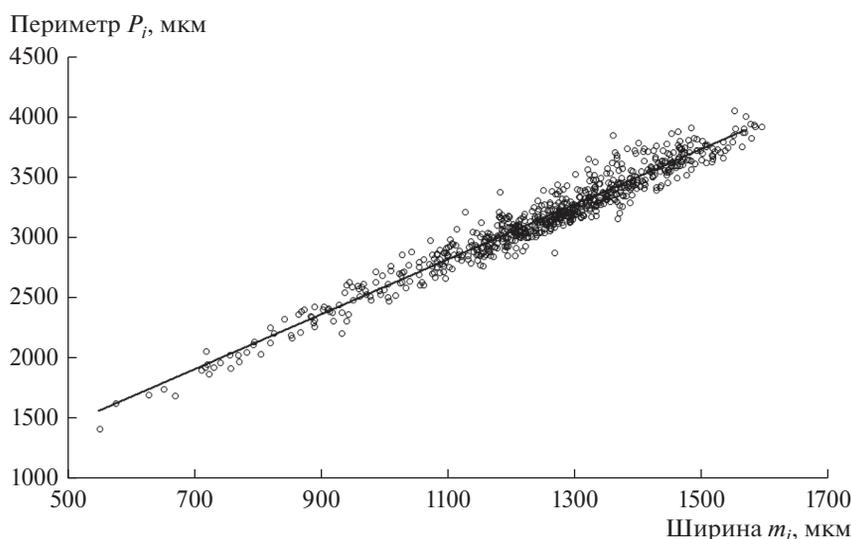
где  $\bar{P} = a_0 + b_0 \bar{m}$  – средний периметр хвоинки ( $\bar{m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i$ ), мм,  $\bar{h} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i$  – средняя длина хвоинки, мм,  $N$  – число хвоинок на побеге. Погрешность оценки суммарной площади поверхности хвоинок побега рассчитывается стандартным образом как погрешность результата косвенного измерения (Тейлор, 1985).

В исследовательской практике находит применение еще одна корреляционная зависимость, которая связывает суммарную площадь поверхности хвоинок побега и их абсолютно сухую мас-

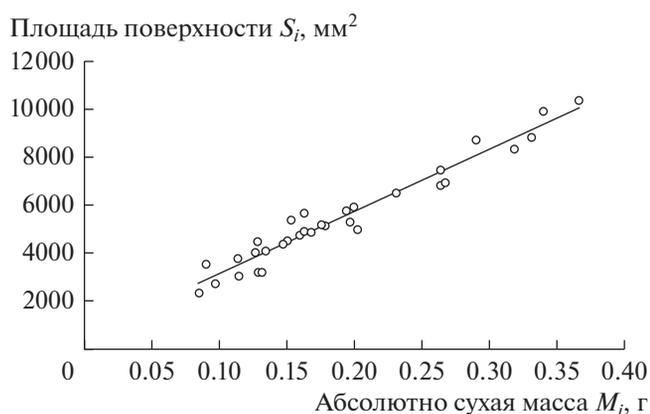
Таблица 1. Показатели качества и параметры регрессионного уравнения связи периметра и ширины хвоинки пихты

Число наблюдений	Коэффициент детерминации $R^2$	Расчетное значение $F$ -критерия	$p$ -уровень	Коэффициент уравнения	Значение коэффициента	Стандартная ошибка коэффициента $SE$	Расчетное значение $t$ -критерия	$p$ -уровень
686	0.974	12358.11	0.00	$a_0$	304.02	0.337	11.71	0.00
				$b_0$	2.29	0.009	111.17	0.00

Примечание. Уровень значимости  $\alpha = 0.05$ .



**Рис. 3.** График уравнения регрессии: модель зависимости периметра от ширины хвоинки. Маркер в виде круга – экспериментальные данные, сплошная линия – уравнение регрессии  $y = 304.02 + 2.29 \cdot x$ ,  $R^2 = 0.97$ .



**Рис. 4.** График уравнения регрессии: модель зависимости площади поверхности хвоинки от ее абсолютно сухой массы. Маркер в виде круга – экспериментальные данные, сплошная линия – уравнение регрессии,  $R^2 = 0.95$ .

су. Иногда более удобным является измерение массы всех хвоинок побега, предлагаемая корреляция позволяет оценивать площадь поверхности хвои побега по суммарной массе его хвоинок. Для

построения регрессионного уравнения, связывающего площадь поверхности хвоинок побега и их абсолютно сухую массу, использовали значения суммарной площади поверхности хвои побега, рассчитанные по вышеприведенной методике. Предпочтение было отдано линейной модели

$$S_{\Sigma i} = a_1 + b_1 M_i, \quad (7)$$

где  $S_{\Sigma i}$  – средняя суммарная площадь поверхности хвои побега,  $\text{мм}^2$ ,  $M_i$  – абсолютно сухая масса хвои побега, г.

