

Copyright © 2025 by Cherkas Global University



Published in the USA
European Reviews of Chemical Research
Issued since 2014.
E-ISSN: 2413-7243
2025. 12(1): 21-36

DOI: 10.13187/ercr.2025.1.21
<https://ercr.cherkasgu.press>



Integrated Spectrozonol/Multispectral Lens-Less Optical Microscopy and Scanning Electron Microscopy as Novel Combined Chemometric Instruments for Food Science

Part I. The brief history of optical and electron microscopy in food industry

Theodor K. Orekhov ^a, Oleg V. Gradov ^{a, *}

^a Department of Dynamics of Chemical and Biological Processes, N.N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Abstract

Food samples are heterogeneous and structured media that require investigation with spatial resolution or positional sensitivity for meaningful metrological data interpretation. When analyzing such materials at a specific scale characteristic to the sample's texture, any averaged information loses its significance without structural context. This leads to overlapping peaks in analytical signals, which could be effectively separated only by introducing position-specific resolution adequate to the size of structures carrying biochemical properties and descriptors responsible for these signals. The solution lies in quantitative analytical microscopy. These methods include various spectral ranges ensuring qualitatively different measurement approaches and characterization possibilities, all crucial for comprehensive understanding of target substances' structure and composition. This article discusses the integration of multiple diagnostic tools and provides analytical reasoning supporting this approach as well as highlighting current methodological and technical limitations preventing broader implementation. It serves primarily as a background resource for potential users from the food industry seeking consultation on adopting such advanced techniques, particularly when considering their applicability to particular research objects described herein or following general technical guidelines provided.

Keywords: chemometrics, food biochemistry, optical microscopy, NMR microscopy, SEM, ESEM, ASEM, CLEM, CryoSEM, multispectral optical microscopy, history of microscopy for food chemical analysis.

1. Введение

Являясь гетерогенной и структурированной средой, пищевой образец либо аналит, как правило, требует исследования свойств с пространственным разрешением или позиционной чувствительностью. На определенном масштабе рассмотрения, специфичном для текстуры образца, любые метрологические данные теряют смысл без привязки к структуре, поскольку аддитивная информация, усредненная по множеству структурно неидентичных/химически неэквивалентных зон (ROI) является источником множества интерференций аналитических сигналов, приводящих к наложению пиков, которые были бы эффективно разделены только лишь при внедрении позиционной привязки данных с разрешением, адекватным размерам структур – носителей тех или иных биохимических свойств и биофизических дескрипторов,

* Corresponding author
E-mail addresses: o.v.gradov@gmail.com (O.V. Gradov)

то есть источников аналитического сигнала. Решение данной проблемы рационально может реализоваться только с применением методов количественной аналитической микроскопии, причем именно того пула методов количественной аналитической микроскопии, который, в комплексе, может быть источником максимального количества аналитических сигналов (из числа целевых). Множественность используемых методов аналитической микроскопии есть, в данном случае, прежде всего, множественность пределов разрешения, соответствующих, в соответствии с критериями Рэлея (аналогичное можно показать для критерия Аббе), длинам волн, а, следовательно – спектральным диапазонам возможной аналитической метрологии, идентификации и амплитудного оценивания концентрации образца (не абсолютного лишь, но и относительного – «рациометрического», с нормированием к диапазонам спектральной чувствительности и изменением принципов расчетов при переходе к качественно-отличным по физике диапазонам – например, от UV-Vis-анализа содержания аналита к инфракрасной области для реконструкции строения аналита, идентификации функциональных групп etc.). Соответственно, максимально полное покрытие спектральных диапазонов, обеспечивающих качественно разные методы измерений и характеристики структур образца, представляется, в случае позиционно-чувствительного измерения-картирования, пререквизитом получения полного комплекса данных о всех целевых измеряемых веществах с минимальным уровнем ROI-локализованной интерференции метрологических сигналов. Задачей настоящей статьи (в аспекте обеспечения вышеуказанных требований) видится, во-первых, комплексирование нескольких методов подобной диагностики пищевого материала (как *proof of concept* / *proof of principles*) на аппаратном уровне, а, во-вторых, реализация аналитического рассмотрения, необходимого для обоснования данного подхода.

2. Обсуждение и результаты

2.1. Методы оптической и МР-микроскопии в пищевой индустрии.

Применение методов микроскопии в пищевой индустрии в технологических процессах и контрольно-надзорных – включая уровень ОТК – квалиметрических и сертификационных целях, начавшись в XIX веке, получило грандиозное развитие в середине XX века, поскольку индустриальная революция и автоматизация в пищевой промышленности интродуцировала метрологические устройства непосредственно в линии переработки, а массовый, посменный характер производства сделал необходимостью «сверять часы» при переходах смен, партий, диверсифицированных источников поставок, дублирующих конвейерных линий и режимов работы отдельных агрегатов, что, несомненно, стало давать свой вклад в гетерогенность (или статистическую невоспроизводимость) качеств продукта – источника целевых аналитов. Это обстоятельство заставило индустриальный сектор прибегать к использованию на линиях и в пищевых лабораториях (не только на этапе становления производства, но и в регулярной его фазе) серьезных микроскопических и микро-метрологических инструментов, включающих в себя не только обычную световую микроскопию, но и весьма экзотичные для периода 1960-х гг. инструменты электронной микроскопии. Ниже приводится аналитический обзор данных тенденций, разделенный по технико-методическому принципу.

Во-первых, конечно, нужно упомянуть хрестоматийные методы прямой микроскопии, перечисленные в перечне практического руководства 1995 г. ([van Laarhoven, 1995](#)), аннотированного в журнале «Trends in Food Science and Technology» в середине 1990-х гг. ([Flint, van Laarhoven, 1995](#)). Эта номенклатура до сих пор актуальна и, если говорить о реальной промышленности, к ней мало что возможно добавить; особенно, если речь идет о квалиметрии в условиях технической вооруженности развивающихся стран. Начиная с 1960-х гг., световая микроскопия входит в широкий обиход за гранью анализа непосредственно биоматериала – в приложениях, связанных с анализом продуктов его переработки, практически повсеместно – включая пережившую атомную бомбардировку Японию ([Nakanishi et al., 1967](#)). В 1970-е гг. в обиход пищевых оптико-микроскопических исследований интенсивно внедряется кино- и теле- микроскопия ([Bell et al., 1975](#)). К 1980-м гг. оформляются возможности квалиметрии с использованием комбинированного анализа образцов с использованием оптической и электронной (как просвечивающей, так и сканирующей) микроскопии ([Fretzdorff et al., 1982](#)). Не ранее 1990-х гг., в силу необходимости достижения определенного технического уровня, для широкого внедрения

становятся доступными компьютеризованная криомикроскопия, особо – в цейтраферных (time lapse) режимах, демонстрирующих динамику процессов заморозки и разморозки (дефростинга, в том числе – в СВЧ-дефростерах, криомикроскопия в которых была реализована группой Градова) и микроскопия в условиях термо- и крио-циклирования (также разрабатывавшаяся нашей группой в середине 2010-х, в приложении к потенциальным синтетическим носителям кода). В большинстве же случаев анализ замороженных пищевых продуктов производится с выемкой их из условий охлаждения – за редким исключением (Caillet et al., 2003), не *in situ* (по аналогии с операндо-спектроскопией можно было бы назвать анализ подобных процессов *in situ* – операндо-криомикроскопией). Исключение же составляют лишь методы криоэлектронной микроскопии молокопродуктов (Ong et al., 2011). Впрочем, если говорить *sensu lato*, и ранее применялись методы электронной микроскопии пищевых продуктов с охлаждаемым столом (Gordon, Barbut, 1990), не называвшиеся CryoEM/CryoSEM и аналогичными модными аббревиатурами. Менее высокоразрешающее и вместе с тем существенно более экзотичное направление – магниторезонансная микроскопия (ЭПР и ЯМР микроскопия) в исследованиях охлаждения продуктов питания, пищевой инженерии также применялась (Serša et al., 2011).

Из специальных видов микроскопии, используемых в пищевой индустрии, инженерии, можно назвать методы поляризационной микроскопии (Swatland, 1990), иммерсионной или лазерно-микродифрактометрической иммерсионной микроскопии (Varcoe, Jones, 1983), ИК, в частности ИК-Фурье- (FTIR) микроскопии (Suutarinen et al., 1998), микроспектроскопии и микроспектрометрии комбинационного рассеяния либо, почти тождественно, рамановской микроскопии (Yang et al., 2017). Если говорить о технических возможностях визуализации, то они отличны – от двумерного сверхразрешающего сканирования в методах сканирующей ближнепольной микроскопии (Zakharia, 2009) до трёхмерной репрезентации сканирующей конфокальной микроскопии (Velinov et al., 1990; Dürrenberger et al., 2001; van de Velde et al., 2002; Ko, Gunasekaran, 2007; Sheen, 2008; Adedeji et al., 2011; Moreno, Bouchon, 2013; Moreno, Bouchon, 2013). Про магниторезонансную микроскопию говорилось выше – она не представляет интереса для повседневного пользователя, в силу сложности бэкграунда, на котором основана, и интерпретации данных (Maeda et al., 2009).

