

Методика исследований

УДК 58.087

К МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОЩАДИ ЛИСТЬЕВ
РАСТЕНИЙ СЕМЕЙСТВА *NYMPHAEACEAE* SALISB.

А. М. Чернова

Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН

152742 пос. Борок, Ярославская обл., Некоузский р-н, e-mail: nuphar@mail.ru

Поступила в редакцию 14.10.2020

Лист – основной фотосинтезирующий орган растений. С площадью листа связаны величина ассимилирующей поверхности, фотосинтез, дыхание, транспирация, удельная площадь листа и продукция. Необходимость получения данных о площади листьев для водных растений не вызывает сомнений. Особое значение этот показатель имеет при изучении продуктивности макрофитов водоемов и водотоков, а также исследовании процессов их зарастания.

Цель настоящей работы – получить регрессионные модели для определения площади листьев широко распространенных гидрофитов с плавающими на воде листьями – *Nuphar lutea* (L.) Smith и *Nymphaea candida* C. Presl. Эти виды обладают высокой экологической валентностью и вносят значительный вклад в общую продуктивность водных объектов.

Корреляционный анализ морфометрических параметров листьев обоих видов показал, что рост листовых пластинок изометрический. Это позволило провести регрессионный анализ и выявить степенную зависимость фактической площади листа (LA) от морфометрических показателей l_1 , l_2 , и w . Модели зависимости выглядят следующим образом – для *Nuphar lutea*: $LA_{N,l}=2.12 \cdot l_1^{1.81}$; $LA_{N,l}=0.64 \cdot l_2^{1.95}$; $LA_{N,w}=0.93 \cdot w^{2.05}$; для *Nymphaea candida*: $LA_{N,c}=3.88 \cdot l_1^{1.79}$; $LA_{N,c}=0.85 \cdot l_2^{1.94}$; $LA_{N,c}=0.93 \cdot w^{1.96}$, где l_1 – длина листовой пластинки от места крепления черешка до верхушки, l_2 – общая длина и w – ширина листовой пластинки. О высокой степени соответствия трендовой модели регрессии исходным данным свидетельствует значительный коэффициент достоверности аппроксимации, он больше 0.9 и приближается к 1. Уравнения регрессии для определения площади листьев гидрофитов в настоящей работе получены впервые. Это достоверный косвенный метод определения площади листьев кувшинковых. Степенные функции справедливы с биологической точки зрения и верны с математической. Их без ограничений можно применять в полевых условиях не нанося ущерб растительным сообществам. Площадь листа можно определить, зная всего лишь один морфометрический параметр листа. Это быстрый, надежный и экономичный метод, позволяющий проводить сезонные исследования динамики роста и развития одних и тех же растений на постоянных учетных площадках, оценивать степень зарастания водоемов и водотоков, прогнозировать дальнейшее развитие сообществ. Метод открывает возможность проводить исследования и мониторинг на водоемах и водотоках особо охраняемых природных территорий.

Ключевые слова: морфология листа, изометрический рост, ассимилирующая поверхность, фотосинтезирующая поверхность, моделирование площади листа, неразрушающие измерения, регрессионная степенная модель, кувшинки, *Nuphar lutea*, *Nymphaea candida*.

DOI:

ВВЕДЕНИЕ

Лист – основной фотосинтезирующий орган растений. Форма и размер листа зависят от вида растения, тесно связаны с климатом и абиотическими условиями произрастания. Очень важный показатель в изучении роста и развития растений – это площадь листьев [Gong et al., 2013; Costa et al., 2016]. С ним тесно связаны величина ассимилирующей поверхности, фотосинтез, дыхание, транспирация, удельная площадь листа и продукция [Filbin, Hough, 1983; Klok, van der Velde, 2017; Liu M. et al., 2017]. Существуют прямые и косвенные методы определения площади листа.

Прямые методы основаны на сборе листьев и включают контурный (гравиметрический) анализ площади листа или использование различных сканирующих планиметров

(например, LI-3000, Licor, NE, USA). Применение портативного сканирующего планиметра актуально для невысоких растений с небольшим количеством листьев, и он не подходит для определения площади крупных листьев [Nyakwende et al., 1997; Rouphael et al., 2010]. Прямые методы наиболее точные, однако, губительны для растений, очень трудоемкие, неудобные в использовании и довольно дорогие [Jonckheere et al., 2004; Bréda, 2008; Liu Z. et al., 2017]. Кроме того, с помощью таких методов невозможно изучать сезонную динамику роста и развития растений.

Косвенные методы основаны на измерении морфологических параметров листьев растений (длина, ширина), которые в дальнейшем используются в качестве входных данных

в математическую модель регрессии [Blanco, Folegatti, 2003; Jonckheere et al., 2004; Liu Z. et al., 2017]. Регрессионные модели широко используются для оценки площади и массы листьев различных сельскохозяйственных культур, например, кукурузы [Birch et al., 1998], персика [Espinoza-Espinoza et al., 1998], кофе [Antunes et al., 2008], перца [Rojas-Lara et al., 2008], авокадо и папайи [Cardona et al., 2009], манго [Ghoreishi et al., 2012], розы [Fascella et al., 2013], какао [Salazar et al., 2018], оливок [Koubouris et al., 2018]. Известны работы, в которых получены регрессионные модели для быстрой оценки площади и массы листьев некоторых широколиственных видов деревьев [Liu Z. et al., 2017]. В каждом случае уравнения регрессии подходят исключительно для конкретного вида растения. Все эти модели основаны на корреляции между морфометрическими параметрами и площадью листьев [Bréda 2003; Jonckheere et al., 2004]. Важно, что косвенные методы не требуют сбора растений. Они позволяют быстрее определить площадь листа и в конечном итоге подходят для автоматизации всех расчетов [Costa et al., 2016]. К косвенным методам определения площади листа можно также отнести фотосъемку и дистанционное зондирование поверхности с последующей дешифровкой снимков. Для определения площади листьев разрабатываются специальные компьютерные программы [Igathinathane et al., 2006] и мобильные приложения [Gong et al., 2013; Tech et al., 2018].

