

УДК 631.811.98:634.8

МИРОВОЙ ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНТРОСКОПИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ БИОЛОГИИ

WORLD EXPERIENCE OF INTROSCOPIC RESEARCH METHODS IN AGRICULTURAL BIOLOGY

Никольский Максим Алексеевич

кандидат сельскохозяйственных наук,
доцент, научный сотрудник,
Федеральное государственное бюджетное
научное учреждение Анапская зональная
опытная станция виноградарства и виноделия
Северо-Кавказского зонального
научно-исследовательского института садоводства и
виноградарства, Анапа, Россия
Mcnik-anapa@mail.ru

Грязнов Артем Юрьевич

доктор технических наук, доцент,
заместитель заведующего кафедрой
по учебной работе, профессор,
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)»
ay-gryaznov@yandex.ru

Жамова Карина Константиновна

ассистент кафедры,
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)»
KZhamova@gmail.com

Аннотация. В статье приводится аналитический обзор по мирового опыта использования интроскопических методов исследования, применяемых в сельскохозяйственной биологии и пищевой промышленности. В частности, кратко рассказывается о применении интроскопии в различных областях науки и о истории развития интроскопических исследований сельскохозяйственных растений в нашей стране и за рубежом.

Приводятся результаты наиболее значимых и интересных исследований с использованием рентгенографических методов исследования, а также результаты современных исследований последнего десятилетия, зарубежных исследователей, с использованием методов компьютерной и магнитно-резонансной томографии.

Далее рассказывается о отечественном опыте и успехах использования методов и средств интроскопии, однако, приведенный анализ показывает не достаточное развитие

Nikolsky Maxim Alekseevich

Candidate of agricultural sciences,
associate professor, research associate,
Federal public budgetary scientific
institution Anapa zone experimental
station of wine growing and winemaking of
the North Caucasian zone research
institute of gardening and wine growing,
Anapa, Russia
Mcnik-anapa@mail.ru

Gryaznov Artem Yuryevich

Doctor of Engineering, the associate
professor, the assistant manager chair on
study, professor, Federal public
autonomous educational institution of
the higher education «The St. Petersburg
state electrotechnical university «LETI» of
V.I. Ulyanov (Lenin)»
ay-gryaznov@yandex.ru

Zhamova Karina Konstantinovna

Assistant to chair, Federal public
autonomous educational institution of
the higher education «The St. Petersburg
state electrotechnical university «LETI» of
V. I. Ulyanov (Lenin)»
KZhamova@gmail.com

Annotation. The paper provides an analytical overview of the global experience with introsopic research methods used in agricultural biology and food industry. In particular, briefly describes the use of imaging in the various fields of science and the history of research introsopic crops in our country and abroad.

The results of the most important and interesting studies using X-ray diffraction methods of investigation and the results of current research of the last decade, foreign researchers, using methods of computer and magnetic resonance imaging.

Below is a domestic experiences and successes using the methods and means of imaging, however, this analysis does not show sufficient development of similar studies in our country, which, for the

подобных исследований в нашей стране, которые, в настоящий момент, ограничиваются только использованием микрофокусной рентгенографии.

Делается заключение, 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.

Ключевые слова: Интроскопия, способы исследований, рентгенография, рентгеновская томография, магнитно-резонансная томография, темнопольная рентгенография, микрофокусная рентгенография, сельскохозяйственная биология, пищевая промышленность.

moment, limited to the use of microfocus X-ray.

It is concluded that the domestic agricultural biology need to expand research and development using imaging techniques, but must be clearly set goals and objectives in research, not to discredit this promising area of research.

Keywords: Introscope, methods of investigation, X-ray, X-ray tomography, magnetic resonance imaging, dark-field X-ray, Microfocus X-RAY, Agricultural Biology, Food Industry.

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

Научные открытия прошлых столетий сильно повлияли на дальнейшее развитие научных знаний и заставили пересмотреть целый ряд положений классической физики.

Открытие в 1895 г. 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 научное открытие послужило толчком для развития нового направления в науке и технике, которое получило название интроскопия.

Интроскопия (лат. intro — внутри, др.-греч. σκοπέω — смотрю; дословный перевод внутривидение) — визуальное наблюдение предметов, явлений или процессов внутри оптически непрозрачных тел, в непрозрачных средах, а также в условиях недостаточной освещенности. 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.

Интроскопия широко используется в различных областях науки. Например, в медицине для диагностических целей; в металлургии для исследования качества металла; в полупроводниковой технике; в гидротехнике для контроля подводных частей сооружений; в строительстве для контроля качества бетонных сооружений; для анализа функционирования узлов и механизмов; контроля багажа, почтовых отправлений, грузовых контейнеров и транспортных средств; продуктов питания и сырья; судебно-медицинской экспертизе и в анализе произведений искусства; 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 в ходе проведения исследований 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 по применению интроскопических методов не ограничились использованием 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 (L. Bouvier, A. Chavagnat, Y. Zhang[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 отбраковать их 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 (Loic Foucat, Andre Chavagnat и Jean-Pierre Renou [4]). В процессе проведения 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* (Carmen Martin, Juan B. Martinez-Laborde и С. Perez [5]). В результате проведенных исследований семена были отсортированы по показателям развития (рис. 1).

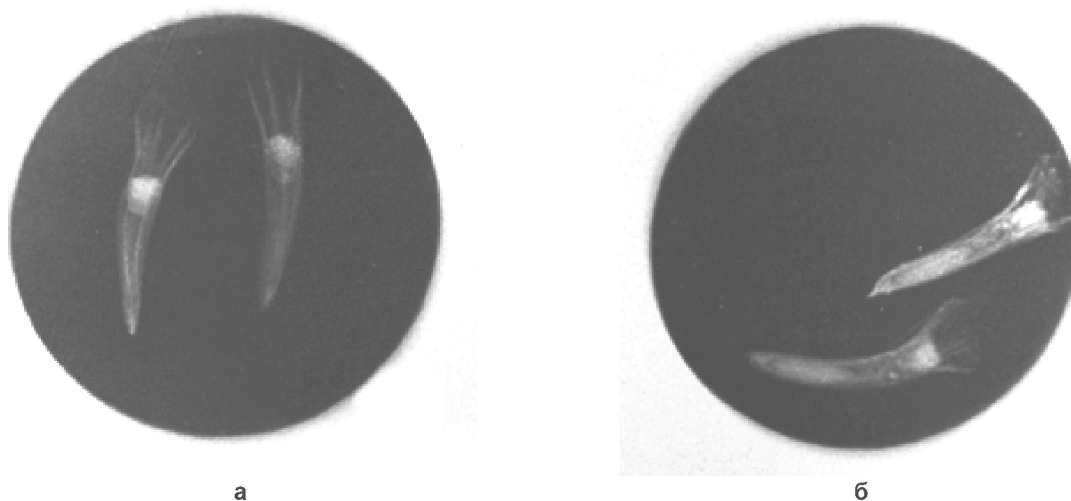


Рис. 1. Рентгеновское изображение *Limonium dufourii*:
а – цветки с плохо развитыми семенами; б – цветки с хорошо развитыми семенами

