

Оригинальные статьи / Original articles

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2023-2-17-28>
УДК 635.63:631.574:001.8

А.В. Курепин^{1*}, А.Ф. Першин¹,
В.Н. Муляр¹, М.К. Белова²

¹ ООО Семеновод

Россия, Краснодарский край, Крымский район,
х. Новоукраинский, ул. Торговая, д. 5

² Кубанский государственный аграрный
университет (КубГАУ)

350044, Россия, г. Краснодар, ул. Калинина, 13

*Автор для переписки: kuralek@mail.ru

Вклад авторов: Все авторы участвовали
в планировании и постановке эксперимента,
а также в анализе экспериментальных данных
и написании статьи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют
об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Курепин А.В., Першин А.Ф.,
Муляр В.Н., Белова М.К. Прижизненное неразрушающее определение площади листьев у растений огурца для массового анализа. *Овощи России*. 2023;(2):17-28.
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2023-2-17-28>

Поступила в редакцию: 24.11.2022

Принята к печати: 15.12.2022

Опубликована: 03.04.2023

Aleksey V. Kurepin^{1*}, Alexander F. Pershin¹,
Valeriy N. Mulyar¹, Margarita K. Belova²

¹ LLC Semenovod

5, st. Trading, Novoukrainsky, Krymsky district,
Krasnodar Kray, Russia

² Kuban State Agrarian University

13, st. Kalina, Krasnodar, 350044, Russia

*Correspondence Author: kuralek@mail.ru

Authors' Contribution: All authors contributed to
the planning and setting up the experiment, as
well as in the analysis of experimental data and
writing of the article.

Conflict of interest. The authors declare that there
is no conflict of interest regarding the publication
of this article.

For citations: Kurepin A.V., Pershin A.F., Mulyar
V.N., Belova M.K. Measuring the area of cucumber
leaves without separation from the plant for
mass analysis. *Vegetable crops of Russia*.
2023;(2):17-28. (In Russ.)
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2023-2-17-28>

Received: 24.11.2022

Accepted for publication: 15.12.2022

Published: 03.04.2023

Прижизненное неразрушающее определение площади листьев у растений огурца для массового анализа



Резюме

Актуальность. Разработать математическую модель распределения площади листьев на растении огурца. На ее основе, с помощью измерения минимального количества параметров: длины и ширины наибольшего листа и количества листьев на растении возможно определение площади листовой поверхности растения без их удаления с растений.

Методы. Для определения фактической площади листьев пользовались двумя методами: весовым и с использованием сканирования изображения листьев в черно-белом режиме. Формулы математических моделей выводили с помощью регрессионного анализа.

Результаты: Разработана и практически опробована система массового определения площади листьев у огурцов. Представлена пошаговая инструкция определения площади листа в обоих случаях: весовым методом и в графическом редакторе по файлу его скана. Точность определения площади составляет при этом $\pm 2\%$. Система включает в себя разработку математической модели распределения площади листьев по растению на момент учета. Для практического использования полученных формул этой модели достаточно измерения всего лишь трех параметров на каждом растении: 1-количество листьев, 2-длина и 3-ширина наибольшего типичного листа. Предложен критерий типичности на основе соотношения длины и ширины листа. Модель совпадает с фактической площадью листьев у растений с типичным распределением на уровне $\pm 5\%$. Это позволяет одному звену в 2 человека измерить до 500 растений за рабочий день. Доля растений с типичным распределением площади листьев колеблется от 90% в начале вегетации до 80-85% - в конце ее. Это позволяет относительно точно при минимальных затратах рассчитывать общую площадь в агротехнических опытах. Листья при этом не получают никаких повреждений и продолжают расти.

Заключение: Разработанный метод позволяет проводить учет листовой площади на одних и тех же растениях многократно, на разных фазах онтогенеза и в разные периоды вегетации.

Ключевые слова: огурец, лист, площадь листьев, математическая модель

Measuring the area of cucumber leaves without separation from the plant for mass analysis

Abstract

Relevance. A mathematical model of the distribution of the leaf area of a cucumber plant has been developed. On this basis, it is possible to determine the area of the leaf surface of the plant without removing them from the plants. By measuring the minimum number of parameters: the length and width of the largest leaf and the number of leaves on the plant.

Methods. We determined the area by two methods: using scales and by scanning the leaves in black-and-white image mode. We present here a step-by-step instruction on determining the area of the sheet in both cases: by weighing and by using graphic editor (program) for his scan file. The accuracy of determining the area is $\pm 2\%$.

Results. We have developed and practically tested a system for mass determination of the area of cucumber leaves. It includes the development of a mathematical model of the distribution of leaf area by plants at the time of accounting. For practical use of the obtained formulas, it is enough to measure only three parameters on each plant: the number of leaves, the length and width of the largest typical leaf. A typicality criterion based on the ratio of the length and width of the sheet was proposed. The model coincides with the actual plant area with a typical distribution of $\pm 5\%$. This allows two people to account for up to 500 plants in one working day. The proportion of plants with a typical leaf area distribution ranges from 90% at the beginning of the growing season to 80-85% at its end. This allows relatively accurate calculation of the total area in agrotechnical experiments at minimal cost. The leaves of the plant do not receive any impact and continue to grow at the same time.

Conclusion. The developed method allows taking into account the area on the same plants repeatedly, at different phases of ontogenesis and in different periods of vegetation.

Keywords: cucumber, leaf, leaf area, mathematical model

Введение

Лист – важный орган растения с ограниченным ростом, уплощенной формы, выполняющий три основные метаболические функции: фотосинтез, газообмен и транспирацию. Фотосинтез – это процесс преобразования солнечной энергии в метаболиты, являющиеся строительным материалом растения. В условиях, когда другие параметры (питание, влажность и т.д.) окружающей среды являются оптимальными, продуктивность растений определяется количеством световой энергии, которую растение может улавливать [1]. Соответственно, площадь листьев является наиболее важным фактором, способствующим росту и продуктивности растений [2]. Кроме этого, интенсивность транспирации прямо влияет на ток соков по сосудам растения и далее на степень поглощения питательных веществ. Поэтому величина площади листьев является основным фактором развития растений из-за ее влияния на все эти процессы [3]. По этой причине измерение площади листьев является важнейшим моментом при оценке большинства агрономических и физиологических исследований, включая развитие растений [4].

Классические методы оценки площади листьев, связанные с отделением листьев от растения и измерением их площади, являются трудоёмкими и не подходят для опытов с небольшим количеством образцов. По этой причине многие ученые стремились разработать простой, недорогой и неразрушающий метод оценки площади листьев.

Неразрушающее измерение площади без отрыва листьев является более предпочтительным в исследованиях на одном и том же растении и листе, что позволяет учитывать динамику процессов в ходе испытаний. Кроме того, возможность определения площади листа с помощью простых линейных измерений устраняет необходимость в дорогостоящих и сложных устройствах для измерения площади листа типа электронных планиметров. По этой причине прогнозирование с помощью математических моделей с использованием данных о размере листьев, полученных путем линейных измерений листьев, очень полезно в исследованиях [5].

Многочисленно проводили разработку таких методов на различных сельскохозяйственных культурах, таких, как виноград [6], земляника [7], кукуруза [8], салат-латук [9] и томаты [10]. На огурце также было проведено множество исследований по разработке методик оценки листовой площади огурца в различных условиях. Так, Bozkurt и Keskin (2018) предложили уравнение прогнозирования площади листьев для различных уровней орошения [11]. Blanco и Folegatti (2005) в условиях различной солености и прививки для тепличных огурцов [12]. Cho и др. (2007) предложили уравнение прогнозирования изменения площади листьев с использованием длины, ширины листа, и значения уровня хлорофилла измеренного с помощью SPAD для огурцов, выращенных на гидропонике [13].

Материал и методы

Исследуемые растения выращивали в осеннем обороте на светокультуре (посев – 16.08.2022, посадка – 02.09.2022, первый сбор – 21.09.2022, ликвидация – 01.12.2022). Опыт проводили на 110 образцах гибридов F₁ селекции компании «Гавриш», в качестве контроля использовали гибриды иностранной селекции: F₁ Бьерн,

F₁ Валигора, F₁ Малахит, F₁ Муромец, F₁ Мева, F₁ Лоэнгрин. Растения выращивали в отапливаемых зимних остекленных теплицах на субстрате из минеральной ваты на шпалере с приспусканием, с использованием искусственного освещения (16 тыс. лк). На 1 м² располагали 2,4 растения, площадь учетной делянки – 2,5 м², расстояние между лотками 1,6-1,8 м, высота шпалеры на светокультуре 3,5 метра. Формирование растений вели в один стебель с приспусканием. На протяжении всей вегетации на растениях удаляли все боковые побеги, учеты проводили на главном побеге. Первый учет площади листьев проводили в фазу первого плодоношения растений 19.09.2022, второй учет – через 1,5 месяца после первого (08.11.2022).

