

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДЛЯ НЕДЕСТРУКТИВНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОЩАДИ И МАССЫ ЛИСТА У КОК-САГЫЗА (*Taraxacum kok-saghyz* Rodin)

G. SHEN^{1, 2}, W. WANG¹, F. CHEN², F. ZHENG², D. WEI², L. LI², X. ZENG³,
Y. FAN³, Н.Г. КОНЬКОВА⁴

Кок-сагыз (*Taraxacum kok-saghyz* Rodin) — русский одуванчик, травянистое растение-многолетник, в настоящее время широко признан как один из наиболее перспективных естественных каучуконосов. Позиции натурального каучука на мировом рынке устойчивы и потребность в нем ежегодно возрастает. В настоящее время в США, Китае, Германии, Испании, Голландии и ряде других стран уделяется большое внимание исследованиям по получению натурального каучука на основе растительного сырья. Нашей целью была разработка модели, позволяющей выполнять биометрическую оценку листа растений недеструктивным методом, что актуально для физиологических наблюдений *in vivo*. Для этого нами был выполнен регрессионный анализ соотношения показателей длины, ширины, площади листа и сырой массы листа на 250 листьях, собранных на разных стадиях роста растений кок-сагыза (Харбин, N45°34'59.9", E126°34'18.8"). Для проверки предложенных моделей использовались данные по выборке еще из 50 листьев. При определении наименьшего размера выборки, необходимого для адекватного применения итоговой модели, выполнили регрессионный анализ для 10 групп с разным числом образцов, случайным образом отобранных из 300 листьев. В результате предложена следующая модель оценки площади листа (LA) в зависимости от его длины (L) и ширины (W): $LA = 6226,424 + 26,31L + 545,334W - 313,993L^{0,5} - 3138,047W^{0,5} - 0,009L^2 - 3,86W^2 + 0,057LW$ (коэффициент детерминации $R^2 = 0,818$, среднеквадратичная ошибка RMSE = 168,29). Модель для определения сырой массы листа (FW) имеет следующий вид: $FW = 1125,572 - 24,857L + 233,070W + 0,055LW + 276,956L^{0,5} - 1264,466W^{0,5} + 0,067L^2 - 1,964W^2$ ($R^2 = 0,735$, RMSE = 87,84). Для применения этих двух моделей необходимы результаты измерений не менее чем 10 листьев. Определение функций преобразования длины и ширины листа, линейно связанных с его площадью и сырой массой, и создание регрессионной модели с их использованием может быть лучшим решением при создании моделей для оценки площади листа и сырой массы у растений разных видов, особенно тех, для которых характерна значительная вариабельность листьев по размеру.

Ключевые слова: *Taraxacum kok-saghyz* Rodin, кок-сагыз, длина листа, ширина листа, недеструктивные методы исследования, модели оценки, регрессионный анализ.

Одуванчик кок-сагыз (*Taraxacum kok-saghyz* Rodin, русский одуванчик) — восточно-тянь-шаньский редкий и эндемичный вид, травянистое растение-многолетник, произрастает на обедненных и солончаковых почвах, в 1930-1940 годы изучался в качестве местного каучуконоса и в настоящее время широко признан как один из наиболее перспективных источников природного сырья для производства резины (1, 2). Для кок-сагыза характерно наличие большого количества листьев, более 200, формирующих прикорневую розетку. Розетка чаще всего прижата к земле, плотная и состоит из продолговатых мясистых листьев. По форме пластинки они обратно ланцетно-яйцевидные, плотные, блестящие, гладкие, покрытые восковым налетом. Наружные листья почти цельнокрайние, ближе к центру розетки степень расчлененности листа увеличивается, и внутренние листья имеют более или менее струговидную форму, как у других одуванчиков, хотя выемки и доли у листьев кок-сагыза туповатые, без острых шиловидных зубчиков, зубчики встречаются в редких случаях (3). Хорошо известно, что площадь листа — важный показатель роста и развития растения (4, 5). Измерение площади и массы листа необходимо для расчета листового индекса (6), определения интенсивности фотосинтеза, эффективности поглощения света, потребления воды и питательных веществ, оценки урожайности растений (7-9). Такие свойства растения затрудняют прямой мониторинг состояния его надземных органов, следовательно,

требуется разработать методы непрямого (неинвазивного) определения площади и массы листьев растения.

Среди различных подходов при биометрических исследованиях предпочтение отдается непрямым неструктурным методам — недорогим, быстрым и простым в исполнении (6, 10). Кроме того, не прямые методы оценки позволяют исследователям изучать площадь и массу листьев на одном и том же растении в динамике в течении всего периода вегетации. Это существенно повышает надежность данных, снижает вариативность эксперимента (11-14). При неструктурной оценке площади масса листа обычно оценивается по длине, ширине, сумме эффективных температур и длине черешка. Предлагаемые модели основаны на ростовых показателях с учетом формы листа у растения. Чаще всего рассматриваются корреляции длины и ширины листа с его площадью и массой (6, 15-17).

Хотя русский одуванчик изучался в течение десятилетий, до сих пор не были предложены предикативные модели для показателей площади и массы листа у этого растения. Такая модель впервые разработана нами и представлена в настоящем сообщении.

Цель работы состояла в создании надежной модели прижизненной оценки размера и массы листьев русского одуванчика на основе линейных измерений для анализа продуктивности зеленой массы растения в экологических, физиологических, генетических и селекционных исследованиях.

Методика. Растения кок-сагыза (коллекционные образцы Академии наук Heilongjiang) изучали в условиях города Харбина (Китай, N45°34'59.9", E126°34'18.8", июнь 2014 года). Климат умеренный муссонный, средняя годовая температура 4,2 °С, среднегодовая норма осадков 532 мм. При выращивании растений использовали стандартную общепринятую технологию возделывания кок-сагыза.

