

УДК 631.811.98:634.8

**МИРОВОЙ ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
ИНТРОСКОПИЧЕСКИХ  
МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ  
В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ  
БИОЛОГИИ И ПИЩЕВОЙ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Никольский Максим Алексеевич  
канд. с.-х., наук, доцент  
ст. научный сотрудник  
лаборатории виноградарства  
и виноделия

*Федеральное государственное бюджетное  
научное учреждение Анапская зональная  
опытная станция виноградарства и  
виноделия СКЗНИИСиВ,  
Анапа, Россия*

Грязнов Артем Юрьевич  
д-р техн. наук, профессор

*Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ»,  
Санкт-Петербург, Россия*

В материалах статьи приводится аналитический обзор мирового опыта использования интроскопических методов исследования, применяемых в сельскохозяйственной биологии и пищевой промышленности. Кратко изложены аспекты применения интроскопии в различных областях науки и история развития интроскопических исследований сельскохозяйственных растений в нашей стране и за рубежом. Приводятся результаты наиболее значимых и интересных исследований с использованием рентгенографических методов, а также результаты современных исследований последнего десятилетия зарубежных исследователей с использованием методов компьютерной и магнитно-резонансной томографии. Обсуждается отечественный опыт и успехи использования методов и средств интроскопии в нашей стране. Отмечено,

UDC 631.811.98:634.8

**WORLD EXPERIENCE  
OF USE OF INTROSCOPIC  
RESEARCH METHODS  
IN THE AGRICULTURAL  
BIOLOGY AND FOOD  
INDUSTRY**

Nikolsky Maxim  
Cand. Agr. Sci., Docent  
Senior Research Associate  
of Laboratory of Viticulture  
and Wine-making

*Federal State Budget Scientific  
Institution Anapa's Zonal Experimental  
Station of Viticulture  
and Wine-making of NCRRIH&V,  
Anapa, Russia*

Gryaznov Artyom  
Dr. Tech. Sci., Professor

*St. Petersburg State Electrotechnical  
University "LETI",  
St. Petersburg, Russia*

The analytical overview of world experience of use of introsopic methods of research applied in the agricultural biology and the food industry are given in the materials of article. The aspects of application of introsopic testing in the various areas of science and the development history of the introsopic researches of agricultural plants in the our country and abroad are shortly described. The results of the most significant and interesting research with use of radiographic methods, and also results of modern research of the last decade of foreign research with use of methods of computer and magnetic-resonance tomography are given. The domestic experience and progress of use of methods and means of a nondestructive testing in our country are discussed.

что проведенный анализ показывает недостаточное развитие подобных исследований в нашей стране, которые, в настоящий момент, ограничиваются только использованием микрофокусной рентгенографии. Сложившаяся ситуация объясняется высокой стоимостью научно-исследовательской аппаратуры, низкой квалификацией сотрудников, а также недостаточным количеством научной информации о существующих перспективах данного исследования. Делается заключение, что в отечественной сельскохозяйственной биологии необходимо расширить диапазон научно-исследовательских работ с применением методов интроскопии, но необходимо четко определять цели и задачи при проведении научных исследований, чтобы не дискредитировать это важное и перспективное направление.

*Ключевые слова:* АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР, ИНТРОСКОПИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ, СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ БИОЛОГИЯ, ПИЩЕВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

It is noted that the carried-out analysis shows the insufficient development of similar research in our country which, at the moment, are limited only to use of a microfocal X-ray analysis. Current situation is explained by the high cost of the research equipment, low qualification of employers, insufficient amount of information about the existing prospects of this research. The conclusion becomes that in domestic agricultural biology it is necessary to expand the range of research works with application of introspective methods, but it is necessary to define accurately the purposes and the tasks for carrying out the scientific research not to discredit this important and perspective direction.

*Key words:* INTROSCOPE, METHODS OF INVESTIGATION, AGRICULTURAL BIOLOGY, FOOD INDUSTRY

**Введение.** История развития знаний человечества о природе и мире характеризуется желанием человека заглянуть в самые глубины еще неизведанного, для того чтобы создать целостную картину окружающего мира. Это желание провоцировало его разрабатывать технические средства и методики, с помощью которых возможно изучение космического пространства (Галилей, 1609) и микромира (Антони ван Левенгук, 1674).

Научные открытия прошлых столетий сильно повлияли на дальнейшее развитие научных знаний и заставили пересмотреть целый ряд положений классической физики. Открытие в 1895 году Вильгельмом Конрадом Рентгеном нового вида излучения повлияло на дальнейшее развитие науки, поскольку проводимые с использованием данного излучения эксперименты и исследования позволили получить новые сведения о внутреннем строении объектов, не разрушая при этом его целостности. Данное на-

учное открытие послужило толчком для развития нового направления в науке и технике, которое получило название «интроскопия».

Интроскопия – визуальное наблюдение предметов, явлений или процессов внутри оптически непрозрачных тел, в непрозрачных средах, а также в условиях недостаточной освещённости. Осуществляется посредством преобразования невидимого глазом изображения исследуемого объекта в фиксированном диапазоне электромагнитного излучения в видимое изображение на экране специального прибора, называемого интроскопом.

Разнообразие практических задач, решаемых на основе методов и средств интроскопии, как по своей цели и содержанию, так и по своим условиям, позволяет решать проблему с помощью различных физических методов.

**Обсуждение.** Метод интроскопии широко используется в различных областях науки: например, в медицине для диагностических целей, в металлургии, полупроводниковой технике, в гидротехнике, строительстве, в геологии, археологии и палеонтологии. Кроме всего вышперечисленного, интроскопия нашла свое применение в сельскохозяйственной биологии и пищевой промышленности.

Основоположниками данного направления по праву считаются Simak и Gustafsson, которые в 1953 году, используя метод рентгенографии, разработали методику изучения внутреннего строения семян интродуцентов древесных пород с целью анализа полиэмбрионии зародышей семян, их индивидуальной и географической изменчивости, а также выбраковки пустых и поврежденных семян [1].

Данная работа послужила началом исследований в области контроля качества семян лесных и сельскохозяйственных культур как за рубежом, так и в нашей стране. В период с 50-х по 90-е года прошлого столетия были получены важные результаты по применению рентгенографии для контроля качества семенного материала в процессе его выращивания, уборки,

сушки, послеуборочной подработки и определения режимов, обеспечивающих получение партий семян с минимальным уровнем скрытой травмированности [2]. Но зарубежные исследования не ограничились использованием интроскопических методов только для контроля качества посевного материала.

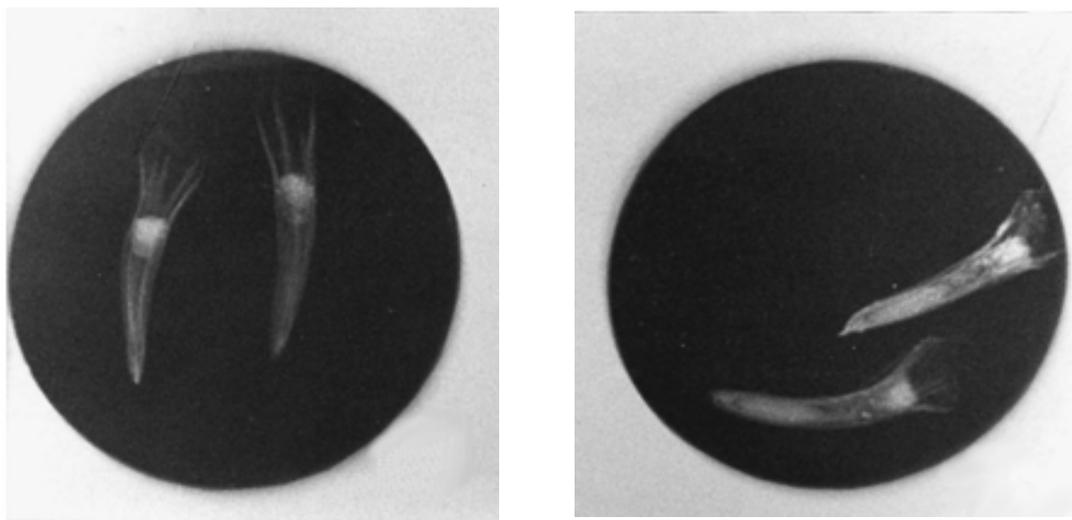
В 1992 году была совершена попытка определения гаплоидных эмбрионов в семенах яблок сорта Голден Делишес на ранних этапах, для чего был использован метод рентгенографии [3].

Интерес в раннем определении гаплоидных эмбрионов объясняется тем, что у культуры яблони гаплоидный фенотип растения показывает меньший размер плодов и более плохой рост растений. Таким образом, определение семян с гаплоидным набором генов позволяет проводить отбраковку на начальных этапах селекционного процесса.

Однако в результате проведенных исследований было установлено, что у зрелых семян яблок не существует корреляционной связи между размером эмбриона и уровнем пloidности. В связи с этим использование рентгенографии не подходит для отбора гаплоидов в зрелых семенах.