Анализ модели подтвердил статистическую значимость параметров уравнения регрессии и его адекватность натурным данным. Основные показатели, характеризующие качество и значимость модели и ее параметров, представлены в табл. 2, график подбора регрессионного уравнения приведен на рис. 4.

В диапазоне наблюдаемого в эксперименте изменения абсолютно сухой массы от 0.1 до 0.35 г максимальное значение стандартного отклонения оценки площади поверхности хвои побега  $S_{S_{\Sigma i}} = \pm 160 \text{ мм}^2$ , соответственно  $t_{\alpha/2, N-2} S_{\hat{P}_i} = 2.04 \times 160 \approx 326 \text{ мм}^2$  ( $\alpha = 0.05$ ;  $N = 32$ ). Приняв

**Таблица 2.** Показатели качества и параметры регрессионного уравнения связи суммарной площади поверхности и абсолютно сухой массы хвоинок побега пихты и их оценки

Число наблюдений	Коэффициент детерминации $R^2$	Расчетное значение $F$ -критерия	$p$ -уровень	Коэффициент уравнения	Значение коэффициента	Стандартная ошибка коэффициента $SE$	Расчетное значение $t$ -критерия	$p$ -уровень
32	0.949	136.17	0.00	$a_1$	553.51	224.62	2.46	0.02
				$b_1$	25970.12	1099.50	23.62	0.00

Примечание. Уровень значимости  $\alpha = 0.05$ .

это значение за оценку верхней и нижней границ 95% доверительного интервала, результат оценки площади поверхности хвои побега по уравнению (6) можно записать как  $\hat{S}_{\Sigma_i} \pm 326 \text{ мм}^2$ .

Таким образом, оценка площади поверхности отдельной хвоинки пихты сибирской находится по формуле (4), оценка суммарной площади поверхности хвоинок побега пихты сибирской – по формуле (6) или по уравнению (7). Точность оценки суммарной площади по формуле (6) выше.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате наших исследований была разработана методика оценки площади поверхности листовой пластинки пихты сибирской. Отличительная особенность методики состоит в аппроксимации поверхности хвоинки простой геометрической фигурой (для пихты – это трапеция), при этом для оценки площади поверхности используются легко измеряемые параметры листовой пластинки: ее длина и ширина. Методика адаптирована для оценки суммарной площади поверхности любого количества хвоинок, например, хвоинок отдельного побега. Возможна оценка суммарной площади поверхности хвои побега пихты на основе другого параметра: найдена корреляционная зависимость, связывающая абсолютно сухую массу и среднюю суммарную площадь поверхности нескольких хвоинок. Полученная корреляция позволяет оценивать площадь поверхности хвои побега по массе его хвоинок. Представленная методика может применяться для оценки площади поверхности листовых пластинок хвойных, имеющих другую форму.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дрейнер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Финансы и статистика, 1986. 366 с.  
 Лотова Л.И. Морфология и анатомия высших растений. М.: Эдиториал УРСС, 2001. 528 с.

Муньос В. Мир математики. М.: Де Агостини, 2014. Т. 36. Деформируемые формы. Топология. 176 с.  
 Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок. М.: Мир, 1985. 272 с.

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

Цельникер Ю.Л., Ельчина Л.М. Упрощенный метод определения площади поверхности хвои лиственницы // Лесоведение. 1996. №3. С. 86–91.

Цельникер Ю.Л. Упрощенный метод определения поверхности хвои сосны и ели // Лесоведение. 1982. № 4. С. 85–88.

Эзю К. Анатомия семенных растений. М.: Мир. 1980. Т. 2. 400 с.

Bond-Lamberty B., Wang C., Gower S.T. The use of multiple measurement techniques to refine estimates of conifer needle geometry // Canadian J. Forest Research. 2003. V. 33. P. 101–105.

Benecke U. Surface area of needles in pinus radiata – variation with respect to age and crown position // New Zealand J. Forestry Science. 1979. V. 9. № 3. P. 267–71.

Brand D.G. Estimating the surface area of spruce and pine foliage from displaced volume and length // Canadian J. Forest Research. 1987. V. 17. P. 1305–1308.

Daughtry C.S.T. 1990. Direct measurements of canopy structure // Remote Sensing Reviews. V. 5. № 1. P. 45–60.

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. V. 121. P. 19–35.

Katsuno M. Needle Area Measurement by the Cut Method and Estimation of Specific Leaf Area in Cryptomeria japonica // Ecology Research. 1987. V. 2. P. 203–213.

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 J. Botany. 2002. V. 80. P. 927932.