Через 2 мес после посадки проростков на участке случайным образом с интервалом 14 сут отбирали по 50 репрезентативных неповрежденных листьев (всего 250 образцов). Для каждого листа определяли сырую массу взвешиванием на электронных весах (с точностью до 0,1 мг) и линейные размеры (длина и ширина, мм) обычной линейкой. Длину измеряли от кончика листовой пластинки до точки пересечения со стеблем, ширину — от края до края в самой широкой части пластинки (округляли до ближайшего значения на миллиметровой шкале). Затем все листья последовательно пронумеровали, выложили на лист белой бумаги с измерительной линейкой, расправили, для чего накрыли прозрачной пластиковой пленкой, и сфотографировали. Изображения хранили в JPG формате. Фотографии обрабатывали в программе ImageJ v.1.48 (W. Rasband, «National Institute of Mental Health», США), рассчитывая площадь каждого листа. Детали метода подробно описаны ранее (18). Всего в предварительном калибровочном эксперименте определяли площадь, ширину и длину листовой пластинки, сырую массу для 250 листьев.

При установлении и калибровке модели использовали регрессионный анализ. Для 250 листьев оценивали взаимосвязи между площадью листа и массой как зависимыми переменными и длиной и шириной как независимыми переменными. Независимые переменные преобразовывали в другие функции (квадраты, квадратные корни и др.), чтобы установить линейные связи с площадью и сырой массой листа. По этим данным строили матрицы диаграмм рассеяния, используя программу OriginPro v.9.0 («OriginLab Corporation», США) для выявления линейных зависимостей между площадью и массой листа и преобразованными показателями длины и ширины листа. На основании матриц диаграмм рассеяния в программе SPSS v.19.0

(«IBM», США) получали уравнения моделей. Для применения выбрали уравнения с наибольшим коэффициентом детерминации (R^2). Рассчитанные ($Sim.Y_i$) и измеренные ($Obs.Y_i$) значения площади листа сравнивали, оценивая достоверность уравнения регрессии и степень соответствия статистической модели реальной системе (R^2). В итоге выбирали модель с наибольшей величиной R^2 при наименьшей среднеквадратичной ошибке (RMSE, root mean square error) (4). RMSE рассчитывали по формуле (n — число измерений, в нашем случае $n = 250$):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Sim.Y_i - Obs.Y_i)^2}{n}}$$

С целью валидации выбранной модели в октябре 2015 года на том же участке случайным образом отобрали 50 листьев растений кок-сагыза. Фактические значения показателей (длина, ширина, площадь и масса листа) определяли, как описано выше. Смоделированные величины площади и массы листа сравнивали с фактическими значениями методом регрессионного анализа. Уравнения регрессии в полученной линейной модели зависимости расчетных значений от фактических сравнивали с таковыми для

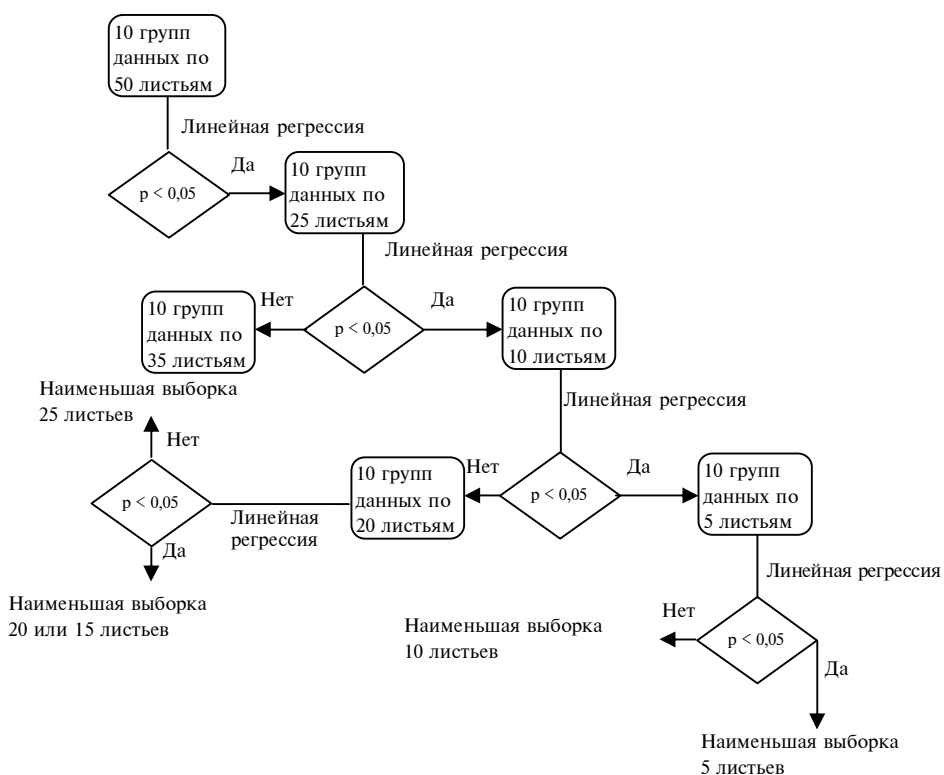


Рис. 1. Алгоритм определения размера выборки при использовании предлагаемой модели неструктуривной биометрии листа у кок-сагыза (*Taraxacum kok-saghyz* Rodin).