Описанные выше наработки и методы, относятся к наземным растениям. К сожалению, опубликованных аналогичных исследований для водных растений найти не удалось.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Сбор плавающих листьев кувшинковых проводили в вегетационный период 2019 г. В одном из заливов р. Волга (Угличское водохранилище) в окрестностях деревни Плешково Кимрского района Тверской области (56°58'50.4" с.ш., 37°27'45.2" в.д.). Всего собрано 108 листьев *Nuphar lutea* и 170 – *Nymphaea candida*.

В камеральных условиях листья очищали проточной водой, при помощи фильтровальной бумаги удаляли излишки воды, на бумаге очерчивали контуры листьев. Далее линейкой [ГОСТ 427-75] с точностью 0.1 см. измеряли основные параметры листовых пластинок (рис. 1): длину листовой пластинки от места крепления черешка до верхушки (l_1), общую длину (l_2) и ширину (w) листовых пластинок. Фактическую площадь листьев (см²) измеряли с помощью планиметра Planix 7 (рис.2). Для анализа

Имеются лишь отрывочные сведения о площади листьев некоторых видов гидрофитов [Brock et al., 1983; Filbin, Hough 1983; Boese et al., 2008; Sinden-Hempstead, Killingbeck, 1996].

В настоящее время необходимость получения данных о площади листьев для водных растений не вызывает сомнений. Особое значение этот показатель имеет при изучении продуктивности макрофитов водоемов и водотоков, а также исследовании процессов их за-растания.

Цель работы – получить регрессионные модели для определения площади листьев широко распространенных гидрофитов с плавающими на воде листьями – *Nuphar lutea* (L.) Smith и *Nymphaea candida* C. Presl. (*Nymphaeaceae*).

Ассоциации с участием этих видов наиболее типичны для озер, водохранилищ, стариц, малых и средних рек. Они образуют как монодоминантные ценозы, так и сообщества с другими гидрофитами (*Lemna minor* L., *Ceratophyllum demersum* L., *Nymphaea alba* L., *Potamogeton lucens* L., *Potamogeton natans* L.) и с гелофитами (*Sagittaria sagittifolia* L., *Butomus umbellatus* L., *Sparganium erectum* L.). Наземная форма растения становится полноценным участником ценозов гигрогелофитов и даже мезофитов, но встречается лишь на обсыхающих мелководьях и реже отмелях. Растения обладают высокой экологической валентностью и вносят значительный вклад в общую продуктивность водоемов и водотоков [Папченков, 2001 (Papchenkov 2001); Chernova, 2015; Klok, van der Velde, 2017].

морфометрических данных применяли корреляционный и регрессионный анализы.

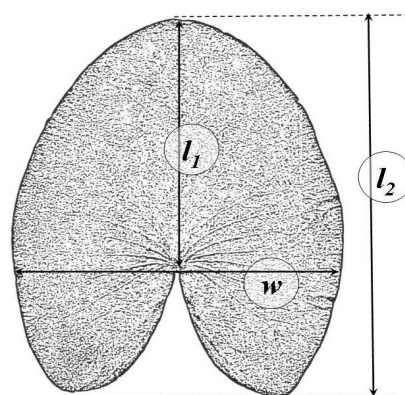


Рис. 1. Основные измеряемые параметры у листовых пластинок кувшинковых.

Fig. 1. The main measured parameters of leaf blades of water lilies.



Рис.2. Планиметр Planix 7 для измерения площади.

Fig. 2. Planix 7 planimeter for area measurement.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С помощью корреляционного анализа выявили зависимость между длиной листовой пластинки от места крепления черешка (l_1) и общей длиной листовой пластинки (l_2), между длиной листовой пластинки от места крепления черешка (l_1) и ее шириной (w), а также между общей длиной листовой пластинки (l_2) и

ее шириной (w). Определили коэффициент линейной корреляции (r), который показывает тесноту связи и то, насколько изменения одного признака объясняются изменениями другого (табл. 1). Рассчитанные коэффициенты парной корреляции являются достоверными при уровне значимости $\alpha=0.05$.

Таблица 1. Значения коэффициентов линейной корреляции (r) для признаков l_1 , l_2 и w

Table 1. Values of coefficients of linear correlation (r) for the characteristics l_1 , l_2 and w

Параметры / Parameters	<i>Nuphar lutea</i>	<i>Nymphaea candida</i>
l_1 и l_2	0.99	0.99
l_1 и w	0.99	0.97
l_2 и w	0.98	0.99

Такие высокие значения корреляции свидетельствуют о значительной степени тесноты связи между рассматриваемыми признаками. Аналогичные результаты были получены ранее [Chernova, 2015; Chernova, 2019]. Рост листовых пластинок изометрический – равномерный, и форма листа в процессе роста меняется незначительно. Этот факт позволил провести дальнейший регрессионный анализ и выявить степенную зависимость фактической площади листа (LA – leaf area) от морфометрических показателей l_1 , l_2 , и w . Модели зависи-

мости площади листа от его общей длины, длины от верхушки до места крепления черешка и от его ширины для *Nuphar lutea* и *Nymphaea candida* представлены на рис. 3 и рис. 4 соответственно.

В табл. 2 представлены регрессионные уравнения для расчета площади плавающих листьев (LA) *Nuphar lutea* и *Nymphaea candida* в зависимости от измеряемых морфометрических показателей: длиной листовой пластинки от места крепления черешка (l_1), общей длины листовой пластинки (l_2) и ее ширины (w).