Помимо обычной микроскопии в разных диапазонах, для анализа пищевых продуктов часто используют люминесцентную или флуоресцентную микроскопию, в том числе методы иммунофлуоресцентной микроскопии (Fritz, Greaser, 1991; Parkkonen et al., 1997; Corich et al., 2004; Heilig et al., 2009). Не является исключением и рентгеновский поддиапазон, в котором с использованием синхротронного излучения детектируются неорганические нутриенты и/или поллютанты (Ohi et al., 2016). Надо сказать, что рентгеновская микроскопия достаточно существенно прогрессировала последние годы и теперь возможно регистрировать не только рентгеновские дифрактограммы пищевых продуктов, сопоставляемые с электронными либо иными микрофотографиями (Kitada et al., 1986), но и полно-информативные рентгеновские микрофотографии данных изображений на синхротронном микроскопе (Seim et al., 2015). До этого ни один промышленно выпускавшийся рентгеновский микроскоп (в том числе МИР – разработка советских специалистов, допускавший лишь микронные точности/разрешения) не достигал таких возможностей. Единственным методом, конкурирующим с рентгеновской микроскопией современного уровня в полноатомном восстановлении структуры soft matter / частично упорядоченных сред является собственно атомно-силовая микроскопия, активно и постоянно совершенствуясь внедряющаяся в технологии анализа пищевой индустрии (Kirby et al., 1995; Morris et al., 2001; Yang et al., 2007; Cardona et al., 2008; Handojo et al., 2009; Sigua et al., 2010; Sigua et al., 2010; Neethirajan et al., 2012; Phinney et al., 2017). Однако предметами её использования в пищевой индустрии, как правило, являются микроструктуры неатомного масштаба – представляет практический интерес использование технологий атомно-силовой микроскопии для определения адгезии, гидрофильности-гидрофобности / контактного угла (Handojo et al., 2009; Sigua et al., 2010), реологических параметров пищевых продуктов, сред и их прекурсоров (Morris et al., 2001; Ikeda et al., 2013), что ранее делалось с использованием стандартных вискозиметрических (и реометрических) сред с электронно-микроскопической визуализацией и визуальным «вынесением вердикта» по продукту (Hoskin, Dimick, 1980).

Электронная микроскопия также находит известное применение в пищевой промышленности – но, как правило, это не является просвечивающей электронной микроскопией, которая, по известным данным, позволяет визуализировать, а не реконструировать, атомную структуру кристаллов. Более распространена сканирующая электронная микроскопия низкого уровня увеличения и просвечивающая микроскопия цитофизиологических масштабов увеличения. Активно используется электронная микроскопия в пищевой микробиологии, в ультраструктурном анализе результатов термической обработки на структуру говядины (Cheng, Parrish, 1976) и других источников мясного сырья (Cassens et al., 1963; Stromer, Goll, 1967; Schaller, Powrie, 1971; Schaller, Powrie, 1972; Yang et al., 1974; Ruddick, Richards, 1975; Cheng, Parrish, 1976; Jones et al., 1976; Hägerdal, Löfqvist, 1977; Otwell, Hamann, 1979), включая моллюсков и ракообразных. Сканирующая электронная микроскопия несколько позже вошла в практику пищевой промышленности (Alli, Baker, 1981; Rosenberg et al., 1985; Zilberboim et al., 1986), однако же, она также достаточно широко используется как в мясомолочной промышленности, так и в анализе и исследованиях вегетарианских или фруторианских продуктов (Tatsumi et al., 1991; Indrani et al., 2003; Careli et al., 2009; Scussel et al., 2014). Широкое использование нашел контроль с помощью сканирующих электронных микроскопов результата ультразвуковой сонификации продуктов или микроволновой обработки (Bermúdez, Barbosa-Cánovas, 2008; Wambura et al., 2010; Bermudez-Aguirre et al., 2012). Существуют программные подходы поиска особенностей микроструктуры образцов пищевых продуктов при сканирующей электронной микроскопии (Amboni et al., 1999). Если для простых образцов – типа жировых кристаллов – можно лишь охарактеризовать геометрию (Heertje, Leunis, 1997), то для пищевых образцов с развитой поверхностью есть возможность охарактеризовать около трёх десятков дескрипторов текстуры, морфологии поверхности (Hayta, Ertop, 2018). Это переводит электронную микроскопию как метод анализа в пищевой промышленности из раздела иллюстраций в раздел метрологического её обеспечения.

2.2. Электронная микроскопия в пищевой промышленности и её нюансы.

С 1970-х гг. идёт речь о внедрении в практику не только электронно-микроскопической визуализации, но и количественной электронной микроскопии сырья и пищевых продуктов (Flint, 1977), причём количественный анализ подразумевает не только морфометрию тех или иных структур, но и привязку электронно-микроскопических изображений к их конкретным условиям получения или конкретным условиям формирования/обработки образца, особо – термической, в силу специфики большинства кулинарных процедур для подготовки образца (Lin, Ito, 1986). Несомненно, гранулометрия и калибровочный сайзинг распределений неких частиц по размерам также интересуют и современного пользователя (Tan, Balasubramanian, 2017), однако на этом мы не останавливаемся, так как этому посвящены сотни статей с 2000-го г.. Более интересны рентгеновские методы структурного и спектрального микроанализа – как волнодисперсионной, так и энергодисперсионной микроспектрометрии/спектроскопии вторично-эмиссионного рентгеновского излучения, а также рентгеновской дифрактометрии (James, 2005; Dharmaraj et al., 2014; Ivanov et al., 2017). Ранее была актуальна также и задача оценки и картирования микронеоднородностей рельефа, решавшаяся количественным YMD – Y-модулированным детектированием, ныне перешедшая в компетенцию атомно-силовой микроскопии (Yang et al., 2005). Нами ранее были реализованы процедуры картирования на YMD-подобных режимах не только для морфологии, но и для распределения элементов (как микронзондовый анализ) и заряда поверхности пищевых и биомиметических продуктов.

Надо сказать, что специальные методы электронной микроскопии являются средством физико-химического качественного и количественного определения (или оценки) структур, систем, фаз, микрообъектов пищевого назначения – вплоть до тонких soft matter – частично упорядоченных сред (например, продуктов инкапсуляции (Kaláb, Larocque, 1996), эмульсий (Borchert et al., 1967), белковых мицелл (Karlsson et al., 2007), белок-содержащих оболочек и мембран (Tung, Richards, 1972)). С помощью электронной микроскопии пищевых объектов и сред можно устанавливать: изменения продуктов и состояние дрожжевых культур хлебного производства при воздействии давления при обработке, хранении и изготовлении отличных видов изделий (Bang, Swanson, 2008); потерю воды при дегидратации, при эмульсификации (Hsu et al., 1980); причины возникновения жесткости мясных продуктов при окоченении тех

