

УДК 634.1+633.4:681.7069.2

## ЦВЕТОВЫЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЗРЕЛОСТИ ТОМАТОВ

**Ольга Николаевна Будаговская<sup>1,2</sup>**

доктор технических наук

budagovsky@mail.ru

**Екатерина Владимировна Грошева<sup>2</sup>**

научный сотрудник

**Марина Витальевна Маслова<sup>2</sup>**

кандидат сельскохозяйственных наук, с.н.с.

**Андрей Валентинович Будаговский<sup>1,2</sup>**

доктор технических наук

<sup>1</sup>Федеральный Научный Центр имени И.В. Мичурина

<sup>2</sup>Мичуринский государственный аграрный университет

г. Мичуринск, Россия

**Аннотация.** Представлен обзор инструментальных неразрушающих методов оценки зрелости томатов, использующих колориметрические и спектральные характеристики плодов. Описаны основные достоинства и недостатки методов и сделан вывод о необходимости продолжения поиска оптимальных способов недеструктивной оценки зрелости томатов с недорогой аппаратной реализацией.

**Ключевые слова:** зрелость томатов, цвет, цветовая система Lab, спектр отражения, гиперспектральная визуализация.

### *Аппаратурные методы диагностики зрелости по цвету*

Качественная оценка по цвету для большинства плодов используется в государственных стандартах как мера соответствия определенной степени свежести, зрелости, вкуса, целостности, содержания питательных веществ и т.п. показателей. Это обусловлено известным фактом тесной связи химического состава (содержание твердых растворимых веществ, титрируемой кислотности, крахмала, сахаров, хлорофиллов, каротиноидов) и цветом плодов самых разнообразных видов растений [1, 7, 13, 17].

*Колориметрический метод* анализа основан на том, что любой цвет рассматривают как некоторую трехмерную величину, характеризующую излучение видимой зоны восприятия [28] по количественному (яркость) и качественному (цветность) показателям его действия на среднестатистический глаз. Координаты цвета, производные от них координаты цветности, а также различные соотношения основных цветов могут быть использованы как количественные признаки цветковых классов, соответствующих определенному состоянию объекта. В последнее время преимущественно используют для оценки цвета и зрелости плодоовощной продукции цветовую систему  $La^*b$ .

Первые исследования в области сортировки томатов по цвету известны с 20-х годов прошлого столетия, когда J. MacGillivray описал цветовые индексы плодов на базе колориметрической системы Манселла [15]. Дальнейшее развитие этого направления привело к разработке специализированных колориметров, предназначенных только для анализа томатов [11]. Колориметрическая диагностика и по сей день не потеряла своей актуальности. И в настоящее время наука и практика считают цвет плодов важным показателем качества, который определяет срок годности и влияет на принятие потребителем. Для исследования колориметрических характеристик, как правило, используют портативные колориметры серии «Minolta» [5], с помощью которых определяют цветовые координаты в системе  $La^*b$ , а степень зрелости оценивают по отношению цветовых индексов  $a^*/b$  (рис. 1).