Затем 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 корней, пространственного распределе-

ния, а также интенсивности ветвления (Alain Pierret, Yvan Capowiez, Christopher J. Moran, и др. [6]). Результаты данного 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 (Kathy Steppe, Veerle Cnudde, Catherine Girard [7]). Сопоставление результатов исследования 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) (J.S. Perret, M.E. Al-Belushi, M. Deadman [8]), было установлено, что систематически недооценивается длина корня по сравнению с другими методами (различие достигает 10 %).

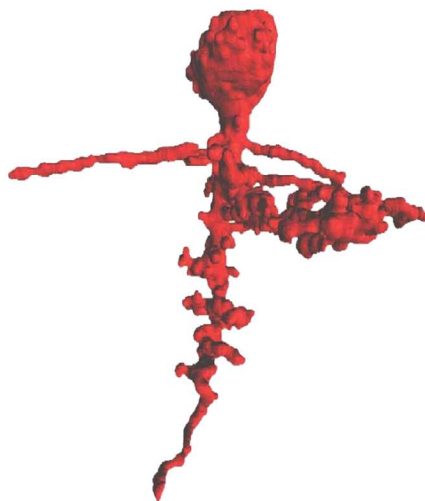


Рис. 2. Трехмерная реконструкция корневой системы

Средняя длина отрезка корня, оцененная с помощью рентгеновской томографии, составляла 28,1 мм по сравнению с 36 мм полученными другими методами. Однако 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.

В 2007 году в ходе проведения исследования по анализу внутренних структур зерна кукурузы (рис. 3) с применением нейтронной рентгеновской томографии (T.E. Cleveland IV, D.S. Hussey, Z.-Y. Chen и др. [9]) основной целью которого являлось определение внутренних систематических структурных различий отвечающих за устойчивость к данному патогену, достичь не удалось. Но были определены показатели, характеризующие поражение зерна патогеном *Aspergillus flavus*.

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

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].

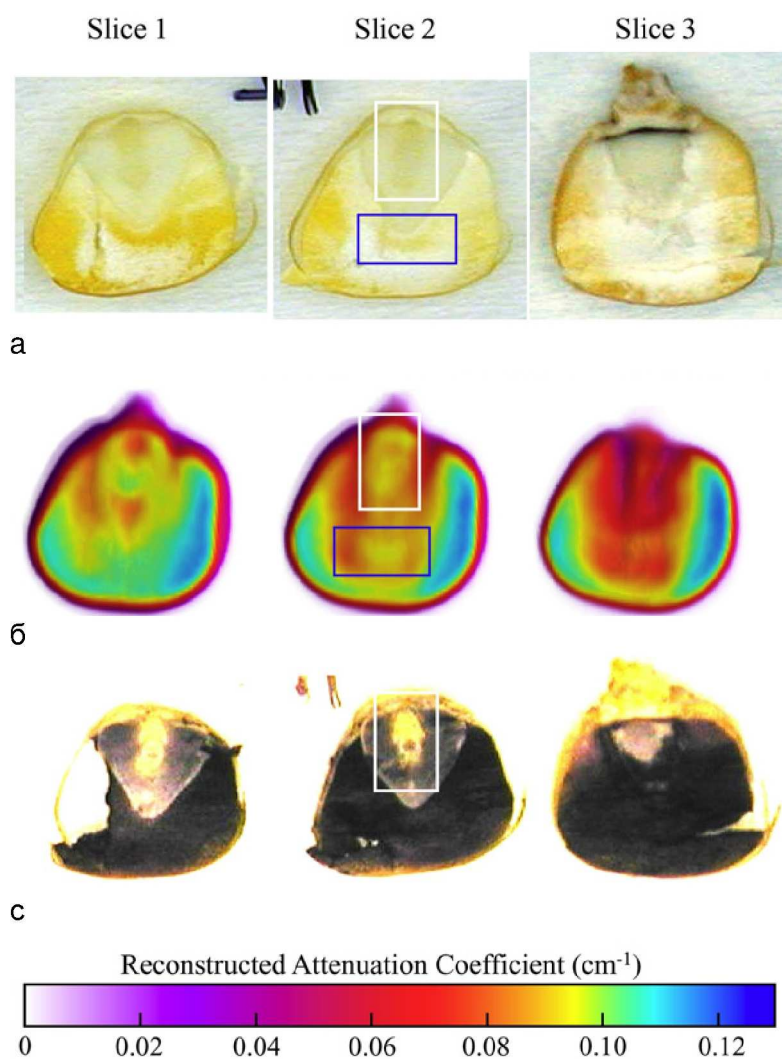


Рис. 3. Кукурузные зёрна:
 а – зерна, разрезанные вдоль; б – реконструкция после нейтронной томографии;
 с – зерна, разрезанные вдоль с окрашенным йодом эндоспермом

В 2010 году использование рентгеновской томографии для оценки результатов воздействия ультразвуковой очистки внутренней поверхности дубовых бочек от отложения солей винной кислоты (Garth Wayne Porter, Andrew Lewis, Mark Barnes, Ruth Williams [13]) позволило установить, что хорошо удаляются отложения винного камня из первых двух миллиметров поверхности дубовой клепки. 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 (Carolyn A Larabell, Keith A Nugent [14]), позволило получить не только изображение изучаемых объектов, но и построить объемную реконструкцию. Полученные результаты позволили более качественно проводить исследования на клеточном и субклеточном уровнях (рис. 5).