Таблица 2. Регрессионные модели для расчета площади плавающих листьев *Nuphar lutea* и *Nymphaea candida* по морфометрическим показателям

Table 2. Regression models for calculating the area of floating leaves of *Nuphar lutea* and *Nymphaea candida* by morphometric parameters

<i>Nuphar lutea</i>		<i>Nymphaea candida</i> :	
Регрессионная модель Regression model	Коэффициент достоверности аппроксимации (R^2) Confidence coefficient of the approximation (R^2)	Регрессионная модель Regression model	Коэффициент достоверности аппроксимации (R^2) Confidence coefficient of the approximation (R^2)
$LA_{N,l}=2.12 \cdot l_1^{1.81}$	0.99	$LA_{N,c}=3.88 \cdot l_1^{1.79}$	0.94
$LA_{N,l}=0.64 \cdot l_2^{1.95}$	0.99	$LA_{N,c}=0.85 \cdot l_2^{1.94}$	0.96
$LA_{N,l}=0.93 \cdot w^{2.05}$	1.00	$LA_{N,c}=0.93 \cdot w^{1.96}$	0.97

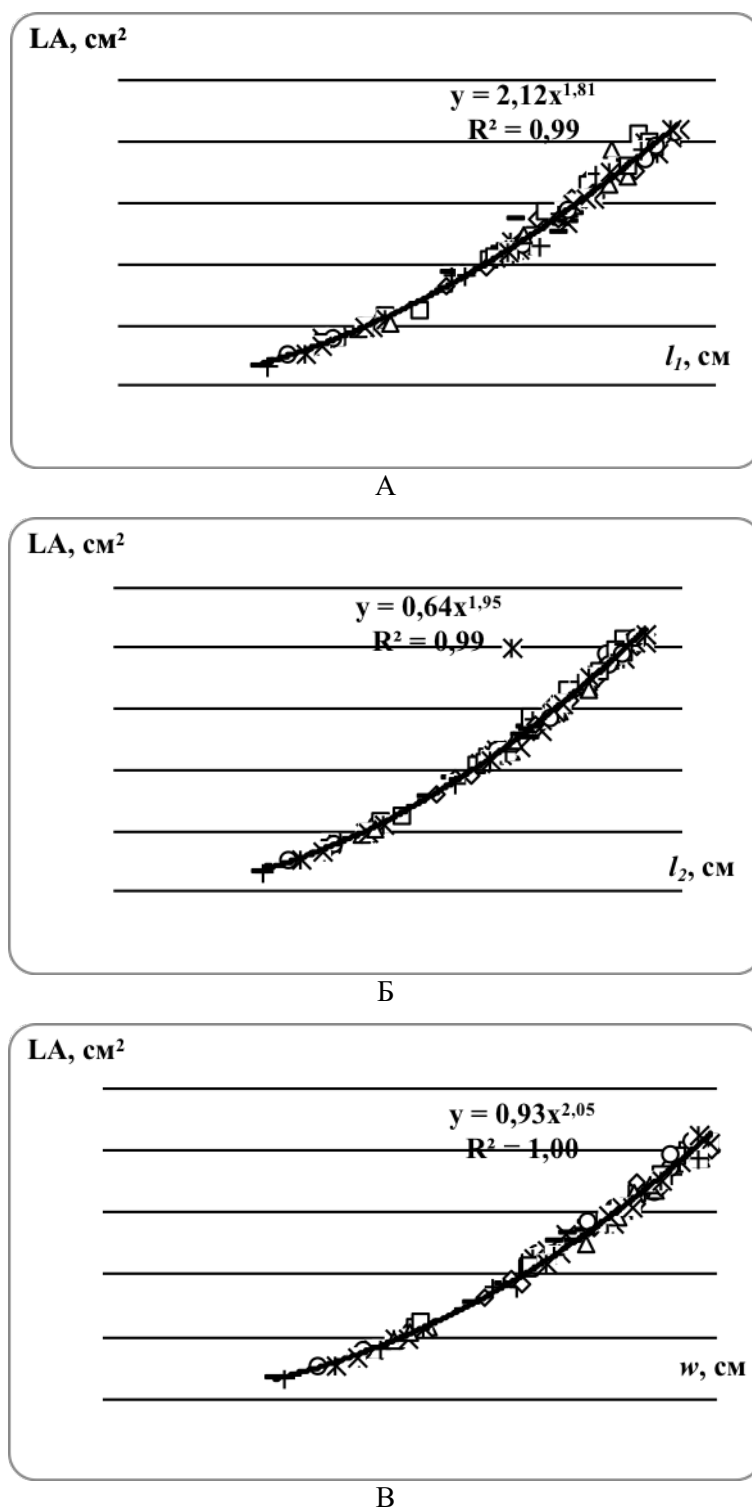


Рис. 3. Модели зависимости площади листа от длины листа от верхушки до места крепления черешка (А), общей длины листа (Б) и от его ширины (Б) для *Nuphar lutea*

Fig. 3. Models of the leaf area dependence on the leaf length from the tip to the place of attachment of the petiole (А), the total length of the leaf (Б) and its width (Б) for *Nuphar lutea*