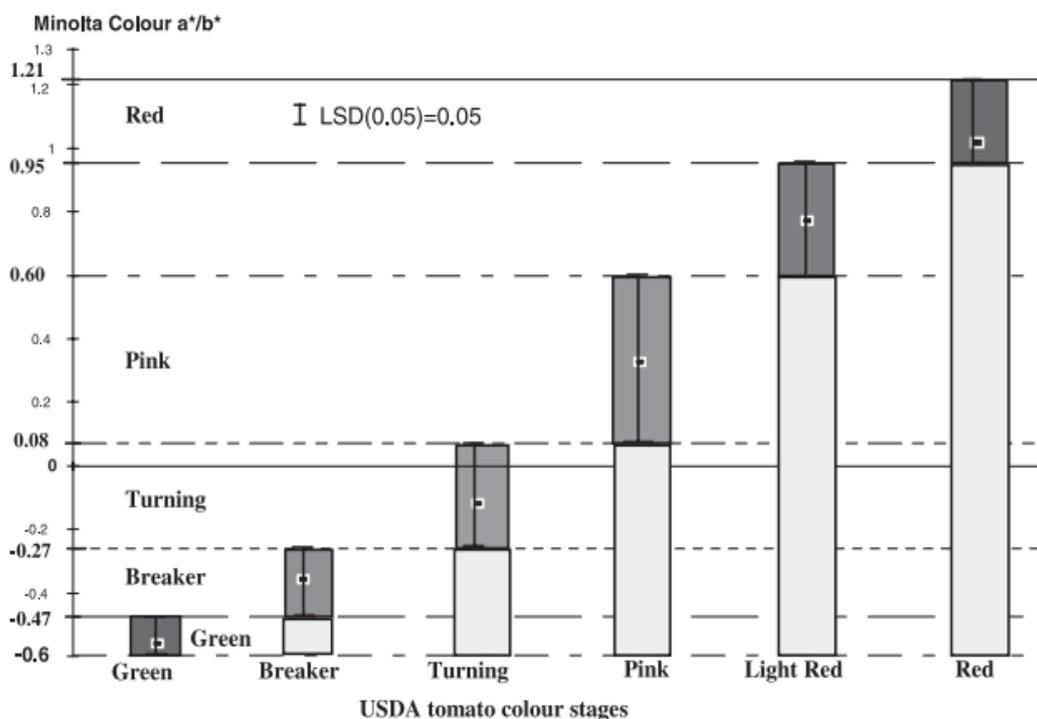


Рисунок 1 – Значения отношения цветных индексов  $a^*/b^*$  на различных стадиях созревания томатов (вертикальные линии представляют минимальные и максимальные значения). Из статьи [5].

В 70-е годы прошлого столетия стали появляться первые опытные образцы автоматизированных сортировок томатов по цвету [18, 27]. Но, как правило, в связи с проблемой обслуживания и небольшой надежностью сложного оптико-электронного оборудования, эти системы внедрялись не очень широко. Ситуация изменилась с массовым выпуском (и существенным удешевлением) цветных видеокамер и развитием цифровых устройств распознавания цветных изображений. С середины восьмидесятых годов, колориметрические системы анализа цвета на базе цветных видеокамер (так называемое «техническое зрение») стали составлять основу автоматизированных устройств контроля качества различных плодов – томатов, огурцов, баклажанов, перца, персиков, мандаринов, лимонов, хурмы и т.д. [2, 25]. Они широко используются в универсальных комплексах для сортирования плодоовощной продукции, выпускаемых зарубежными фирмами Barwell International Ltd Tamkin LDT (Великобритания), GMB&CO (Германия), FMC (Италия), AWETA (Нидерланды), MAF (Франция), Greefa и Hortegro (Голландия), Aid, (Италия), Buhler Sortex (Великобритания).

В связи со стремительным развитием информационных технологий в последние годы для объективного измерения цвета применяется *компьютерное зрение*. Его чаще всего используют для распознавания формы, размера и качества плодов [14, 24]. Существенная разница между компьютерным зрением и традиционными способами оценки цветовых характеристик заключается в количестве предоставляемой информации. Системы компьютерного зрения могут анализировать каждый пиксель всей поверхности, вычислять среднее и стандартное отклонение цвета, выделять и определять внешний вид, измерять неоднородные формы и цвета, выбирать интересующую область, а также анализировать одновременно несколько объектов [3, 23].

Несмотря на столь мощную техническую оснащенность, колориметрические методы начинают терять свою актуальность из-за появления на рынке большого количества сортов томатов различной цветовой гаммы. Из-за этого возникает необходимость поиска универсальных методов оценки зрелости, не зависящих от покровной окраски.

Как альтернатива колориметрии, стали развиваться *спектрофотометрические методы диагностики зрелости томатов*. Данные методы основаны на явлении избирательного поглощения оптического излучения в зависимости от молекулярного состава объекта [26, 28].

Использование спектрофотометрических методов для диагностики растительных организмов базируется на двух положениях: 1) в природе нет двух веществ с одинаковыми спектральными распределениями; 2) изменение качества плодов сопровождается модификацией биохимического состава растительных тканей.