Проведенные в 2010 году исследования по анализу морфологических особенностей растений в естественных условиях (Stijn Dhondt, Hannes Vanhaeren, Denis Van Loo и др. [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).

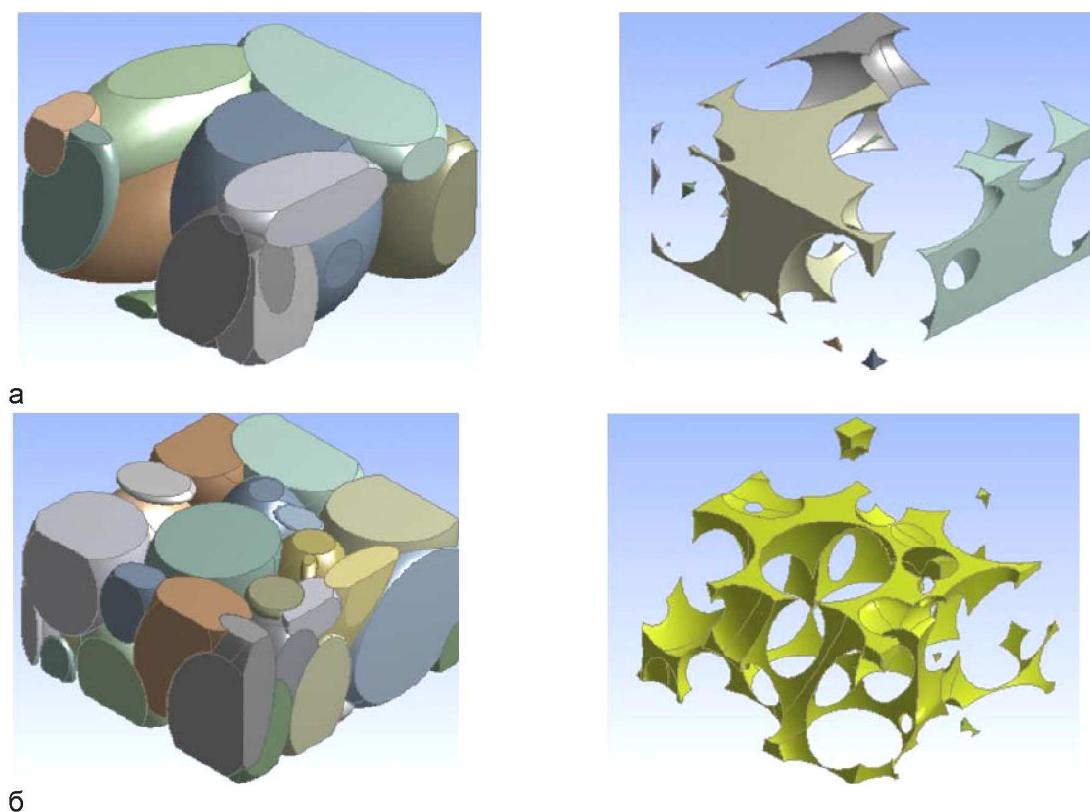
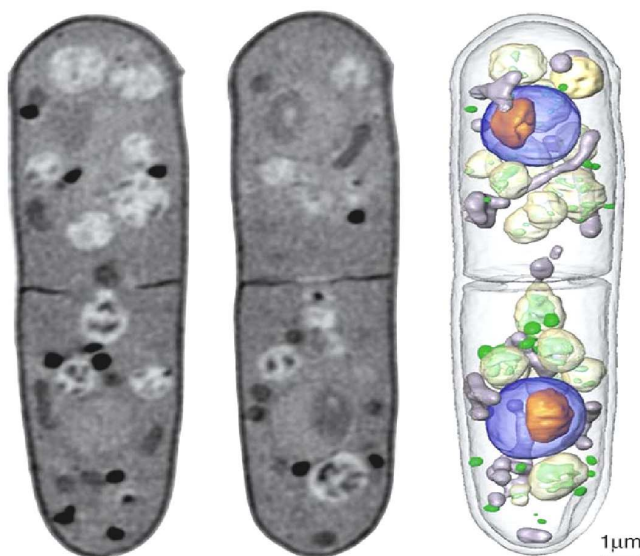


Рис. 4. Объемная модель клеток кожицы:

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



Current Opinion in Structural Biology

Рис. 5. Объемная реконструкция дрожжевой клетки

В 2010 году определение качества срастания подвойно-привойных компонентов привитых виноградных саженцев и влияние качества спайки на развитие покраснения у листьев (Elman Bahar, Ilknur Korkutal, Alain Carbonneau и др. [16]) проводилось двумя способами — с использованием МРТ и по морфологическим признакам (диаметру подвоя и привоя, длине и диаметру однолетнего прироста, параметрическим характеристикам места спайки). В результате проведенных исследований было установлено, что сильное развитие каллюсной ткани и покраснение листьев вызвано плохим срастанием привитых компонентов.