В 1993 году для изучения прорастания семян перца *Capsicum annuum* L была использована магнитно-резонансная томография (МРТ) и рентгенография [4]. В процессе исследований были определены достоинства и недостатки используемых методов. Было установлено, что использование МРТ позволяет более детально изучить морфологические особенности (семядоли и сосудистые пучки) исследуемых объектов по сравнению с использованием рентгенографии.

В 1998 году с целью оценки фактической репродуктивной способности образцов методом микрофокусной рентгенографии была проведена морфологическая оценка партии семян шести разновидностей *Limonium* [5]. В результате проведенных исследований семена были отсортированы по показателям развития (рис. 1).



а

б

Рис. 1. Рентгеновское изображение *Limonium dufourii*

а – цветки с плохо развитыми семенами,

б – цветки с хорошо развитыми семенами

Семена были пророщены для определения влияния условия развития семени на процесс его прорастания. Полученные результаты позволили сделать вывод, что, несмотря на плохое развитие, семена обладают высокой жизнеспособностью, и их прорастание достигало 90-100%.

В 1999 году, используя рентгеновскую томографию, был проведен анализ пространственного распределения древесной корневой системы: распределения корней, их плотности, углового распределения роста, пространственного распределения, а также интенсивности ветвления [6]). Результаты исследования улучшили понимание пространственного распределения корневой системы в зависимости от физических, химических и биологических условий окружающей среды.

В 2004 году с использованием рентгеновского микротомографа был проведен количественный анализ анатомических структур древесных культур, который позволил автоматически определить внутренний диаметр сосудов, их поперечное сечение, площадь поверхности, плотность сосудов, а также их пористость [7]). Сопоставление классической методики

гистологических срезов и микротомографии показало, что количественные показатели статистически сопоставимы, но использование микротомографа менее трудоемко и более оперативно.

В 2007 году при использовании рентгеновской томографии для визуализации корневой системы нута и ее количественного анализа (рис. 2), было установлено, что систематически недооценивается длина корня [8]. Средняя длина отрезка корня, оцененная с помощью рентгеновской томографии, составляла 28,1 мм, по сравнению с 36 мм, полученными другими методами. Использование рентгеновской томографии показало детали, которые невозможно получить другим способом. К таким деталям относятся пространственное распределение и ориентация. Использование других методов исследования корневой системы также не позволяет отследить развитие корневой системы в динамике, а также определить воздействие внешних условий на рост и развитие корней.



Рис. 2. Трехмерная реконструкция корневой системы

В 2007 году в ходе проведения анализа внутренних структур зерна кукурузы (рис. 3) с применением нейтронной рентгеновской томографии, основной целью которого являлось определение внутренних систематических структурных различий, отвечающих за устойчивость к данному патогену, цели достичь не удалось [9]. Но были определены показатели, характеризующие поражение зерна патогеном *Aspergillus flavus*.

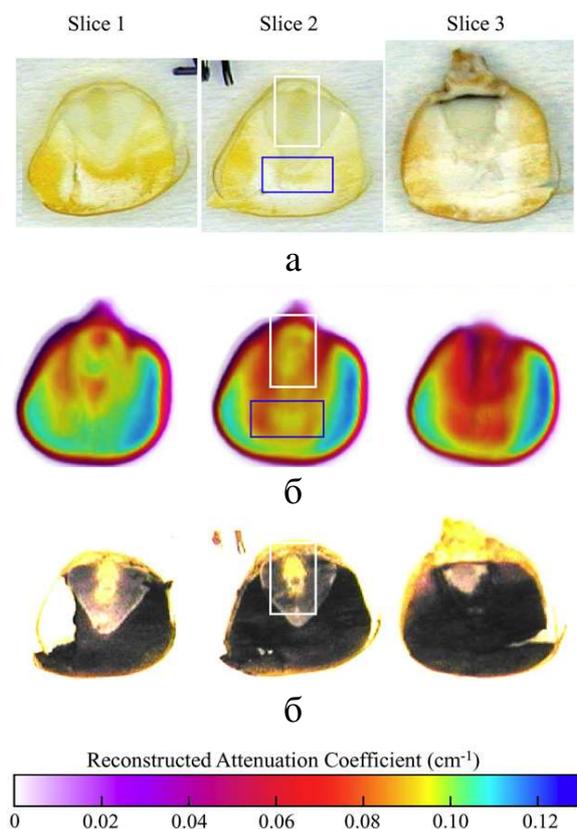


Рис. 3. Кукурузные зёрна:

- а – зерна, разрезанные вдоль;
- б – реконструкция после нейтронной томографии;
- с – зерна, разрезанные вдоль, с окрашенным йодом эндоспермом

В 2009 и 2013 гг. использование рентгеновской томографии для построения объемной модели клеток и межклеточного пространства кожуры яблок и груш, подвергшихся длительному хранению в условиях регулируемой среды (рис. 4), позволило расширить существующие знания о взаимодействии окружающей среды с клеточными структурами плодов [10, 11].

Также в 2014 году было проведено исследование особенностей структуры кожицы и паренхимы плодов киви для определения их физиологических показателей и оценки их влияния на качественные показатели хранения [12].

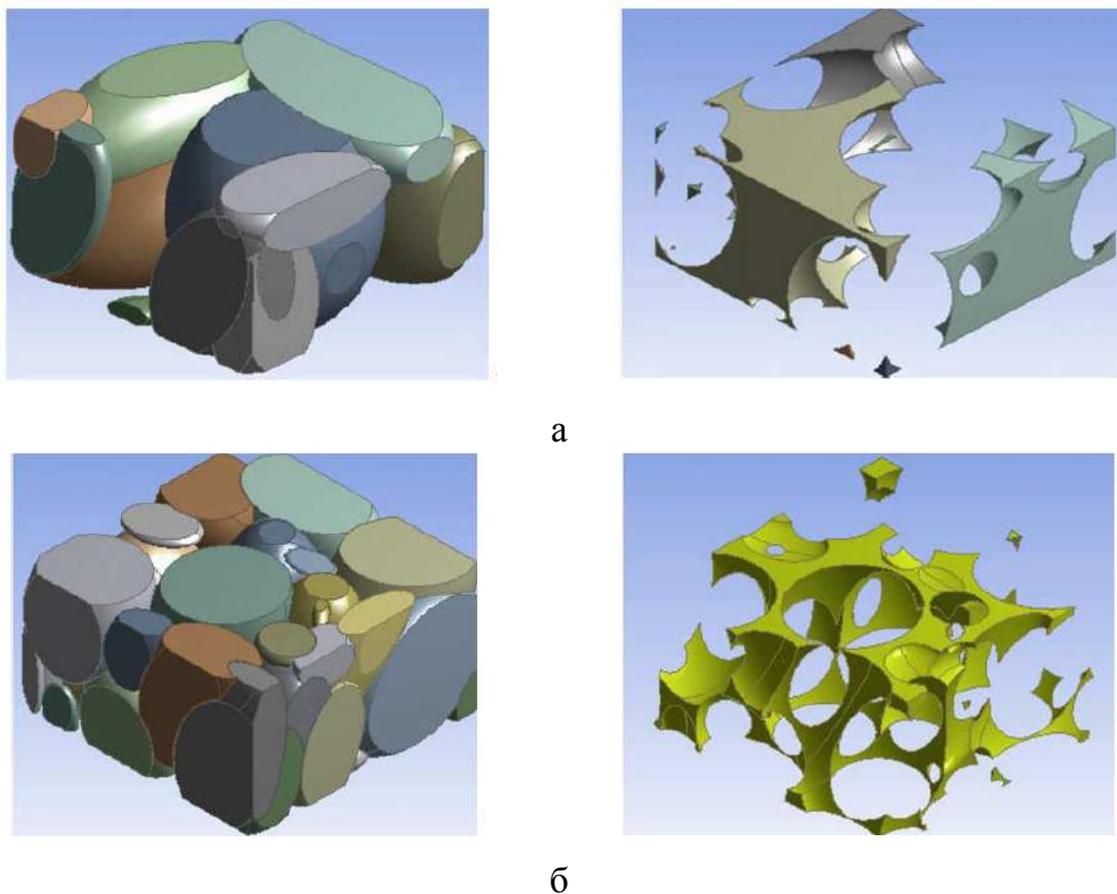


Рис. 4. Объемная модель клеток кожицы плодов:

- а – клеточная структура кожицы яблока и межклеточного пространства,  
б – клеточная структура кожицы груши и межклеточного пространства

В 2010 году использование рентгеновской томографии для оценки результатов воздействия ультразвуковой очистки внутренней поверхности дубовых бочек от отложения солей винной кислоты позволило установить, что хорошо удаляются отложения винного камня из первых двух миллиметров поверхности дубовой клепки [13]. Однако на глубине 2-8 мм такого эффекта уже не наблюдалось. В среднем 89% винного камня удалялось с поверхности дуба за первую обработку. Дальнейшее увеличение очистки до 98% достигалось за счет повышения температуры растворителя и времени ультразвукового воздействия.