На каждой делянке стандартно высаживали по 6 учетных растений, кроме того дополнительно на 30% делянок было высажено седьмое не учетное растение, которое предназначалось для удаления на разных этапах выращивания. С него срезали все листья, проводили измерения по каждому из них. Всего было обработано более 400 листьев, полностью все на 18 растениях. После создания математической модели для ее практического применения на каждой делянке описывали три растения из шести: обычно 1, 3 и 5. Если среди них было не типичное: с травмами, заломами, поражениями – его заменяли соседним. Одни и те же растения описывали в обоих учетах. Если какое-либо из них было травмировано в период между учетами, брали в работу соседнее. Среднее арифметическое параметров трех типичных растений на делянке использовали для вычисления площади листьев, характерное для данного генотипа.

Результаты исследований и их обсуждение

Первой задачей было определить способ точного измерения площади листа. Начали с весового метода. Для этого контур листа переносили на листовой материал (бумагу) с известной плотностью. Вырезали его и взвешивали. Далее вычислили, сколько весит каждый см². Использовали бумагу повышенной плотности: 1 дм² – 0,823 г или 1 см² – 8,2 мг. Точность наших аналитических весов (OHAUS PA214) составляла 0,1 мг, что соответствует площади в 0,012 см².

Следующим этапом оценили равномерность плотности бумаги по всей площади листа: Его разрезали на фрагменты по 120 см² с максимальной точностью ±0,2 мм. Перед взвешиванием их взаимно совместили, убедившись, что площади каждого точно совпадают друг с другом. Результаты представлены на рисунке 1: хорошо видно, что отклонения от среднего значения не превышают 2%.

1,01	1,00	1,01
1,00	1,00	1,00
1,01	1,01	0,99
1,01	1,00	0,98
1,00	1,01	0,98
1,00	1,01	0,99
1,02	1,02	0,98
0,98	1,00	1,00

Рис. 1. Относительная равномерность плотности бумаги для определения площади листьев. 1,00 = 823 мг/100 см²
Fig. 1. Relative uniformity of paper density for measuring leaf area. 1.00=823 mg/100 cm²

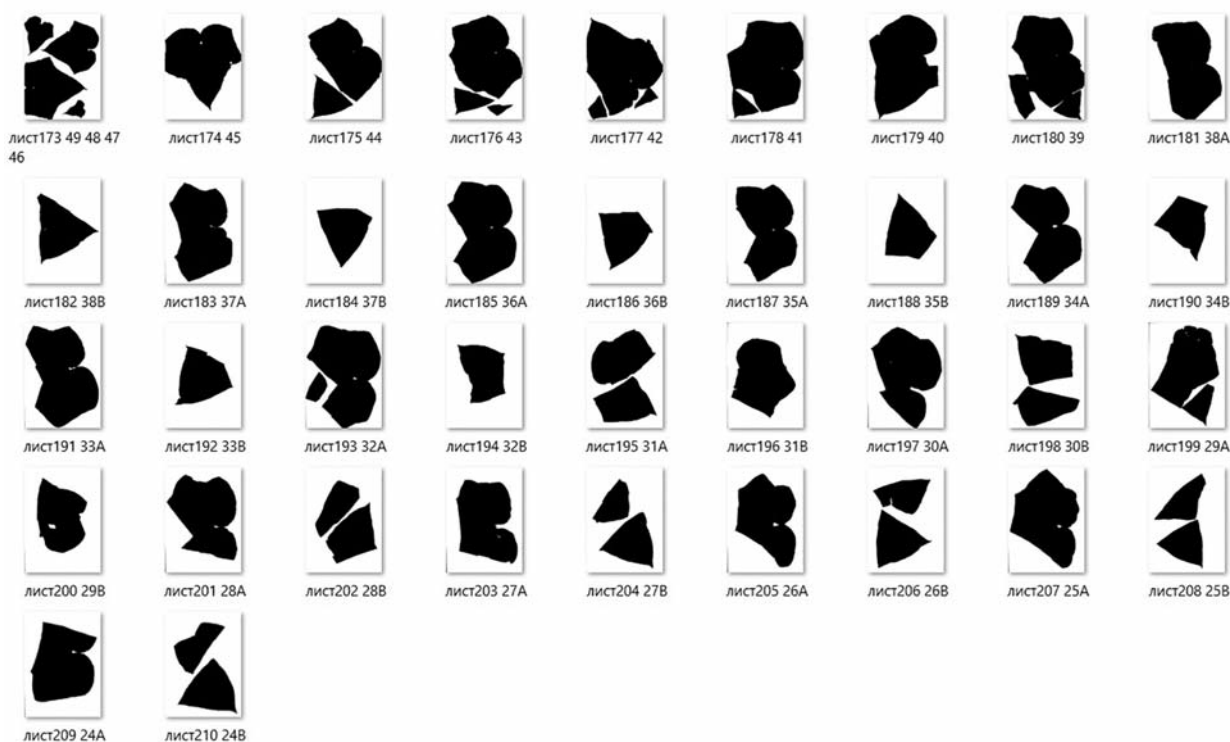


Рис.2. Сканированные фрагменты листьев одного растения. Всего 26 листьев
Fig. 2. Scanned fragments of leaves of one plant. 26 leaves in total

Поскольку каждый лист бумаги использовали для вырезания контура многократно (на большем контуре вырезали контур листа меньшего размера), учитывали возможную ситуацию, когда испарения из листа огурца пропитывают бумагу. При каждом переносе контура листа на бумагу под ним в центре помещали дополнительно контрольный листок из того же материала. Его взвешивали каждый раз перед взвешиванием очередного контура. Никаких достоверных изменений массы такого контроля даже при многократных повторях не обнаружили: лист растения не передавал влагу на бумагу в количествах, способных исказить получаемые данные.

Площадь листа рассчитывали по формуле:

$$S = m/P \cdot 100 \quad (1);$$

где S – площадь листа в см^2 , m – масса его бумажного контура в мг, P – плотность дм^2 (100 см^2) в мг.

Например, масса бумажного контура в $m=2,354$ г соответствовала площади 286 см^2 при плотности $P=823 \text{ мг/дм}^2$, или при $m=4,956$ г – площади 602 см^2 .

Это относительно точный метод с ошибкой не более 2%, однако является довольно громоздким и трудоемким. Два человека обрабатывали 5 растений с общим количеством 130 листьев полный рабочий день. Поэтому испытали ещё и вариант со сканированием листьев на фото-сканере “EPSON Perfection V600 Photo”.

Сканирование проводили с параметрами: тип скана – «черно-белый»; разрешение – 100 dpi; размер окна 215,9x297,2 мм (полное по умолчанию). Полученные в формате «*.jpg» изображения, записывали в отдельную папку, с указанием даты сканирования, номера делянки и растения. Каждый лист нумеровали, и этот номер указывали в имени файла. Если размер листа

выходил за рамки окна сканера, отрезали выступающие части и помещали их на свободное место. Если и этого оказывалось недостаточно, разрезали лист пополам и обе половинки его сканировали отдельно: скан фрагментов одного листа записывали в двух файлах: № «А» и № «В».

На рисунке 2 показаны результаты сканирования 26 листьев одного растения. Такой подход ускоряет работу в 2-2,5 раза по сравнению с весовым методом.

Получение числовых значений площади листа можно проводить в любом графическом редакторе, имеющем необходимые инструменты. Мы использовали «Adobe Photoshop CS3». Для этого создается новый файл с размером холста 215,9x297,2 мм, как окно сканера и с разрешением 100 пикселей/см. Туда с помощью инструмента «Перемещение» вставляется необходимый файл. Далее инструментом «Трансформирование» границы этого файла точно совмещаем с границами холста файла «Нового». Все черные контуры выделяем инструментом «Быстрое выделение». Во вкладке «Гистограмма» используем режим «Расширенный просмотр». В графе «Источник» выбираем «Выделенный слой». После этих шагов следует «Обновить данные». Наконец, в графе «Пиксели» указано количество пикселей в выделенном фрагменте. Если отбросить последние четыре цифры, получаем его площадь в см^2 . При некотором опыте все эти операции вместе занимают всего 15-20 с – время определения площади одного листа.

На рисунке 3 видно, что оба метода практически полностью совпадают по сумме площадей всех листьев и по виду распределения площадей по растению. Все отклонения в сторону «+» полностью компенсированы отклонениями в сторону «-». Вычисленная с их помощью площадь каждого отдельного листа может отличаться до 12-15 см^2 , что не превышает 2%.