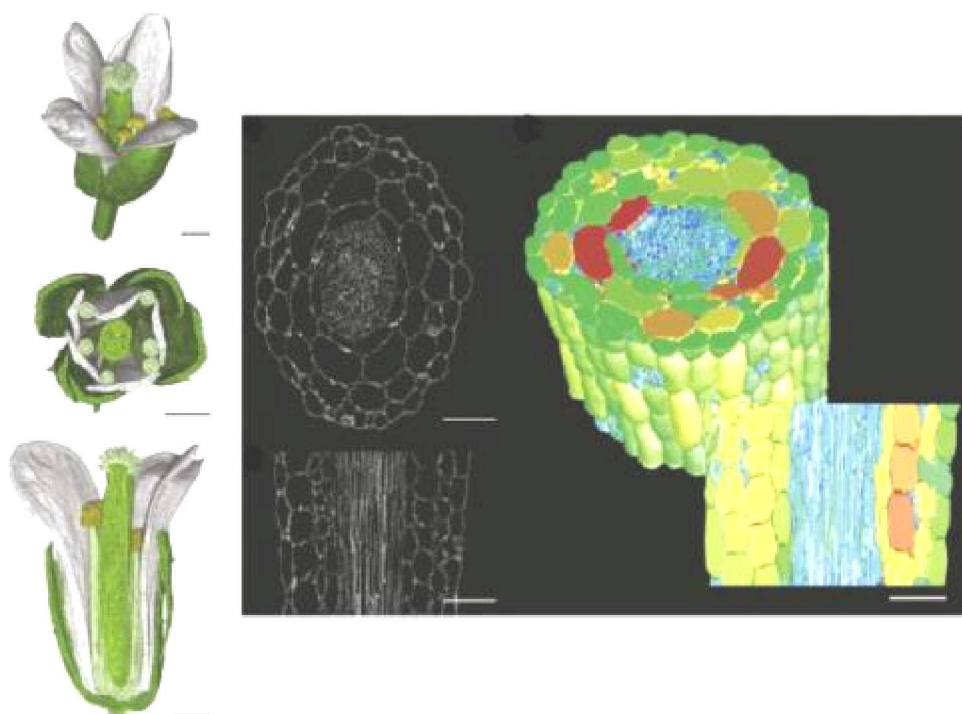


Рис. 6. Объемная реконструкция цветка *Arabidopsis*, с горизонтальным и вертикальным срезами, а также клеточная реконструкция hypocotyle

В 2011 году для автоматизированного анализа сосудистой системы ксилемы винограда *V. Vinifera* сорта Шардоне использовалась компьютерная томография (КТ) (Craig R. Brodersen, Eric F. Lee, Brendan Choat и др. [17]). Полученные 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.

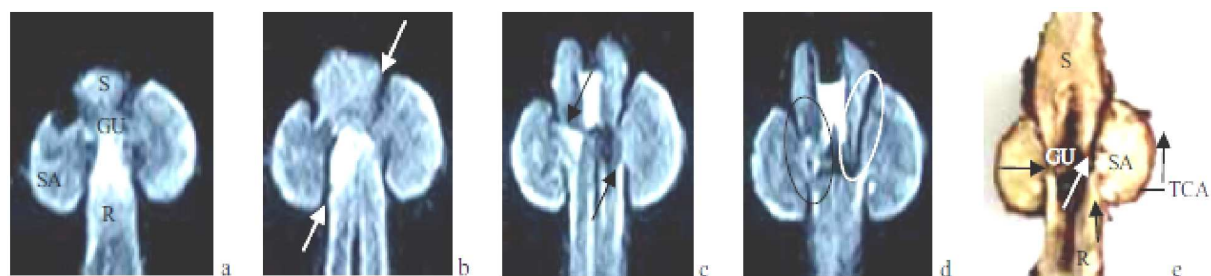
В 2012 году проводились исследования на виноградных растениях возрастом 8 и 18 месяцев и 14 лет по анализу срастания подвойно-привойных компонентов виноградно-растения с использованием КТ (Mayeul Milien, Anne-Sophie Renault-Spilmont, Sarah Jane Cookson и др. [18]) (рис. 8).

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.

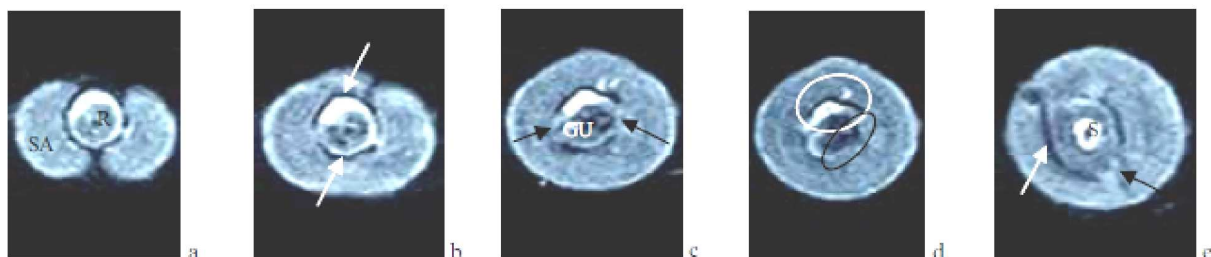
В 2013 году для обнаружения инородных тел в пищевой продукции использовалась темнопольная рентгенография (Mikkel Schou Nielsen, Torsten Lauridsen, Lars Bager Christense [19]), позволяющая повысить обнаружение инородных тел за счет большего контрастирования по сравнению с обычной рентгенографией (рис.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

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. (Jan Van den Bulcke, Erik L.G. Wernersson, Manuel Dierick и др. [20]) позволило повысить и точность оценки древесины.

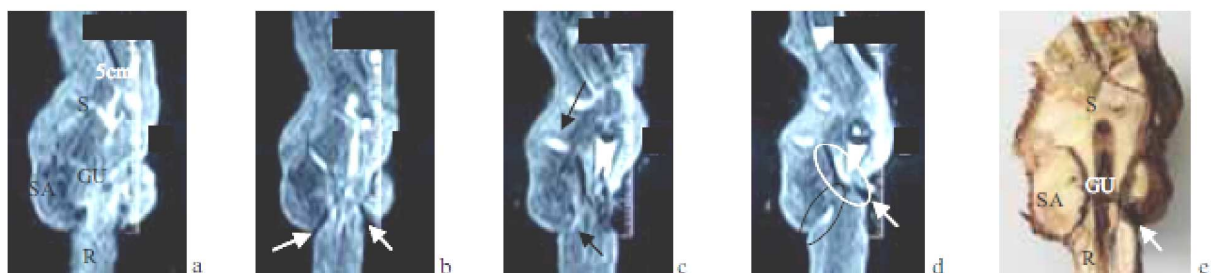
В 2013 году проведенные исследования с использованием рентгеновского томографа по оценке качественных параметров сыров (P. Schuetz, D. Guggisberg, I. Jerjen [21]), например, количества, объема и формы, сформированных в процессе созревания в теле сыра дырок-глазков (рис. 10), позволили определить технологические факторы, влияющие на формирование дырок-глазков. Полученные результаты позволили лучше понять механизмы, которые приводят к дефектам при формировании дырок-глазков в период созревания сыра.