Характер спектральных кривых различных фруктов и овощей имеет много общего. Типичным для большинства овощей и плодов является процесс распада хлорофилла и синтез каротиноидов по мере созревания, окисление внутриклеточного содержимого при механических повреждениях, физиологических и грибных заболеваниях. Различия сказываются только в

видимой области (за счет цвета) и в абсолютных значениях коэффициента отражения [1, 27]. На рисунке 2 в качестве примера приведена типовая спектральная кривая отражения зрелых томатов (цвет между розовым и светло-красным) сорта "Heatwave", полученная путем усреднения данных от 30 образцов [20].

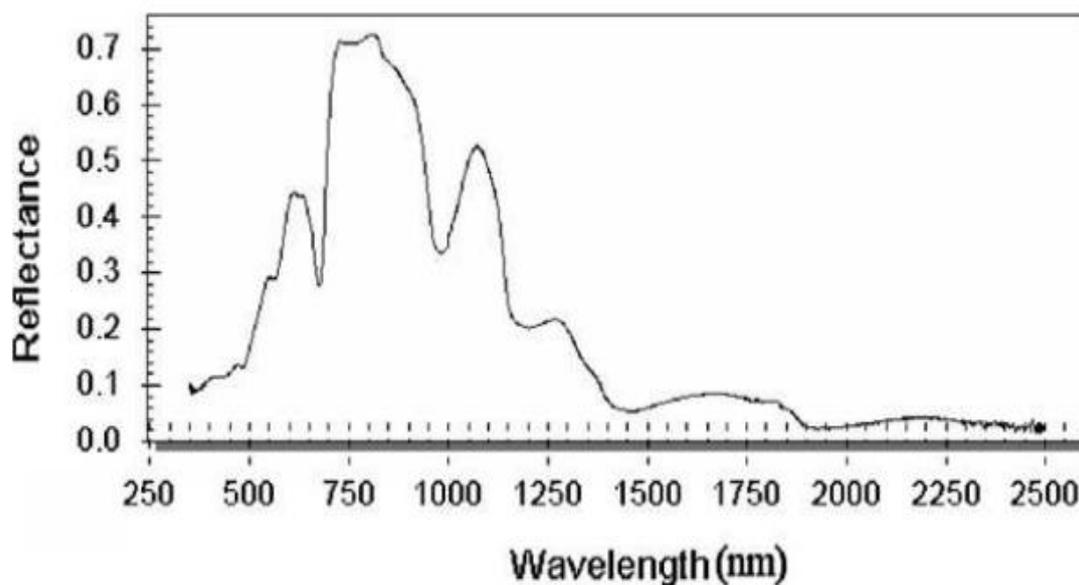


Рисунок 2 – Спектр отражения зрелых томатов (среднее по 30 образцам). Из статьи [20]

Использование спектрометрии отражения при оценке зрелости и внутреннего качества плодов томата основано на связи их химического состава со спектрами отражения в диапазоне длин волн 400-2500 нм. Как правило, исходные данные коэффициента отражения ( $R$ ) плодов затем преобразуются в значения коэффициента поглощения ( $T = \log(1/R)$ ) для получения линейных корреляций значений  $T$  с концентрацией оцениваемых биохимических компонентов (содержания сахаров, ликопина, кислот, пектина, сухих веществ и т.п.).

Следующие критерии учитываются при выборе наиболее желательной модели для каждого параметра качества плодов [8]: стандартная ошибка калибровки (SEC), стандартная ошибка прогнозирования (SEP) и коэффициент

корреляции ( $r$ ) между прогнозируемыми и измеренными параметрами. Приемлемые модели должны иметь более низкие значения SEC и SEP, высокие коэффициенты корреляции и небольшие различия между SEC и SEP.

Начиная с середины восьмидесятых, коммерческие компании стали производить многоканальные спектрометры со сканирующими монохроматорами, фиксированными или сканирующими светофильтрами для анализа сельскохозяйственных продуктов. Современные разработки отличаются серьезной электроникой, волоконной оптикой, методическим и техническим обеспечением калибровки [16].