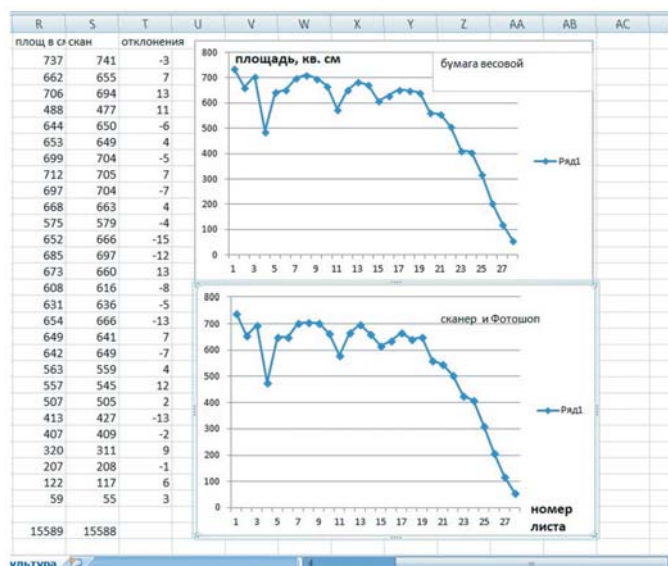


Рис.3. Сравнение площади листьев одного и того же растения, определенных бумажно-весовым способом и анализом скана листа в графическом редакторе
Fig. 3. Comparison of leaf areas of the same plant measuring by paper-weight method and by analysis of leaf scan into a graphic editor

Таким образом, использование сканера и графического редактора для определения площади листьев оказалось в 2-2,5 производительнее, чем бумажно-весовой метод при одинаковой 98% точности. Поэтому все остальные измерения мы проводили только с помощью сканера.

Следующим этапом нашей работы было определение связи площади листа с его линейными размерами (рис. 4), минимизировать её возможные искажения.

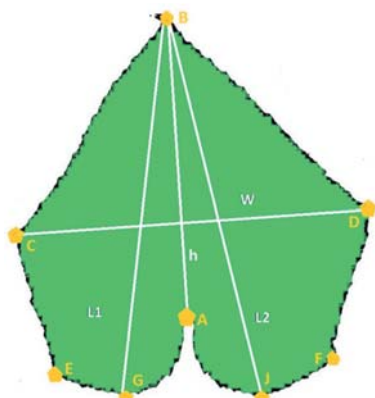


Рис.4. Линейные параметры листа, измеряемые при определении его площади. W - ширина, L - длина, h - длина центральной жилки. Жёлтым отмечены реперные точки
Fig. 4. Linear parameters of leaf, measured of its area. W - is the width, L - is the length, h - is the length of the central vein. Reference points are marked by yellow

Если измерение ширины листа (W – максимальное расстояние между его боковыми краями) не вызывала вопросов, то измерение длины многие авторы проводят по-разному. Одни измеряют расстояние от точки прикрепления черешка до верхушки, при этом не учитывается разнообразие нижних долей; другие – параллельно центральной жилке от края доли до верхушки, что не учитывает асимметрию листа. Однако асимметрия огуречного листа довольно часто присутствует и

порой достигает существенных величин. Поэтому мы производили два измерения от верхушки до вершин обеих долей: L_1 и L_2 . А длиной «L» считали среднее арифметическое между ними:

$$L = (L_1 + L_2)/2 \quad (2)$$

На выборке из более чем 400 листьев, принадлежавших 18 растениям, изучили изменчивость этих параметров и их связь с площадью листа. На рисунке 5 представлены четыре из 18 как иллюстрация закономерностей. Отмечено (на рис.5. пунктиром), что у всех огурцов в нашем опыте отношение L/W закономерно увеличивалось от 1,00 у старых листьев в низу растения до 1,20 у молодых на верхушке. Т.е. молодые листья более вытянутые. С возрастом листа становятся шире. При этом отмечали регулярные «провалы» этого коэффициента до 0,80 и даже до 0,60 у отдельных листьев. Они связаны с травмированием или сломом центральной жилки в процессе ухода. Тогда рост листа в длину резко затормаживается. Таких листьев отмечали в среднем по 2,2 шт. на каждое растение.

Коэффициент « L/W » – очень важный критерий на типичность листа, ведь в обсуждаемом методе центральное место занимает т.н. «наибольший лист» растения, и его параметры являются ключевыми. Он обязательно должен быть типичным. Поэтому, наибольшим листом, включенным в математическую модель, является лист с не только максимальными значениями L и W , но и его отношение L/W должно находиться в диапазоне 1,00-1,15. Если оно меньше 1,00 следует измерить и внести в модель соседний ему лист.

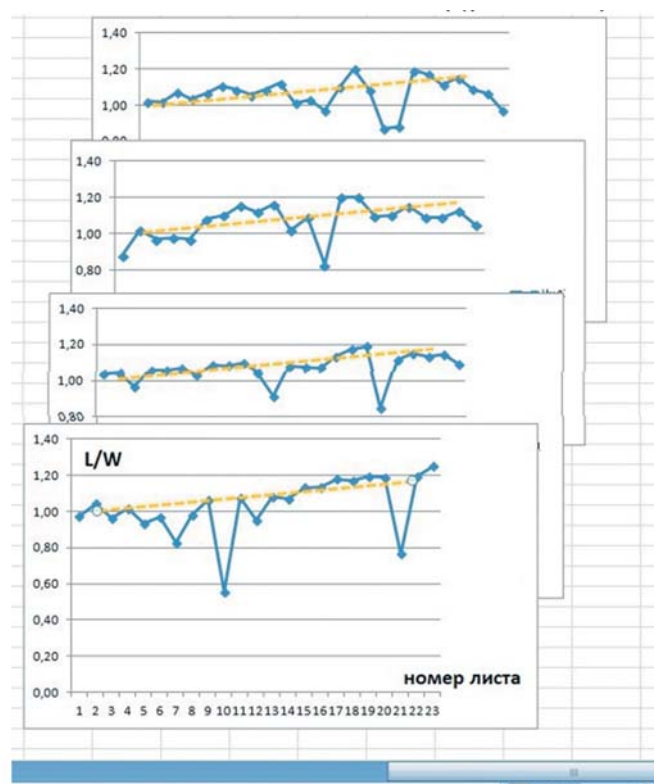


Рис.5. Изменение индекса листа огурца (соотношения L/W) на основном побеге растения. Пунктиром указан основной тренд: молодые листья более удлиненные
Fig. 5. A change in the cucumber leaf index (L/W ratio) along the main stem of the plant. Young leaves are more elongated

Следующий этап создания методики массового определения площади листьев заключался в изучении связи линейных параметров листа и его площади. Для этого изучили изменчивость коэффициента $P=L*W/S$ (3), отношение произведения длины на ширину листа к его площади. С его помощью возможно вычислять площадь по длине-ширине листа. Этот коэффициент выбран из множества предложенных разными авторами вариантов связи площади листа и его линейных параметров [11,12,13], включающих множественную регрессию, квадраты величин отдельных параметров и т.д. Выбор основан на том, что и W и L имеют свою независимую изменчивость, исключение любого из них увеличивает разброс и отклонения математической модели от фактических данных, а их произведение сохраняет всю эмпирическую информацию о форме листа. К тому же длина листа « L » у разных авторов измеряется по-разному и обозначает не одно и то же.

Как видно из рисунка 6, на котором приведены пять растений из 18, данный коэффициент « P » в целом колеблется в диапазоне 1,40-1,60 кроме 3-4 верхних, самых молодых, листьев, где он может достигать величин до 1,7 и даже до 1,9. Более того, около 75% всех листьев имеют этот параметр в более узком диапазоне 1,45-1,57. Наиболее интересует величина этого коэффициента у самых крупных листьев на всех 18 проанализированных растениях. Она составила от 1,48 до 1,52, в среднем 1,49.

Было бы заманчивым отыскать связь между коэффициентами « L/W » и « $P=L*W/S$ », чтобы не довольствоваться средним значением последнего 1,49, а с помощью первого выбирать более точное значение из диапазона 1,48-1,52 для каждой конкретной ситуации. Однако такой

связи обнаружить не удалось. На рисунке 7 отображено взаимное расположение обоих коэффициентов в двумерном поле у всех измеренных листьев. Видно, что генеральная средняя $P=1,51$, но если рассматривать только типичные листья в указанных рамках, то $P=1,49$, если еще сузить рамки до $1,00 < L/W < 1,05$, в которых находятся большинство самых крупных листьев, то $P=1,48$.