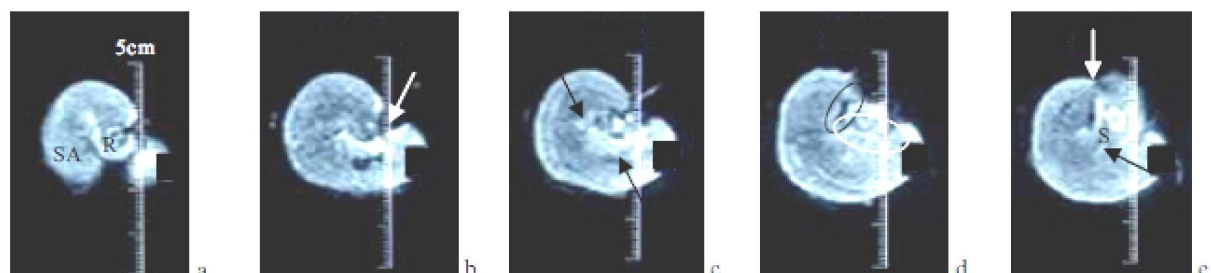
Вертикальные МРТ-срезы места спайки с плохим срастанием прививаемых компонентов и сильным развитием каллюсной ткани



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



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



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

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

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

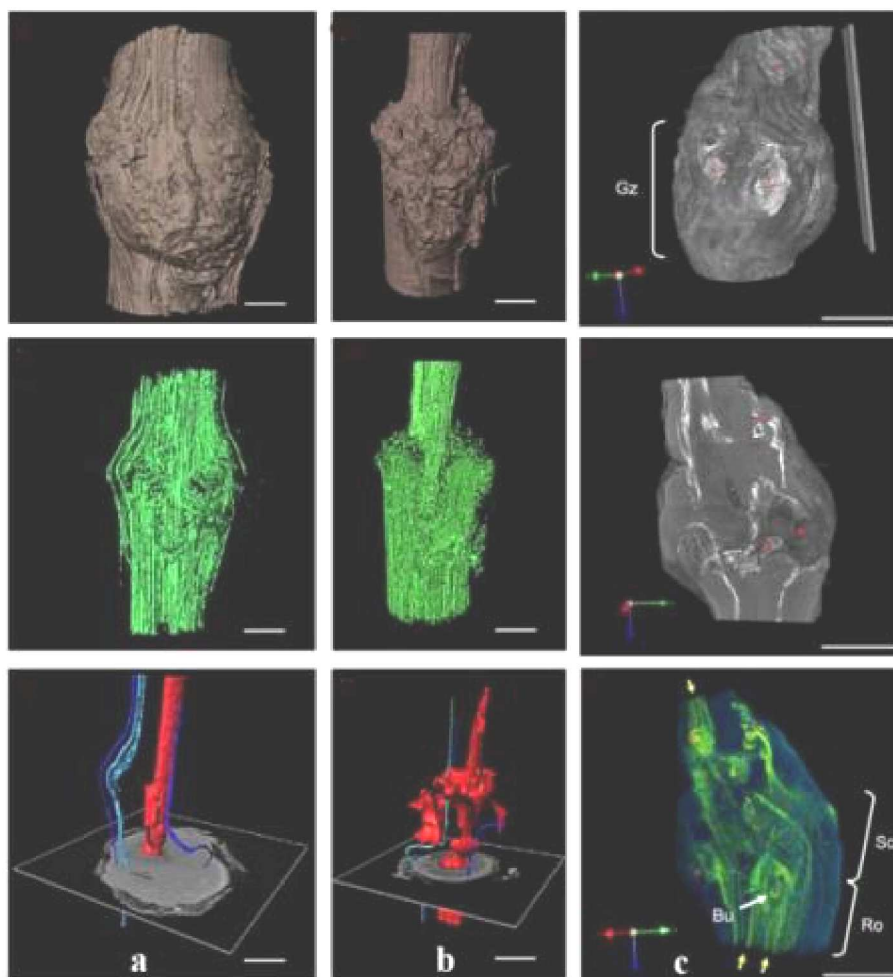


Рис. 8. Объемная модель растений винограда:

a – 8-ми месячное растение с хорошим срастанием привитых компонентов;
 b – 18-ми месячное растение с плохим срастанием привитых компонентов;
 c – 14-ти летнее растение

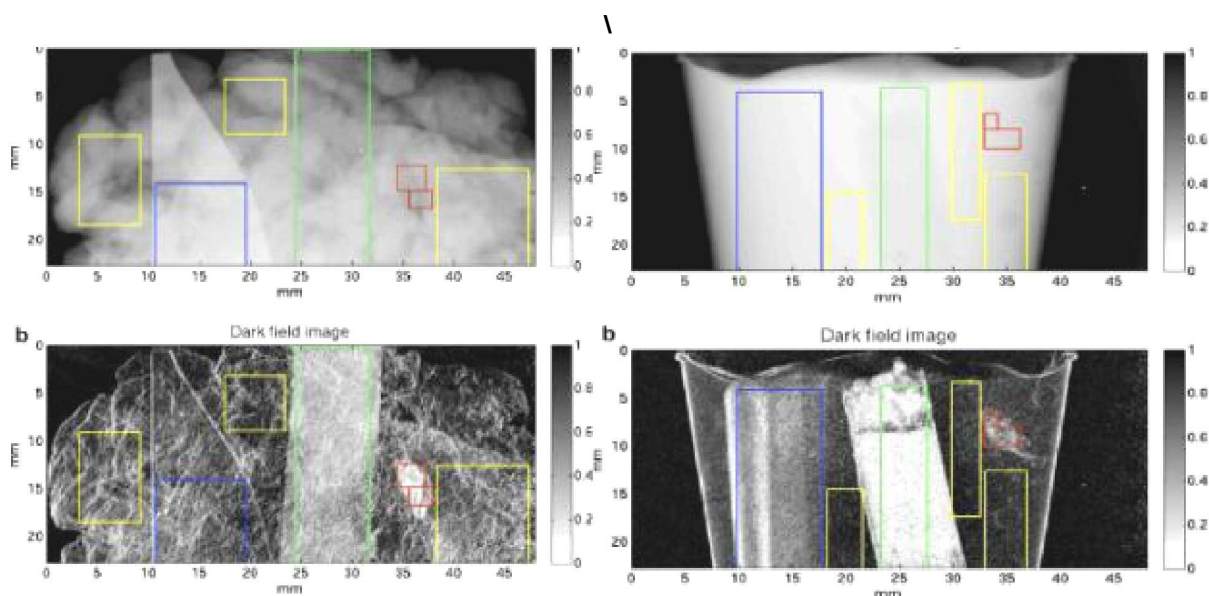


Рис. 9. Обычные (вверху) и темнопольные (внизу) рентгеновские снимки фарша (слева) и стакана с молоком (справа), прямоугольные области выделяют инородные включения — осколок стекла, окурок, муху и кусок бумаги, которые могут попасть в готовую продукцию, и которые должны быть выявлены и удалены