модели равенства расчетных и фактических значений (линейного соответствия 1:1) при $p = 0,05$ (18). Регрессионный анализ выполняли в программе SPSS v.19.0. При оценке наименьшего размера выборки случайным образом из всего набора биометрических данных по 300 листьям формировали по 10 групп для числа листьев от 5 до 50. Площадь и массу листа рассчитывали для этих 10 групп, используя предложенную модель. Определяли линейные регрессии между рассчитанными и измеренными величинами. При статистической значимости (p) уравнения меньше 0,05 использованный размер выборки считали достаточным. Сначала тестировали

10 групп для 50 листьев, и если все коэффициенты уравнений линейной регрессии были достоверны при $p < 0,05$, переходили к тестированию набора данных по 25 листьям, продолжая процедуру до тех пор, пока не находили наименьший достоверный размер выборки.

Результаты. Используемую схему определения размера выборки для создания предлагаемой модели недеструктивной биометрической оценки растения иллюстрирует рисунок 1.

Разработка и валидация модели площади листа. Известная

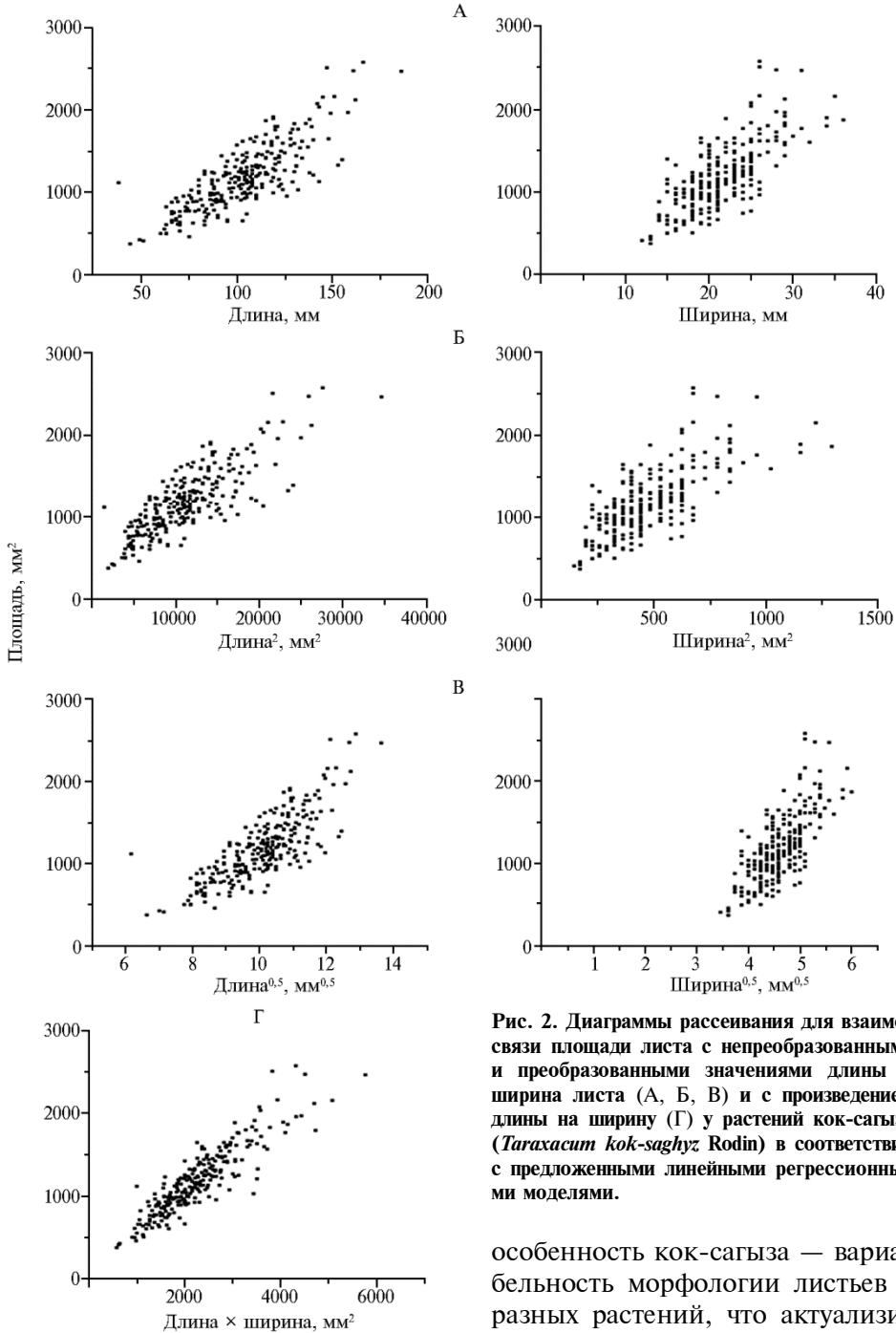


Рис. 2. Диаграммы рассеивания для взаимосвязи площади листа с необработанными и преобразованными значениями длины и ширина листа (А, Б, В) и с произведением длины на ширину (Г) у растений кок-сагыза (*Taraxacum kok-saghyz* Rodin) в соответствии с предложенными линейными регрессионными моделями.

особенность кок-сагыза — вариативность морфологии листьев у разных растений, что актуализирует задачу разработки модели для

недеструктивной оценки их биометрических показателей.

Площадь листа была линейно связана с его длиной и шириной (А), квадратом длины и ширины (В), квадратным корнем из длины листа и ширины листа (С) и длиной листа, умноженной на ширину (D). Последовательно получили уравнения: $LA = a + bL + cW$; $LA = a + bL^2 + cW^2$; $LA = a + bL^{0,5} + cW^{0,5}$; $LA = a + bLW$ (табл. 1). Оказалось, что R^2 возрастает, а RMSE уменьшается, если два разных преобразованных значения длины и ширины листа включить в одно уравнение регрессии. Если уравнение содержало три из четырех различных переменных (см. [9], [10], табл. 1), величина R^2 была наибольшей и составила 0,818. Однако для [10] значение RMSE было ниже, чем для [9].