Из этого следует, что наиболее предпочтительно использовать $P=1,48-1,49$ при расчете площади листа по

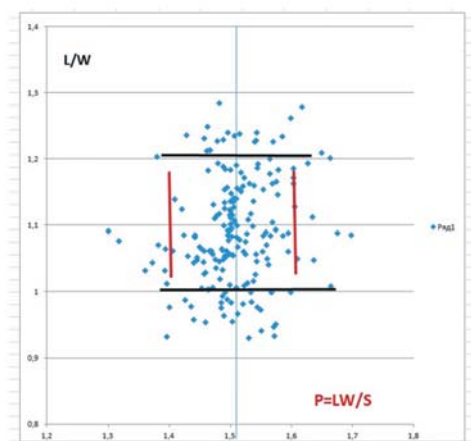


Рис.7. Взаимное расположение коэффициентов формы « L/W » и площади « $P=L*W/S$ » листьев огурца. Цветными штрихами отмечены границы обычного варьирования величин коэффициентов у типичных листьев
Fig. 7. The relative position of the coefficients of the shape "L/W" and the area "P=L*W/S" of cucumber leaves. Color lines mark the borders of the usual variation in the values of coefficients in typical leaves

его линейным параметрам в общем случае, или ориентироваться на параметры растений обучающей выборки в каждом конкретном опыте.

Различные авторы применяли разные подходы для расчета площади листа у огурца по его линейным параметрам. Для корректного сравнения их формул друг с другом обозначения в них унифицировали следующим образом: S – площадь листа; W – его ширина; h – длина центральной жилки, L – длина листа с учетом нижних долей.

Bozkurt и Keskin (2018) подтвердили преимущество использования длины и ширины листа не по отдельности, а совместно [11]. Наибольшую точность расчётной и фактической площади они достигли при использовании формулы:

$$S = -2.8849 + 0.5023 * (W)^2 + 0.2474 * (h)^2 \quad (4)$$

Американские ученые Robbins и Pharr (1987) разработали модели определения площади листа огурца, в различных условиях выращивания. Была отмечена необходимость постоянного уточнения модели для конкретных условий [14]. Самой точной их моделью была:

$$S = 14.61 - 5.0(h) + 0.94(h^2) + 0.47(W) + 0.63(W^2) - 0.62(h \times W) \quad (5)$$

Индийские ученые Mahesh Chand Singh (2018) постарались связать параметры растений и площадь через уравнение регрессии [15]:

$$S = 0.004094(192.684(hh/100) + (hW/100) - 1) \quad (6)$$

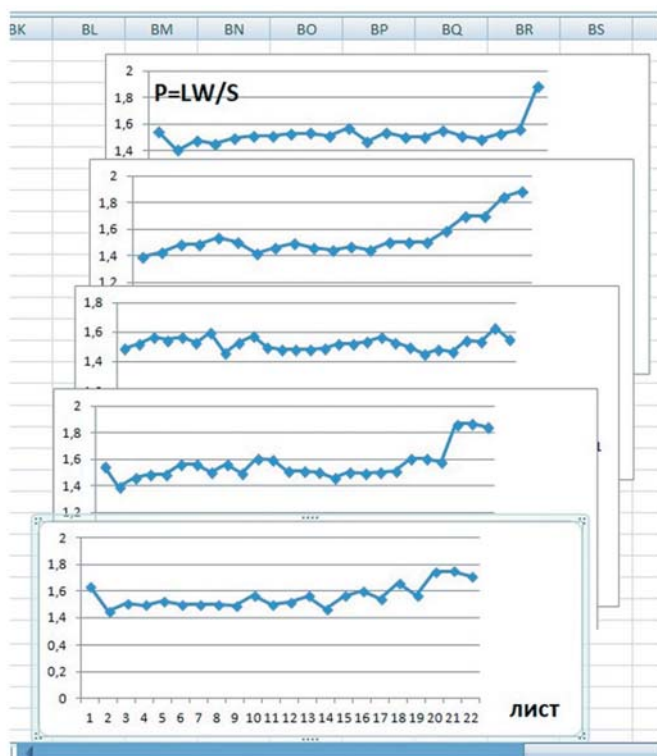


Рис.6. Изменчивость коэффициента $P = L*W/S$ на основном побеге у отдельных растений
Fig. 6. Variability of the coefficient $P = L*W/S$ along the main stem in individual plants

Корейский ученый Y. Cho (2006) занимался моделированием изменения площади листьев в процессе их роста [13]. Для определения индивидуальной площади листа использовал регрессионное уравнение:

$$S=0,849 \cdot hW-29,96 \quad (7)$$

В 2003 году бразильские ученые разрабатывали новый метод определения площади листьев для оценки привитых и не привитых растений. Ими была выбрана формула

$$S=0,85 \cdot (hW) \quad (8),$$

которая отражает те же отношения, что и наша формула (3), но с противоположной позиции [12].

Для сравнения разных математических моделей вычисления площади листьев по их линейным размерам, часть растений с наибольшим количеством листьев описали более подробно: кроме обсуждаемых длины (L) и ширины (W), измеряли также и длину центральной жилки (AB=h) от точки прикрепления черешка до верхушки листа. Каждый лист сканировали (столбец 1 табл. 1), и затем по его линейным размерам вычисляли теоретическую площадь.

Для сравнения мы взяли наиболее часто используемые формулы от (Cho, 2007) и (Bozkurt и Keskin, 2018) [11, 13].

Модель 1 основана на нашей формуле $S=WL/P$, где $P=1,45$. Модель 5 – взята нами из публикации (Cho, 2007) [13], где $S=0,849 \cdot hW-29,96$. Она основана на вычислении параметров (a и b) линии регрессии $S=a \cdot hW+b$ на обучающих выборках. Модель 4 взята из публикации (Bozkurt и Keskin, 2018) [11], которые оценили ее как наиболее точную из всех ими испытанных: $S=W^2 \cdot 0,5023+h^2 \cdot 0,2474-2,8849$. В ней применена множественная регрессия. Математика, обычно недоступная обычным агротехническим опытам.

Модель 3 получена нами из Модели 5. Стандартный подход, но на собственной обучающей выборке: $S=0,8927 \cdot hW-17,887$. Видно, что коэффициенты a и b этих моделей отличаются, но не принципиально. Наконец, Модель 2 получена из Модели 3 путем замены параметра «h» на параметр «L» на той же самой обучающей выборке: $S=0,682 \cdot LW+0,2722$. Поскольку «L» всегда значительно больше «h» на 20-25%, то и коэффициент регрессии a заметно уменьшился. Еще более уменьшился свободный член b от -30,0 и -18,0 почти до нуля. Модели пронумерованы и расположены по степени сходства с эталонными значениями площадей листьев в столбце 1.

Таблица 1 наглядно показывает, что Модель 1 определения площади листьев наиболее из всех близка к эталону: сумма отклонений от него по всей выборке составила всего -0,03, что дало среднее отклонение равное 0,00. Максимальное отклонение равно 0,07. Следующей идет Модель 2 с суммой отклонений 0,28 (в 10 раз больше, чем у Модели 1) и средним отклонением 0,01. Максимальные отклонения их практически равны: 0,07 и 0,08. Зато сопоставление моделей 2 и 3 наглядно показывает бульшую информативность параметра «L» относительно «h», поскольку он, в отличие от второго, учитывает и разнообразие нижних долей огу-

речного листа: сумма отклонений в пять, а среднее отклонение в 4 раза больше у Модели №3. Также и её максимальное отклонение вдвое превышает таковое у Модели 2. Модель 4 с квадратами параметров действительно более эффективна, чем стандартное уравнение регрессии в Модели 5. Однако обе модели 4 и 5 далеко отстают от моделей 1, 2, 3 по уровню соответствия эталону. Причина не в менее адекватной математике, а в том, что их обучающие выборки были сформированы совсем на другом материале, генетически отличном от нашего. Хорошо видно, что все отклонения в Моделях 4 и 5 происходят в сторону «+». Т.е. эталонные площади системно больше расчетных, по этим моделям. Это происходит потому, что у используемых авторами сортов листья были менее округлыми: у нашего материала край листа между реперными точками (рис.4) CE, DF, EG, FJ представляет практически прямую линию (лист более угловатый), а у их – вогнутую дугу. Эта дополнительная для них площадь составляет 10-12%. Введение поправок от «+9%» до «+12%» в случаях с формулами (4) и (7) приводит к очень хорошему соответствию эталону, когда сумма отклонений стремится к нулю.

Из этого видно, что линейные размеры листа – это расстояния между реперными точками, которые не чувствительны к изменчивости края между ними: выпуклый он, ровный или вогнутый. Рис.4. создан на базе реального скана типичного листа нашего материала и край там практически ровный. Это справедливо только для наших генотипов в наших конкретных условиях. В других условиях и/или для других генотипов лист огурца может быть как более округлым, так более вогнутым (площадь меньше до 13%). Это приводит к тому, что даже в одинаковых формулах числовые коэффициенты будут отличны. Они должны вычисляться под каждую конкретную ситуацию, а не использоваться одинаково во всех случаях.