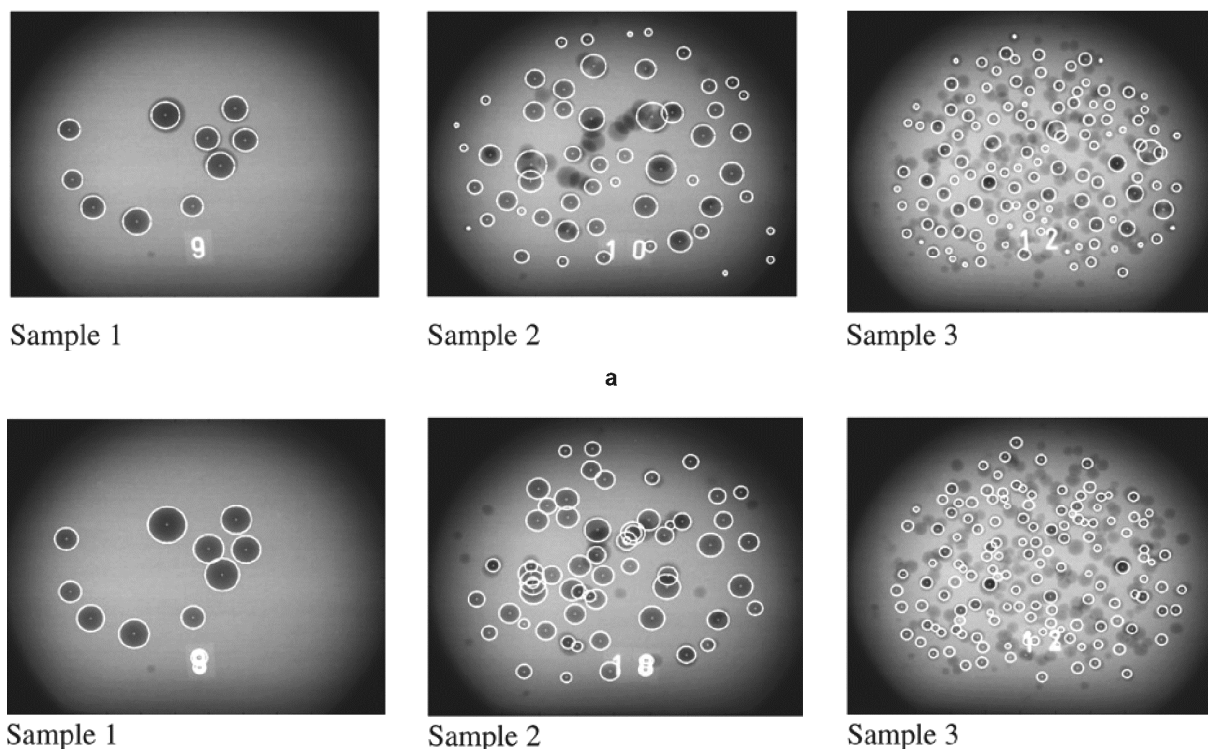


Рис. 10. Рентгенограммы сыров с разными параметрами дырок-глазков

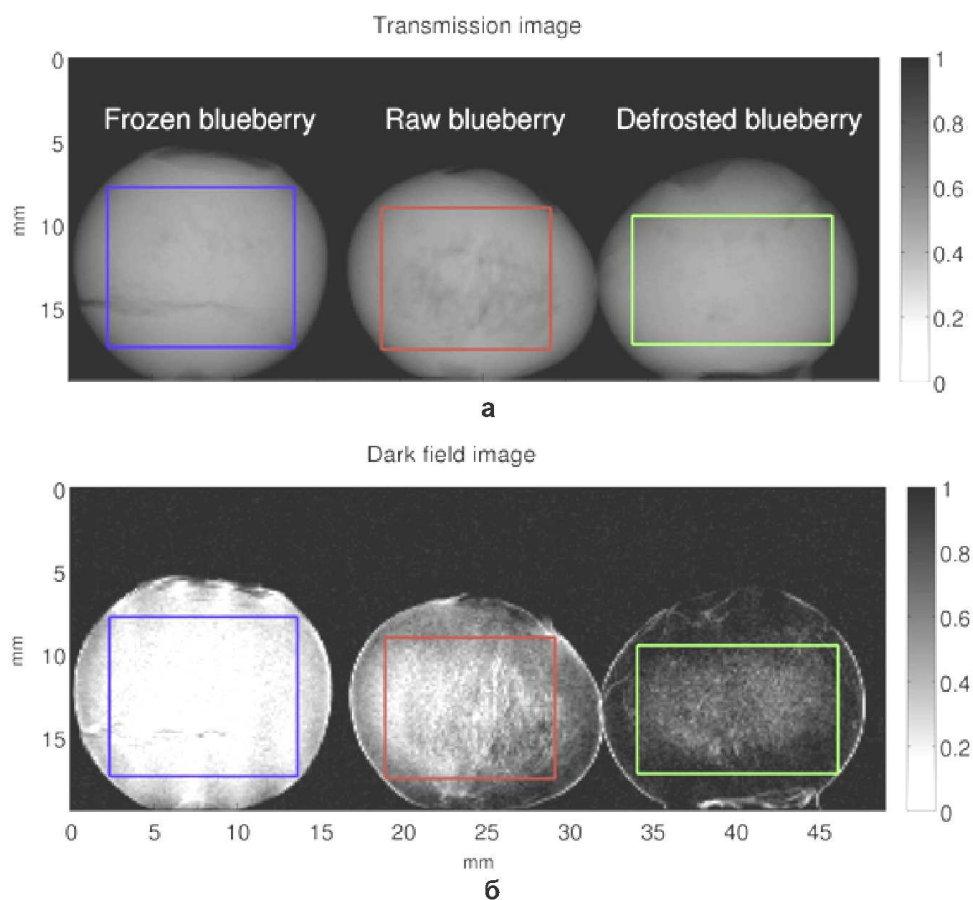


Рис. 11. Рентгенография ягод черники:
а – обычная; б – темнопольная (слева – направо) замороженная, свежая, размороженная черника

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 (Pierre Dutilleul, Li Wen Han и Jean Beaulieu [23]), для оценки качества плодов *Castanea* spp., *Cucumis sativus*, *Prunus cerasus* и *Conotrachelus nenuphar* (Irwin R. Donis-González, Daniel E. Guyer, Anthony Pease и Frank Barthel [24, 25]), а также для количественной оценки внутренних структур плодов граната *Punica granatum* L. для определения его качественных показателей (Lembe Samukelo Magwaza и Umezuruike Linus Opara [26]) (рис. 12).