В 2010 году использование рентгеновской томографии для отображения клеточных структур в высоком разрешении, позволило получить не только изображение изучаемых объектов, но и построить объемную рекон-

струкцию [14]. Полученные результаты позволили более качественно проводить исследования на клеточном и субклеточном уровнях (рис. 5).

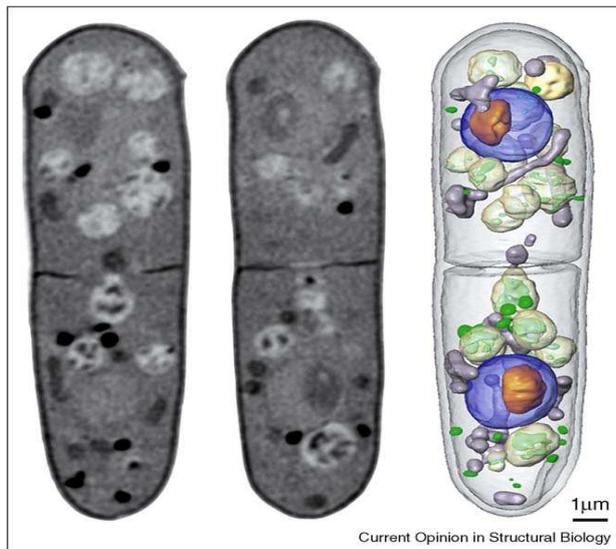


Рис. 5. Объемная реконструкция дрожжевой клетки

Проведенные в 2010 году исследования морфологических особенностей растений в естественных условиях [15], включая клеточную организацию отдельных органов, показали, что использование рентгеновской томографии позволяет построить объемную морфологическую модель и быстрее проводить количественный анализ клеточной организации исследуемых образцов растений (рис. 6).

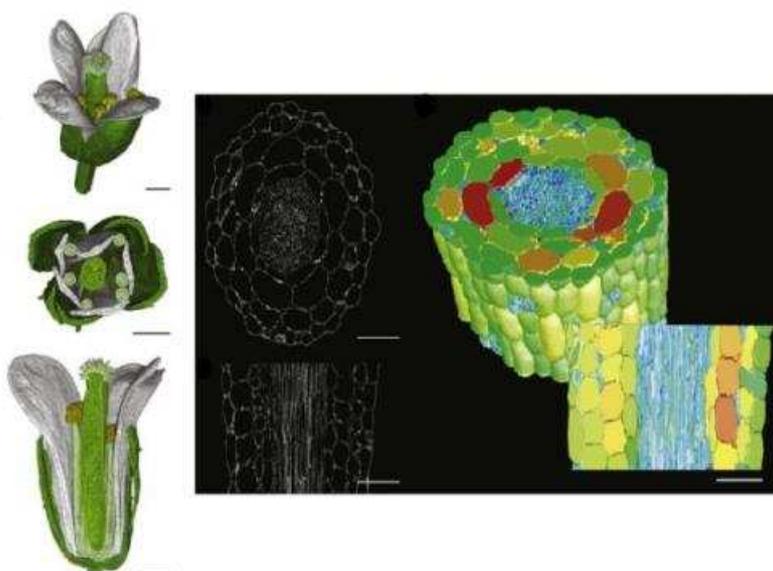
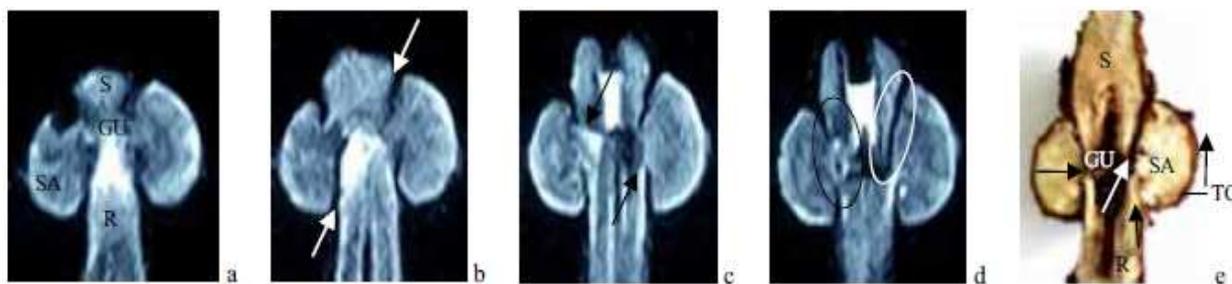
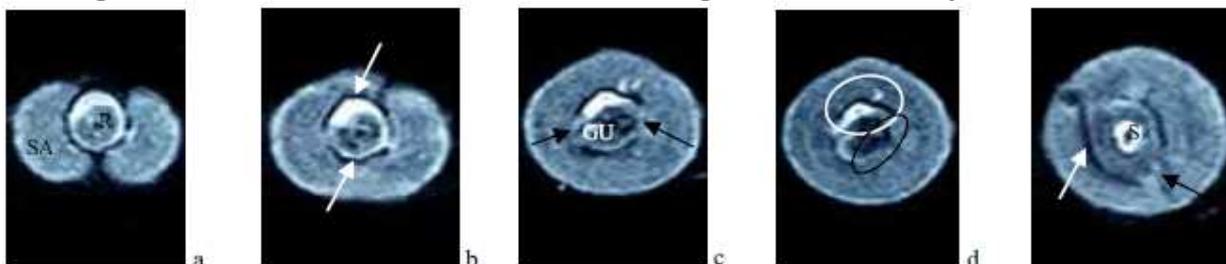


Рис. 6. Объемная реконструкция цветка *Arabidopsis*, с горизонтальным и вертикальным срезами, а также клеточная реконструкция hypocotilia



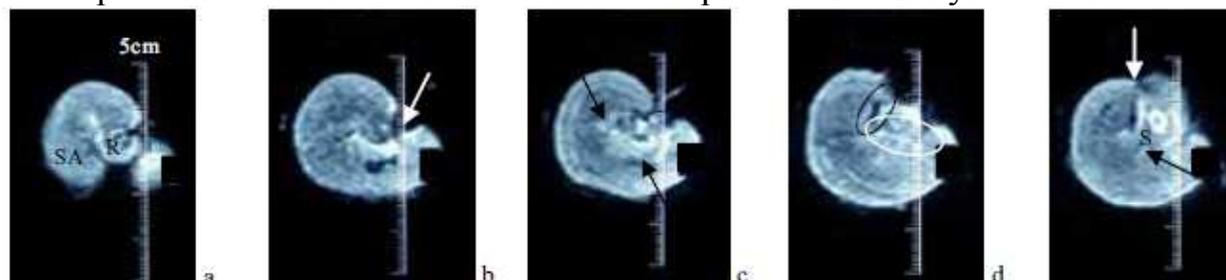
Вертикальные МРТ-срезы места спайки с плохим срастанием прививаемых компонентов и сильным развитием каллусной ткани



Горизонтальные МРТ-срезы места спайки с плохим срастанием прививаемых компонентов и сильным развитием каллусной ткани



Вертикальные МРТ-срезы места спайки с односторонним срастанием прививаемых компонентов и сильным развитием каллусной ткани



Горизонтальные МРТ-срезы места спайки с односторонним срастанием прививаемых компонентов и сильным развитием каллусной ткани

Рис. 7. Срезы исследуемых саженцев, полученные с помощью МРТ

В 2010 году определение качества срастания подвойно-привойных компонентов привитых виноградных саженцев и влияние качества спайки на развитие покраснения у листьев проводилось двумя способами – с использованием МРТ (рис. 7) и по морфологическим признакам (диаметру

подвоя и привоя, длине и диаметру однолетнего прироста, параметрическим характеристикам места спайки) [16]. Было установлено, что сильное развитие каллусной ткани и покраснение листьев вызвано плохим срастанием привитых компонентов. В 2011 году для автоматизированного анализа сосудистой системы ксилемы винограда сорта Шардоне использовалась компьютерная томография (КТ) [17]. Результаты показали, что использование КТ является экспрессным способом анализа, по сравнению с гистологическими срезами, а также позволяет усовершенствовать программу для обработки и анализа данных, полученных с помощью рентгеновской томографии. В 2012 году проводились исследования на виноградных растениях возрастом 8 и 18 месяцев и 14 лет по анализу срастания подвойно-привойных компонентов виноградного растения с использованием КТ [18] (рис. 8).