или иных мышечных структур после смерти животного (Varriano-Marston et al., 1978) [но это зависит ещё и от техники пробоподготовки образцов, если речь не идет о SEM-микроскопии во влажной среде или же в камерах в специализированных газо-паровых атмосферах, ESEM – Environmental Scanning Electron Microscopy или, аналогично ей – ETEM (McDonough et al., 1993; James, 2009; James, 2009; James, Yang, 2011; James, Yang, 2011; Gradov, Gradova, 2016)] или же явления агрегации белков (Badii et al., 2004). Эффекты заморозки среды, затронутые в последней цитированной работе, можно воспроизводить *in situ* – непосредственно в SEM и TEM на охлаждающем столе (Kaláb, Larocque, 1996). Быстрая заморозка является достаточно весомой альтернативой как низковольтной (LVEM) либо сверхнизковольтной ESEM (James, Smith, 2009), так и классическим методам контрастирования и фиксации, деформирующим микроструктуру (или ультраструктуру – если речь о клеточных системах) пищевого образца (Lee, Morr, 1993). Однако для некоторых объектов может понадобиться вакуумный нагрев, а не вакуумное охлаждение, или атмосферный нагрев, а не «естественная» газовая атмосфера ESEM; пример – крахмал, изменения которого при данных типах нагрева в воде и маслах *in situ* могут быть проанализированы вакуумной микроскопией с нагреваемым столом (Ovalle et al., 2013), ибо обычные микроскопические методы наблюдения изменений крахмала здесь бессильны (Freke, 1971). Аналогичное утверждение может касаться фрагментов мяса, особо – говядины, которые логично анализировать не просто «электронной термомикроскопией», а коррелированной световой и электронной термомикроскопии (CLEM – Correlated Light and Electron ThermoMicroscopy), в частности – фазово-контрастной её модификацией, поскольку прецеденты успешного применения и сопоставления микрофото сканирующей электронной микроскопии и фазового контраста для фрагментов говядины и свинины имели место уже в 70-е (Hearne et al., 1978). Динамические измерения *in situ* в данном случае оправданы даже в столь экзотических случаях, так как данные о динамике химических или постбиологических процессов в пищевых анализатах могут быть источником для построения макрокинетических моделей со структурной интерпретацией (хотя это не будет «структурной макрокинетикой» в её стандартном значении). Нужно учитывать, однако, что «дух времени» в данном аспекте не всегда себя оправдывает (Yada et al., 1995). В отличие от световой микроскопии, которая, в частности, допускает многодневный мониторинг биodeградации пищевых продуктов или их прекурсоров (Yau, Murphy, 2001), в большинстве электронных микроскопов возможно – без ущерба инфраструктуре и образцу – проводить быстрые «операндо-микроскопические» измерения контрольного плана, но не многосуточный мониторинг.

3. Заключение

Поэтому нужна техника, которая бы позволила это реализовывать. На роль такой техники хорошо подходит безлинзовая многоцветная (мультиспектральная и гиперспектральная) микроскопия, о которой пойдёт речь в ближайших статьях данного цикла, в том числе безлинзовая микроскопия в «субкамерах» электронных микроскопов на нагреваемых столах и столах-термоциклах (например, с элементами Пельтье).

Литература

Adedeji et al., 2011 – Adedeji A.A., Liu L., Ngadi M.O. Microstructural evaluation of deep-fat fried chicken nugget batter coating using confocal laser scanning microscopy // *Journal of food engineering*. 2011. 102(1): 49-57.

Alli, Baker, 1981 – Alli I., Baker B.E. Constitution of leguminous seeds. Scanning electron microscopy of proteins prepared from Phaseolus beans // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 1981. 32(11): 1069-1073.

Amboni et al., 1999 – Amboni R.D., Francisco A.D., Teixeira E. Detection of frauds in ground coffee with scanning electronic microscopy // *Food Science and Technology*. 1999. 19(3): 311-313.

Badii et al., 2004 – Badii F., Zhdan P., Howell N.K. Elucidation of protein aggregation in frozen cod and haddock by transmission electron microscopy/immunocytochemistry, light microscopy and atomic force microscopy // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2004. 84(14): 1919-1928.

- [Bang, Swanson, 2008](#) – Bang W.S., Swanson B.G. Scanning electron microscopy studies of *Saccharomyces cerevisiae* structural changes by high hydrostatic pressure treatment // *Food Science and Biotechnology*. 2008. 17(5): 1102-1105.
- [Bell et al., 1975](#) – Bell A.V., Berger K.G., Russo J.V., White G.W., Weathers T.L. A study of the micro-baking of sponges and cakes using cine and television microscopy // *International Journal of Food Science & Technology*. 1975. 10(2): 147-156.
- [Bermúdez, Barbosa-Cánovas, 2008](#) – Bermúdez D., Barbosa-Cánovas G.V. Scanning Electron Microscopy of thermo-sonicated *Listeria innocua* cells. *Food Engineering: Integrated Approaches*. Springer, New York, NY. 2008. Pp. 287-294.
- [Bermudez-Aguirre et al., 2012](#) – Bermúdez-Aguirre D.A.N.I.E.L.A., Lynch-Holm V.A.L.E. R.I.E., Barbosa-Cánovas G.V. Microwave-assisted dehydration for electron microscopy sample preparation in the study of thermo-sonicated yogurt // *Journal of Food Process Engineering*. 2012. 35(6): 923-929.
- [Borchert et al., 1967](#) – Borchert L.L., Greaser M.L., Bard J.C., Cassens R.G., Briskey E.J. (1967). Electron microscopy of a meat emulsion // *Journal of Food Science*. 1967. 32(4): 419-421.
- [Caillet et al., 2003](#) – Caillet A., Cogné C., Andrieu J., Laurent P., Rivoire A. Characterization of ice cream structure by direct optical microscopy. Influence of freezing parameters // *LWT-Food Science and Technology*. 2003. 36(8): 743-749.
- [Cardona et al., 2008](#) – Cardona Y.P., Oliveros C.E., Arias D.F., Alvarez F., Devia A. Epicarp characterization of coffee fruits by atomic force microscopy // *Journal of food engineering*. 2008. 86(2): 167-171.
- [Careli et al., 2009](#) – Careli R.T., De Andrade N.J., De Fátima Ferreira Soares N.I.L.D.A., Ribeiro Junior J.I., Rosado M.S., Pinheiro Luiz L.M., Bernardes P.C. Microtopography and bacterial adherence to food contact surfaces evaluated by scanning electron microscopy and epifluorescence microscopy // *Journal of food process engineering*. 2009. 32(5): 730-742.
- [Cassens et al., 1963](#) – Cassens R.G., Briskey E.J., Hoekstra W.G. Electron microscopy of post-mortem changes in porcine muscle // *Journal of Food Science*. 1963. 28(6): 680-684.
- [Cheng, Parrish, 1976](#) – Cheng C.S., Parrish Jr.F.C. Scanning electron microscopy of bovine muscle: Effect of heating on ultrastructure // *Journal of Food Science*. 1976. 41(6): 1449-1454.
- [Corich et al., 2004](#) – Corich V., Soldati E., Giacomini A. Optimization of fluorescence microscopy techniques for the detection of total and viable lactic acid bacteria in whey starter cultures // *Annals of microbiology*. 2004. 54: 335-342.
- [Dharmaraj et al., 2014](#) – Dharmaraj U., Parameswara P., Somashekar R., Malleshi N.G. Effect of processing on the microstructure of finger millet by X-ray diffraction and scanning electron microscopy // *Journal of food science and technology*. 2014. 51(3): 494-502.
- [Dürrenberger et al., 2001](#) – Dürrenberger M.B., Handschin S., Conde-Petit B., Escher F. Visualization of food structure by confocal laser scanning microscopy (CLSM) // *LWT-Food Science and Technology*. 2001. 34(1): 11-17.
- [Flint, 1977](#) – Flint O. Quantitative aspects of food microscopy / *Proceedings-Institute of Food Science and Technology (UK)*, 1977.
- [Flint, van Laarhoven, 1995](#) – Flint O., Laarhoven H.V. Food Microscopy: A Manual of Practical Methods, Using Optical Microscopy // *Trends in Food Science and Technology*. 1995. 6(8): 284-284.
- [Freke, 1971](#) – Freke C.D. The examination of starch gelling by microscopy // *International Journal of Food Science & Technology*. 1971. 6(3): 273-279.
- [Fretzdorff et al., 1982](#) – Fretzdorff B., Pomeranz Y., Bechtel D.B. Malt modification assessed by histochemistry, light microscopy, and transmission and scanning electron microscopy // *Journal of Food Science*. 1982. 47(3): 786-791.
- [Fritz, Greaser, 1991](#) – Fritz J.D., Greaser M.L. Changes in titin and nebulin in postmortem bovine muscle revealed by gel electrophoresis, western blotting and immunofluorescence microscopy // *Journal of Food Science*. 1991. 56(3): 607-610.
- [Funami, 2010](#) – Funami T. Atomic force microscopy imaging of food polysaccharides in relation to rheological properties // *Food science and technology research*. 2010. 16(1): 13-22.
- [Gatti et al., 2008](#) – Gatti A.M., Tossini D., Gambarelli A., Montanari S., Capitani F. Investigation of the presence of inorganic micro-and nanosized contaminants in bread and biscuits

by environmental scanning electron microscopy // *Critical reviews in food science and nutrition*. 2008. 49(3): 275-282.

[Giddings, Hill, 1976](#) – Giddings G.G., Hill L.H. A scanning electron microscopy study of effects of processing on crustacean muscle // *Journal of Food Science*. 1976. 41(2): 455-457.

[Gordon, Barbut, 1990](#) – Gordon A., Barbut S. Cold stage scanning electron microscopy study of meat batters // *Journal of Food Science*. 1990. 55(4): 1196-1198.