В таблице 1 представлено сопоставление моделей и по количеству листьев с более точным прогнозом площади (с меньшим отклонением) по сравнению с Моделью 1: так дробь 21/7 указывает, что 21 лист был определен Моделью 1 более точно, чем Моделью 2; и 7 листьев более точно вычислены по Модели 2. Соответственно дробь 32/3 указывает, что 32 листа были определены Моделью 1 более точно, чем Моделью 4, и только 3 листа (из 36) Модель 4 предсказала лучше первой.

Существует еще множество математических моделей, связывающих площадь листьев и их линейные размеры, в том числе и с использованием логарифмов, однако их эффективность не выше наших Моделей 1 и 2. Из этого следует два базовых вывода:

Первый: любая обучающая выборка для создания математической модели должна быть максимально приближена по всем характеристикам к описываемому экспериментальному материалу. Нет более «правильных» формул, есть более точные числовые коэффициенты в этих формулах. Этот вывод подтвержден Роббинсоном и Фарром (1987), которые также отмечали необходимость постоянного уточнения модели для конкретных условий [14].

Второй: длина листа более точно отражает форму и площадь листа, если учитывает и его нижние доли, их асимметрию. Иначе: параметр $L=(L_1+L_2)/2$ более

Таблица 1. Сравнительная эффективность математических моделей определения площади листа огурца по его линейным размерам
Table 1. Comparative effectiveness of mathematical models for measuring area of a cucumber leaf by its linear dimensions

	Эталон	Модель 1		Модель 2		Модель 3		Модель 4		Модель 5	
№ пп	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	площадь, см ²	площадь, см ²	отклонение	площадь, см ²	отклонение	площадь, см ²	отклонение	площадь, см ²	отклонение	площадь, см ²	отклонение
1	549	540	0,02	534	0,03	488	0,11	472	0,14	451	0,18
2	739	751	-0,02	743	-0,01	689	0,07	687	0,07	642	0,13
3	710	684	0,03	677	0,05	646	0,09	622	0,12	602	0,15
4	764	728	0,05	720	0,06	668	0,13	654	0,14	622	0,19
5	781	751	0,04	743	0,05	689	0,12	687	0,12	642	0,18
6	795	774	0,02	765	0,04	748	0,06	711	0,11	698	0,12
7	700	728	-0,04	720	-0,03	668	0,05	654	0,07	622	0,11
8	795	774	0,03	765	0,04	741	0,07	732	0,08	692	0,13
9	689	683	0,01	675	0,02	625	0,09	592	0,14	581	0,16
10	645	641	0,00	635	0,02	625	0,03	592	0,08	581	0,10
11	689	684	0,01	677	0,02	646	0,06	622	0,10	602	0,13
12	690	683	0,01	675	0,02	678	0,02	616	0,11	632	0,08
13	610	641	-0,04	635	-0,04	652	-0,07	604	0,01	607	0,00
14	614	599	0,02	592	0,04	607	0,01	546	0,11	564	0,08
15	643	640	0,00	633	0,02	655	-0,02	587	0,09	610	0,05
16	644	662	-0,02	655	-0,02	678	-0,05	616	0,04	632	0,02
17	629	599	0,05	592	0,06	582	0,08	533	0,15	541	0,14
18	630	662	-0,04	655	-0,04	652	-0,03	604	0,04	607	0,04
19	622	640	-0,02	633	-0,02	629	-0,01	574	0,08	586	0,06
20	599	620	-0,03	613	-0,02	578	0,04	550	0,08	536	0,10
21	523	521	0,00	516	0,01	512	0,02	483	0,08	474	0,09
22	396	397	0,00	392	0,01	393	0,01	362	0,09	361	0,09
23	498	521	-0,04	516	-0,04	512	-0,03	483	0,03	474	0,05
24	467	466	0,00	461	0,01	451	0,03	420	0,10	416	0,11
25	396	397	0,00	392	0,01	393	0,01	362	0,09	361	0,09
26	400	412	-0,02	408	-0,02	434	-0,08	383	0,04	400	0,00
27	333	348	-0,04	344	-0,03	338	-0,02	308	0,08	309	0,07
28	345	349	-0,01	345	0,00	355	-0,03	330	0,05	325	0,06
29	233	248	-0,05	246	-0,06	239	-0,03	223	0,04	215	0,08
30	290	303	-0,04	300	-0,03	286	0,02	270	0,07	259	0,11
31	215	199	0,07	197	0,08	182	0,15	174	0,19	160	0,25
32	179	176	0,02	174	0,03	170	0,05	159	0,12	148	0,17
33	133	134	-0,01	133	0,00	110	0,17	112	0,16	91	0,31
34	98	91	0,06	90	0,07	80	0,18	83	0,15	63	0,35
35	88	91	-0,03	90	-0,03	80	0,09	83	0,06	63	0,28
36	61	62	-0,01	62	-0,01	54	0,11	58	0,05	39	0,36
		ср. отклонение	0,00		0,01		0,04		0,09		0,13
		сумма отклонений	-0,03		0,28		1,48		3,26		4,63
		макс. отклонение	0,07		0,08		0,18		0,19		0,36
		Модели			21/7		28/7		32/3		33/2

Таблица 2. Параметры растений обучающей выборки Table 2. Parameters of plants for the training sample
Table 2. Parameters of plants for the training sample

№ пп	Количество листьев, шт.	Наибольший лист					Листовая поверхность растения Sp, см ²
		W, см	L, см	L/W	фактическая площадь S, см ²	P=W/L/S	
1	25	34,5	37,5	1,09*	924	1,40	15662
2	22	31	33,5	1,08*	694	1,50	10446
3	24	37	38,2	1,03*	993	1,42	16298
4	23	31	33	1,06*	735	1,39	11401
* - типичный лист, попадает в диапазон L/W 1,00-1,15						ср. 1,43	

информативен, чем обычно используемый «h» – длина центральной жилки.

Теперь, когда основные связи параметров листа и растений установлены, можно приступать к созданию математической модели площади листовой поверхности. Одновременно с массовым учетом, когда на 110 делянках описываются по 3 растения: на каждом подсчитывается количество листьев и параметры его самого большого листа – его длина, ширина и (желательно, но не обязательно) номер; берем не менее пяти типичных растений из числа «седьмых», неучётных, для создания обучающей выборки. Если не получается одновременно, то взятие их нужно осуществить не более, чем за два дня до или после учета. Желательно, чтобы количество листьев у них было разным, и охватывало весь диапазон в границах учета.

У этих растений отделяем все листья, нумеруем их, определяем площадь каждого (любым из доступных методов), выявляем самый крупный. У него дополнительно кроме площади и номера измеряем длину и ширину, проводим тест на типичность (табл. 2):

В таблице 2 фигурируют лишь четыре растения из пяти. Дело в том, что пятое признано не типичным из-за чрезвычайно малого количества листьев (17 вместо 22-25) и аномально большой разницы наибольшего листа

по сравнению с соседним. Обычно эта разница не превышает 2-4%, тут же доходила до 49%. На рис.8 хорошо видны отличия типичных распределений от нетипичного. Поэтому пятое растение исключено из процесса построения математической модели распределения площадей.

Для объединения данных растений с типичными распределениями площадей в единую модель провели их нормировку: у каждого номер листа заменили на частное: номер разделили на количество листьев. Например, 5й лист при 25 учетных листьях имел нормированный номер $n=5:25=0,20$. Теперь у всех растений верхний лист имеет номер 1,00, а все остальные – доле от него. Также поступили с площадями каждого листа: их разделили на площадь наибольшего из них. Теперь площадь каждого наибольшего листа равна единице, а все остальные – доле от него. Нормированные данные легко объединить в единую модель путем прямого суммирования (рис.9).