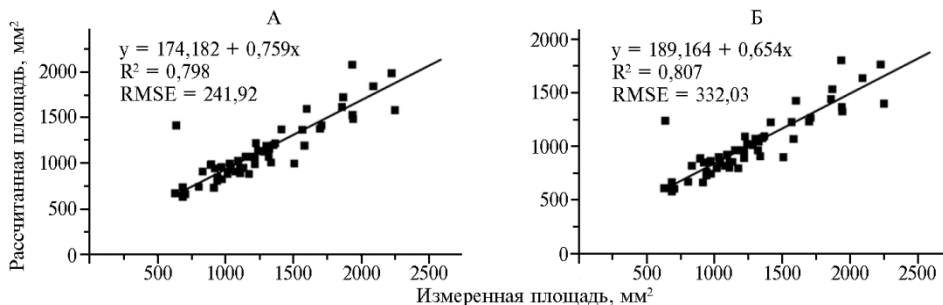


Рис. 3. Модели площади единичного листа у растений кок-сагыза (*Taraxacum kok-saghyz* Rodin) при использовании уравнений [9] (А) и [10] (Б) (сплошная линия — линейная регрессия).

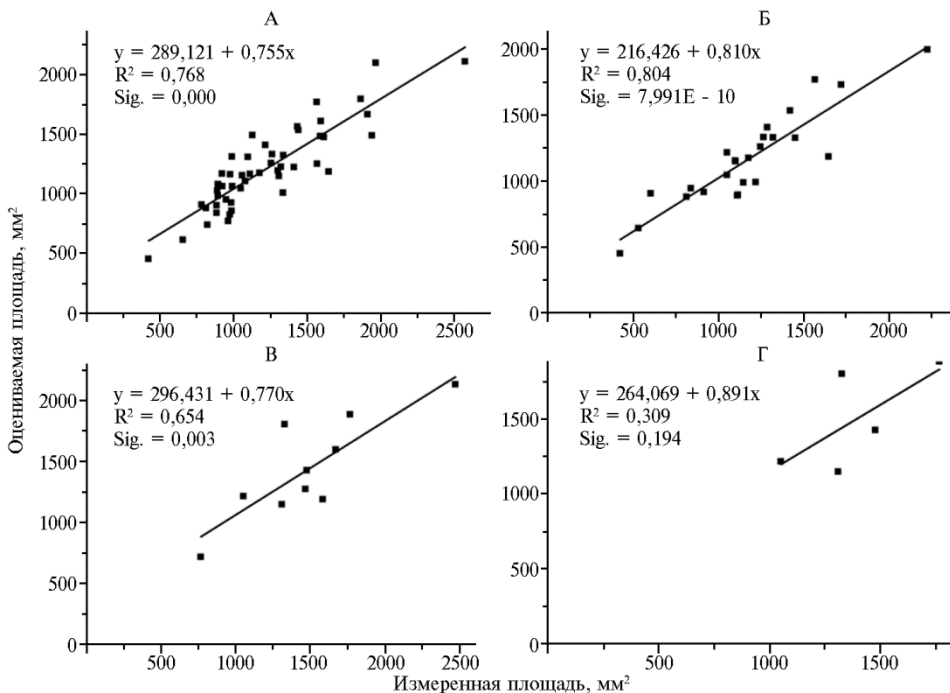


Рис. 4. Определение размера выборки для предложенной модели оценки площади листа у растений кок-сагыза (*Taraxacum kok-saghyz* Rodin): 50 (А), 25 (Б), 10 (В) и 5 листьев (Г); Sig. — уровень значимости.

Валидация показала, что оценки площади листа с использованием моделей [9] и [10] были очень близки к фактически измеренной площади листа. Линейная регрессия взаимосвязи между измеренной и рассчитанной с помощью моделей площади листа были такими же, как для линии регрессии 1:1 при $p = 0,05$ (рис. 2, 3). При этом у модели [10] величина R^2

1. Линейные регрессионные модели для оценки площади листа у растений кок-сагыза (*Taraxacum kok-saghyz* Rodin)

№	Набор переменных	Регрессионная модель	Константа							R ²	RMSE	
			a	b	c	d	e	f	g			h
[1]	L, W	LA = a + bL + cW	-744,204	9,962	42,043						0,810	171,96
[2]	LW	LA = a + bLW	225,999	0,424							0,805	174,30
[3]	L ² , W ²	LA = a + bL ² + cW ²	222,184	0,047	0,907						0,810	171,87
[4]	L ^{0,5} , W ^{0,5}	LA = a + bL ^{0,5} + cW ^{0,5}	-2609,279	195,109	396,179						0,795	178,54
[5]	L, W, LW	LA = a + bL + cW + dLW	-356,135	6,274	23,674	0,171					0,813	170,74
[6]	L, W, L ² , W ²	LA = a + bL + cW + dL ² + eW ²	-392,679	2,062	46,133	0,037	0,287				0,816	169,20
[7]	L, W, L ^{0,5} , W ^{0,5}	LA = a + bL + cW + dL ^{0,5} + eW ^{0,5}	711,166	25,248	38,795	-306,976	29,071				0,816	169,00
[8]	L ^{0,5} , W ^{0,5} , LW	LA = a + b(L ^{0,5} W ^{0,5}) + cLW	-220,583	18,881	0,231						0,808	172,92
[9]	L, W, L ² , W ² , L ^{0,5} , W ^{0,5}	LA = a + bL + cW + dL ^{0,5} + eW ^{0,5} + fL ² + gW ²	6321,276	21,902	579,001	-248,841	-3346,881	0,002	-3,984		0,818	168,34
[10]	L, W, L ² , W ² , L ^{0,5} , W ^{0,5} , LW	LA = a + bL + cW + dL ^{0,5} + eW ^{0,5} + fL ² + gW ² + hLW	6226,424	26,310	545,334	-313,993	-3138,047	-0,009	-3,866	0,057	0,818	168,29

Примечание. L — длина листа, W — ширина листа, LA — площадь листа.