[Hägerdal, Löfqvist, 1977](#) – Hägerdal B., Löfqvist B. Effect of acetone on color and microstructure of myoglobin characterized by reemission photometry and scanning electron microscopy // *Journal of Food Science*. 1977 42(5): 1258-1263.

[Handojo et al., 2009](#) – Handojo A., Zhai Y., Frankel G., Pascall M.A. Measurement of adhesion strengths between various milk products on glass surfaces using contact angle measurement and atomic force microscopy // *Journal of Food Engineering*. 2009. 92(3): 305-311.

[Hayta, Ertop, 2018](#) – Hayta M., Ertop M.H. Evaluation of microtextural properties of sourdough wheat bread obtained from optimized formulation using scanning electron microscopy and image analysis during shelf life // *Journal of food science and technology*. 2018. Pp. 1-9.

[Hearne et al., 1978](#) – Hearne L.E., Penfield M.P., Goertz G.E. Heating effects of bovine semitendinosus: Phase contrast microscopy and scanning electron microscopy // *Journal of Food Science*. 1978. 43(1): 13-16.

[Heertje, Leunis, 1997](#) – Heertje I., Leunis M. Measurement of shape and size of fat crystals by electron microscopy // *LWT-Food Science and Technology*. 1997. 30(2): 141-146.

[Heilig et al., 2009](#) – Heilig A., Göggerle A., Hinrichs J. Multiphase visualisation of fat containing β -lactoglobulin- κ -carrageenan gels by confocal scanning laser microscopy, using a novel dye, V03-01136, for fat staining // *LWT-Food Science and Technology*. 2009. 42(2): 646-653.

[Hoskin, Dimick, 1980](#) – Hoskin J.M., Dimick P.S. Observations of chocolate during conching by scanning electron microscopy and viscometry // *Journal of Food Science*. 1980. 45(6): 1541-1545.

[Hsu et al., 1980](#) – Hsu E.E., Gordon J., Davis E.A. Water loss rates and scanning electron microscopy of model cake systems made with different emulsification systems // *Journal of Food Science*. 1980. 45(5): 1243-1255.

[Ikeda et al., 2013](#) – Ikeda S., Gohtani S., Nishinari K., Zhong Q. High acyl gellan networks probed by rheology and atomic force microscopy // *Food Science and Technology Research*. 2013. 19(2): 201-210.

[Indrani et al., 2003](#) – Indrani D., Prabhasankar P., Rajiv J., Rao G.V. Scanning electron microscopy, rheological characteristics, and bread-baking performance of wheat-flour dough as affected by enzymes // *Journal of Food Science*. 2003. 68(9): 2804-2809.

[Ivanov et al., 2017](#) – Ivanov K.I., Zapryanova P.S., Krustev S.V., Angelova V.R. Application of Scanning Electron Microscopy and X-Ray Evaluation of the Main Digestion Methods for Determination of Macroelements in Plant Tissue // *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Biological, Biomolecular, Agricultural, Food and Biotechnological Engineering*. 2017. 11(6): 488-493.

[James, 2005](#) – James B. Foreign Body Contamination of Food-Scanning Electron Microscopy and Energy Dispersive Spectroscopy as Tools for Identification // *International Journal of Food Engineering*. 2005. 1(1).

[James, 2009](#) – James B. Advances in “wet” electron microscopy techniques and their application to the study of food structure // *Trends in Food Science & Technology*. 2009. 20(3-4): 114-124.

[James, Smith, 2009](#) – James B.J., Smith B.G. Surface structure and composition of fresh and bloomed chocolate analysed using X-ray photoelectron spectroscopy, cryo-scanning electron microscopy and environmental scanning electron microscopy // *LWT-Food Science and Technology*. 2009. 42(5): 929-937.

[James, Yang, 2011](#) – James B., Yang S.W. Testing meat tenderness using an in situ straining stage with variable pressure scanning electron microscopy // *Procedia Food Science*. 2011. 1: 258-266.

[Jones et al., 1976](#) – Jones S.B., Carroll R.J., Cavanaugh J.R. Muscle samples for scanning electron microscopy: Preparative techniques and general morphology // *Journal of Food Science*. 1976. 41(4): 867-873.

Joyner, Meldrum, 2016 – Joyner H.S., Meldrum A. Rheological study of different mashed potato preparations using large amplitude oscillatory shear and confocal microscopy // *Journal of Food Engineering*. 2016. 169: 326-337.

Kaláb, Larocque, 1996 – Kaláb M., Larocque G. Research note: suitability of agar gel encapsulation of milk and cream for electron microscopy // *LWT-Food Science and Technology*. 1996. 29(4): 368-371.

Karlsson et al., 2007 – Karlsson A.O., Ipsen R., Ardö Y. Observations of casein micelles in skim milk concentrate by transmission electron microscopy // *LWT-Food Science and Technology*. 2007. 40(6): 1102-1107.

Kirby et al., 1995 – Kirby A.R., Gunning A.P., Morris V.J. Atomic force microscopy in food research: a new technique comes of age // *Trends in Food Science & Technology*. 1995. 6(11): 359-365.

Kitada et al., 1986 – Kitada Y., Sasaki M., Ueda Y., Arai N., Nakamura M., Amano R. Method for Discrimination of Kuzu Starch by X-Ray Diffractometry and Scanning Electron Microscopy // *Food Hygiene and Safety Science (Shokuhin Eiseigaku Zasshi)*. 1986. 27(1): 9-14_1.

Ko, Gunasekaran, 2007 – Ko S., Gunasekaran S. Error correction of confocal microscopy images for in situ food microstructure evaluation // *Journal of food engineering*. 2007. 79(3): 935-944.

Lee, Morr, 1993 – Lee S.Y., Morr C.V. Fixation staining methods for examining microstructure in whipped cream by electron microscopy // *Journal of food science*. 1993. 58(1): 124-127.

Lin, Ito, 1986 – Lin L.C., Ito T. Flow behaviour and scanning electron microscopy of myosin B, soya protein components and mixtures at varying temperatures // *International Journal of Food Science & Technology*. 1986. 21(2): 133-149.

Liu, Lanier, 2015 – Liu W., Lanier T.C. Combined use of variable pressure scanning electron microscopy and confocal laser scanning microscopy best reveal microstructure of comminuted meat gels // *LWT-Food Science and Technology*. 2015. 62(2): 1027-1033.

Maeda et al., 2009 – Maeda I., Horigane A.K., Yoshida M., Aikawa Y. Principles of Nuclear Magnetic Resonance Microscopy Principles of Nuclear Magnetic Resonance Microscopy 229, 1991. // *Food science and technology research*. 2009. 15(2): 107-116.

McDonough et al., 1993 – McDonough C., Gomez M.H., Lee J.K., Waniska R.D., Rooney L.W. Environmental scanning electron microscopy evaluation of tortilla chip microstructure during deep-fat frying // *Journal of Food Science*. 1993. 58(1): 199-203.

Moreno, Bouchon, 2013 – Moreno M.C., Bouchon P. Microstructural characterization of deep-fat fried formulated products using confocal scanning laser microscopy and a non-invasive double staining procedure // *Journal of Food Engineering*. 2013. 118(2): 238-246.

Morris et al., 2001 – Morris V.J., Mackie A.R., Wilde P.J., Kirby A.R., Mills E.C.N., Gunning A.P. Atomic force microscopy as a tool for interpreting the rheology of food biopolymers at the molecular level // *LWT-Food Science and Technology*. 2001. 34(1): 3-10.

Nakanishi et al., 1967 – Nakanishi T., Makino M., Adachi S. Fixation, Staining and Sectioning Techniques of Milk Powder in Light Microscopy // *Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi*. 1967. 14(5): 183-186.

Neethirajan et al., 2012 – Neethirajan S., Tsukamoto K., Kanahara H., Sugiyama S. Ultrastructural analysis of buckwheat starch components using atomic force microscopy // *Journal of food science*. 2012. 77(1): N2-N7.

Ohi et al., 2016 – Oli P., Ward R., Adhikari B., Mawson A.J., Adhikari R., Wess T., ... , Torley P. Synchrotron X-ray Fluorescence Microscopy study of the diffusion of iron, manganese, potassium and zinc in parboiled rice kernels // *LWT-Food Science and Technology*. 2016. 71: 138-148.

Ong et al., 2011 – Ong L., Dagastine R.R., Kentish S.E., Gras S.L. Microstructure of milk gel and cheese curd observed using cryo scanning electron microscopy and confocal microscopy // *LWT-Food Science and Technology*. 2011. 44(5): 1291-1302.