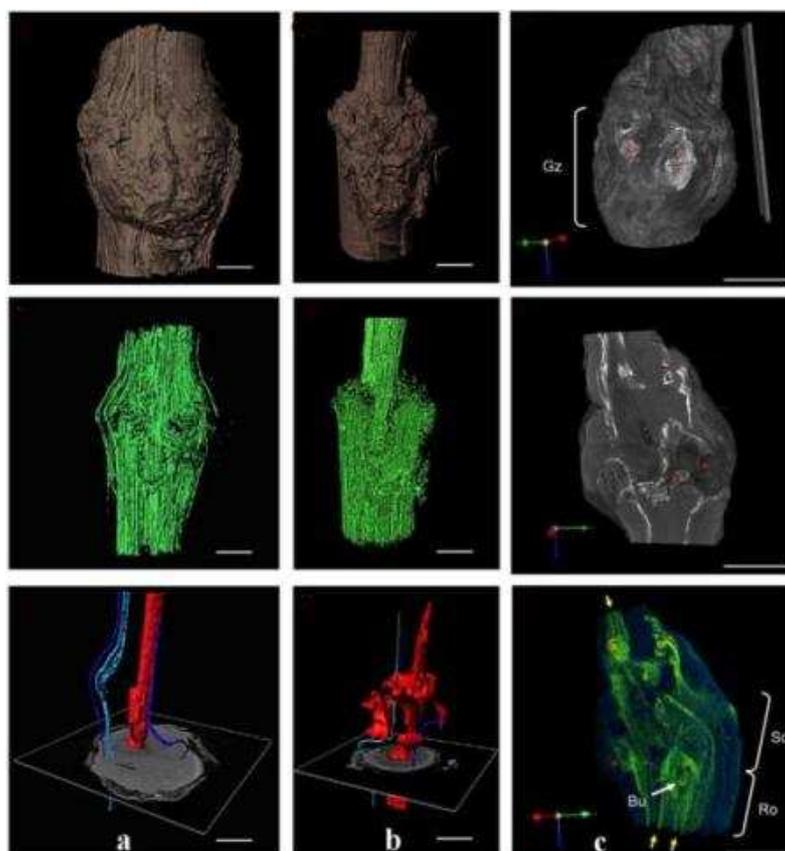


Рис. 8. Объемная модель растений винограда:

- а – 8-ми месячное растение с хорошим срастанием привитых компонентов,
- б – 18-ми месячное растение с плохим срастанием привитых компонентов,
- с – 14-летнее растение

В процессе проведения исследований были построены объемные модели исследуемых растений. На их основе была изучена пространственная организация проводящей сосудистой системы в месте спайки, что позволило изучить процесс дифференциации клеток проводящей системы в месте соприкосновения трансплантатов.

В 2013 году для обнаружения инородных тел в пищевой продукции использовалась темнопольная рентгенография [19], позволяющая повысить обнаружение инородных тел за счет большего контрастирования по сравнению с обычной рентгенографией (рис. 9).

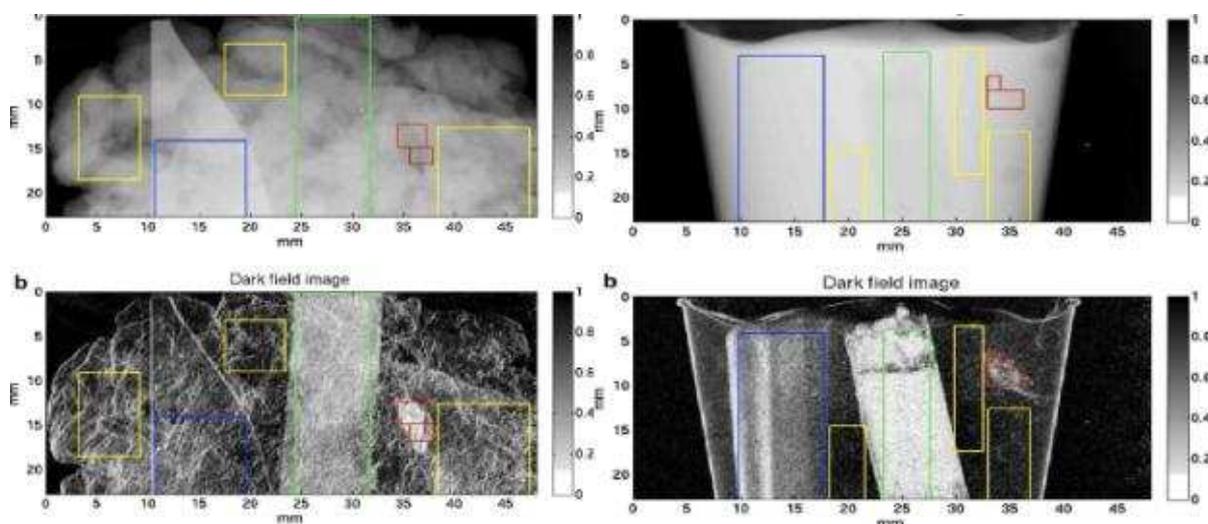


Рис. 9. Обычные (вверху) и темнопольные (внизу) рентгеновские снимки фарша (слева) и стакана с молоком (справа), прямоугольные области выделяют инородные включения – *осколок стекла, окурок, муху и кусок бумаги*, которые могут попасть в готовую продукцию и должны быть выявлены и удалены

В 2013 году использование рентгеновской томографии для анализа годовичных колец и оценки плотности древесины у *Pinus sylvestris* L., *Quercus robur* L. и *Tectona grandis* L. позволило повысить и точность оценки древесины [20]. Исследования с использованием рентгеновского томографа по оценке качественных параметров сыров, например количества, объема и формы, сформированных в процессе созревания в теле сыра дырок-глазков (рис. 10), позволили определить технологические факторы, влияющие на формирование дырок-глазков [21]. Полученные результаты

позволили лучше понять механизмы, которые приводят к дефектам при формировании дырок-глазков в период созревания сыра.

В 2014 году использование темнопольной рентгенографии для разработки метода выявления ягод и фруктов, подвергшихся замораживанию и последующей разморозке (рис. 11), показало, что за счет большего контрастирования, по сравнению с обычной рентгенографией, данный метод позволяет получать снимки с большей детализацией внутренних структур [22].

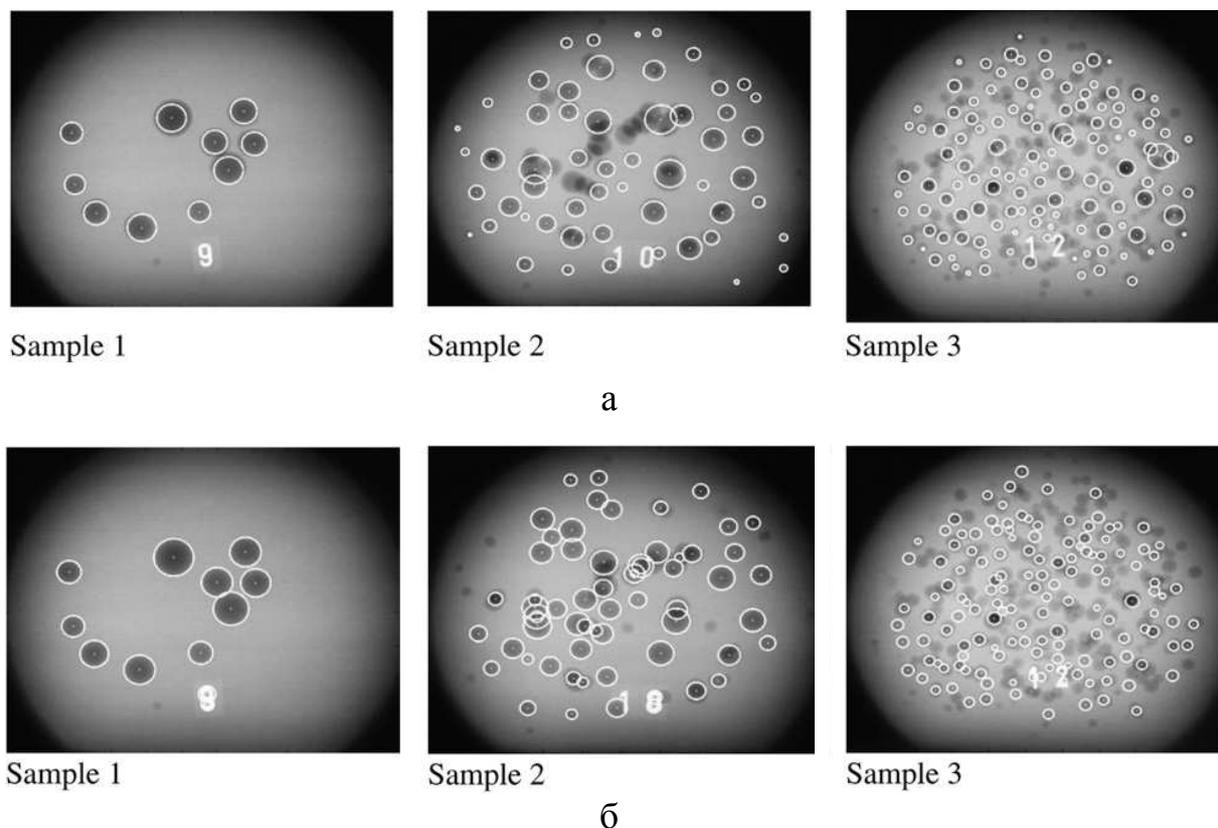


Рис. 10. Рентгенограммы сыров с разными параметрами дырок-глазков

В 2014 году рентгеновская томография использовалась для изучения роста деревьев *Picea glauca* (Moench) Voss, *Abies balsamea* (L.) Mill., *Betula papyrifera* Marsh. и влияния на их рост и развитие внешних факторов среды и физиологических особенностей самого растения [23], для оценки качества плодов *Castanea* spp., *Cucumis sativus*, *Prunus cerasus* и *Conotrachelus nenuphar* [24, 25], а также для количественной оценки внутренних структур плодов граната *Punica granatum* L. для определения их качественных показателей [26] (рис. 12).