2. Линейные регрессионные модели для оценки сырой массы листа у растений кок-сагыза (*Taraxacum kok-saghyz* Rodin)

№	Набор переменных	Регрессионная модель	Константа							R ²	RMSE	
			a	b	c	d	e	f	g			h
[1]	L, W	FW = a + bL + cW	-304,693	4,243	15,378						0,699	93,69
[2]	LW	FW = a + bLW	74,630	0,172							0,703	93,00
[3]	L ² , W ²	FW = a + bL ² + cW ²	76,556	0,021	0,319						0,717	90,83
[4]	L ^{0,5} , W ^{0,5}	FW = a + bL ^{0,5} + cW ^{0,5}	-1041,233	81,679	147,543						0,678	96,85
[5]	L, W, LW	FW = a + bL + cW + dLW	29,784	1,064	-0,455	0,147					0,709	92,03
[6]	LW, L ² , W ²	FW = a + bLW + cL ² + dW ²	77,149	0,048	0,016	0,205					0,718	90,74
[7]	L, W, L ² , W ² , L ^{0,5} , W ^{0,5}	FW = a + bL + cW + dLW + eL ² + fW ²	-45,050	-4,630	32,631	0,086	0,033	-0,587			0,734	88,11
[9]	L, W, L ² , W ² , L ^{0,5} , W ^{0,5} , LW	FW = a + bL + cW + dLW + eL ^{0,5} + fW ^{0,5} + gL ² + hW ²	1125,572	-24,857	233,070	0,055	276,956	-1264,466	0,067	-1,964	0,735	87,84

Примечание. L — длина листа, W — ширина листа, FW — сырая масса листа.

была выше, чем в модели [9], поэтому в качестве итоговой модели выбрали [10].

Чтобы определить наименьший размер выборки в соответствии с моделью [10], сформировали 10 групп данных для 50, 25, 10 и 5 листьев, случайным образом выбранных из 300 анализируемых. Выполненный регрессионный анализ полученных оценок и результатов измерений показал,