Otwell, Hamann, 1979 – Otwell W.S., Hamann D.D. Textural characterization of squid (*Loligo pealei* LESUER): scanning electron microscopy of cooked mantle // *Journal of Food Science*. 1979. 44(6): 1629-1635.

Ovalle et al., 2013 – Ovalle N., Cortes P., Bouchon P. Understanding microstructural changes of starch during atmospheric and vacuum heating in water and oil through online in situ vacuum hot-stage microscopy // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2013. 17: 135-143.

- Parkkonen et al., 1997 – Parkkonen T., Heinonen R., Autio K. A new method for determining the area of cell walls in rye doughs based on fluorescence microscopy and computer-assisted image analysis // *LWT-Food Science and Technology*. 1997. 30(7): 743-747.
- Phinney et al., 2017 – Phinney D.M., Goode K.R., Fryer P.J., Heldman D., Bakalis S. Identification of residual nano-scale foulant material on stainless steel using atomic force microscopy after clean in place // *Journal of Food Engineering*. 2017. 214: 236-244.
- Rosenberg et al., 1985 – Rosenberg M., Kopelman I.J., Talmon Y. A scanning electron microscopy study of microencapsulation // *Journal of Food Science*. 1985. 50(1): 139-144.
- Ruddick, Richards, 1975 – Ruddick J.E., Richards J.F. Comparison of sarcomere length measurement of cooked chicken pectoralis muscle by laser diffraction and oil immersion microscopy // *Journal of Food Science*. 1975. 40(3): 500-501.
- Schaller, Powrie, 1971 – Schaller D.R., Powrie W.D. Scanning electron microscopy of skeletal muscle from rainbow trout, turkey and beef // *Journal of Food Science*. 1971. 36(4): 552-559.
- Schaller, Powrie, 1972 – Schaller D.E., Powrie W.D. Scanning electron microscopy of heated beef, chicken and rainbow trout muscles // *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*. 1972. 5(4): 184-190.
- Scussel et al., 2014 – Scussel V.M., Manfio D., Savi G.D., Moecke E.H. Stereoscopy and Scanning Electron Microscopy of Brazil Nut (*Bertholletia excelsa* HBK) Shell, Brown Skin, and Edible Part: Part One-Healthy Nut // *Journal of food science*. 2014. 79(7): H1443-H1453.
- Seim et al, 2015 – Seim C., Reineke K., Werner S., Dehlinger A., Legall H., Stiel H., Kanngießer B. High pressure treated *Bacillus subtilis* spores—Structural analysis by means of synchrotron and laboratory based soft X-ray microscopy // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2015. 29: 134-142.
- Serša et al., 2011 – Serša I., Bajd F., Sepe A.. MR Microscopy of Food Freezing and Thawing / *Magnetic Resonance in Food Science*. Pp. 190-197.
- Sheen, 2008 – Sheen S., Bao G., Cooke P. Food surface texture measurement using reflective confocal laser scanning microscopy // *Journal of food science*. 2008. 73(5): E227-E234.
- Sigua et al., 2010 – Sigua G., Adhikari S., Frankel G.S., Pascall M.A. The use of atomic force microscopy to measure the efficacies of various chemical sanitizers in removing organic matter from glass surfaces // *Journal of food engineering*. 2010. 100(1): 139-144.
- Stromer, Goll, 1967 – Stromer M.H., Goll D.E. Molecular properties of post-mortem muscle. 3. Electron microscopy of myofibrils // *Journal of Food Science*. 1967. 32(4): 386-389.
- Suutarinen et al., 1998 – Suutarinen J., Änäkäinen L., Autio K. Comparison of light microscopy and spatially resolved Fourier transform infrared (FT-IR) microscopy in the examination of cell wall components of strawberries // *LWT-Food Science and Technology*. 1998. 31(7-8): 595-601.
- Swatland, 1990 – Swatland H.J. Thermal denaturation of perimysial collagen in meat measured by polarized light microscopy // *Journal of food science*. 1990. 55(2): 305-307.
- Tan, Balasubramanian, 2017 – Tan J., Balasubramanian B.M. Particle size measurements and scanning electron microscopy (SEM) of cocoa particles refined/conched by conical and cylindrical roller stone melangers // *Journal of Food Engineering*. 2017. 212: 146-153.
- Tatsumi et al., 1991 – Tatsumi Y., Watada A.E., Wergin W.P. Scanning electron microscopy of carrot stick surface to determine cause of white translucent appearance // *Journal of Food Science*. 1991. 56(5): 1357-1359.
- Tung, Richards, 1972 – Tung M.A., Richards J.F. Ultrastructure of the hen's egg shell membranes by electron microscopy // *Journal of Food Science*. 1972. 37(2): 277-281.
- van de Velde et al., 2002 – van de Velde F., van Riel J., Tromp R.H. Visualisation of starch granule morphologies using confocal scanning laser microscopy (CSLM) // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2002. 82(13): 1528-1536.
- van Laarhoven, 1995 – van Laarhoven H. Food microscopy: A manual of practical methods, using optical microscopy: by Olga Flint, BIOS Scientific Publishers. 1995. xii+ 125 pages.
- Varcoe, Jones, 1983 – Varcoe G., Jones S.D.M. The measurement of sarcomere length in beef longissimus muscle by laser diffraction and oil immersion microscopy // *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*. 1983. 16(1): 82-83.

- [Varriano-Marston et al., 1978](#) – Varriano-Marston E., Davis E.A., Hutchinson T.E., Gordon J. Postmortem aging of bovine muscle: A comparison of two preparation techniques for electron microscopy // *Journal of Food Science*. 1978. 43(3): 680-683.
- [Velinov et al., 1990](#) – Velinov P.D., Cassens R.G., Greaser M.L., Fritz J.D. Confocal scanning optical microscopy of meat products // *Journal of food science*. 1990. 55(6): 1751-1752.
- [Wambura et al., 2010](#) – Wambura P., Yang W., Mwakatage N., Herring J.L. Removal of lipid from surfaces of roasted peanuts by sonication as assessed by fluorescence and scanning electron microscopy // *Journal of food process engineering*. 2010. 33(5): 837-847.
- [Yada et al., 1995](#) – Yada R.Y., Harauz G., Marcone M. F., Beniac D.R., Ottensmeyer F.P. Visions in the mist: The Zeitgeist of food protein imaging by electron microscopy // *Trends in Food Science & Technology*. 1995. 6(8): 265-270.
- [Yang et al., 1974](#) – Yang R., Kim C.J., Moon Y.H., Yu J.H. Studies on the Myofibrillar Proteins Part I. Phase Microscopy of Myofibrils from Rabbit Muscle // *Korean Journal of Food Science and Technology*. 1974. 6(2): 79-85.
- [Yang et al., 2017](#) – Yang Y., Wang X., Zhao C., Tian G., Zhang H., Xiao H., ... , Zheng J. Chemical Mapping of Essential Oils, Flavonoids and Carotenoids in Citrus Peels by Raman Microscopy // *Journal of food science*. 2017. 82(12): 2840-2846.
- [Yang et al., 2005](#) – Yang H., An H., Feng G., Li Y. Visualization and quantitative roughness analysis of peach skin by atomic force microscopy under storage // *LWT-Food Science and Technology*. 2005. 38(6): 571-577.
- [Yang et al., 2007](#) – Yang H., Wang Y., Regenstein J.M., Rouse D.B. Nanostructural characterization of catfish skin gelatin using atomic force microscopy // *Journal of food science*. 2007. 72(8): C430-C440.
- [Yau, Murphy, 2001](#) – Yau P.Y., Murphy R.J. A light microscopy study on the cell walls decay of biodegraded coir waste // *Journal of tropical agriculture and food science*. 2001. 29: 61-68.
- [Zakharia, 2009](#) – Zakharia I., הירכז דאמט. Development of a Submicron Optochemical Probe for Near-field Scanning Microscopy. Technion-Israel Institute of Technology, Faculty of Biotechnology and Food Engineering, 2009.
- [Zilberboim et al., 1986](#) – Zilberboim R., Kopelman I.J., Talmon Y. Microencapsulation by a dehydrating liquid: a microstructural study by scanning electron microscopy // *Journal of Food Science*. 1986. 51(5): 1307-1310.