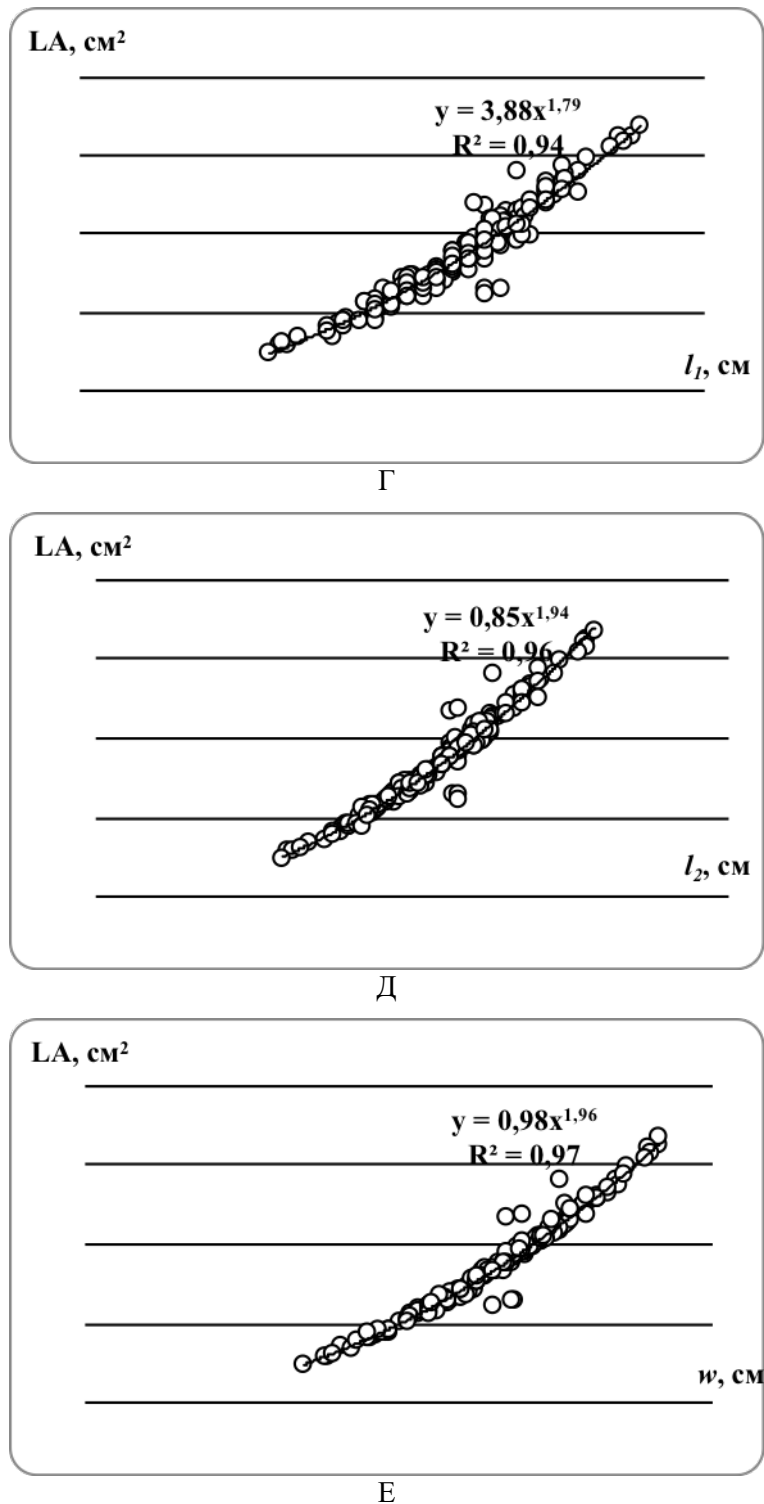


Рис. 4. Модели зависимости площади листа от длины листа от верхушки до места крепления черешка (Г), общей длины листа (Д) и от его ширины (Е) для *Nymphaea candida*.

Fig. 4. Models of the leaf area dependence on the leaf length from the tip to the place of attachment of the petiole (Г), the overall length of the leaf (Д) and its width (Е) for *Nymphaea candida*.

Из таблицы видно, что для каждого уравнения регрессии коэффициент достоверности аппроксимации выше 0.9 и приближается к 1, это свидетельствует о высокой степени соответствия трендовой модели исходным данным.

Регрессионный метод оценки площади листьев различных древесным растений, плодовых и овощных культур применяется многими исследователями [Montero et al., 2000; Buttaro et al., 2015; Blanco, Folegatti, 2003; De Swart et al., 2004; Bakhshandeh et al., 2011; Silva

et al., 2008; Zhang, Liu, 2010; De Maria et al., 2018; Tsialtas, Maslaris, 2007; Firouzabadi et al., 2015; Cristofori et al., 2007; Koubouris et al., 2018]. Авторы этих исследований так же проводили корреляционный и регрессионный анализ между длиной, шириной и площадью листа. Большинство полученных регрессионных уравнений расчета площади листьев являются линейными, общего вида $y=ax+b$, что верно с математической точки зрения, но ошибочно с биологической. Так как при нулевой длине или ширине листа площадь листа не равна нулю, а равна коэффициенту b , что является ошибкой. В таком случае, следует указывать диапазоны длины и ширины листьев, при которых полученные уравнения справедливы.

Степенные уравнения, полученные в данной работе справедливы с биологической точки зрения и верны с математической. Их без ограничений можно применять в полевых условиях не нанося ущерб растительным сообществам. Площадь листа можно определить, зная всего лишь один морфометрический па-

раметр листа (в природных условиях листья растений часто повреждаются консументами). Надо понимать, что в зависимости от количества и размеров листьев, площадь которых нужно определить, метод может стать довольно трудоемким (Costa et al., 2016). Тем не менее, тем не менее, подход является быстрым, надежным и экономичным.

Развитие косвенных методов определения площади листьев растений очень перспективно для проведения сезонных исследований динамики роста и развития одних и тех же растений на одних и тех же площадках. Метод позволяет оценивать степень зарастания водоемов и водотоков, прогнозировать дальнейшее развитие сообществ; открывает возможности проводить исследования на водоемах и водотоках особо охраняемых природных территорий. Регрессионные степенные модели могут послужить основой для дальнейшего моделирования роста и развития растений, продукционных процессов как в сезонной, так и в многолетней динамике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа, посвященная разработке методов косвенного определения площади листьев водных растений – одна из первых. Косвенный метод оценки площади листьев довольно прост (из инструментов для исследований необходима только линейка), повторить который сможет любой исследователь. На его основе можно получить достоверные данные площади плавающих листьев растений семейства кувшинковые, выявить динамику

роста и развития растений, дать оценку и прогноз по зарастанию водоемов и водотоков. Полученные регрессионные уравнения можно адаптировать и для других видов макрофитов. Необходимость таких исследований не вызывает сомнений. Полученные в перспективе новые данные могут стать основой для дальнейшего моделирования процессов продуктивности водных экосистем.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госзадания ФАНО РАН для ИБВВ РАН (№ АААА-А18-118012690099-2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 427-75 Линейки измерительные металлические. Технические условия.
Папченков В.Г. Растительный покров водоемов и водотоков Среднего Поволжья. Ярославль: ЦМП МУБиНТ, 2001. 213 с.
Antunes W.C., Pompelli M.F., Carretero D.M., Da Matta F.M. 2008. Allometric models for non-destructive leaf area estimation in coffee (*Coffea arabica* and *Coffea canephora*) // Ann. Appl. Biol. Vol. 153. № 1. P. 33–40. DOI:10.1111/j.1744-7348.2008.00235.x
Aulio K. 1980. Accumulation of copper in fluvial sediments and yellow water lilies (*Nuphar lutea*) at varying distances from a metal processing plant // Bull. Environ. Contam. Toxicol. Vol. 25. № 5. P. 713–717. DOI:10.1007/bf01985597
Bakhshandeh E., Kamkar B., Tsialtas J.T. 2011. Application of linear models for estimation of leaf area in soybean *Glycine max* (L.) Merr. // Photosynthetica. Vol. 49. № 3. P. 405–416. DOI:10.1007/s11099-011-0048-5
Birch C.J., Hammer G.L., Rickert K.G. 1998. Improved methods for predicting individual leaf area and leaf senescence in maize (*Zea mays*) // Aust. J. Agric. Res. Vol. 49. № 2. P. 249–262. DOI:10.1071/A97010
Blanco F.F., Folegatti M.V. 2003. A new method for estimating the leaf area index of cucumber and tomato plants // Hortic. Bras. Vol. 21. № 4. P. 666–669. DOI:10.1590/s0102-05362003000400019
Boese B.L., Clinton P.J., Dennis D., Golden R.C., Kim B. 2008. Digital image analysis of *Zostera marina* leaf injury // Aquat. Bot. Vol. 88. № 1. P. 87–90. DOI:10.1016/j.aquabot.2007.08.016
Bréda N.J.J. 2003. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies // J. of Exp. Bot. Vol. 54. № 392. P. 2403–2417. DOI:10.1093/jxb/erg263