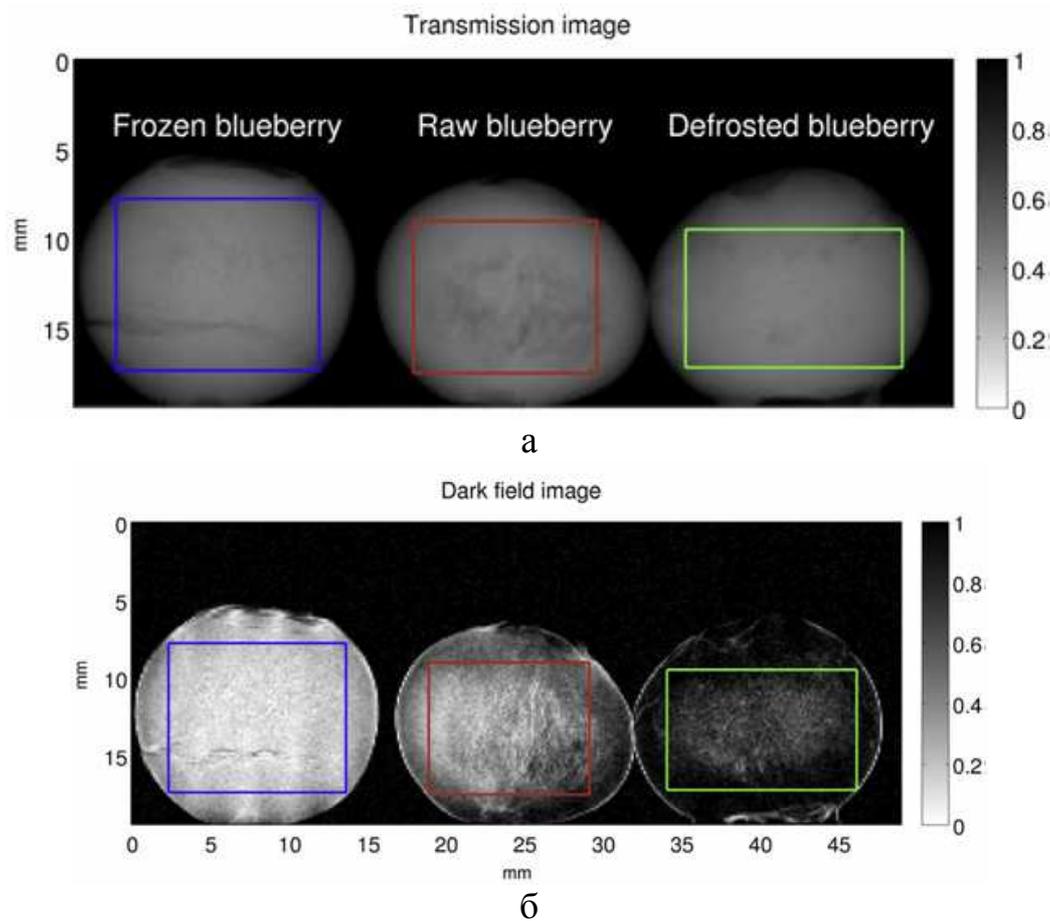


Рис. 11. Рентгенография ягод черники:  
а – обычная; б – темнопольная (слева – направо) замороженная, свежая, размороженная черника

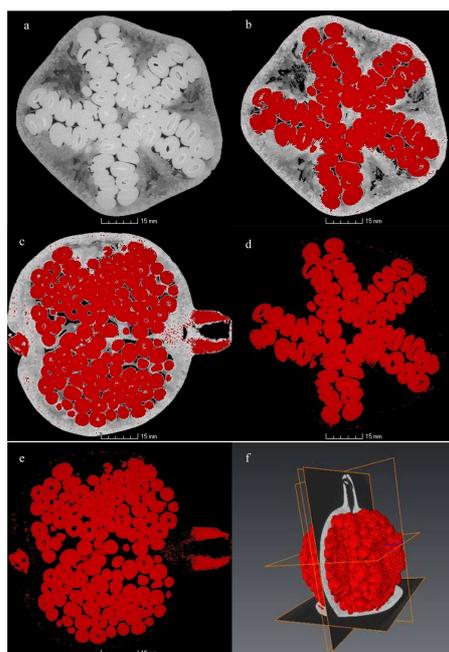


Рис. 12. Объемная реконструкция плода граната *Punica granatum*

На основании проведенного анализа можно говорить о том, что за рубежом при проведении исследований большое внимание уделяется рентгеновской томографии. Однако, стоит отметить недостаток большинства работ, который заключается в отсутствии структурированности и четко сформулированных выводов по результатам проведенных исследований.

Можно предположить, что данное положение объясняется тем, что использование рентгеновской томографии при исследовании появилось недавно, и в связи с этим еще не до конца понимается необходимость применения данных методов в подобных исследованиях.

В нашей стране первые исследования с использованием интроскопических методов проводились в Агрофизическом научно-исследовательском институте (АФИ). Начиная с 60-х годов прошлого столетия и до настоящего времени проводятся работы по разработке методики рентгенографической оценки семян и по качественной оценке коллекционных образцов семян из мировой коллекции ВИР [2].

Помимо этого была разработана методика рентгенографии в земледелии и растениеводстве, в которой освещены вопросы особенностей метода рентгенографии применительно к семенам важнейших сельскохозяйственных культур, компьютерной обработки рентгеновских снимков и их биологической интерпретации, рассмотрены возможности применения рентгенографической аппаратуры для оценки качества семян зерновых, овощных, технических культур, а также кормовых трав и некоторых видов лекарственных растений [27].

За последние годы были опубликованы следующие материалы: методические рекомендации «Интроскопический метод ускоренного определения скрытой заселенности зерна карантинными вредителями», монография «Микрофокусная рентгенография растений», а также ряд методических рекомендаций применения метода микрофокусной рентгенографии в виноградарстве.

В данных работах рассмотрены следующие вопросы:

– особенности применения метода рентгенографии для оценки качества семенного материала за счет интроскопического выявления различных типов скрытых дефектов экогенного и техногенного происхождения (особое внимание уделено выявлению скрытой зараженности и поврежденности посадочного материала и зерна насекомыми-вредителями [28]);

– физико-технические основы мягколучевой рентгенографии с прямым рентгеновским увеличением изображением зерна и вегетирующих растений, дается описание используемой при исследованиях аппаратуры для пленочной и цифровой рентгенографии, а также программно-математического обеспечения для автоматического распознавания рентгеновских изображений скрытых дефектов зерна различных сельскохозяйственных культур [29];

– определение всхожести семян винограда [31, 32], определение качества спайки у привитых саженцев винограда [33, 34], степени поражения сосудистым некрозом посадочного материала винограда [35, 36] и определение сохранности виноградных глазков [37].

В сотрудничестве с Санкт-Петербургским государственным электротехническим университетом им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») был разработан аппаратно-программный комплекс в составе передвижной рентгенодиагностической установки семейства ПРДУ и зарегистрированной компьютерной программы SEAN по обработке и анализу рентгеновских изображений семян (рис.13).

С 2006 года, используя наработки прошлых лет, Анапская ЗОСВиВ, СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и АФИ, при технической поддержке ЗАО «ЭЛТех-Мед», ведут исследования по применению метода микрофокусной рентгенографии в виноградарстве для изучения внутреннего строения отдельных органов и всего виноградного растения в целом [30].

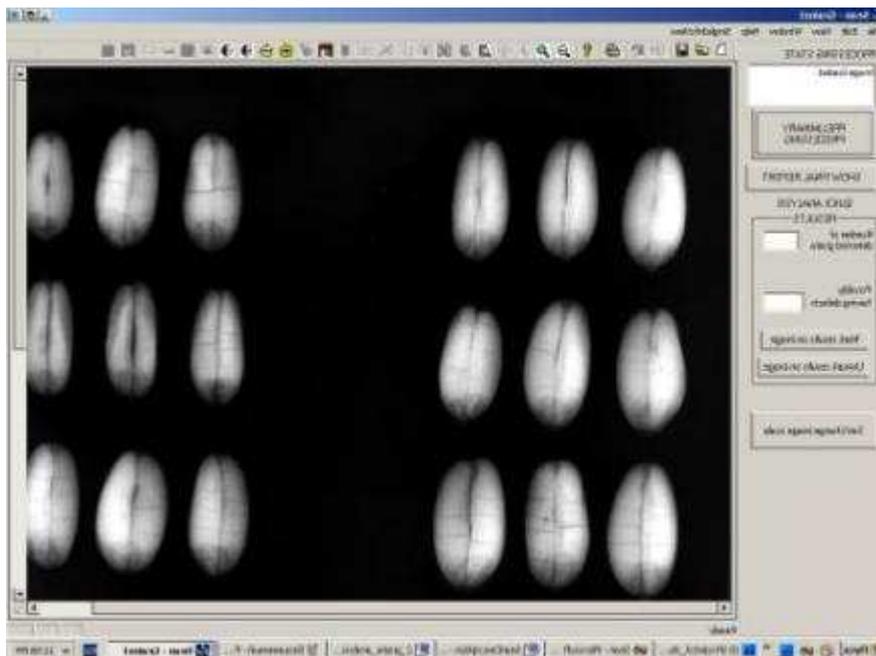


Рис. 13. Рабочее окно программы SEAN

В 2012 году с помощью методики компьютерной томографии удалось изучить важные детали строения паука, невидимые с помощью оптической микроскопии из-за положения, в котором fossilized spider [38], а в 2013 предложена методика идентификации древесных пород, которая позволяет исследовать внутренние характеристики и особенности анатомического строения различных пород [39].