References

- [Adedeji et al., 2011](#) – Adedeji, A.A., Liu, L., Ngadi, M.O. (2011). Microstructural evaluation of deep-fat fried chicken nugget batter coating using confocal laser scanning microscopy. *Journal of food engineering*. 102(1): 49-57.
- [Alli, Baker, 1981](#) – Alli, I., Baker, B.E. (1981). Constitution of leguminous seeds. Scanning electron microscopy of proteins prepared from Phaseolus beans. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 32(11): 1069-1073.
- [Amboni et al., 1999](#) – Amboni, R.D., Francisco, A.D., Teixeira, E. (1999). Detection of frauds in ground coffee with scanning electronic microscopy. *Food Science and Technology*. 19(3): 311-313.
- [Badii et al., 2004](#) – Badii, F., Zhdan, P., Howell, N.K. (2004). Elucidation of protein aggregation in frozen cod and haddock by transmission electron microscopy/immunocytochemistry, light microscopy and atomic force microscopy. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 84(14): 1919-1928.
- [Bang, Swanson, 2008](#) – Bang, W.S., Swanson, B.G. (2008). Scanning electron microscopy studies of *Saccharomyces cerevisiae* structural changes by high hydrostatic pressure treatment. *Food Science and Biotechnology*. 17(5): 1102-1105.
- [Bell et al., 1975](#) – Bell, A.V., Berger, K.G., Russo, J.V., White, G.W., Weathers, T.L. (1975). A study of the micro-baking of sponges and cakes using cine and television microscopy. *International Journal of Food Science & Technology*. 10(2): 147-156.
- [Bermúdez, Barbosa-Cánovas, 2008](#) – Bermúdez, D., Barbosa-Cánovas, G.V. (2008). Scanning Electron Microscopy of thermo-sonicated *Listeria innocua* cells. *Food Engineering: Integrated Approaches*. Springer, New York, NY. Pp. 287-294.

- [Bermudez-Aguirre et al., 2012](#) – Bermúdez-Aguirre, D.A.N.I.E.L.A., Lynch-Holm, V.A.L.E. R.I.E., Barbosa-Cánovas, G.V. (2012). Microwave-assisted dehydration for electron microscopy sample preparation in the study of thermo-sonicated yogurt. *Journal of Food Process Engineering*. 35(6): 923-929.
- [Borchert et al., 1967](#) – Borchert, L.L., Greaser, M.L., Bard, J.C., Cassens, R.G., Briskey, E.J. (1967). Electron microscopy of a meat emulsion. *Journal of Food Science*. 32(4): 419-421.
- [Caillet et al., 2003](#) – Caillet, A., Cogné, C., Andrieu, J., Laurent, P., Rivoire, A. (2003). Characterization of ice cream structure by direct optical microscopy. Influence of freezing parameters. *LWT-Food Science and Technology*. 36(8): 743-749.
- [Cardona et al., 2008](#) – Cardona, Y.P., Oliveros, C.E., Arias, D.F., Alvarez, F., Devia, A. (2008). Epicarp characterization of coffee fruits by atomic force microscopy. *Journal of food engineering*. 86(2): 167-171.
- [Careli et al., 2009](#) – Careli, R.T., De Andrade, N.J., De Fátima Ferreira Soares, N.I.L.D.A., Ribeiro Junior, J.I., Rosado, M.S., Pinheiro Luiz, L.M., Bernardes, P.C. (2009). Microtopography and bacterial adherence to food contact surfaces evaluated by scanning electron microscopy and epifluorescence microscopy. *Journal of food process engineering*. 32(5): 730-742.
- [Cassens et al., 1963](#) – Cassens, R.G., Briskey, E.J., Hoekstra, W.G. (1963). Electron microscopy of post-mortem changes in porcine muscle. *Journal of Food Science*. 28(6): 680-684.
- [Cheng, Parrish, 1976](#) – Cheng, C.S., Parrish, Jr.F.C. (1976). Scanning electron microscopy of bovine muscle: Effect of heating on ultrastructure. *Journal of Food Science*. 41(6): 1449-1454.
- [Corich et al., 2004](#) – Corich, V., Soldati, E., Giacomini, A. (2004). Optimization of fluorescence microscopy techniques for the detection of total and viable lactic acid bacteria in whey starter cultures. *Annals of microbiology*. 54: 335-342.
- [Dharmaraj et al., 2014](#) – Dharmaraj, U., Parameswara, P., Somashekar, R., Malleshi, N.G. (2014). Effect of processing on the microstructure of finger millet by X-ray diffraction and scanning electron microscopy. *Journal of food science and technology*. 51(3): 494-502.
- [Dürrenberger et al., 2001](#) – Dürrenberger, M.B., Handschin, S., Conde-Petit, B., Escher, F. (2001). Visualization of food structure by confocal laser scanning microscopy (CLSM). *LWT-Food Science and Technology*. 34(1): 11-17.
- [Flint, 1977](#) – Flint, O. (1977). Quantitative aspects of food microscopy. *Proceedings-Institute of Food Science and Technology (UK)*.
- [Flint, van Laarhoven, 1995](#) – Flint, O., Laarhoven, H.V. (1995). Food Microscopy: A Manual of Practical Methods, Using Optical Microscopy. *Trends in Food Science and Technology*. 6(8): 284-284.
- [Freke, 1971](#) – Freke, C.D. (1971). The examination of starch gelling by microscopy. *International Journal of Food Science & Technology*. 6(3): 273-279.
- [Fretzdorff et al., 1982](#) – Fretzdorff, B., Pomeranz, Y., Bechtel, D.B. (1982). Malt modification assessed by histochemistry, light microscopy, and transmission and scanning electron microscopy. *Journal of Food Science*. 47(3): 786-791.
- [Fritz, Greaser, 1991](#) – Fritz, J.D., Greaser, M.L. (1991). Changes in titin and nebulin in postmortem bovine muscle revealed by gel electrophoresis, western blotting and immunofluorescence microscopy. *Journal of Food Science*. 56(3): 607-610.
- [Funami, 2010](#) – Funami, T. (2010). Atomic force microscopy imaging of food polysaccharides in relation to rheological properties. *Food science and technology research*. 16(1): 13-22.
- [Gatti et al., 2008](#) – Gatti, A.M., Tossini, D., Gambarelli, A., Montanari, S., Capitani, F. (2008). Investigation of the presence of inorganic micro-and nanosized contaminants in bread and biscuits by environmental scanning electron microscopy. *Critical reviews in food science and nutrition*. 49(3): 275-282.
- [Giddings, Hill, 1976](#) – Giddings, G.G., Hill, L.H. (1976). A scanning electron microscopy study of effects of processing on crustacean muscle. *Journal of Food Science*. 41(2): 455-457.
- [Gordon, Barbut, 1990](#) – Gordon, A., Barbut, S. (1990). Cold stage scanning electron microscopy study of meat batters. *Journal of Food Science*. 55(4): 1196-1198.