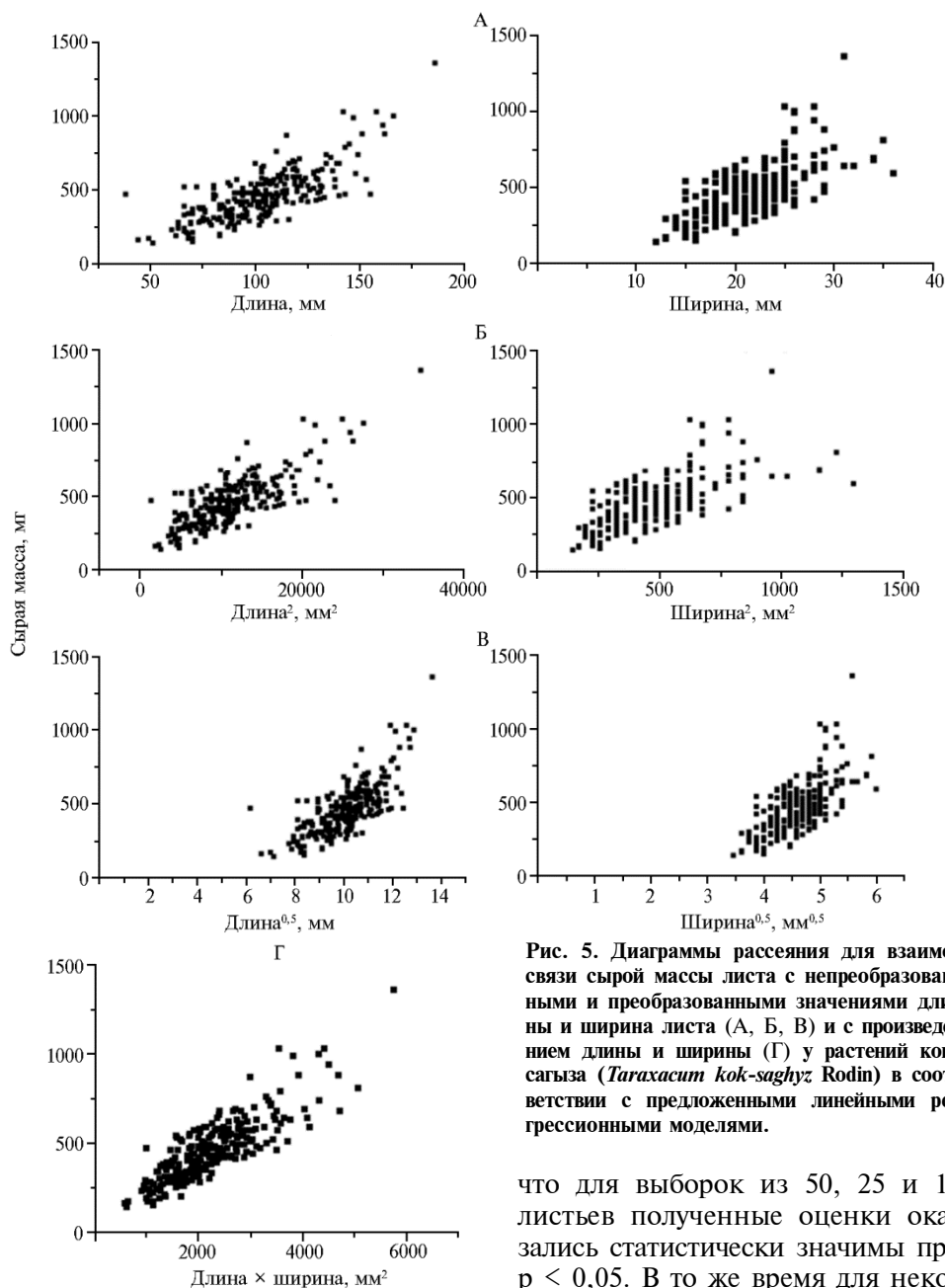


Рис. 5. Диаграммы рассеяния для взаимосвязи сырой массы листа с непреобразованными и преобразованными значениями длины и ширина листа (А, Б, В) и с произведением длины и ширины (Г) у растений кокуса (*Taraxacum kok-saghyz* Rodin) в соответствии с предложенными линейными регрессионными моделями.

что для выборок из 50, 25 и 10 листьев полученные оценки оказались статистически значимы при $p < 0,05$. В то же время для некоторых величин уравнений линейной регрессии при выборке из 5

листьев $p > 0,05$ (рис. 4, Г). Из этого следует, что наименьший размер выборки при использовании модели [10] — 10 листьев.

Разработка модели определения сырой массы листа. Диаграммы рассеяния (рис. 5) показали, что длина и ширина листа, в том

числе преобразованные формы этих показателей (длина², ширина²; длина^{0,5}, ширина^{0,5}), а также произведение длины на ширину линейно связаны с сырой массой листа FW. Включив в одно уравнение все четыре формы показателей, получили итоговое уравнение регрессии с наибольшим значением R² и наименьшей величиной RMSE (табл. 2). Полученное уравнение регрессии: $FW = 1125,572 - 24,857L + 233,070W + 0,055LW + 276,956L^{0,5} - 1264,466W^{0,5} + 0,067L^2 - 1,964W^2$.

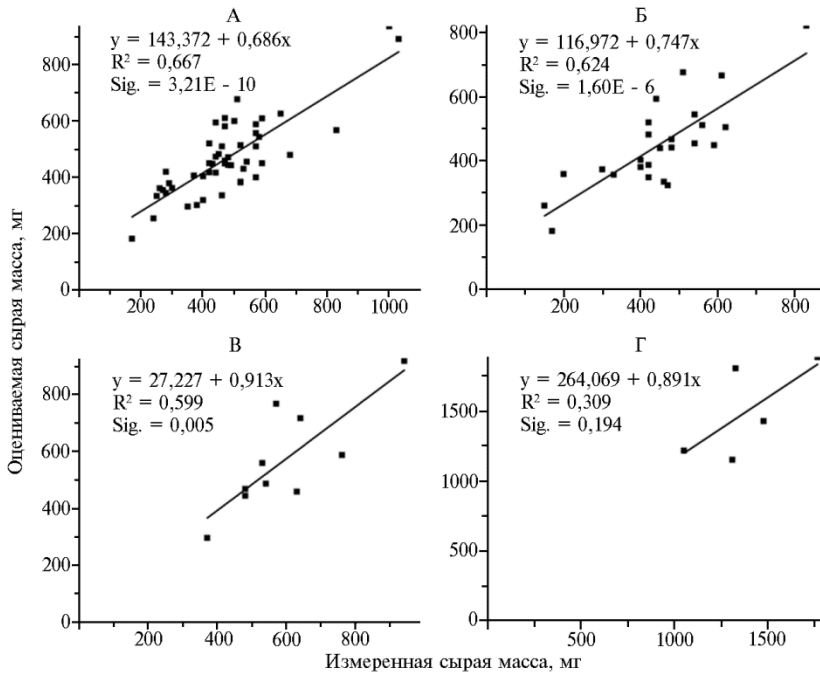


Рис. 6. Определение размера выборки для предложенной модели оценки сырой массы листа у растений кок-сагыза (*Taraxacum kok-saghyz* Rodin): 50 (А), 25 (Б), 10 (В) и 5 листьев (Г); Sig. — уровень значимости.

Регрессионный анализ с целью определения минимального размера выборок для применения предложенной модели (рис. 6) показал результаты, сходные с отмеченными для площади листа (выборка, необходимая для получения статистически значимых оценок, — не менее 10 листьев).

Таким образом, было показано, что четыре преобразованные формы значений длины и ширины листа (собственно длина и ширина, длина² и ширина², длина^{0,5} и ширина^{0,5} и длина × ширина) связаны с площадью и сырой массой листа у кок-сагыза зависимостью, приближенной к линейной. Интеграция всех четырех форм в одно уравнение регрессии позволят предложить модель для неdestructивной оценки размера и массы листьев кок-сагыза. Предлагается следующее уравнение площади листа: $LA = 6226,424 + 26,31L + 545,334W - 313,993L^{0,5} - 3138,047W^{0,5} - 0,009L^2 - 3,86W^2 + 0,057LW$ (R² и RMSE соответственно 0,818 и 168,29). Для применения модели необходимы данные не менее чем по 10 случайно выбранным листьям. Для определения сырой массы листьев применяется уравнение $FW = 1125,572 - 24,857L + 233,070W + 0,055LW + 276,956L^{0,5} - 1264,466W^{0,5} + 0,067L^2 - 1,964W^2$ (R² и RMSE соответственно 0,735 и 87,84). Необходимый минимальный размер выборки — 10 листьев. Предложенную модель в будущем следует валидировать для других сортов кок-сагыза. Объединение в одном уравнении регрессии преобразованных биометрических измерений, линейно связанных с площадью и массой листа,