- Bréda N.J.J. 2008. Leaf Area Index // Encyclopedia of Ecology. P. 457–462. DOI:10.1016/b978-0-444-63768-0.00849-0
- Brock T.C.M., Arts G.H.P., Goossen I.L.M., Rutenfrans A.H.M. 1983. Structure and annual biomass production of *Nymphoides peltata* (Gmel.) O. Kuntze (Menyanthaceae) // Aquat. Bot. Vol. 17. № 3-4. P. 167–188. DOI:10.1016/0304-3770(83)90056-6
- Buttaro D., Roupheal Y., Rivera C.M., Colla G., Gonnella M. 2015. Simple and accurate allometric model for leaf area estimation in *Vitis vinifera* L. genotypes // Photosynthetica. Vol. 53. № 3. P. 342–348. doi:10.1007/s11099-015-0117-2
- Calderón A., Soto F., Calderón M., Fundora L.R. 2009. Estimación de área foliar en posturas de mango (*Mangifera indica* L.) y aguacatero (*Persea spp.*) en fase de vivero a partir de las medidas lineales de las hojas // Cultivos Tropicales. Vol. 30. № 1. P. 43–48.
- Cardona A.C., Araméndiz H.T., Barrera C.C. 2009. Estimación del área foliar de papaya (*Carica papaya* L.) basada en muestreo no destructivo // Actualidad y Divulgación Científica. Vol. 12. № 1. P. 131–139.
- Chernova A.M. 2015. Seasonal dynamics of yellow water lily *Nuphar lutea* (L.) Smith (*Nymphaeaceae*) in the small Ild river (Yaroslavl oblast) // Inland Water Biol. Vol. 8. № 2. P. 157–165. DOI:10.1134/S1995082915020042
- Chernova A.M. Non-destructive estimation of the leaf area in *Nuphar lutea* L. (*Nymphaeaceae*) // Modern Phytomorphology. 2019. Vol. 13. P.20–25. DOI:10.5281/zenodo.3518799
- Costa A.P., Pôças I., Cunha M. 2016. Estimating the leaf area of cut roses in different growth stages using image processing and allometrics // Horticulturae. Vol. 2. № 6. DOI:10.3390/horticulturae2030006
- Cristofori V., Roupheal Y., Mendoza-de Gyves E., Bignami C. 2007. A simple model for estimating leaf area of hazelnut from linear measurements // Sci. Hortic. № 113. P. 221–225. DOI:10.1016/j.scienta.2007.02.006
- De Maria S., Rita A., Trotta V., Rivelli A.R. 2018. Assessment of a non-destructive method to estimate the leaf area of *Armoracia rusticana* // Acta Physiol. Plant. № 40. P. 213–217. DOI:10.1007/s11738-018-2789-2
- De Swart E.A.M., Groenwold R., Kanne H.J., Stam P., Marcelis L.F.M., Voorrips R.E. 2004. Non-destructive estimation of leaf area for different plant ages and accessions of *Capsicum annuum* L. // J. Hortic. Sci. Biotechnol. № 79. P. 764–770. DOI:10.1080/14620316.2004.11511840
- Espinoza-Espinoza J.R., Ortiz-Cereceres J., Mendoza-Castillo Ma. del C., Villaseñor-Alva J.A., Villegas-Monter A., Peña-Valdivia C., Almaguer-Vargas G. 1998. Modelos de regresión para la estimación del peso fresco y seco de ramas de duraznero (*Prunus persica*, L. Batsh.) // Revista Chapingo Serie horticultura. Vol. 4. № 2. P. 125–131.
- Fascella G., Darwich S., Roupheal Y. 2013. Validation of a leaf area prediction model proposed for rose // Chilean J. Agric. Res. Vol. 73. № 1. P. 73–76. DOI:10.4067/S0718-58392013000100011
- Filbin G.J., Hough R.A. 1983. Specific leaf area, photosynthesis, and respiration in two sympatric *Nymphaeaceae* populations // Aquat. Bot. Vol. 17. № 2. P. 157–165. DOI:10.1016/0304-3770(83)90111-0
- Firouzabadi A.G., Raeini-Sarjaz M., Shahnazari A., Zareabyaneh H. 2015. Non-destructive estimation of sunflower leaf area and leaf area index under different water regime managements // Arch. Agron. Soil Sci. № 61. P. 1357–1367. DOI:10.1080/03650340.2014.1002776
- Ghoreishi M., Hossini Y., Maftoon M. 2012. Simple models for predicting leaf area of mango (*Mangifera indica* L.) // J. Biol. Earth Sci. Vol. 2. № 2. P. 845–853.
- Gong A., Wu X., Qiu Z., He Y. 2013. A handheld device for leaf area measurement // Computers and Electronics in Agriculture. № 98. P. 74–80. DOI:10.1016/j.compag.2013.07.013
- Igathinathane C., Prakash V.S.S., Padma U., Babu G.R., Womac A.R. (2006). Interactive computer software development for leaf area measurement // Computers and Electronics in Agriculture. Vol. 51. № 1–2. P. 1–16. DOI:10.1016/j.compag.2005.10.003
- Jonckheere I., Fleck S., Nackaerts K., Muys B., Coppin P., Weiss M., Baret F. 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination. Part I. Theories, sensors and hemispherical photography // Agricultural and Forest Meteorology. № 121. P. 19–35. DOI:10.1016/j.agrformet.2003.08.027
- Klok P.F., van der Velde G. 2017. Plant traits and environment: floating leaf blade production and turnover of waterlilies // PeerJ. 5: e3212. DOI: 10.7717/peerj.3212
- Koubouris G., Bouranis D., Vogiatzis E., Nejad A.R., Giday H., Tsaniklidis G., Ligoixigakis E.K., Blazakis K., Kalaitzis P., Fanourakis D. 2018. Leaf area estimation by considering leaf dimensions in olive tree. *Scientia Horticulturae*. 240: 440–445. doi:10.1016/j.scienta.2018.06.034
- Liu M., Wang Z., Li S., Lü X., Wang X., Han X. 2017. Changes in specific leaf area of dominant plants in temperate grasslands along a 2500-km transect in northern China // Scientific Reports. 7: 10780. DOI:10.1038/s41598-017-11133-z
- Liu Z., Zhu Y., Li F., Jin G. 2017. Non-destructively predicting leaf area, leaf mass and specific leaf area based on a linear mixed-effect model for broadleaf species // Ecological Indicators. № 78. P. 340–350. DOI:10.1016/j.ecolind.2017.03.025
- Montero F.J., de Juan J.A., Cuesta A., Brasa A. 2000. Nondestructive methods to estimate leaf area in *Vitis vinifera* L. // Hort. Sci. Vol. 35. № 4. P.: 696–698. DOI: 10.21273/HORTSCI.35.4.696
- Nyakwende E., Paull C.J., Atherton J.G. 1997. Non-destructive determination of leaf area in tomato plants using image processing // J. Hortic. Sci. Biotechnol. Vol. 72. № 2. P. 225–262. DOI:10.1080/14620316.1997.11515512
- Rojas-Lara P.C., Pérez-Grajales M., Colinas-León M.T.B., Sahagún-Castellanos J., Avitia-García E. 2008. Modelos matemáticos para estimar el crecimiento del fruto de chile manzano (*Capsicum pubescens*) // Revista Chapingo Serie Horticultura. Vol. 14. № 3. P. 27–34.