Анализ спектров отражения (в последнее время эти методы стали называть гипер- или мультиспектральным анализом) широко используют для оценки зрелости и качества томатов [4, 9, 10, 20, 21].

Следующий шаг в развитии спектральной диагностики отмечен появлением методов и устройств *гиперспектрального изображения* (HSI), которые сочетают в себе спектроскопию с оптической визуализацией и предоставляют информацию о химических свойствах материала и его пространственном распределении (рис.3). Гиперспектральное изображение представляет собой трехмерный (3-D) куб, обычно называемый гиперкубом, в котором спектральная информация предоставляется для каждого пикселя изображения. HSI также может предоставить более полную информацию о качестве с.-х. продуктов, включая характеристики внутренней структуры, морфологии и химического состав образца, по сравнению с технологией машинного зрения или технологией спектроскопического анализа. В настоящее время метод HSI апробируют для неразрушающего определения в томатах влаги, pH, прогнозирования содержания сухих веществ (SSC), а также твердости плодов [12, 19, 22].

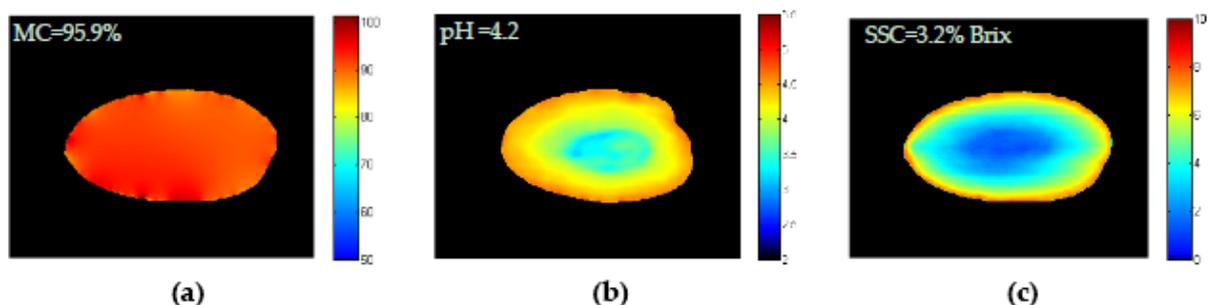
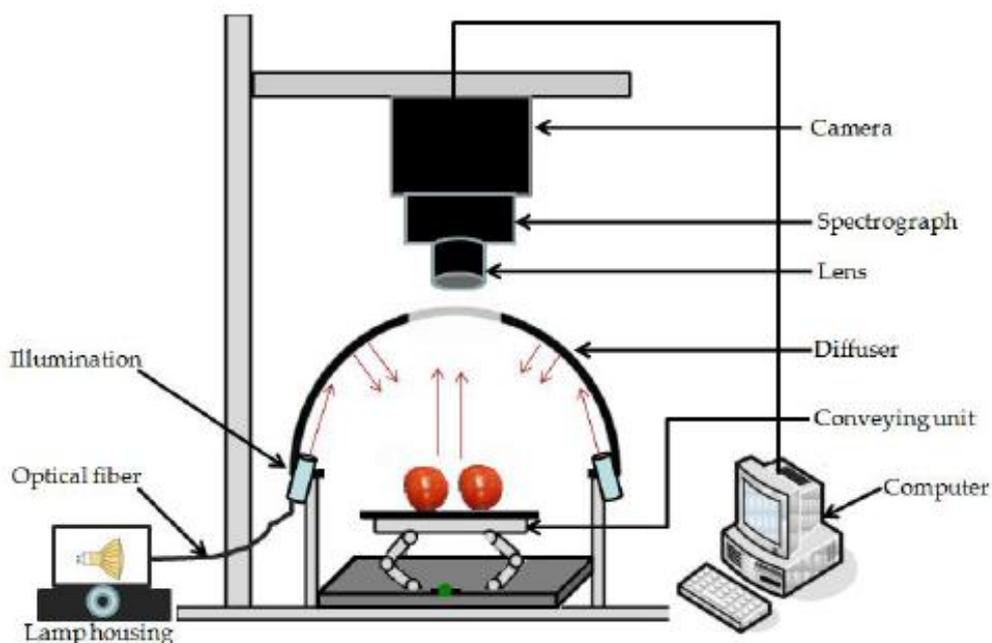