может быть перспективно при работе с видами растений, для которых характерна высокая вариабельность размеров листовых пластинок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Van Beilen J.B., Poirier Y. Establishment of new crops for the production of natural rubber. *Trends Biotechnol.*, 2007, 25(11): 522-529 (doi: 10.1016/j.tibtech.2007.08.009).
2. Venkatachalam P., Geetha N., Sangeetha P., Thulaseedharan A. Natural rubber producing plants: An overview. *Afr. J. Biotechnol.*, 2013, 12(12): 1297-1310 (doi: 10.5897/AJBX12.016).
3. Gavrilova V.A., Konkova N.G., Kutuzova S.N., Gavrilenko T.A., Pendinen G.I., Dunaeva S.E., Podolnaya L.P., Petrosyan I., Fan Yanxin, Zeng Xiangjun, Zhang Jichuan, Shen Guang. Kok-saghyz (*Taraxacum kok-saghyz* Rodin) cultivation guidelines. St. Petersburg, 2017: 26-27.
4. Kumar R. Calibration and validation of regression model for non-destructive leaf area estimation of saffron (*Crocus sativus* L.). *Scientia Horticulturae*, 2009, 122(1): 142-145 (doi: 10.1016/j.scienta.2009.03.019).
5. Mokhtarpour H., Teh C.B., Saleh G., Selamat A.B., Asadi M.E., Kamkar B. Non-destructive estimation of maize leaf area, fresh weight, and dry weight using leaf length and leaf width. *Communications in Biometry and Crop Science*, 2010, 5(1): 19-26.
6. Williams L., Martinson T.E. Nondestructive leaf area estimation of 'Niagara' and 'DeChaunac' grapevines. *Scientia Horticulturae*, 2003, 98(4): 493-498 (doi: 10.1016/s0304-4238(03)00020-7).
7. Peksen E. Non-destructive leaf area estimation model for faba bean (*Vicia faba* L.). *Scientia Horticulturae*, 2007, 113(4): 322-328 (doi: 10.1016/j.scienta.2007.04.003).
8. Macfarlane C., Grigg A., Evangelista C. Estimating forest leaf area using cover and fullframe fisheye photography: Thinking inside the circle. *Agr. Forest Meteorol.*, 2007, 146(1-2): 1-12 (doi: 10.1016/j.agrformet.2007.05.001).
9. Greaves H.E., Vierling L.A., Eitel J.U.H., Boelman N.T., Magney T.S., Prager C.M., Griffin K.L. Estimating aboveground biomass and leaf area of low-stature Arctic shrubs with terrestrial LiDAR. *Remote Sens. Environ.*, 2015, 164: 26-35 (doi: 10.1016/j.rse.2015.02.023).
10. Tsialtas J., Koundouras S., Zioziou E. Leaf area estimation by simple measurements and evaluation of leaf area prediction models in Cabernet-Sauvignon grapevine leaves. *Photosynthetica*, 2008, 46(3): 452-456 (doi: 10.1007/s11099-008-0077-x).
11. Gamiely S., Randle W., Mills H., Smittle D. A rapid and nondestructive method for estimating leaf area of onions. *HortScience*, 1991, 26(2): 206.
12. NeSmith D.S. Nondestructive leaf area estimation of rabbiteye blueberries. *HortScience*, 1991, 26: 1332-1332.
13. Serdar Ü., Demirsoy H. Non-destructive leaf area estimation in chestnut. *Scientia Horticulturae*, 2006, 108: 227-230 (doi: 10.1016/j.scienta.2006.01.025).
14. Unigarro-Mucoz C.A., Hernández-Arredondo J.D., Montoya-Restrepo E.C., Medina-Rivera R.D., Ibarra-Ruales L.N., Carmona-González C.Y., Flyrez-Ramos C.P. Estimation of leaf area in coffee leaves (*Coffea arabica* L.) of the Castillo® variety. *Bragantia*, 2015, 74(4): 412-416 (doi: 10.1590/1678-4499.0026).
15. Sala F., Arsene G.-G., Iordănescu O., Boldea M. Leaf area constant model in optimizing foliar area measurement in plants: A case study in apple tree. *Scientia Horticulturae*, 2015, 193: 218-224 (doi: 10.1016/j.scienta.2015.07.008).
16. Tsialtas J., Maslaris N. Leaf area prediction model for sugar beet (*Beta vulgaris* L.) cultivars. *Photosynthetica*, 2008, 46(2): 291-293 (doi: 10.1007/s11099-008-0051-7).
17. Montero F., De Juan J., Cuesta A., Brasa A. Nondestructive methods to estimate leaf area in *Vitis vinifera* L. *HortScience*, 2000, 35: 696-698.
18. Dent J.B., Blackie M.J. *Systems simulation in agriculture*. Springer, 1979 (doi: 10.1007/978-94-011-6373-6).
19. Bakhshandeh E., Kamkar B., Tsialtas J.T. Application of linear models for estimation of leaf area in soybean [*Glycine max* (L.) Merr]. *Photosynthetica*, 2011, 49: 405-416 (doi: 10.1007/s11099-011-0048-5).
20. Easlon H.M., Bloom A.J. Easy leaf area: automated digital image analysis for rapid and accurate measurement of leaf area. *Appl. Plant Sci.*, 2014, 2(7): 1-4 (doi: 10.3732/apps.1400033).
21. Gao M., Van der Heijden G.W.A.M., Vos J., Eveleens B.A., Marcelis L.F.M. Estimation of leaf area for large scale phenotyping and modeling of rose genotypes. *Scientia Horticulturae*, 2012, 138(1): 227-234 (doi: 10.1016/j.scienta.2012.02.014).
22. Goudie J.W., Parish R., Antos J.A. Foliage biomass and specific leaf area equations at the branch, annual shoot and whole-tree levels for lodgepole pine and white spruce in British Columbia. *Forest Ecol. Manag.*, 2016, 361: 286-297 (doi: 10.1016/j.foreco.2015.11.005).
23. Homolová L., Lukeš P., Malenovský Z., Lhotáková Z., Kaplan V., Hanuš J. Measurement methods and variability assessment of the Norway spruce total leaf area: implications for remote sensing. *Trees*, 2013, 27(1): 111-121 (doi: 10.1007/s00468-012-0774-8).
24. Vazquez-Cruz M.A., Luna-Rubio R., Contreras-Medina L.M., Torres-Pacheco I., Guevara-Gonzalez R.G. Estimating the response of tomato (*Solanum lycopersicum*) leaf area to changes