Совокупность (сумма) всех типичных распределений и является математической моделью распределения площадей листьев на растении. Формула ее тренда позволяет найти площадь любого листа по его номеру:

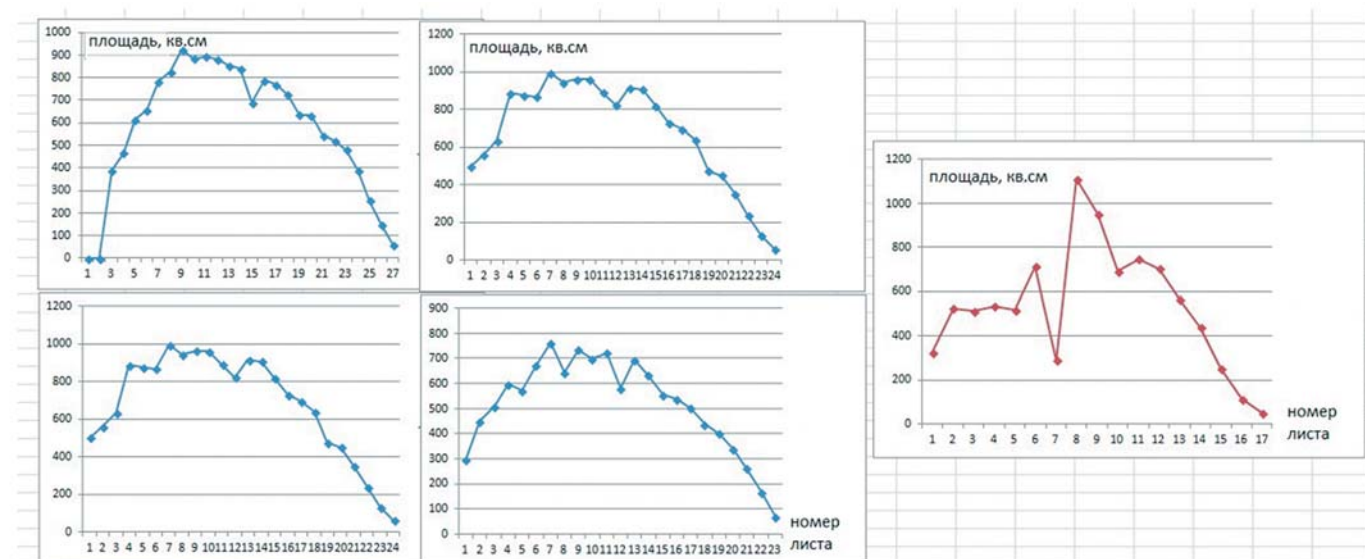


Рис.8. Типичные (слева) и нетипичное (справа) распределения на растении листовой поверхности обучающей выборки
Fig. 8. Typical (left) and atypical (right) leaf area distributions of the training sample

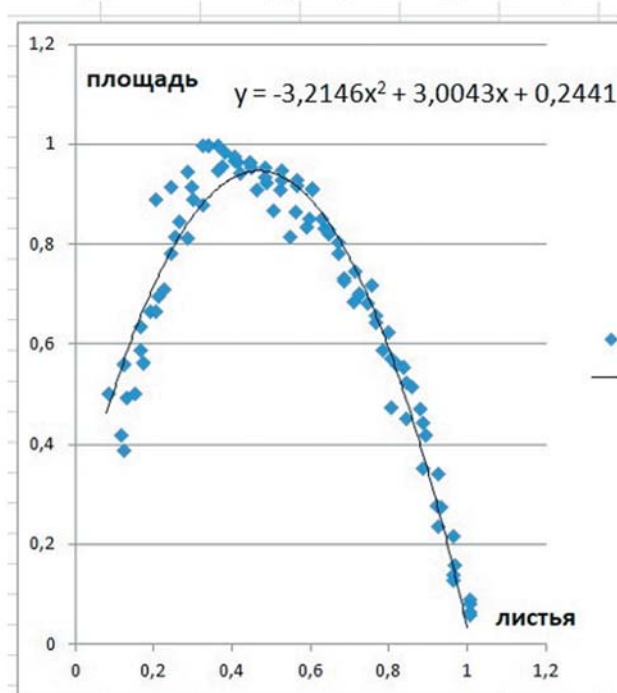


Рис.9. Модель нормированного распределения площади листьев по данным обучающей выборки
Fig. 9. The model of the leaf areas distribution according to the training sample data

$$S = -3,2146 \cdot n^2 + 3,0043 \cdot n + 0,2441 \quad (9),$$

где S – площадь; n – номер листа относительно диапазона 0,00-1,00.

Например, на типичном растении 25 листьев. Шаг считывания формулы (9) составит $1/25 = 0,04$. Итак, для первого листа $n = 0,04$. По формуле его площадь составит 0,36 частей площади наибольшего листа (ПНБЛ). Для пятого листа $n = 5 \cdot 0,04 = 0,20$ и его площадь $S = 0,72$ ПНБЛ; для 12-го $n = 12 \cdot 0,04 = 0,48$ и $S = 0,95$ ПНБЛ, для 20-го $n = 0,80$ и $S = 0,59$ ПНБЛ; наконец, для 25-го $n = 1,00$ и $S = 0,03$ ПНБЛ. Выписав таким образом площади всех листьев и просуммировав их, мы получаем значение листовой поверхности всего растения. Оно составляет $Sp = 16,74$ ПНБЛ. Сравним его с фактическими данными (из табл.2) $Sp = 15662/924 = 16,95$ ПНБЛ. Разница с математической моделью составляет всего лишь 1,2%.

Соответственно шаг считывания для растения с 20 листьями $1/20 = 0,05$, для 21 – 0,048; для 22 – 0,045, для

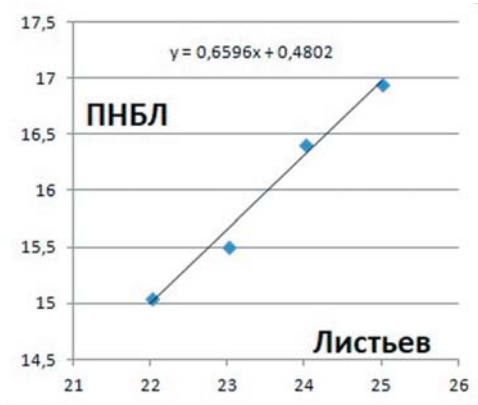


Рис.10. Зависимость площади листовой поверхности растения огурца (в единицах ПНБЛ) от количества листьев на нем
Fig. 10. The dependence of the leaf area of the cucumber plant (in units of PNB�) from the number of leaves on it

23 – 0,043 и для 24 листьев – 0,0417. Этого достаточно, чтобы просчитать площадь листовой поверхности для любого растения с типичным распределением.

Однако есть и более короткий, хотя и менее точный, путь. Наша обучающая выборка была очень удачно подобрана так, что охватывала почти все основные случаи описываемого материала: растения с листьями от 22 до 25. Для каждого из них рассчитаем площадь листовой поверхности в единицах ПНБЛ: 22 – 15,05; 23 – 15,51; 24 – 16,41 и 25 – 16,95. Графическое построение демонстрирует нам достаточно чёткую линейную зависимость (рис.10) этих величин.

Приведенная формула (10) служит основой применения математической модели распределения площадей листьев на растениях.

$$Sp = N \cdot 0,6596 + 0,4802 \quad (10)$$

где Sp – листовая поверхность в единицах ПНБЛ, N – количество листьев на растении.

Сравним соответствие математической модели эмпирическим данным (табл.3) и этим продемонстрируем алгоритм практического применения обсуждаемого метода:

Итак, для каждого растения считаем количество листьев и измеряем длину с шириной наибольшего типичного листа – «нбл» (столбцы 1, 2 и 3 в таб.3). Для растений обучающей группы дополнительно

Таблица 3. Соответствие математической модели распределения площади листьев фактическим данным
Table 3. Accordance of the mathematical model of the distribution of the leaf area to the actual data

Количество листьев N, шт.	W нбл, см	L нбл, см	S нбл, см ²	Площадь листовой поверхности, см ²	ПНБЛ, шт.	ПНБЛ, шт.	S нбл, см ²	Площадь листовой поверхности, см ²	см ²	%%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
22	31	33,5	694	10446	15,05	14,99	726	10887	-441	-4,22%
23	31	33	735	11401	15,51	15,65	715	11196	205	1,79%
24	37	38,2	993	16298	16,41	16,31	988	16121	177	1,08%
25	34,5	37,5	924	15662	16,95	16,97	905	15353	309	1,97%

* – цветом выделены измеренные данные; нбл – наибольший лист; ПНБЛ – площадь наибольшего листа

измеряем площадь наибольшего листа и всю листовую поверхность (столбцы 4 и 5). Данные столбца 6 получены из столбцов 4 и 5 и послужили основой выведения формулы (10). При ее использовании аргументом были данные колонки 1, а результаты представлены в столбце 7. Для получения данных столбца 8 использовали отношение произведения столбцов 2 и 3, к коэффициенту $P=1,43$ из таблицы 2. Конечный результат, листовая поверхность растения (столб. 9), получается перемножением столбцов 7 и 8. Отклонения математической модели (столб. 9) от фактических данных (столб. 5) в абсолютных величинах кв.см и в процентах представлены соответственно в столбцах 10 и 11. Величина таких отклонений не превышает 5%. Можно также сравнить данные столбцов 6 и 7. Их отличия находятся в пределах от 0,1% до 0,9%. Разница между данными в столбцах 4 и 8 по площади наибольшего листа колеблется от 0,4% до 4,6%.