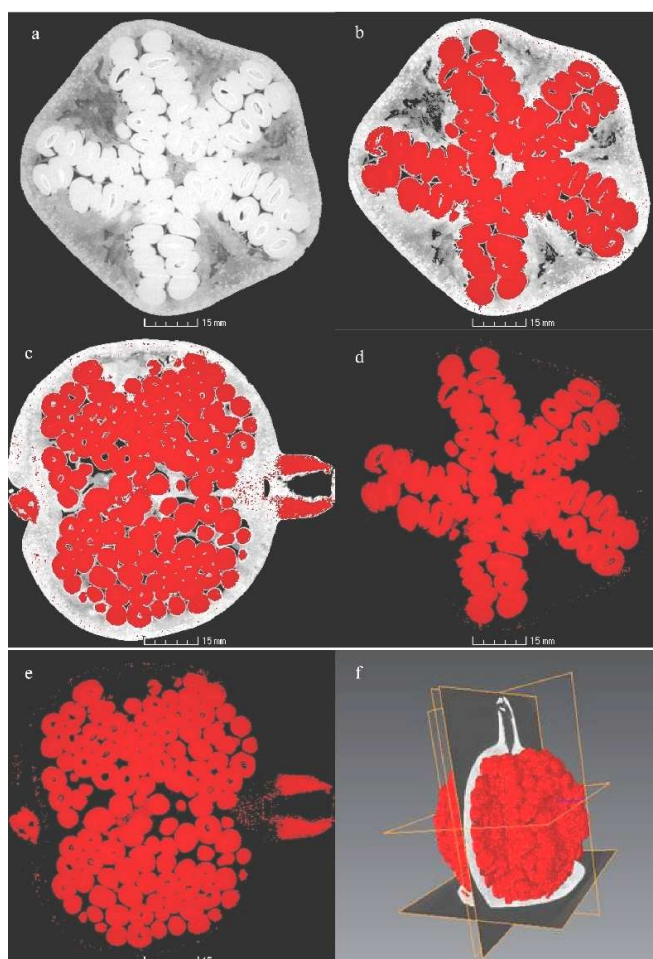


Рис. 12. Объемная реконструкция плода граната *Punica granatum*

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 освеще-

ны 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 определению 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).

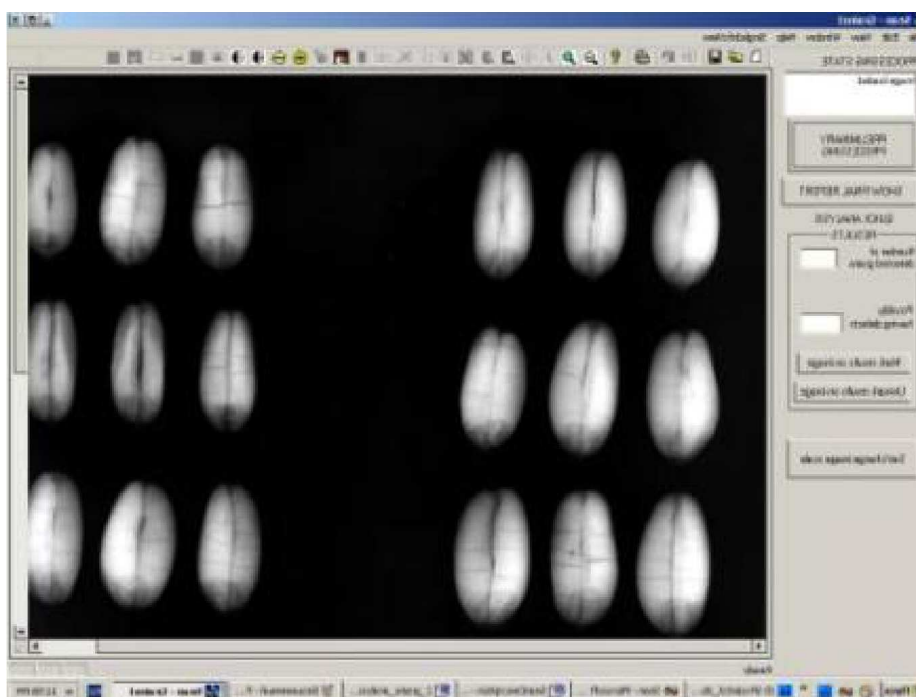


Рис. 13. Рабочее окно программы SEAN

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

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 паук [38], а в 2013 предложена методика идентификации древесных пород, которая позволяет исследовать внутренние характеристики и особенности анатомического строения различных пород [39].