in climate and salicylic acid applications by means of artificial neural networks. *Biosyst. Eng.*, 2012, 112(4): 319–327 (doi: 10.1016/j.biosystemseng.2012.05.003).

25. Keramatlou I., Sharifani M., Sabouri H., Alizadeh M., Kamkar B. A simple linear model for leaf area estimation in Persian walnut (*Juglans regia* L.). *Scientia Horticulturae*, 2015, 184: 36–39 (doi: 10.1016/j.scienta.2014.12.017).

¹The Ministry of Education Key Laboratory
of Forest Plant Ecology, Northeast Forestry University,
Harbin 150040
e-mail: shen19772@163.com;

²Institute of Natural Resources and Ecology,
Heilongjiang Academy of Sciences,
Harbin 150040,
e-mail: shen19772@163.com;

³Heilongjiang Academy of Sciences,
Harbin 150040
e-mail: xxi2004@mail.ru ✉;

⁴ФГБНУ ФИЦ Всероссийский институт
генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова,
190000 Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42–44,
e-mail: n.konkova@vir.nw.ru ✉

Поступила в редакцию
7 июля 2017 года

Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology], 2018, V. 53, № 3, pp. 645–654

NONDESTRUCTIVE LEAF AREA AND FRESH WEIGHT ESTIMATION FOR *Taraxacum kok-saghyz* Rodin AND THEIR SAMPLING NUMBER

G. Shen^{1, 2}, W. Wang¹, F. Chen², F. Zheng², D. Wei², L. Li², X. Zeng³,
Y. Fan³, N.G. Kon'kova⁴

¹The Ministry of Education Key Laboratory of Forest Plant Ecology, Northeast Forestry University, Harbin 150040,
e-mail shen19772@163.com;

²Institute of Natural Resources and Ecology, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin, 150040, e-mail shen19772@163.com;

³Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin 150040, e-mail xxi2004@mail.ru (✉ corresponding author);

⁴Federal Research Center the Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Federal Agency for Scientific
Organizations, 42–44, ul. Bol'shaya Morskaya, St. Petersburg, 190000 Russia, e-mail n.konkova@vir.nw.ru (✉ cor-
responding author)

ORCID:

Shen G. orcid.org/0000-0001-5320-6465

Wang W. orcid.org/0000-0003-0465-686X

Chen F. orcid.org/0000-0002-8890-9782

Zheng F. orcid.org/0000-0002-8966-5230

Wei D. orcid.org/0000-0002-8610-4921

The authors declare no conflict of interests

Received July 7, 2017

Li L. orcid.org/0000-0002-4423-6934

Zeng X. orcid.org/0000-0002-2042-9969

Fan Y. orcid.org/0000-0002-4582-4172

Kon'kova N.G. orcid.org/0000-0002-4920-3904

doi: 10.15389/agrobiol.2018.3.645eng

Abstract

Kok-saghyz (*Taraxacum kok-saghyz* Rodin), Russian dandelion, is a perennial plant widely recognized as one of the most promising sources of natural rubber. The works to utilize natural rubber are underway in the United States, China and Western Europe (Germany, Spain, Czech Republic and the Netherlands). The aim of this study was to determine nondestructive models for estimating leaf area and fresh weight of Russian dandelion plants. Regression analyses were performed between leaf area, fresh weight, leaf length, and leaf width in two hundred and fifty leaf samples collected during different growth stages of Russian dandelion plants. Data from another fifty leaves were used for validating the proposed models. Regression analyses were performed among ten data groups with different numbers of data randomly selected from the total three hundred leaves data set to determine the smallest sampling number for applying the final models correctly. The model for estimating leaf area (LA) is: $LA = 6226.424 + 26.31L + 545.334W - 313.993L^{0.5} - 3138.047W^{0.5} - 0.009L^2 - 3.86W^2 + 0.057LW$, with R^2 and RMSE values of 0.818 and 168.29, respectively. The model for estimating leaf fresh weight (FW) is: $FW = 1125.572 - 24.857L + 233.070W + 0.055LW + 276.956L^{0.5} - 1264.466W^{0.5} + 0.067L^2 - 1.964W^2$, with R^2 and RMSE values of 0.735 and 87.84, respectively. At least ten leaf samples are required when applying the two models. Determining transformed forms of leaf dimensions that are linearly related to leaf area and fresh weight, and integrating all of them into one equation maybe a better solution for establishing models to estimate leaf area and fresh weight of plant species, particularly those with higher variation among individual leaves.

Keywords: *Taraxacum kok-saghyz* Rodin, leaf length, leaf width, estimation model, regression analysis.