**Заключение.** Можно заметить, что в нашей стране в настоящее время научно-исследовательских работ с использованием интроскопических методов исследований, в том числе рентгеновской томографии, мало, а исследования ограничиваются только микрофокусной рентгенографией.

Сложившуюся ситуацию можно объяснить следующим образом:

- высокая стоимость научно-исследовательской аппаратуры, которую сложно приобрести на средства, выделяемые на НИР;
- низкая квалификация сотрудников;
- недостаточное количество информации о существующих перспективах данного исследования.

На основании всего вышеизложенного можно сделать вывод, что в отечественной сельскохозяйственной биологии необходимо расширить научно-исследовательские работы с использованием методов интроскопии, но необходимо четко ставить цели и задачи при проведении исследований, чтобы не дискредитировать это перспективное направление исследований.

### Литература

1. Simak, M. och Gustafsson, A., X-ray photography and sensitivity in forest tree species. – *Hereditas*, 1953. – 39 с.
2. Дерунов, И.В. Рентгенографическое исследование семян различных сельскохозяйственных культур и продуктов их переработки: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Санкт-Петербург, 2004. – 24 с.
3. Bouvier L., Using radiography to attempt to screen for haploid embryos in apple seeds / L. Bouvier, A. Chavagnat, Y.X. Zhang, Y. Lespinasse // *Scientia Horticulturae*, Vol.52 (1992) Pages 215-221.
4. Loic Foucat Nuclear magnetic resonance micro-imaging and X-radiography as possible techniques to study seed germination / Loic Foucat, Andre Chavagnat, Jean-Pierre Renou // *Scientia Horticulturae*, Vol.55 (1993) Pages 323-331.
5. Carmen Mart´ın The use of X-ray radiography in the assessment of conserved seeds of six halophytic species of *Limonium* / Carmen Mart´ın, Juan B. Mart´inez-Laborde, C. P´erez // *Journal of Arid Environments* Vol. 38(1998) Pages 245-253.
6. Alain Pierret, X-ray computed tomography to quantify tree rooting spatial distributions / Alain Pierret, Yvan Capowiez, Christopher J. Moran, Andre´ Kretzschmar // *Geoderma* Vol.90 (1999). Pages 307-326.
7. Kathy Steppe Use of X-ray computed microtomography for non-invasive determination of wood anatomical characteristics / Kathy Steppe, Veerle Cnudde, Catherine Girard, Raoul Lemeur, Jean-Pierre Cnudde, and Patric Jacobs // *Journal of Structural Biology* Vol.148 (2004) Pages 11-21.
8. J.S. Perret Non-destructive visualization and quantification of roots using computed tomography / J.S. Perret, M.E. Al-Belushi, M. Deadman // *Soil Biology & Biochemistry* Vol.39 (2007) Pages 391-399.
9. Cleveland IV T.E. The use of neutron tomography for the structural analysis of corn kernels / T.E. Cleveland IV, D.S. Hussey, Z.-Y. Chen, D.L. Jacobson, R.L. Brown, C. Carter-Wientjes, T.E. Cleveland, M. Arif // *Journal of Cereal Science* Vol.48 (2008) Pages 517-525.
10. Mebatsion H.K. A novel method for 3-D microstructure modeling of pome fruit tissue using synchrotron radiation tomography images / H.K. Mebatsion, P. Verboven, A. Melese Endalew, J. Billen, Q.T. Hoa, B.M. Nicolai // *Journal of Food Engineering* Vol.93 (2009) Pages 141-148.
11. Pieter Verboven, Optical coherence tomography visualizes microstructure of apple peel / Pieter Verboven, Alexandra Nemeth, Metadel K. Abera, Evi Bongaers, Dirk Daelemans, Pascale Estrade, Els Herremans, Maarten Hertog, Wouter Saeys, Els Vanstreels, Bert Verlinden, Michael Leitner, Bart Nicolai // *Postharvest Biology and Technology* Vol.78 (2013) Pages 123-13.

12. Dennis Cantre, Microstructural characterisation of commercial kiwifruit cultivars using X-ray micro computed tomography / Dennis Cantre, Andrew East, Pieter Verboven, Ximenita Trejo Araya, Els Herremans, Bart M. Nicolai, Thamarath Pranamornkith, Michael Loh, Alistair Mowat, Julian Heyes // *Postharvest Biology and Technology* Vol.92 (2014) Pages 79-86.

13. Garth Wayne Porter Evaluation of high power ultrasound porous cleaning efficacy in American oak winebarrels using X-ray tomography / Garth Wayne Porter, Andrew Lewis, Mark Barnes, Ruth Williams // *Innovative Food Science and Emerging Technologies* Vol.12 (2011) Pages 509-514.

14. Carolyn A Larabell Imaging cellular architecture with X-rays / Carolyn A Larabell, Keith A Nugent // *Current Opinion in Structural Biology* Vol.20 (2010) Pages 623-631.

15. Stijn Dhondt Plant structure visualization by high-resolution X-ray computed tomography / Stijn Dhondt, Hannes Vanhaeren, Denis Van Loo, Veerle Cnudde, Dirk Inze // *Trends in Plant Science* Vol.15 (2010) Pages 419-422.

16. Elman Bahar, Using magnetic resonance imaging technique (MRI) to investigate graft connection and its relation to reddening discoloration in grape leaves / Elman Bahar, Ilknur Korkutal, Alain Carbonneau, Gulcin Akcay // *Journal of Food, Agriculture & Environment* Vol.8 (2010) Pages 293- 297.

17. Craig R. Brodersen Automated analysis of three-dimensional xylem networks using high-resolution computed tomography / Craig R. Brodersen, Eric F. Lee, Brendan Choat, Steven Jansen, Ronald J. Phillips, Kenneth A. Shackel, Andrew J. McElrone, Mark A. Matthews // *New Phytologist* Vol.191 (2011) Pages 1168-1179.

18. Mayeul Milien Visualization of the 3D structure of the graft union of grapevine using X-ray tomography / Mayeul Milien, Anne-Sophie Renault-Spilmont, Sarah Jane Cookson, Amelie Sarrazin, Jean-Luc Verdeil // *Scientia Horticulturae* Vol.144 (2012) P. 130-140.

19. Mikkel Schou Nielsen X-ray dark-field imaging for detection of foreign bodies in food / Mikkel Schou Nielsen, Torsten Lauridsen, Lars Bager Christensen, Robert Feidenhans'1 // *Food Control* Vol.30 (2013) Pages 531-535.

20. Jan Van den Bulcke 3D tree-ring analysis using helical X-ray tomography / Jan Van den Bulcke, Erik L.G. Wernerssonb, Manuel Dierickc, Denis Van Looc, Bert Masschaelec, Loes Brabantc, Matthieu N. Boonec, Luc Van Hoorebekec, Kristof Hanecad, Anders Brunb, Cris L. Luengo Hendriksb, Joris Van Ackera // *Dendrochronologia* Vol.32 (2014) Pages 39-46.

21. Schuetz P. Quantitative comparison of the eye formation in cheese using radiography and computed tomography data / P. Schuetz, D. Guggisberg, I. Jerjen, M.T. Fröhlich-Wyder, J. Hofmann, D.Wechsler, A. Flisch, W. Bisig, U. Sennhauser, H.-P. Bachmann // *International Dairy Journal* Vol.31(2013) Pages 150-155.

22. Mikkel Schou Nielsen, Frozen and defrosted fruit revealed with X-ray dark-field radiography / Mikkel Schou Nielsen, Lars Bager Christensen, Robert Feidenhans'1 // *Food Control* Vol.39 (2014) Pages 222-226.

23. Pierre Dutilleul, How do trees grow? Response from the graphical and quantitative analyses of computed tomography scanning data collected on stem sections / Pierre Dutilleul, Li Wen Han, Jean Beaulieu // *C. R. Biologies* Vol.337 (2014) Pages 391-398.