Подводя итог сравнению всех параметров математической модели с фактическими данными, можно утверждать, что она с высокой степенью точности отражает реальные распределения площадей листьев по растениям. Это, конечно, касается только растений с типичными распределениями, и таких мы наблюдали более 90% при первом учете среди 110 делянок (всего просмотрено более 700 растений). Отклонения от типичности практически всегда бывали в меньшую сторону (меньше листьев, меньшие площади и т.д.). Они были вызваны в основном травмами растений при уходных работах по уходу (сломаны верхушки – отросли боковые побеги, перекручены и надломлены стебли или черешки и т.д.). Таким образом, чтобы объективно и довольно точно описать площадь листовой поверхности 330 учетных растений (один день работы для двух человек) нам понадобился детальный анализ лишь пяти растений обучающей выбор-

ки, которые относились к неучетной группе, и которых всего было высажено около 50 шт. Определение площади их листьев (два человека на пол дня) и расчет параметров математической модели (один сотрудник на пол дня) позволяют говорить о высокой производительности предлагаемого подхода.

Мы провели проверку предлагаемой методики на том же материале, но в другую, более позднюю, фазу производственного цикла. Через полтора месяца растения пережили несколько фаз приспускания, количество сформированных узлов достигло 60-65 шт. Нижние листья (от 35 до 42 шт.) и боковые стебли были удалены, живых работающих листьев на каждом растении было от 22 до 27.

Пять растений обучающей выборки для формирования модели были изъяты и детально описаны: измерены площадь каждого листа и дополнительно длина и ширина наибольшего из них. Измерения проводили с помощью сканера и анализа в графическом редакторе, согласно вышеописанным процедурам. Распределения площадей листьев по растениям (рис. 11) кардинально отличались от распределений первого учета:

У 10-12 листьев от верхушки (зона роста) шло равномерное увеличение размеров. Далее к низу (зона плодов) наблюдали «турбулентность» – резкие колебания графиков с множеством пиков и провалов, бессистемных и хаотичных. Считаем, что причиной этому могли быть нагрузки на лист, вызванные плодоношением: формирование зеленца затормаживало рост листа, уборка плодов порождала пики.

Нормированные распределения вместе сформировали следующую модель (рис. 12):

В зоне листа 0,6-1,0 (зона роста) все графики хорошо совпадают и зависимость площади листа от его номера ясна и понятна. Зато в зоне 0,0-0,6 (зона плодоношения) имеющаяся «турбулентность» заметно иска-

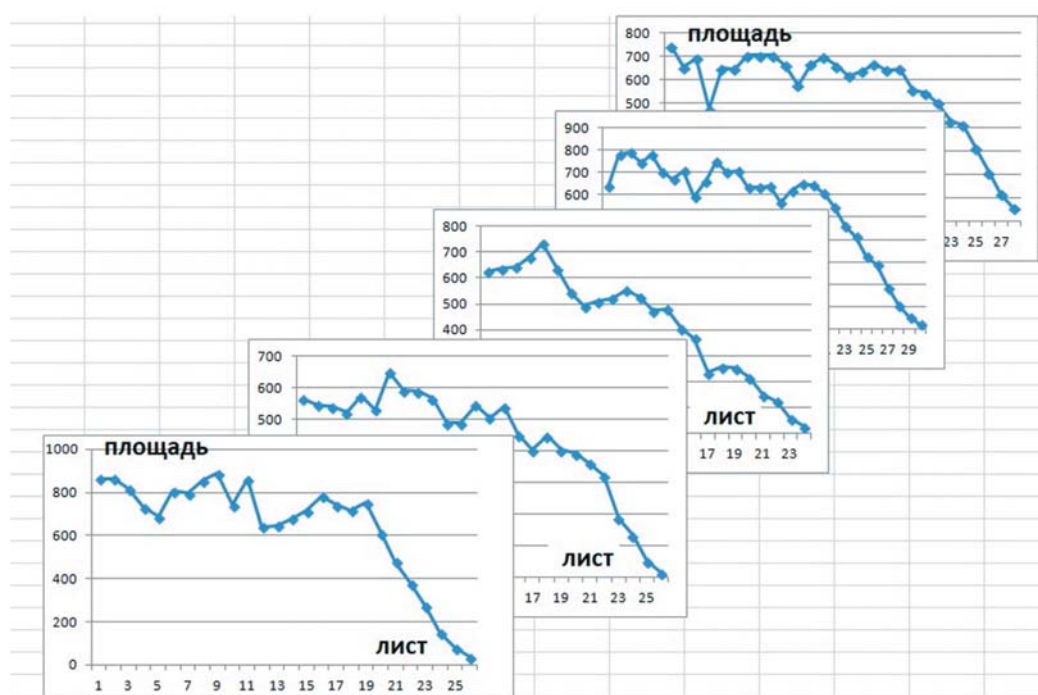


Рис. 11. Распределения площадей листьев у растений обучающей группы
Fig. 11. Distribution of leaf areas in plants of the training group

жает основную квадратичную линию тренда: она проходит явно выше середины эмпирических точек в районах 0,2-0,6 и 0,8-1,0; и ниже в районе 0,6-0,8. Возможно, построить альтернативную кривую на основе визуальных оценок или заменить квадратичную зависимость комбинацией двух линейных: одна для диапазона 0,0-0,7, другая – для диапазона 0,7-1,0 как показано на рис.12 синими линиями. Однако оба варианта страдают субъективностью, отсутствием четких критериев типичности имеющихся данных.

Поэтому мы вернулись к варианту регрессии количества листьев и листовой поверхности в единицах ПНБЛ. В том случае, если бы такой подход завышал данные в зоне «турбулентности», можно было бы ввести поправочный коэффициент. Параметры обучающей выборки представлены в таблице 4.

Все пять растений по пропорциям их наибольшего листа (столб. 3 и 4) соответствуют критерию типичности, т.е. он выбран правильно (столб. 5). Коэффициент $P=WL/S=1,49$ (столбец 7), связывающий размеры и форму листа, полностью соответствовал предварительным исследованиям, т.к. в фазе второго учета листья были уже полностью сформированными, тогда как во время первого учета на молодых листьях он был занижен до уровня $P=1,43$. Однако листовая поверх-

ность в единицах ПНБЛ (столб. 9) показала, что третье растение с максимальным количеством листьев – 30, не может быть отнесено к типичным, т.к. его параметры (21,06 ПНБЛ) ниже таковых у первого растения с 28 листьями (22,11 ПНБЛ). Дальнейший ход анализа подтвердил правильность этого вывода: среди оцениваемых растений не было ни одного с 30 листьями. Максимальное количество листьев было 29. Данное нетипичное растение отличалось от остальных усиленным ростом при малых размерах листьев в среднем.

Линия регрессии параметров из столбцов 2 и 9 представлена на рис.13:

Полученная из неё формула (11) легла в основу математической модели второго учёта.

$$Sp=N*2,0067-34,072 \quad (11);$$

где Sp – листовая поверхность в единицах ПНБЛ, N – количество листьев на растении.

Как и в первом учете, провели проверку соответствия этой модели фактическим данным измерения растений.

Сначала данные столбца 1 подставили в формулу (11) и полученные результаты занесли в столбец 7. Далее данные столбцов 2 и 3 перемножили и раздели-

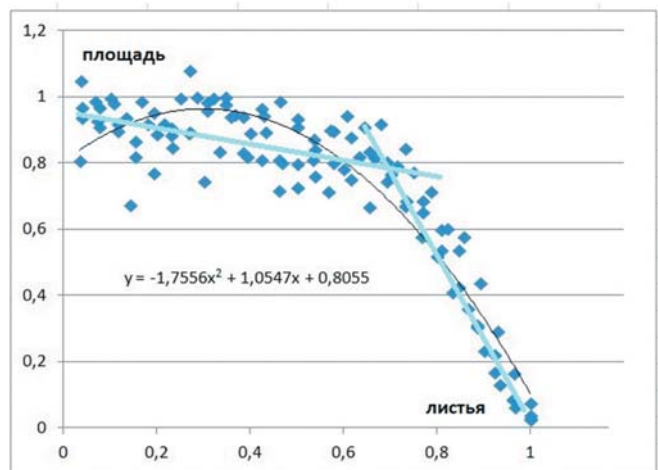


Рис.12. Модель распределения площади листьев по данным обучающей выборки. Второй учет (08.11.2022). Голубым отмечены альтернативные линии тренда
Fig. 12. A model of the distribution of leaf areas according to the training sample data. Second accounting. Alternative trend lines are marked in blue