- Hägerdal, Löfqvist, 1977 – Hägerdal, B., Löfqvist, B. (1977). Effect of acetone on color and microstructure of myoglobin characterized by reemission photometry and scanning electron microscopy. *Journal of Food Science*. 42(5): 1258-1263.
- Handojo et al., 2009 – Handojo, A., Zhai, Y., Frankel, G., Pascall, M.A. (2009). Measurement of adhesion strengths between various milk products on glass surfaces using contact angle measurement and atomic force microscopy. *Journal of Food Engineering*. 92(3): 305-311.
- Hayta, Ertop, 2018 – Hayta, M., Ertop, M.H. (2018). Evaluation of microtextural properties of sourdough wheat bread obtained from optimized formulation using scanning electron microscopy and image analysis during shelf life. *Journal of food science and technology*, 1-9.
- Hearne et al., 1978 – Hearne, L.E., Penfield, M.P., Goertz, G.E. (1978). Heating effects of bovine semitendinosus: Phase contrast microscopy and scanning electron microscopy. *Journal of Food Science*. 43(1): 13-16.
- Heertje, Leunis, 1997 – Heertje, I., Leunis, M. (1997). Measurement of shape and size of fat crystals by electron microscopy. *LWT-Food Science and Technology*. 30(2): 141-146.
- Heilig et al., 2009 – Heilig, A., Göggerle, A., Hinrichs, J. (2009). Multiphase visualisation of fat containing β -lactoglobulin- κ -carrageenan gels by confocal scanning laser microscopy, using a novel dye, V03-01136, for fat staining. *LWT-Food Science and Technology*. 42(2): 646-653.
- Hoskin, Dimick, 1980 – Hoskin, J.M., Dimick, P.S. (1980). Observations of chocolate during conching by scanning electron microscopy and viscometry. *Journal of Food Science*. 45(6): 1541-1545.
- Hsu et al., 1980 – Hsu, E.E., Gordon, J., Davis, E.A. (1980). Water loss rates and scanning electron microscopy of model cake systems made with different emulsification systems. *Journal of Food Science*. 45(5): 1243-1255.
- Ikeda et al., 2013 – Ikeda, S., Gohtani, S., Nishinari, K., Zhong, Q. (2013). High acyl gellan networks probed by rheology and atomic force microscopy. *Food Science and Technology Research*. 19(2): 201-210.
- Indrani et al., 2003 – Indrani, D., Prabhasankar, P., Rajiv, J., Rao, G.V. (2003). Scanning electron microscopy, rheological characteristics, and bread-baking performance of wheat-flour dough as affected by enzymes. *Journal of Food Science*. 68(9): 2804-2809.
- Ivanov et al., 2017 – Ivanov, K.I., Zapryanova, P.S., Krustev, S.V., Angelova, V.R. (2017). Application of Scanning Electron Microscopy and X-Ray Evaluation of the Main Digestion Methods for Determination of Macroelements in Plant Tissue. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Biological, Biomolecular, Agricultural, Food and Biotechnological Engineering*. 11(6): 488-493.
- James, 2005 – James, B. (2005). Foreign Body Contamination of Food-Scanning Electron Microscopy and Energy Dispersive Spectroscopy as Tools for Identification. *International Journal of Food Engineering*, 1(1).
- James, 2009 – James, B. (2009). Advances in “wet” electron microscopy techniques and their application to the study of food structure. *Trends in Food Science & Technology*. 20(3-4): 114-124.
- James, Smith, 2009 – James, B.J., Smith, B.G. (2009). Surface structure and composition of fresh and bloomed chocolate analysed using X-ray photoelectron spectroscopy, cryo-scanning electron microscopy and environmental scanning electron microscopy. *LWT-Food Science and Technology*. 42(5): 929-937.
- James, Yang, 2011 – James, B., Yang, S.W. (2011). Testing meat tenderness using an in situ straining stage with variable pressure scanning electron microscopy. *Procedia Food Science*. 1: 258-266.
- Jones et al., 1976 – Jones, S.B., Carroll, R.J., Cavanaugh, J.R. (1976). Muscle samples for scanning electron microscopy: Preparative techniques and general morphology. *Journal of Food Science*. 41(4): 867-873.
- Joyner, Meldrum, 2016 – Joyner, H.S., Meldrum, A. (2016). Rheological study of different mashed potato preparations using large amplitude oscillatory shear and confocal microscopy. *Journal of Food Engineering*. 169: 326-337.
- Kaláb, Larocque, 1996 – Kaláb, M., Larocque, G. (1996). Research note: suitability of agar gel encapsulation of milk and cream for electron microscopy. *LWT-Food Science and Technology*. 29(4): 368-371.

[Karlsson et al., 2007](#) – Karlsson, A.O., Ipsen, R., Ardö, Y. (2007). Observations of casein micelles in skim milk concentrate by transmission electron microscopy. *LWT-Food Science and Technology*. 40(6): 1102-1107.

[Kirby et al., 1995](#) – Kirby, A.R., Gunning, A.P., Morris, V.J. (1995). Atomic force microscopy in food research: a new technique comes of age. *Trends in Food Science & Technology*. 6(11): 359-365.

[Kitada et al., 1986](#) – Kitada, Y., Sasaki, M., Ueda, Y., Arai, N., Nakamura, M., Amano, R. (1986). Method for Discrimination of Kuzu Starch by X-Ray Diffractometry and Scanning Electron Microscopy. *Food Hygiene and Safety Science (Shokuhin Eiseigaku Zasshi)*. 27(1): 9-14_1.

[Ko, Gunasekaran, 2007](#) – Ko, S., Gunasekaran, S. (2007). Error correction of confocal microscopy images for in situ food microstructure evaluation. *Journal of food engineering*. 79(3): 935-944.

[Lee, Morr, 1993](#) – Lee, S.Y., Morr, C.V. (1993). Fixation staining methods for examining microstructure in whipped cream by electron microscopy. *Journal of food science*. 58(1): 124-127.

[Lin, Ito, 1986](#) – Lin, L.C., Ito, T. (1986). Flow behaviour and scanning electron microscopy of myosin B, soya protein components and mixtures at varying temperatures. *International Journal of Food Science & Technology*. 21(2): 133-149.

[Liu, Lanier, 2015](#) – Liu, W., Lanier, T.C. (2015). Combined use of variable pressure scanning electron microscopy and confocal laser scanning microscopy best reveal microstructure of comminuted meat gels. *LWT-Food Science and Technology*. 62(2): 1027-1033.

[Maeda et al., 2009](#) – Maeda, I., Horigane, A.K., Yoshida, M., Aikawa, Y. (2009). Principles of Nuclear Magnetic Resonance Microscopy Principles of Nuclear Magnetic Resonance Microscopy 229, 1991. *Food science and technology research*. 15(2): 107-116.

[McDonough et al., 1993](#) – McDonough, C., Gomez, M.H., Lee, J.K., Waniska, R.D., Rooney, L.W. (1993). Environmental scanning electron microscopy evaluation of tortilla chip microstructure during deep-fat frying. *Journal of Food Science*. 58(1): 199-203.

[Moreno, Bouchon, 2013](#) – Moreno, M.C., Bouchon, P. (2013). Microstructural characterization of deep-fat fried formulated products using confocal scanning laser microscopy and a non-invasive double staining procedure. *Journal of Food Engineering*. 118(2): 238-246.

[Morris et al., 2001](#) – Morris, V.J., Mackie, A.R., Wilde, P.J., Kirby, A.R., Mills, E.C.N., Gunning, A.P. (2001). Atomic force microscopy as a tool for interpreting the rheology of food biopolymers at the molecular level. *LWT-Food Science and Technology*. 34(1): 3-10.

[Nakanishi et al., 1967](#) – Nakanishi, T., Makino, M., Adachi, S. (1967). Fixation, Staining and Sectioning Techniques of Milk Powder in Light Microscopy. *Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi*. 14(5): 183-186.

[Neethirajan et al., 2012](#) – Neethirajan, S., Tsukamoto, K., Kanahara, H., Sugiyama, S. (2012). Ultrastructural analysis of buckwheat starch components using atomic force microscopy. *Journal of food science*. 77(1): N2-N7.

[Ohi et al., 2016](#) – Oli, P., Ward, R., Adhikari, B., Mawson, A.J., Adhikari, R., Wess, T., ... , Torley, P. (2016). Synchrotron X-ray Fluorescence Microscopy study of the diffusion of iron, manganese, potassium and zinc in parboiled rice kernels. *LWT-Food Science and Technology*. 71: 138-148.

[Ong et al., 2011](#) – Ong, L., Dagastine, R.R., Kentish, S.E., Gras, S.L. (2011). Microstructure of milk gel and cheese curd observed using cryo scanning electron microscopy and confocal microscopy. *LWT-Food Science and Technology*. 44(5): 1291-1302.

[Otwell, Hamann, 1979](#) – Otwell, W.S., Hamann, D.D. (1979). Textural characterization of squid (*Loligo pealei* LESUER): scanning electron microscopy of cooked mantle. *Journal of Food Science*. 44(6): 1629-1635.

[Ovalle et al., 2013](#) – Ovalle, N., Cortes, P., Bouchon, P. (2013). Understanding microstructural changes of starch during atmospheric and vacuum heating in water and oil through online in situ vacuum hot-stage microscopy. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 17: 135-143.

[Parkkonen et al., 1997](#) – Parkkonen, T., Heinonen, R., Autio, K. (1997). A new method for determining the area of cell walls in rye doughs based on fluorescence microscopy and computer-assisted image analysis. *LWT-Food Science and Technology*. 30(7): 743-747.