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. V. 20. № 1. P. 91–100.

## A New Approach to the Assessment of the Surface Area of the Siberian Fir Needles

S. I. Tarasov<sup>1</sup>, \* and N. V. Gerling<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Biology, Komi Scientific Centre, Ural Branch of the RAS, Kommunisticheskaya st., 28, Syktyvkar, 167982 Russia

\*E-mail: tarasov@ib.komisc.ru

This paper presents the results of a study of the Siberian fir needles morphometric features, carried out with the aim of developing a method for assessing the surface area of a fir needle. The relevance of this topic is associated with the lack of research dedicated specifically to methods for determining the surface area of Siberian fir needles. In the course of the research, a corresponding mathematical model was obtained. It is shown that as a result of a number of geometric transformations, the surface area of the needles can be considered and estimated as the area of a trapezoid. The parameters for estimating the area of the trapezoid are derived from the length and width of the needles. Samples of shoots and needles of Siberian fir, which were used to determine the morphometric parameters of needles required for model verification, were taken from healthy Siberian fir trees of the first level of the bilberry-sphagnum spruce forest of the middle taiga zone

(Knyazhpogostsky district, Komi Republic) in 2016–2017. The relative error in assessing the surface area of an individual needle using the resulting model does not exceed 3%. The above-mentioned approach to modeling the surface area of individual fir needles can be applied to other conifers. An algorithm is given that allows using the resulting model to estimate the average total surface area of any number of needles, for example, one or several shoots. When determining the total surface area, the sample characteristics of the morphometric indicators of needles are used as model parameters. A correlation dependence was obtained linking the dry weight and the average total surface area of the Siberian fir shoot needles. This makes it possible to assess the surface area of the fir shoots needles.

*Keywords:* Siberian fir, needles surface area, modeling.

**Acknowledgements:** The work has been carried out within the framework of the budget program “Structure and productivity spatial-temporal dynamics in the forest and bog ecosystems’ phytocenoses of the North-East of the European Russia”, No. AAAA-A17-117122090014-8.

## REFERENCES

- Benecke U., Surface area of needles in *Pinus radiata* – variation with respect to age and crown position, *New Zealand J. Forestry Science*, 1979, Vol. 9, No. 3, pp. 267–271.
- Bond-Lamberty B., Wang C., Gower S.T., The use of multiple measurement techniques to refine estimates of conifer needle geometry, *Canadian J. Forest Research*, 2003, Vol. 33, pp. 101–105.
- Brand D.G., Estimating the surface area of spruce and pine foliage from displaced volume and length, *Canadian J. Forest Research*, 1987, Vol. 17, No. 10, pp. 1305–1308.
- Daughtry C.S.T., Direct measurements of canopy structure, *Remote Sensing Reviews*, 1990, Vol. 5, No. 1, pp. 45–60.
- Dreiper N., Smit G., *Prikladnoi regressiionnyi analiz* (Applied regression analysis), M.: Finansy i statistika, 1986, 366 p.
- Ezau K., *Anatomiya semennykh rastenii* (Anatomy of seed plants), M.: Mir, 1980, Vol. 2, 400 p.
- 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, No. 19–35.
- Katsuno M., Needle Area Measurement by the Cut Method and Estimation of Specific Leaf Area in *Cryptomeria japonica*, *Ecology Research*, 1987, Vol. 2, pp. 203–213.
- 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 J. Botany*, 2002, Vol. 80, pp. 927–932.
- Lotova L.I., *Morfologiya i anatomiya vysshikh rastenii* (Morphology and anatomy of higher plants), M.: Editorial URSS, 2001, 528 p.
- Mun’os V., *Mir matematiki* (World of mathematics), M.: De Agostini, 2014, Vol. 36. Deformiruemye formy. Topologiya (Deformable forms. Topology), 176 p.
- 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, No. 1, pp. 91–100.
- Teilor D., *Vvedenie v teoriyu oshibok* (An introduction to error analysis), M.: Mir, 1985, 272 p.
- Tsel’niker Y.L., Uproshchennyi metod opredeleniya ploshchadi poverkhnosti khvoi listvennitsy (A short-cut technique of the needles surface area estimation for larch), *Lesovedenie*, 1996, No. 3, pp. 86–91.
- Tsel’niker Y.L., Uproshchennyi metod opredeleniya poverkhnosti khvoi sosny i eli (The short-cut technique of needles surface area estimation for a pine and a spruce), *Lesovedenie*, 1982, No. 4, pp. 85–88.
- Utkin A.I., Ermolova L.S., Utkina I.A., *Ploshchad’ poverkhnosti lesnykh rastenii: sushchnost’, parametry, ispol’zovanie* (The surface area of forest plants: essence, parameters, use), M.: Nauka, 2008, 292 p.