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). – P. 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). – P. 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´ınez-Laborde, C. P´erez // *Journal of Arid Environments*. – Vol. 38(1998). – P. 245–253.
6. Alain Pierret. X-ray computed tomography to quantify tree rooting spatial distributions / Alain Pierret, Yvan Capowiez, Christopher J. Moran, Andre´ Kretschmar // *Geoderma*. – Vol. 90 (1999). – P. 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). – P. 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). – P. 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). – P. 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). – P. 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). – P. 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). – P. 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). – P. 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). – P. 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). – P. 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). – P. 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). – P. 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'l // *Food Control*. – Vol. 30 (2013). – P. 531–535.
20. Jan Van den Bulcke. 3D tree-ring analysis using helical X-ray tomography / Jan Van den Bulcke, Erik L.G. Wernersson, Manuel Dierick, Denis Van Looc, Bert Masschaele, Loes Brabant, Matthieu N. Boonec, Luc Van Hoorebeke, Kristof Hanecad, Anders Brunb, Cris L. Luengo Hendriks, Joris Van Ackera // *Dendrochronologia*. – Vol. 32 (2014). – P. 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). – P. 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'l // *Food Control*. – Vol. 39 (2014). – P. 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). – P. 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). – P. 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 Pease // *Postharvest Biology and Technology*. – Vol. 94 (2014). – P. 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). – P. 1–6.
27. Архипов М.В. Методика рентгенографии в земледелии и растениеводстве / М.В. Архипов, Д.И. Алексеева, Н.Ф. Батыгин, Л.П. Великанов, Л.П. Гусакова, И.В. Дерунов, А.Г. Желудков, В.Ф. Николенко, Л.И. Никитина, Е.Н. Пономаренко, В.Н. Савин, В.П. Якушев. – 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. – С-Пб. : 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. Учебно-методическое 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. Учебно-методическое пособие / М.А. Никольский, М.И. Панкин, А.Ю. Грязнов, Н.Н. Потрахов. – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2014 – 20 с.
35. Никольский М.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. 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. Бомбардые // 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 с.
2. Derunov I.V. Radiographic research of seeds of various crops and products of their processing : Avtoref. yew. ... Cand. Biol. Sci. – St. Petersburg, 2004. – 24 p.
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). – P. 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). – P. 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). – P. 245–253.
6. Alain Pierret. X-ray computed tomography to quantify tree rooting spatial distributions / Alain Pierret, Yvan Capowicz, Christopher J. Moran, Andre´ Kretschmar // *Geoderma*. – Vol. 90 (1999). – P. 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). – P. 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). – P. 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). – P. 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). – P. 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). – P. 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). – P. 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). – P. 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). – P. 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 Inzé // *Trends in Plant Science*. – Vol. 15 (2010). – P. 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). – P. 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). – P. 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'l // *Food Control*. – Vol. 30 (2013). – P. 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). – P. 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). – P. 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'l // *Food Control*. – Vol. 39 (2014). – P. 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). – P. 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). – P. 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 Pease // *Postharvest Biology and Technology*. – Vol. 94 (2014). – P. 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). – P. 1–6.
27. Arkhipov M.V. Metodik of a X-ray analysis in agriculture and plant growing / M.V. Arkhipov, D.I. Alekseeva, N.F. Batygin, L.P. Velikanov, L.P. Gusakova, I.V. Derunov, A.G. Zheludkov, V.F. Nikolenko, L.I. Nikitina, E.N. Ponomarenko, V.N. Savin, V.P. Yakushev. – M. : Russian Academy of Agrarian Sciences, 2001. – 102 p.
28. Arkhipov M.V. Introskopichesky a method of the accelerated determination of the hidden population of grain by quarantine wreckers: methodical recommendations / M.V. Arkhipov, D.I. Alekseeva, L.P. Velikanov, L.P. Gusakova, I.V. Derunov. – S-Pb, 2005. – 28 p.
29. Arkhipov M.V. Microfocal X-ray analysis of plants / M.V. Arkhipov, N.N. Potrakhov. – S-Pb. : Tekhnolit, 2008. – 194 p.
30. Nikolsky M.A. A microfocal X-ray analysis in wine growing. Methodical recommendations // M.A. Nikolsky, A.A. Lukyanova, M.I. Pankin, A.Yu. Gryaznov, L.P. Velikanov, M.V. Arkhipov, N.N. Potrakhov. – Anapa, 2012. – 91 p.
31. Nikolsky M.A. Methodical recommendations about application of a microfocal X-ray analysis for the express analysis of seeds of grapes / M.A. Nikolsky, L.P. Velikanov, M.I. Pankin, M.V. Arkhipov, A.Yu. Gryaznov, N.N. Potrakhov, A.A. Lukyanova, A.A. Lukyanov. – Anapa, 2010. – 14 p.
32. Nikolsky M.A. Determination of viability of seeds of grapes, method microfocus ache a X-ray analysis. Educational and methodical grant / M.A. Nikolsky, M.I. Pankin, M.D. Larkina, A.Yu. Gryaznov, N.N. Potrakhov. – Krasnodar : Publishing house – South, 2014. – 20 p.
33. Nikolsky M.A. Methodical recommendations about application of a x-ray method for an express assessment of quality of accretion for the imparted grapes / M.A. Nikolsky, M.I. Pankin, A.A. Lukyanova, L.P. Velikanov, A.A. Lukyanov, M.V. Arkhipov, A.Yu. Gryaznov, N.N. Potrakhov. – Anapa, 2010. – 14 p.
34. Nikolsky, M.A. Determination of quality of accretion of the imparted components of saplings of grapes, method of a microfocal X-ray analysis. Educational and methodical grant / M.A. Nikolsky, M.I. Pankin, A.Yu. Gryaznov, N.N. Potrakhov. – Krasnodar : Publishing house – South, 2014 – 20 p.
35. Nikolsky M.A. Methodical recommendations about application of a microfocal X-ray analysis for an express assessment of a prevalence of shanks and saplings of grapes vascular necrosis / A.A. Lukyanova, M.A. Nikolsky, L.P. Velikanov, M.I. Pankin, A.A. Lukyanov, M.V. Arkhipov, A.Yu. Gryaznov, N.N. Potrakhov. – Anapa, 2010. – 14 p.
36. Definition of degree of a prevalence of landing material of grapes vascular necrosis, by method of a microfocal X-ray analysis: Educational and methodical grant / M.A. Nikolsky, M.I. Pankin, A.Yu. Gryaznov, N.N. Potrakhov. – Krasnodar : Publishing house – South, 2014. – 20 p.
37. Nikolsky M.A. Determination of safety of grape eyes, method of a micro focal X-ray analysis. Methodical recommendations / M.A. Nikolsky, A.Yu. Gryaznov, K.K. Zhamova. – Krasnodar : Publishing house – South, 2014. – 16 p.
38. Penny D. New species of spiders of the sort *Craspedisia* (Araneae: theridiidae) from Miocene Dominican amber, illustrated by method of a computer tomography / Penny D., Green D.I., McNail A., Bradley R.S., Marusik Yu.M., P.D.'s Vitters, R.F'S Preziosi // *Paleontologic magazine*. – 2012. – No. 6. – P. 35.
39. Longetyud F. Research of process of identification of tree species on macroscopic signs with use of a computer tomography / F. Longetyud, F. Motya, M.A. Bakhshiyeva, A.N. Chubinsky, A.A. Tambi, P. Sharpentye, V. Bombardie // *News of the St. Petersburg timber college*. – 2013. – No. 202. – P. 158–167.