- Phinney et al., 2017 – Phinney, D.M., Goode, K.R., Fryer, P.J., Heldman, D., Bakalis, S. (2017). Identification of residual nano-scale foulant material on stainless steel using atomic force microscopy after clean in place. *Journal of Food Engineering*. 214: 236-244.
- Rosenberg et al., 1985 – Rosenberg, M., Kopelman, I.J., Talmon, Y. (1985). A scanning electron microscopy study of microencapsulation. *Journal of Food Science*. 50(1): 139-144.
- Ruddick, Richards, 1975 – Ruddick, J.E., Richards, J.F. (1975). Comparison of sarcomere length measurement of cooked chicken pectoralis muscle by laser diffraction and oil immersion microscopy. *Journal of Food Science*. 40(3): 500-501.
- Schaller, Powrie, 1971 – Schaller, D.R., Powrie, W.D. (1971). Scanning electron microscopy of skeletal muscle from rainbow trout, turkey and beef. *Journal of Food Science*. 36(4): 552-559.
- Schaller, Powrie, 1972 – Schaller, D.E., Powrie, W.D. (1972). Scanning electron microscopy of heated beef, chicken and rainbow trout muscles. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*. 5(4): 184-190.
- Scussel et al., 2014 – Scussel, V.M., Manfio, D., Savi, G.D., Moecke, E.H. (2014). Stereoscopy and Scanning Electron Microscopy of Brazil Nut (*Bertholletia excelsa* HBK) Shell, Brown Skin, and Edible Part: Part One-Healthy Nut. *Journal of food science*. 79(7): H1443-H1453.
- Seim et al., 2015 – Seim, C., Reineke, K., Werner, S., Dehlinger, A., Legall, H., Stiel, H., Kanngießer, B. (2015). High pressure treated *Bacillus subtilis* spores—Structural analysis by means of synchrotron and laboratory based soft X-ray microscopy. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 29: 134-142.
- Serša et al., 2011 – Serša, I., Bajd, F., Sepe, A. (2011). MR Microscopy of Food Freezing and Thawing. *Magnetic Resonance in Food Science*. Pp. 190-197.
- Sheen, 2008 – Sheen, S., Bao, G., Cooke, P. (2008). Food surface texture measurement using reflective confocal laser scanning microscopy. *Journal of food science*. 73(5): E227-E234.
- Sigua et al., 2010 – Sigua, G., Adhikari, S., Frankel, G.S., Pascall, M.A. (2010). The use of atomic force microscopy to measure the efficacies of various chemical sanitizers in removing organic matter from glass surfaces. *Journal of food engineering*. 100(1): 139-144.
- Stromer, Goll, 1967 – Stromer, M.H., Goll, D.E. (1967). Molecular properties of post-mortem muscle. 3. Electron microscopy of myofibrils. *Journal of Food Science*. 32(4): 386-389.
- Suutarinen et al., 1998 – Suutarinen, J., Änäkäinen, L., Autio, K. (1998). Comparison of light microscopy and spatially resolved Fourier transform infrared (FT-IR) microscopy in the examination of cell wall components of strawberries. *LWT-Food Science and Technology*. 31(7-8): 595-601.
- Swatland, 1990 – Swatland, H.J. (1990). Thermal denaturation of perimysial collagen in meat measured by polarized light microscopy. *Journal of food science*. 55(2): 305-307.
- Tan, Balasubramanian, 2017 – Tan, J., Balasubramanian, B.M. (2017). Particle size measurements and scanning electron microscopy (SEM) of cocoa particles refined/conched by conical and cylindrical roller stone melangers. *Journal of Food Engineering*. 212: 146-153.
- Tatsumi et al., 1991 – Tatsumi, Y., Watada, A.E., Wergin, W.P. (1991). Scanning electron microscopy of carrot stick surface to determine cause of white translucent appearance. *Journal of Food Science*. 56(5): 1357-1359.
- Tung, Richards, 1972 – Tung, M.A., Richards, J.F. (1972). Ultrastructure of the hen's egg shell membranes by electron microscopy. *Journal of Food Science*. 37(2): 277-281.
- van de Velde et al., 2002 – van de Velde, F., van Riel, J., Tromp, R.H. (2002). Visualisation of starch granule morphologies using confocal scanning laser microscopy (CSLM). *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 82(13): 1528-1536.
- van Laarhoven, 1995 – van Laarhoven, H. (1995). Food microscopy: A manual of practical methods, using optical microscopy: by Olga Flint, BIOS Scientific Publishers. xii+ 125 pages.
- Varcoe, Jones, 1983 – Varcoe, G., Jones, S.D.M. (1983). The measurement of sarcomere length in beef longissimus muscle by laser diffraction and oil immersion microscopy. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*. 16(1): 82-83.
- Varriano-Marston et al., 1978 – Varriano-Marston, E., Davis, E.A., Hutchinson, T.E., Gordon, J. (1978). Postmortem aging of bovine muscle: A comparison of two preparation techniques for electron microscopy. *Journal of Food Science*. 43(3): 680-683.

Velinov et al., 1990 – Velinov, P.D., Cassens, R.G., Greaser, M.L., Fritz, J.D. (1990). Confocal scanning optical microscopy of meat products. *Journal of food science*. 55(6): 1751-1752.

Wambura et al., 2010 – Wambura, P., Yang, W., Mwakatage, N., Herring, J.L. (2010). Removal of lipid from surfaces of roasted peanuts by sonication as assessed by fluorescence and scanning electron microscopy. *Journal of food process engineering*. 33(5): 837-847.

Yada et al., 1995 – Yada, R.Y., Harauz, G., Marcone, M. F., Beniac, D.R., Ottensmeyer, F.P. (1995). Visions in the mist: The Zeitgeist of food protein imaging by electron microscopy. *Trends in Food Science & Technology*. 6(8): 265-270.

Yang et al., 1974 – Yang, R., Kim, C.J., Moon, Y.H., Yu, J.H. (1974). Studies on the Myofibrillar Proteins Part I. Phase Microscopy of Myofibrils from Rabbit Muscle. *Korean Journal of Food Science and Technology*. 6(2): 79-85.

Yang et al., 2017 – Yang, Y., Wang, X., Zhao, C., Tian, G., Zhang, H., Xiao, H., ... , Zheng, J. (2017). Chemical Mapping of Essential Oils, Flavonoids and Carotenoids in Citrus Peels by Raman Microscopy. *Journal of food science*. 82(12): 2840-2846.

Yang et al., 2005 – Yang, H., An, H., Feng, G., Li, Y. (2005). Visualization and quantitative roughness analysis of peach skin by atomic force microscopy under storage. *LWT-Food Science and Technology*. 38(6): 571-577.

Yang et al., 2007 – Yang, H., Wang, Y., Regenstein, J.M., Rouse, D.B. (2007). Nanostructural characterization of catfish skin gelatin using atomic force microscopy. *Journal of food science*. 72(8): C430-C440.

Yau, Murphy, 2001 – Yau, P.Y., Murphy, R.J. (2001). A light microscopy study on the cell walls decay of biodegraded coir waste. *Journal of tropical agriculture and food science*. 29: 61-68.

Zakharia, 2009 – Zakharia, I., הירכז דאמע (2009). Development of a Submicron Optochemical Probe for Near-field Scanning Microscopy. Technion-Israel Institute of Technology, Faculty of Biotechnology and Food Engineering.

Zilberboim et al., 1986 – Zilberboim, R., Kopelman, I.J., Talmon, Y. (1986). Microencapsulation by a dehydrating liquid: a microstructural study by scanning electron microscopy. *Journal of Food Science*. 51(5): 1307-1310.

Корреляционная спектрозональная/мультиспектральная безлинзовая оптическая микроскопия и сканирующая электронная микроскопия как новый комбинированный инструментальный хеометрики для пищевой биохимии

Часть I. Краткая история применения оптической и электронной микроскопии в пищевой промышленности

Фёдор Константинович Орехов ^a, Олег Валерьевич Градов ^{a, *}

^a Отдел динамики химических и биологических процессов, Институт химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

Аннотация. Пищевые образцы представляют собой гетерогенные и структурированные среды, требующие исследования с пространственным разрешением или позиционной чувствительностью для осмысленной метрологической интерпретации данных. При анализе таких материалов в масштабе, характерном для текстуры образца, любая усредненная информация теряет свою значимость без структурного контекста. Это приводит к перекрывающимся пикам в аналитических сигналах, которые можно эффективно разделить только путем введения позиционно-специфического разрешения, адекватного размеру структур, несущих биохимические свойства и дескрипторы, ответственные за эти сигналы. Решение заключается в количественных методах аналитической микроскопии. Эти методы включают различные спектральные диапазоны, обеспечивающие качественно различные подходы к измерениям и возможности

* Корреспондирующий автор

Адреса электронной почты: o.v.gradov@gmail.com (О.В. Градов)

характеризации, что имеет решающее значение для всестороннего понимания структуры и состава целевых веществ. В данной статье обсуждается интеграция множества диагностических инструментов, а также освещаются существующие методологические и технические ограничения, препятствующие более широкому внедрению. Она служит в первую очередь справочным ресурсом для потенциальных пользователей из пищевой промышленности, обращающихся за консультацией по внедрению таких передовых методов, особенно при рассмотрении их применимости к конкретным исследовательским объектам, описанным в данной статье.

Ключевые слова: хемометрика, пищевая биохимия, оптическая микроскопия, ЯМР-микроскопия, СЭМ, ESEM, ASEM, CLEM, КриоСЭМ, мультиспектральная оптическая микроскопия, история микроскопии для химического анализа пищевых продуктов.