- Rouphael Y., Mouneimne A.H., Ismail A., Gyves E.M., Rivera C.M., Colla G. 2010. Modeling individual leaf area of rose (*Rosa hybrid* L.) based on leaf length and width measurement // *Photosynthetica*. Vol. 48. № 1. P. 9–15. DOI:10.1007/s11099-010-0003-x
- Salazar J.C.S., Melgarejo L.M., Bautista E.H.D., Di Rienzo J.A., Casanoves F. 2018. Non-destructive estimation of the leaf weight and leaf area in cacao (*Theobroma cacao* L.) // *Scientia Horticulturae*. № 229. P. 19–24. DOI:10.1016/j.scienta.2017.10.034
- Silva S.H., Lima J.D., Bendini H., Nomura E.S., Moraes W. 2008. Estimating leaf area in anthurium with regression functions // *Cienc. Rural*. № 38. P. 243–246. DOI:10.1590/S0103-84782008000100040
- Sinden-Hempstead M., Killingbeck K.T. 1996. Influences of water depth and substrate nitrogen on leaf surface area and maximum bed extension in *Nymphaea odorata* // *Aquat. Bot.* Vol. 53. № 3–4. P. 151–162. DOI:10.1016/0304-3770(96)01020-0
- Tech A.R.B., Silva A.L.C., Meira L.A., Oliveira M.E. Pereira L.E.T. 2018. Methods of image acquisition and software development for leaf area measurements in pastures // *Computers and Electronics in Agriculture*. Vol. 153. № 1. P. 278–284. DOI:10.1016/j.compag.2018.08.025
- Tsialtas J.T., Maslaris N. 2007. Leaf shape and its relationship with leaf area index in a sugar beet (*Beta vulgaris* L.) cultivar // *Photosynthetica*. № 45. P. 527–532. DOI:10.1007/s11099-007-0090-5
- Zhang L., Liu X.S. 2010. Non-destructive leaf-area estimation for *Bergenia purpurascens* across timberline ecotone, southeast Tibet // *Ann. Bot. Fenn.* Vol. 47. № 5. P. 346–352. DOI:10.5735/085.047.0504