24. Irwin R. Donis-González, Internal characterisation of fresh agricultural products using traditional and ultrafast electron beam X-ray computed tomography imaging / Irwin R. Donis-González, Daniel E. Guyer, Anthony Pease, Frank Barthel // *Biosystems engineering* Vol.117 (2014) Pages 104- 113.

25. Irwin R. Donis-González Postharvest noninvasive assessment of fresh chestnut (*Castanea* spp.) internal decay using computer tomography images / Irwin R. Donis-González, Daniel E. Guyer, Dennis W. Fulbright, Anthony Peasec // *Postharvest Biology and Technology* Vol.94 (2014) Pages 14-25.

26. Lembe Samukelo Magwazaa, Investigating non-destructive quantification and characterization of pomegranate fruit internal structure using X-ray computed tomography / Lembe Samukelo Magwazaa, Umezuruike Linus Opara // *Postharvest Biology and Technology* Vol.95 (2014) Pages 1-6.

27. Архипов, М.В. Методика рентгенографии в земледелии и растениеводстве / М.В. Архипов, Д.И. Алексеева, Н.Ф. Батыгин [и др.]. – М.: РАСХН, 2001. – 102 с.

28. Архипов, М.В. Интроскопический метод ускоренного определения скрытой заселенности зерна карантинными вредителями: методические рекомендации / М.В. Архипов, Д.И. Алексеева, Л.П. Великанов, Л.П. Гусакова, И.В. Дерунов. – С-Пб, 2005. – 28 с.

29. Архипов, М.В. Микрофокусная рентгенография растений / М.В. Архипов, Н.Н. Потрахов. – СПб.: Технолит, 2008. – 194 с.

30. Никольский, М.А. Микрофокусная рентгенография в виноградарстве. Методические рекомендации // М.А. Никольский, А.А. Лукьянова, М.И. Панкин, А.Ю. Грязнов, Л.П. Великанов, М.В. Архипов, Н.Н. Потрахов. – Анапа, 2012. – 91 с.

31. Никольский, М.А. Методические рекомендации по применению микрофокусной рентгенографии для экспресс-анализа семян винограда / М.А. Никольский, Л.П. Великанов, М.И. Панкин, М.В. Архипов, А.Ю. Грязнов, Н.Н. Потрахов, А.А. Лукьянова, А.А. Лукьянов. – Анапа, 2010. – 14 с.

32. Никольский, М.А. Определение всхожести семян винограда, методом микрофокусной рентгенографии: учеб.-метод. пособие / М.А. Никольский, М.И. Панкин, М.Д. Ларькина, А.Ю. Грязнов, Н.Н. Потрахов. – Краснодар: Издательский Дом – Юг, 2014 – 20 с.

33. Никольский, М.А. Методические рекомендации по применению рентгеновского метода для экспресс-оценки качества срастания у привитых саженцев винограда / М.А. Никольский, М.И. Панкин, А.А. Лукьянова, Л.П. Великанов, А.А. Лукьянов, М.В. Архипов, А.Ю. Грязнов, Н.Н. Потрахов. – Анапа, 2010. – 14 с.

34. Никольский, М.А. Определение качества срастания привитых компонентов саженцев винограда, методом микрофокусной рентгенографии: учеб.-метод. пособие / М.А. Никольский, М.И. Панкин, А.Ю. Грязнов, Н.Н. Потрахов. – Краснодар: Издательский Дом – Юг, 2014. – 20 с.

35. Лукьянова, А.А. Методические рекомендации по применению микрофокусной рентгенографии для экспресс-оценки поражённости черенков и саженцев винограда сосудистым некрозом / А.А. Лукьянова, М.А. Никольский, Л.П. Великанов, М.И. Панкин, А.А. Лукьянов, М.В. Архипов, А.Ю. Грязнов, Н.Н. Потрахов. – Анапа, 2010. – 14 с.

36. Никольский, М.А. Определение степени поражённости посадочного материала винограда сосудистым некрозом, методом микрофокусной рентгенографии: Учебно-методическое пособие. / М.А. Никольский, М.И. Панкин, А.Ю. Грязнов, Н.Н. Потрахов. – Краснодар: Издательский Дом – Юг, 2014. – 20 с.

37. Никольский, М.А. Определение сохранности виноградных глазков, методом микрофокусной рентгенографии. Методические рекомендации. / М.А. Никольский, А.Ю. Грязнов, К.К. Жамова. – Краснодар: Издательский Дом – Юг, 2014. – 16 с.

38. Пенни Д. Новый вид пауков рода *Craspedisia* (Araneae: theridiidae) из миоценового доминиканского янтаря, иллюстрированный методом компьютерной томографии / Пенни Д, Грин Д.И., Макнейл А., Брэдли Р.С., Марусик Ю.М., Витерс П.Д., Презиоси Р.Ф // *Палеонтологический журнал*. – 2012.– № 6.– С. 35.

39. Лонгетюд Ф. Исследование процесса идентификации древесных пород по макроскопическим признакам с использованием компьютерной томографии / Ф. Лонгетюд, Ф. Моте, М.А. Бахшиева, А.Н. Чубинский, А.А. Тамби, П. Шарпентье, В. Бомбардье // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2013.– № 202.– С. 158-167.

### References

1. Simak, M. och Gustafsson, A., X-ray photography and sensitivity in forest tree species. – *Hereditas*, 1953. – 39 s.
2. Derunov, I.V. Rentgenograficheskoe issledovanie semjan razlichnyh sel'skoho-zhajstvennyh kul'tur i produktov ih pererabotki: avtoref. dis. ... kand. biol. nauk. – Sankt-Peterburg, 2004. – 24 s.
3. Bouvier L., Using radiography to attempt to screen for haploid embryos in apple seeds / L. Bouvier, A. Chavagnat, Y.X. Zhang, Y. Lespinasse // *Scientia Horticulturae*, Vol.52 (1992) Pages 215-221.
4. Loic Foucat Nuclear magnetic resonance micro-imaging and X-radiography as possible techniques to study seed germination / Loic Foucat, Andre Chavagnat, Jean-Pierre Renou // *Sci-entia Horticulturae*, Vol.55 (1993) Pages 323-331.
5. Carmen Mart´in The use of X-ray radiography in the assessment of conserved seeds of six halophytic species of *Limonium* / Carmen Mart´in, Juan B. Mart´inez-Laborde, C. P´erez // *Journal of Arid Environments* Vol. 38(1998) Pages 245-253.
6. Alain Pierret, X-ray computed tomography to quantify tree rooting spatial distributions / Alain Pierret, Yvan Capowiez, Christopher J. Moran, Andre´ Kretzschmar // *Geoderma* Vol.90 (1999). Pages 307-326.
7. Kathy Steppe Use of X-ray computed microtomography for non-invasive determination of wood anatomical characteristics / Kathy Steppe, Veerle Cnudde, Catherine Girard, Raoul Lemeur, Jean-Pierre Cnudde, and Patric Jacobs // *Journal of Structural Biology* Vol.148 (2004) Pages 11-21.
8. J.S. Perret Non-destructive visualization and quantification of roots using computed tomography / J.S. Perret, M.E. Al-Belushi, M. Deadman // *Soil Biology & Biochemistry* Vol.39 (2007) Pages 391-399.
9. Cleveland IV T.E. The use of neutron tomography for the structural analysis of corn kernels / T.E. Cleveland IV, D.S. Hussey, Z.-Y. Chen, D.L. Jacobson, R.L. Brown, C. Carter-Wientjes, T.E. Cleveland, M. Arif // *Journal of Cereal Science* Vol.48 (2008) Pages 517-525.
10. Mebatsion H.K. A novel method for 3-D microstructure modeling of pome fruit tissue using synchrotron radiation tomography images / H.K. Mebatsion, P. Verboven, A. Melese Endalew, J. Billen, Q.T. Hoa, B.M. Nicolai // *Journal of Food Engineering* Vol.93 (2009) Pages 141-148.
11. Pieter Verboven, Optical coherence tomography visualizes microstructure of apple peel / Pieter Verboven, Alexandra Nemeth, Metadel K. Abera, Evi Bongaers, Dirk Daelemans, Pascale Estrade, Els Herremans, Maarten Hertog, Wouter Saeys, Els Vanstreels, Bert Verlinden, Michael Leitner, Bart Nicolai // *Postharvest Biology and Technology* Vol.78 (2013) Pages 123-13.
12. Dennis Cantre, Microstructural characterisation of commercial kiwifruit cultivars using X-ray micro computed tomography / Dennis Cantre, Andrew East, Pieter Verboven, Ximenita Trejo Araya, Els Herremans, Bart M. Nicolai, Thamarath Pranamornkith, Michael Loh, Alistair Mowat, Julian Heyes // *Postharvest Biology and Technology* Vol.92 (2014) Pages 79-86.

13. Garth Wayne Porter Evaluation of high power ultrasound porous cleaning efficacy in American oak winebarrels using X-ray tomography / Garth Wayne Porter, Andrew Lewis, Mark Barnes, Ruth Williams // *Innovative Food Science and Emerging Technologies* Vol.12 (2011) Pages 509-514.