Рисунок 3 – Вверху – схема типовой установки для гиперспектрального анализа плодов; внизу – карты параметров качества томатов (а) содержание влаги (MC), (б) pH и (с) содержание растворимых твердых веществ (SSC). Из работы [19].

Однако и эти системы имеют ряд недостатков, которые заключаются в дороговизне оборудования; искажении и смещении изображений, необходимости в квалифицированном персонале, обладающем навыками работы с камерой и получаемыми данными; зависимости результатов измерений от формы и размера плодов, расстояния от регистрирующей камеры, что требует многократной калибровки и проверки.

Таким образом, поиск оптимальных способов неdestructивной оценки зрелости томатов, с недорогой аппаратной реализации, далек от завершения и требует дальнейших исследований. Перспективное направление – использование оптических методов, основанных на люминесценции и когерентной оптике.

### Список литературы:

1. Abbott J. A. Quality measurement of fruits and vegetables //Postharvest biology and technology. 1999. V. 15. №. 3. P. 207-225.
2. Arjenaki O.O., Moghaddam P.A., Motlagh A.M., Online tomato sorting based on shape, maturity, size, and surface defects using machine vision //Journal of Agriculture and Forestry. 2013. V.37. P. 62–68.
3. Balaban M.O., Odabasi A. Z. Measuring color with machine vision //Food Technology. 2006. V.60. N12. P. 32–36.
4. Baranska M., Schütze W., Schulz H. Determination of lycopene and  $\beta$ -carotene content in tomato fruits and related products: comparison of FT-Raman, ATR-IR, and NIR spectroscopy // Analytical Chemistry. 2006. V.78. N.24. P.8456
5. Batu A. Determination of acceptable firmness and colour values of tomatoes //Journal of food engineering. 2004. T. 61. №. 3. C. 471-475.
6. Choi K., Lee G., Han Y.J., et al. Tomato maturity evaluation using color image analysis //Transactions of the ASAE. 1995. V. 38. №. 1. P. 171-176.
7. Fransis F.J. Quality as influenced by color // Food Quality Preference. 1995. V.6. № 1. P. 149 - 155.
8. Gomez A. H., He Y., Pereira A. G. Non-destructive measurement of acidity, soluble solids and firmness of Satsuma mandarin using Vis/NIR-spectroscopy techniques // Journal of Food Engineering. 2006. V.77. P. 313–319.
9. He Y., Zhang Y., Pereira A. G., et al. Nondestructive determination of tomato fruit quality characteristics using VIS/NIR spectroscopy technique // International Journal of Information Technology. 2005. V.11. N.11. P. 97-108.
10. Huang Y., Lu R., Chen K. Prediction of firmness parameters of tomatoes by portable visible and near-infrared spectroscopy // Journal of food engineering. 2018. V.222. P.185-198.
11. Hunter R.S. Yedatmen J.N. Direcr-reading tomato colorimeter // J. Optical Society of America. 1961. V.51. N5. P.552-554.
12. Jiang Y., Chen S., Bian B., Li Y., Sun Y., Wang, X. Discrimination of tomato maturity using hyperspectral imaging combined with graph-based semi-

supervised method considering class probability information // *Food Analytical Methods*. 2021. V.14.N.5. P. 968-983.

13. Kancheva R. Relationship between vegetation biophysical and colorimetric characteristics // *Докл. БЪЛГ. АН*. 1997. Т. 50. № 7/8. С. 21-24.

14. Liu G., Mao S., Jin H., Kim J.H. A Robust mature tomato detection in greenhouse scenes using machine learning and color analysis. Proceedings of the 11th International Conference on Machine Learning and Computing (22–24 February 2019). ICMLC, Zhuhai.