REFERENCES

- Antunes W.C., Pompelli M.F., Carretero D.M., Da Matta F.M. Allometric models for non-destructive leaf area estimation in coffee (*Coffea arabica* and *Coffea canephora*). *Ann. Appl. Biol.*, 2008, vol. 153, no. 1, pp. 33–40. doi:10.1111/j.1744-7348.2008.00235.x.
- Aulio K. Accumulation of copper in fluvial sediments and yellow water lilies (*Nuphar lutea*) at varying distances from a metal processing plant. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 1980, vol. 25, no. 5, pp. 713–717. doi:10.1007/bf01985597.
- Bakhshandeh E., Kamkar B., Tsialtas J.T. Application of linear models for estimation of leaf area in soybean *Glycine max* (L.) Merr. *Photosynthetica*, 2011, vol. 49, no 3, pp. 405–416. doi:10.1007/s11099-011-0048-5.
- Birch C.J., Hammer G.L., Rickert K.G. Improved methods for predicting individual leaf area and leaf senescence in maize (*Zea mays*). *Aust. J. Agric. Res.*, 1998, vol. 49, no. 2, pp. 249–262. doi:10.1071/A97010.
- Blanco F.F., Folegatti M.V. A new method for estimating the leaf area index of cucumber and tomato plants. *Hortic. Bras.*, 2003, vol. 21, no. 4, pp. 666–669. doi:10.1590/s0102-05362003000400019.
- Boese B.L., Clinton P.J., Dennis D., Golden R.C., Kim B. Digital image analysis of *Zostera marina* leaf injury. *Aquat. Bot.*, 2008, vol. 88, no. 1, pp. 87–90. doi:10.1016/j.aquabot.2007.08.016.
- Bréda N.J.J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *J. of Exp. Bot.*, 2003, vol. 54, no. 392, pp. 2403–2417. doi:10.1093/jxb/erg263.
- Bréda N.J.J. Leaf Area Index. *Encyclopedia of Ecology*, 2008, pp. 457–462. doi:10.1016/b978-0-444-63768-0.00849-0.
- Brock T.C.M., Arts G.H.P., Goossen I.L.M., Rutenfrans A.H.M. Structure and annual biomass production of *Nymphaeoides peltata* (Gmel.) O. Kuntze (Menyanthaceae). *Aquat. Bot.*, 1983, vol. 17, no. 3–4, pp. 167–188. doi:10.1016/0304-3770(83)90056-6.
- Buttaro D., Rouphael Y., Rivera C.M., Colla G., Gonnella M. Simple and accurate allometric model for leaf area estimation in *Vitis vinifera* L. genotypes. *Photosynthetica*, 2015, vol. 53, no. 3, pp. 342–348. doi:10.1007/s11099-015-0117-2.
- Calderón A., Soto F., Calderón M., Fundora L.R. Estimación de área foliar en posturas de mango (*Manguifera indica* L.) y aguacatero (*Persea* spp.) en fase de vivero a partir de las medidas lineales de las hojas. *Cultivos Tropicales*, 2009, vol. 30, no. 1, pp. 43–48.
- Cardona A.C., Araméndiz H.T., Barrera C.C. Estimación del área foliar de papaya (*Carica papaya* L.) basada en muestreo no destructivo. *Actualidad y Divulgación Científica*, 2009, vol. 12, no. 1, pp. 131–139.
- Chernova A.M. Seasonal dynamics of yellow water lily *Nuphar lutea* (L.) Smith (*Nymphaeaceae*) in the small Ild river (Yaroslavl oblast). *Inland Water Biol.*, 2015, vol. 8, no. 2, pp. 157–165. doi:10.1134/S1995082915020042.
- Chernova A.M. Non-destructive estimation of the leaf area in *Nuphar lutea* L. (*Nymphaeaceae*). *Modern Phytomorphology*, 2019, vol. 13. pp. 20–25. doi:10.5281/zenodo.3518799.
- Costa A.P., Pôças I., Cunha M. Estimating the leaf area of cut roses in different growth stages using image processing and allometrics. *Horticulturae*, 2016, vol. 2, no. 6. DOI:10.3390/horticulturae2030006.
- Cristofori V., Rouphael Y., Mendoza-de Gyves E., Bignami C. A simple model for estimating leaf area of hazelnut from linear measurements. *Sci. Hortic.*, 2007, no. 113, pp. 221–225. doi:10.1016/j.scienta.2007.02.006.
- De Maria S., Rita A., Trotta V., Rivelli A.R. Assessment of a non-destructive method to estimate the leaf area of *Armoria rusticana*. *Acta Physiol. Plant.*, 2018, no. 40, pp. 213–217. doi:10.1007/s11738-018-2789-2.
- De Swart E.A.M., Groenwold R., Kanne H.J., Stam P., Marcelis L.F.M., Voorrips R.E. Non-destructive estimation of leaf area for different plant ages and accessions of *Capsicum annuum* L. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.*, 2004, no. 79, pp. 764–770. doi:10.1080/14620316.2004.11511840.