14. Carolyn A Larabell Imaging cellular architecture with X-rays / Carolyn A Larabell, Keith A Nugent // *Current Opinion in Structural Biology* Vol.20 (2010) Pages 623-631.

15. Stijn Dhondt Plant structure visualization by high-resolution X-ray computed tomography / Stijn Dhondt, Hannes Vanhaeren, Denis Van Loo, Veerle Cnudde, Dirk Inze // *Trends in Plant Science* Vol.15 (2010) Pages 419-422.

16. Elman Bahar, Using magnetic resonance imaging technique (MRI) to investigate graft connection and its relation to reddening discoloration in grape leaves / Elman Bahar, Ilknur Korkutal, Alain Carbonneau, Gulcin Akcay // *Journal of Food, Agriculture & Environment* Vol.8 (2010) Pages 293- 297.

17. Craig R. Brodersen Automated analysis of three-dimensional xylem networks using high-resolution computed tomography / Craig R. Brodersen, Eric F. Lee, Brendan Choat, Steven Jansen, Ronald J. Phillips, Kenneth A. Shackel, Andrew J. McElrone, Mark A. Matthews // *New Phytologist* Vol.191 (2011) Pages 1168-1179.

18. Mayeul Milien Visualization of the 3D structure of the graft union of grapevine using X-ray tomography / Mayeul Milien, Anne-Sophie Renault-Spilmont, Sarah Jane Cookson, Amelie Sarrazin, Jean-Luc Verdeil // *Scientia Horticulturae* Vol.144 (2012) P. 130-140.

19. Mikkel Schou Nielsen X-ray dark-field imaging for detection of foreign bodies in food / Mikkel Schou Nielsen, Torsten Lauridsen, Lars Bager Christensen, Robert Feidenhans'1 // *Food Control* Vol.30 (2013) Pages 531-535.

20. Jan Van den Bulcke 3D tree-ring analysis using helical X-ray tomography / Jan Van den Bulcke, Erik L.G. Wernerssonb, Manuel Dierickc, Denis Van Looc, Bert Masschaelec, Loes Brabantc, Matthieu N. Boonec, Luc Van Hoorebekec, Kristof Hanecad, Anders Brunb, Cris L. Luengo Hendriksb, Joris Van Ackera // *Dendrochronologia* Vol.32 (2014) Pages 39-46.

21. Schuetz P. Quantitative comparison of the eye formation in cheese using radiography and computed tomography data / P. Schuetz, D. Guggisberg, I. Jerjen, M.T. Fröhlich-Wyder, J. Hofmann, D. Wechsler, A. Flisch, W. Bisig, U. Sennhauser, H.-P. Bachmann // *International Dairy Journal* Vol.31(2013) Pages 150-155.

22. Mikkel Schou Nielsen, Frozen and defrosted fruit revealed with X-ray dark-field radiography / Mikkel Schou Nielsen, Lars Bager Christensen, Robert Feidenhans'1 // *Food Control* Vol.39 (2014) Pages 222-226.

23. Pierre Dutilleul, How do trees grow? Response from the graphical and quantitative analyses of computed tomography scanning data collected on stem sections / Pierre Dutilleul, Li Wen Han, Jean Beaulieu // *C. R. Biologies* Vol.337 (2014) Pages 391-398.

24. Irwin R. Donis-González, Internal characterisation of fresh agricultural products using traditional and ultrafast electron beam X-ray computed tomography imaging / Irwin R. Donis-González, Daniel E. Guyer, Anthony Pease, Frank Barthel // *Biosystems engineering* Vol.117 (2014) Pages 104- 113.

25. Irwin R. Donis-González Postharvest noninvasive assessment of fresh chestnut (*Castanea* spp.) internal decay using computer tomography images / Irwin R. Donis-González, Daniel E. Guyer, Dennis W. Fulbright, Anthony Peasec // *Postharvest Biology and Technology* Vol.94 (2014) Pages 14-25.

26. Lembe Samukelo Magwazaa, Investigating non-destructive quantification and characterization of pomegranate fruit internal structure using X-ray computed tomography / Lembe Samukelo Magwazaa, Umezuruike Linus Opara // *Postharvest Biology and Technology* Vol.95 (2014) Pages 1-6.

27. Arhipov, M.V. Metodika rentgenografii v zemledelii i rastenievodstve / M.V. Arhipov, D.I. Alekseeva, N.F. Batygin [i dr.]. – M.: RASHN, 2001. – 102 s.

28. Arhipov, M.V. Introskopicheskiy metod uskorennoy opredeleniya skrytoy zaselenosti zerna karantinnyimi vreditel'nyami: metodicheskie rekomendatsii / M.V. Arhipov, D.I. Alekseeva, L.P. Velikanov, L.P. Gusakova, I.V. Derunov. – S-Pb, 2005. – 28 s.

29. Arhipov, M.V. Mikrofokusnaya rentgenografija rastenij / M.V. Arhipov, N.N. Potrahov. – S-Pb.: Tehnolit, 2008. – 194 s.

30. Nikol'skiy, M.A. Mikrofokusnaya rentgenografija v vinogradarstve. Metodicheskie rekomendatsii // M.A. Nikol'skiy, A.A. Luk'janova, M.I. Pankin, A.Ju. Grjaznov, L.P. Velikanov, M.V. Arhipov, N.N. Potrahov. – Anapa, 2012. – 91 s.

31. Nikol'skiy, M.A. Metodicheskie rekomendatsii po primeneniju mikrofokusnoj rentgenografii dlja jekspress-analiza semjan vinograda / M.A. Nikol'skiy, L.P. Velikanov, M.I. Pankin, M.V. Arhipov, A.Ju. Grjaznov, N.N. Potrahov, A.A. Luk'janova, A.A. Luk'janov. – Anapa, 2010. – 14 s.

32. Nikol'skiy, M.A. Opredelenie vshozhesti semjan vinograda, metodom mikrofokusnoj rentgenografii. Uchebno-metodicheskoe posobie. / M.A. Nikol'skiy, M.I. Pankin, M.D. Lar'kina, A.Ju. Grjaznov, N.N. Potrahov. – Krasnodar: Izdatel'skiy Dom – Jug, 2014 – 20 s.

33. Nikol'skiy, M.A. Metodicheskie rekomendatsii po primeneniju rentgenovskogo metoda dlja jekspress-ocenki kachestva srastaniya u privityh sazhenec vinograda / M.A. Nikol'skiy, M.I. Pankin, A.A. Luk'janova, L.P. Velikanov, A.A. Luk'janov, M.V. Arhipov, A.Ju. Grjaznov, N.N. Potrahov. – Anapa, 2010. – 14 s.

34. Nikol'skiy, M.A. Opredelenie kachestva srastaniya privityh komponentov sazhenec vinograda, metodom mikrofokusnoj rentgenografii. Uchebno-metodicheskoe posobie. / M.A. Nikol'skiy, M.I. Pankin, A.Ju. Grjaznov, N.N. Potrahov. – Krasnodar: Izdatel'skiy Dom – Jug, 2014. – 20 s.

35. Luk'janova, A.A. Metodicheskie rekomendatsii po primeneniju mikrofokusnoj rentgenografii dlja jekspress-ocenki porazhonnosti cherenkov i sazhenec vinograda sosudistym nekrozom / A.A. Luk'janova, M.A. Nikol'skiy, L.P. Velikanov, M.I. Pankin, A.A. Luk'janov, M.V. Arhipov, A.Ju. Grjaznov, N.N. Potrahov. Anapa, 2010. – 14 s.

36. Nikol'skiy, M.A. Opredelenie stepeni porazhonnosti posadochnogo materiala vinograda sosudistym nekrozom, metodom mikrofokusnoj rentgenografii: Uchebno-metodicheskoe posobie. / M.A. Nikol'skiy, M.I. Pankin, A.Ju. Grjaznov, N.N. Potrahov. – Krasnodar: Izdatel'skiy Dom – Jug, 2014. – 20 s.

37. Nikol'skiy, M.A. Opredelenie sohrannosti vinogradnyh glazkov, metodom mikrofokusnoj rentgenografii. Metodicheskie rekomendatsii. / M.A. Nikol'skiy, A.Ju. Grjaznov, K.K. Zhamova. – Krasnodar: Izdatel'skiy Dom – Jug, 2014. – 16 s.

38. Penni D. Novyj vid paukov roda Craspedisia (Araneae: theridiidae) iz mioce-novogo dominikanskogo jantarja, illjustrirovannyj metodom komp'juternoj tomografii / Penni D, Grin D.I., Maknejl A., Brjedli R.S., Marusik Ju.M., Viters P.D., Pre-ziosi R.F // Paleontologicheskij zhurnal. – 2012. – №6. – S. 35.

39. Longetjud F. Issledovanie processa identifikacii drevesnyh porod po makroskopicheskim priznakam s ispol'zovaniem komp'juternoj tomografii / F. Longe-tjud, F. Mote, M.A. Bahshieva, A.N. Chubinskij, A.A. Tambi, P. Sharpent'e, V. Bombar-d'e // Izvestija Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii. – 2013. – № 202. – S. 158-167.