15. MacGillivray J.H. Studies of tomato quality.III. Color of different regions of a tomato fruit and a method for color determination // *Proc.Am. Soc. Hort. Sci.* 1928. N 25. P.17-20.

16. Nicolai B. M., Beullens K., Bobelyn E., et al. Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review // *Postharvest biology and technology*. 2007. V. 46. №2. С. 99-118.

17. Petrisor C., Lasar V., Balan V., Ivascu A., Popescu M. Evaluation of fruit quality by determination of chromatic characteristics // *Bul. Univ. Sti.agr. si med.vet. Cluj-Napoca. Ser. Hort.* 2004. № 61. P. 439.

18. Quality detection in foods. St. Joseph. Mach., 1976. 1012 p.

19. Rahman A., Kandpal L.M., Lohumi S., et al. Nondestructive estimation of moisture content, pH and soluble solid contents in intact tomatoes using hyperspectral imaging // *Applied Sciences*. 2017. V.7. N.1. P. 109.

20. Shao Y., He Y., Gómez A. H., et al. Visible/near infrared spectrometric technique for nondestructive assessment of tomato ‘Heatwave’ (*Lycopersicon esculentum*) quality characteristics // *Journal of Food Engineering*. 2007. V.81. N. 4. P. 672-678.

21. Sun Y., Pessane I., Pan L., Wang X. Hyperspectral characteristics of bruised tomatoes as affected by drop height and fruit size // *Lwt*. 2021. V 141. P.110863.

22. Roy J., Keresztes J. C., Wouters N., De Ketelaere B., Saeys W. Measuring colour of vine tomatoes using hyperspectral imaging // *Postharvest Biology and Technology*. 2017. V.129. P.79-89.
23. Yamamoto K., Guo W., Yoshioka Y., Ninomiya S. On plant detection of intact tomato fruits using image analysis and machine learning methods // *Sensors*. 2014. V.14. P. 12191–12206.
24. Zhang B., Huang W., Li J. et al. Principles, developments and applications of computer vision for external quality inspection of fruits and vegetables: A review. *Food Research International*, 2014. V.62. P.326–343.
25. Башилов А.М. Электронно-оптическое зрение в аграрном производстве. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2005. 312 с.
26. Ландсберг Г.С. Оптика. М: Физматлит, 2010. 848 с.
27. Старовойтов В.И., Башилов А.М., Андержанов А.А. Автоматизация контроля качества картофеля, овощей и плодов. М.: ВО Агропромиздат, 1987. 197 с.
28. Физическая энциклопедия /под ред. А.М. Прохорова. М.: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия», 1992.

**UDC 634.1+633.4:681.7069.2**

## **COLOR AND SPECTRAL METHODS ESTIMATES OF TOMATO MATURITY**

**Olga N. Budagovskaya**<sup>1,2</sup>

Doctor of Technical Sciences

budagovsky@mail.ru

**Ekaterina V. Grosheva**<sup>2</sup>

Researcher

**Marina V. Maslova**<sup>2</sup>

Candidate of Agricultural Sciences, S.N.S.

**Andrey V. Budagovskii<sup>1,2</sup>**

Doctor of Technical Sciences

<sup>1</sup>Federal Scientific Center named after I.V. Michurin

<sup>2</sup>Michurinsk State Agrarian University

**Annotation.** A review of instrumental non-destructive methods for assessing the maturity of tomatoes using the colorimetric and spectral characteristics of fruits is presented. The main advantages and disadvantages of the methods are described, and the conclusion is made that it is necessary to continue the search for optimal methods for non-destructive evaluation of tomato maturity, with inexpensive hardware implementation.

**Key words:** tomato maturity, color, Lab color system, reflection spectrum, hyperspectral imaging.

Статья поступила в редакцию 05.09.2023; одобрена после рецензирования 16.10.2023; принята к публикации 27.10.2023.

The article was submitted 05.09.2023; approved after reviewing 16.10.2023; accepted for publication 27.10.2023.