- Espinoza-Espinoza J.R., Ortiz-Cereceres J., Mendoza-Castillo Ma. del C., Villaseñor-Alva J.A., Villegas-Monter A., Peña-Valdivia C., Almaguer-Vargas G. Modelos de regresión para la estimación del peso fresco y seco de ramas de duraznero (*Prunus persica*, L. Batsh.). *Revista Chapingo Serie horticultura*, 1998, vol. 4, no. 2, pp. 125–131.
- Fascella G., Darwich S., Roupahel Y. Validation of a leaf area prediction model proposed for rose. *Chilean J. Agric. Res.*, 2013, vol. 73, no 1, pp. 73–76. doi:10.4067/S0718-58392013000100011.
- Filbin G.J., Hough R.A. Specific leaf area, photosynthesis, and respiration in two sympatric *Nymphaeaceae* populations. *Aquat. Bot.*, 1983, vol. 17, no 2, pp. 157–165. doi:10.1016/0304-3770(83)90111-0.
- Firouzabadi A.G., Raeini-Sarjaz M., Shahnazari A., Zareabyaneh H. Non-destructive estimation of sunflower leaf area and leaf area index under different water regime managements. *Arch Agron Soil Sci.*, 2015, no. 61, pp. 1357–1367. doi:10.1080/03650340.2014.1002776/
- Ghoreishi M., Hossini Y., Maftoon M. Simple models for predicting leaf area of mango (*Mangifera indica* L.). *J. Biol. Earth Sci.*, 2012, vol. 2, no 2, pp. 845–853.
- Gong A., Wu X., Qiu Z., He Y. A handheld device for leaf area measurement. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2013, no. 98, pp. 74–80. doi:10.1016/j.compag.2013.07.013.
- State Standard 427-75. Lineiki izmeritelnye metallicheskie. Tekhnicheskie usloviya. Moscow, 1977. 5p. (In Russian)
- Igathinathane C., Prakash V.S.S., Padma U., Babu G.R., Womac A.R. Interactive computer software development for leaf area measurement. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2006, vol. 51, no. 1–2, pp. 1–16. doi:10.1016/j.compag.2005.10.003.
- 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. *Conf. Agric. For. Meteorol.*, 2004, no. 121, pp. 19–35. doi:10.1016/j.agrformet.2003.08.027.
- Klok P.F., van der Velde G. Plant traits and environment: floating leaf blade production and turnover of waterlilies. *PeerJ*. 2017, 5: e3212. doi: 10.7717/peerj.3212.
- Koubouris G., Bouranis D., Vogiatzis E., Nejad A.R., Giday H., Tsaniklidis G., Ligoixigakis E.K., Blazakis K., Kalaitzis P., Fanourakis D. Leaf area estimation by considering leaf dimensions in olive tree. *Scientia Horticulturae*, 2018, 240: 440–445. doi:10.1016/j.scienta.2018.06.034.
- Liu M., Wang Z., Li S., Lü X., Wang X., Han X. Changes in specific leaf area of dominant plants in temperate grasslands along a 2500-km transect in northern China. *Scientific Reports*, 2017, 7: 10780. doi:10.1038/s41598-017-11133-z.
- Liu Z., Zhu Y., Li F., Jin G. Non-destructively predicting leaf area, leaf mass and specific leaf area based on a linear mixed-effect model for broadleaf species. *Ecol. Indic.*, 2017, no. 78, pp. 340–350. doi:10.1016/j.ecolind.2017.03.025.
- Montero F.J., de Juan J.A., Cuesta A., Brasa A. Nondestructive methods to estimate leaf area in *Vitis vinifera* L. *Hort. Sci.*, 2000, vol. 35, no. 4, pp. 696–698. doi: 10.21273/HORTSCI.35.4.696.
- Nyakwende E., Paull C.J., Atherton J.G. Non-destructive determination of leaf area in tomato plants using image processing. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.*, 1997, vol. 72, no 2, pp. 225–262. doi:10.1080/14620316.1997.11515512.
- Papchenkov V.G. Rastitelnyj pokrov vodoemov i vodotokov Srednego Povolzhia. Yaroslavl, CMP MUBiNT, 2001. 213 p. (In Russian)
- Rojas-Lara P.C., Pérez-Grajales M., Colinas-León M.T.B., Sahagún-Castellanos J., Avitia-García E. Modelos matemáticos para estimar el crecimiento del fruto de chile manzano (*Capsicum pubescens*). *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 2008, vol. 14, no. 3, pp. 27–34.
- Roupahel Y., Mouneimne A.H., Ismail A., Gyves E.M., Rivera C.M., Colla G. Modeling individual leaf area of rose (*Rosa hybrid* L.) based on leaf length and width measurement. *Photosynthetica*, 2010, vol. 48, no. 1, pp. 9–15. doi:10.1007/s11099-010-0003-x.
- Salazar J.C.S., Melgarejo L.M., Bautista E.H.D., Di Rienzo J.A., Casanoves F. Non-destructive estimation of the leaf weight and leaf area in cacao (*Theobroma cacao* L.). *Sci. Hortic.*, 2018, no. 229, pp. 19–24. doi:10.1016/j.scienta.2017.10.034.
- Silva S.H., Lima J.D., Bendini H., Nomura E.S., Moraes W. Estimating leaf area in anthurium with regression functions. *Cienc. Rural.*, 2008, no. 38, pp. 243–246. doi:10.1590/S0103-84782008000100040.
- Sinden-Hempstead M., Killingbeck K.T. Influences of water depth and substrate nitrogen on leaf surface area and maximum bed extension in *Nymphaea odorata*. *Aquat. Bot.*, 1996, vol. 53, no. 3–4, pp. 151–162. doi:10.1016/0304-3770(96)01020-0.
- Tech A.R.B., Silva A.L.C., Meira L.A., Oliveira M.E. Pereira L.E.T. Methods of image acquisition and software development for leaf area measurements in pastures. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, vol. 153, no 1, pp. 278–284. doi:10.1016/j.compag.2018.08.025.
- Tsialtas J.T., Maslaris N. Leaf shape and its relationship with leaf area index in a sugar beet (*Beta vulgaris* L.) cultivar. *Photosynthetica*, 2007, no. 45, pp. 527–532. doi:10.1007/s11099-007-0090-5.
- Zhang L., Liu X.S. 2010. Non-destructive leaf-area estimation for *Bergenia purpurascens* across timberline ecotone, southeast Tibet. *Ann. Bot. Fenn.*, vol. 47, no 5, pp. 346–352. doi:10.5735/085.047.0504.

TO THE METHOD OF DETERMINING THE LEAF AREA OF PLANTS OF THE FAMILY NYMPHAEACEAE SALISB.

A. M. Chernova

*Papanin Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences
152742 Yaroslavl region, Nekouzskii district, Borok, e-mail: nuphar@mail.ru*

Leaf area is an important indicator that is closely related to the size of the assimilating surface, photosynthesis, respiration, transpiration, specific leaf area, and production.

The purpose of this work is to obtain regression models for determining the leaf area of widespread hydrophytes – *Nuphar lutea* (L.) Smith and *Nymphaea candida* C. Presl. These plants have a high ecological valence and make a significant contribution to the overall productivity of reservoirs.

Collection of floating leaves of water lilies was carried out in 2019 in the gulf of the Volga river in the Tver region (56°58'50.4", 37°27'45.2"). A total of 108 leaves of *Nuphar lutea* and 170 – *Nymphaea candida* were collected. Main parameters: the length of the leaf blade from the attachment point of the petiole to the tip (l_1), the total length (l_2) and width (w) of the leaf blade were measured with an accuracy of 0.1 cm. The actual leaf area was determined by a Planix 7 planimeter. Correlation and regression analyses were used to analyze the data.

The growth of water lily leaves is uniform. Regression analysis revealed the dependence of the actual leaf area (LA) on morphometric indicators l_1 , l_2 , and w . For *Nuphar lutea*: $LA_{N,l}=2.12 \cdot l_1^{1.81}$; $LA_{N,l}=0.64 \cdot l_2^{1.95}$; $LA_{N,l}=0.93 \cdot w^{2.05}$. For *Nymphaea candida*: $LA_{N,c}=3.88 \cdot l_1^{1.79}$; $LA_{N,c}=0.85 \cdot l_2^{1.94}$; $LA_{N,c}=0.93 \cdot w^{1.96}$.

The received power equation is fair from a biological point of view and correct with mathematical. They can be used in the field without causing damage to plant communities. This is a fast, reliable and cost-effective method. It allows you to monitor, assess the degree of overgrowth of reservoirs, predict the further development of communities, and allows you to conduct research on specially protected natural areas.

Keywords: leaf morphology, isometric growth, assimilating surface, photosynthetic surface, leaf area modeling, non-destructive measurements, regression power models, water lilies, *Nuphar lutea*, *Nymphaea candida*