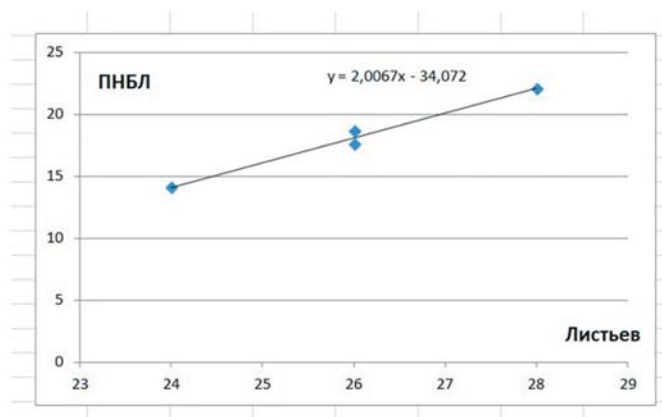


Рис.13. Зависимость листовой поверхности растения огурца (в единицах ПНБЛ) от количества листьев на нем. Второй учёт (08.11.2022)
Fig. 13. The dependence of the leaf area of the cucumber plant (in units of PNBL) from the number of leaves on it. Second accounting

Таблица 4. Параметры обучающей выборки, 2й учёт
Table 4. Parameters of the training sample, 2nd accounting

№ пп	Количество листьев N, шт.	Ширина нбл W, см	Длина нбл L, см	L/W	Площадь нбл S, см ²	P= WL/S	Площадь листовой поверхности	
							в см ²	в ПНБЛ, шт.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	28	31	33,5	1,08*	705	1,47	15588	22,11
2	26	36	38	1,06*	929	1,47	17325	18,65
3	30	33,5	36	1,07*	822	1,47	17314	21,06**
4	24	33	35,7	1,08*	765	1,54	10774	14,08
5	26	30,5	33	1,08*	677	1,49	11895	17,57
				*-типичное		Ср-1,49		** - не типичное

нбл – наибольший лист; ПНБЛ – площадь наибольшего листа

Таблица 5. Соответствие математической модели распределения площади листьев фактическим данным. Второй учет (08.11.2022)
Table 5. The correspondence of the mathematical model of the distribution of the leaf area to the actual data. Second accounting (08.11.2022)

Фактические данные						Рассчитано по модели			Отклонения	
Количество листьев N шт.	W нбл, см	L нбл, см	S нбл, см ²	Площадь листовой поверхности, см ²	Площадь листовой поверхности в ПНБЛ	Площадь листовой поверхности в ПНБЛ	S нбл, см ²	Площадь листовой поверхности, см ²	см ²	%%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
24	33	35,7	765	10774	14,08	14,09	791	11140	-366	-3,4%
26	36	38	929	17325	18,65	18,10	918	16620	705	4,1%
26	30,5	33	677	11895	17,57	18,10	676	12228	-333	-2,8%
28	31	33,5	705	15588	22,11	22,12	697	15414	174	1,1%

* - цветом выделены измеренные данные; **нбл** – наибольший лист; **ПНБЛ** – площадь наибольшего листа.

ли на коэффициент 1,49 (из табл. 4, столб. 7) и внесли в столбец 8. Данные столбца 9 получили перемножением столбцов 7 и 8. Сравнение по конечному результату (столб. 5 и 9) показывает такую же высокую степень соответствия модели фактическим данным, как и в первом учёте: отклонения до 4%.

Как и предполагали, модель несколько завышает данные столбца 9 из-за «турбулентности» в зоне листьев 0,0-0,6. Однако это завышение составляет всего лишь 45 кв. см. на каждое растение или 0,3%. Мы сочли такое искажение совершенно незначительным при уровне статистических колебаний до 5%, чтобы вводить дополнительную поправку.

Таким образом, предлагаемый подход демонстрирует высокую эффективность в обоих учётах для типичных растений огурца, хотя типы распределений площадей листьев и соответствующие им формулы математических моделей там были совершенно разные. Однако уровень типичности исследуемого материала со временем понижается, т.к. новые и новые растения подвергаются травмам в процессе ухода и сбора урожая.

Мы оцениваем степень типичности материала во втором учёте в 80-85%, что на 5-10% меньше, чем было в первом.

Всего на двух учётах было практически описано 660 растений; а для составления двух математических моделей нам пришлось дополнительно вырастить и потратить 10 растений для обучающих выборок. Однако обучающая выборка может быть собрана за ± 2 дня до или после учёта. Поэтому в предельном случае (максимальный охват для одного звена) для пяти дней одного учёта (это около 2500 растений) достаточно лишь одной обучающей выборки, т.е. дополнительно вырастить 5 растений, или всего 0,2% учетного материала. Учетные же растения не подвергаются никаким воздействиям, их листовой аппарат продолжает развиваться и функционировать свободно.

Авторы статьи специально изложили ход использования предлагаемого подхода максимально подробно с пошаговой детализацией. Надеемся, что это поможет легко применить его всем заинтересованным исследователям.

Об авторах:

Алексей Викторович Курепин – заведующий лабораторией селекции тыквенных культур, автор для переписки, kuralek@mail.ru
Александр Федорович Першин – канд. биол. наук, заведующий лабораторией биотехнологии, afpershin@mail.ru
Валерий Николаевич Муляр – научный сотрудник лаборатории селекции тыквенных культур, mulyarvalerii@mail.ru
Маргарита Константиновна Белова – студентка агрономического факультета КУБГАУ, belovamargo@list.ru

About the Authors:

Aleksey V. Kurepin – Head of the Pumpkin Crops Breeding Laboratory, Corresponding Author, kuralek@mail.ru
Alexander F. Pershin – Cand. Sci. (Biology), Head of Laboratory of Biotechnology, afpershin@mail.ru
Valery N. Mulyar – Researcher, Laboratory of Pumpkin Crops Breeding, mulyarvalerii@mail.ru
Margarita K. Belova – student of the Faculty of Agronomy of KUBGAU, belovamargo@list.ru

• Литература / References

1. Kanemasu E.T., Asrar G., Fuchs M. Application of remotely sensed data in wheat growth modelling. In: *Wheat Growth and Modelling*. 1985;(86):357-369. Day W. and R.K. Atkin (Eds.). NatoAsi Series, Series A: Life Sciences. Springer, Boston MA.
2. Kandannan K., Kailasam C., Chandragiri K.K., Sankaran N. Allometric model for leaf area estimation in black pepper (*Piper nigrum* L.). *J. Agric. Crop Sci.* 2002;(188):138-140.
3. Lawlor D.W. Photosynthesis, productivity and environment. *J. Exp. Bot.* 1995;(46):1449-1461.
4. Guo D.P., Sun Y.Z. Estimation of leaf area of stem lettuce (*Lactuca sativa* Var. Angustana) from linear measurements. *Ind. J. Agric. Sci.* 2001;(71):483-486.
5. Camas N., Ayan A.K., Esendal E. Leaf area prediction model for safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Pak. J. Biol. Sci.* 2005;(8):1541-1543.
6. Manivel L. Biometric correlations between leaf area and length measurements of Granache grape leaves. *HortSci.* 1974;(9):27-28.
7. Strik B.C., Proctor J.T.A. Estimating the area of trifoliolate and unequally imparipinnate leaves of strawberry. *Hortic. Sci.* 1985;(20):1072-1074.
8. Stewart D.W., Dwyer L.M. Mathematical characterization of maize canopies. *Agric. For.*

Meteorol. 1993;(66):247-265.

9. Guo D.P. and Y.Z. Sun. Estimation of leaf area of stem lettuce (*Lactuca sativa* var. angustana) from linear measurements. *Ind. J. Agric. Sci.* 2001;(71):483-486.
10. Kucukonder H., Boyaci S., Akyuz A. A modeling study with an artificial neural network: developing estimation models for the tomato plant leaf area. *Turk. J. Agric. For.* 2016;(40):203-212.
11. Bozkurt S., Keskin M. Effect of deficit irrigation on the estimation of cucumber leaf area under greenhouse conditions. *Int. J. Agric. Biol.* 2018;(20):877-882.
12. Blanco F.V., Folegatti M.V. Estimation of leaf area for greenhouse cucumber by linear measurements under salinity and grafting. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)* 2005;(62):305-309.
13. Cho Y., Oh S., Oh M.M., Son J.E. Estimation of individual leaf area, fresh weight, and dry weight of hydroponically grown cucumbers (*Cucumis sativus* L.) using leaf length, width, and SPAD value. *Sci. Hortic.* 2007;(111):330-334.
14. ROBBINS N.S., PHARR D.M. Leaf area prediction models for cucumber from linear measurements. *HortScience.* 1987;22(6):1264-1266.
15. Singh M.C., Singh K.G., Singh J.P. Indirect method for measurement of leaf area and leaf area index of soilless cucumber crop. *Adv Plants Agric Res.* 2018;8(2):188-191. DOI: 10.15406/apar.2018.08.00311