

УДК: 634.[631.8:004.4]

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ РЕНТГЕНОСКОПИИ В ПРОМЫШЛЕННОМ ВИНОГРАДАРСТВЕ

Дмитрий Валериевич Потанин¹, Маргарита Игоревна Иванова²

¹Институт «Агротехнологическая академия» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», 295007, Республика Крым, г. Симферополь, пр-кт Академика Вернадского, д. 4

²Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центр агрохимической службы «Крымский», 295017, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, д. 75/1

В статье, на основе ранее проведённых исследований определены перспективные пути использования рентгенологических методов в научном процессе и промышленном производстве в отрасли виноградарства. Рентгенография, как неразрушающий комплекс исследований, позволяет проводить ряд учётов: степень вызревания лозы, длину и диаметры у подвоев и привоев, а также жизнеспособность глазков. Рентгеноскопия в промышленном виноградарстве, может использоваться при определении потенциальной плодородности глазков на лозе, а также их выживаемость в зимний период. Показаны перспективные пути использования рентгенфлуоресцентного анализа для определения содержания основных макро- и микроэлементов, а также концентраций основных пластических веществ (крахмала, белков, полисахаридов и др.).

Ключевые слова: *виноград; рентгеноскопия; темнопольная рентгенография; микрофокусная рентгенография; рентген флуоресцентная спектроскопия*

Введение

Современные научные исследования в сфере сельского хозяйства больше направлены на освоение методов неразрушающего действия, при которых живые организмы остаются живыми и могут в дальнейшем подвергаться прижизненному изучению. Это связано с тем, что результаты детального изучения живых организмов можно в дальнейшем оцифровывать, создавая математические модели развития тех или иных процессов, важных для понимания изменений [1, 2]. При применении же методов детального исследования с применением разрушающих методов, такие возможности последующего наблюдения за развитием организмов просто отсутствуют и приходится использовать методы вариационной статистики, в попытке найти регрессионные взаимосвязи между имеющимися показателями и ожидаемым результатом [3].

Одним из таких направлений считается методы рентгенологического анализа, к которым относятся рентгеноскопия, рентгенография, рентген спектрометрический анализ во всех его вариациях [4, 5]. При этих методах живые образцы не претерпевают значительных изменений и способны продолжить свой жизненный цикл. Отдельно, следует указать и на использование рентгеновского излучения в селекции, как методологического решения увеличения вероятности мутагенеза и получения биологического материала с изменённым генотипом, часть из которого может иметь хозяйственно-ценные признаки [6].

В работе с растениями уже сейчас применяются рентгенологические исследования по определению качества семян, структуре тканей как однолетних, так и многолетних растений [7, 8, 9]. В виноградарстве рентгенографический анализ, в комплексе с другими методами позволяет изучать вопросы совместимости подвойно-привойных комбинаций. Также существуют разработки быстрого анализа содержания химических элементов в почве и растениях [10, 11].

В промышленности рентгеноспектральный анализ уже достаточно широко применяется при определении концентраций металлов и других, оказывающих тормозящее действие на лучи, элементов по их спектру флуоресценции, что также может переноситься в отрасль сельского хозяйства [12].

В нашей стране, в отрасли сельского хозяйства, одним из самых быстро развивающихся направлений, является виноградарство [3, 13]. В последние годы отмечается устойчивый рост площадей под виноградными насаждениями, внедряются новые сорта, проводится исследовательская работа в целом ряде научно-исследовательских учреждений, а также ВУЗах России. Однако, методологический аппарат, применяющийся сегодня, в большей степени носит разрушающий характер изучения растений или отдельных органов виноградных растений, что затрудняет применять принцип изучения растения начиная от подвойной и привойной лозы, включаемой в процесс производства привитого саженца, до взрослого плодоносящего куста. Поскольку такого плана исследования сквозного детального изучения растений в процессе всего жизненного цикла является важными для создания цифровых моделей и перехода не только научного, но и производственного процесса с полным контролем всех процессов, следует рассмотреть перспективы комплексных рентгенологических исследований как неразрушающих виноградные растения.

Цель исследования: определить перспективные пути использования рентгенологических методов в научном процессе и промышленном производстве в отрасли виноградарства.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились на базе Института «Агротехнологическая академия» ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского» в период 2022-2023 гг. с привитым посадочным материалом винограда, выращенным в условиях открытой виноградной школки в 2022 г.

Рентгенографические исследования проводились на базе ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» с помощью установки семейства «ПРДУ-2» [3, 13]. Образцы изучались в двух проекциях относительно места расположения омегаобразного выреза в месте прививки (фронтальное и боковое размещение). Визуализация результатов рентгеновской съемки проводилась в позитивном и негативном виде для более детального их изучения, а также расширения возможностей для последующего описания результатов исследования.

Обсуждения результатов

В ходе изучения совместимости подвойно-привойных комбинаций винограда, включающих автохтонные для Крыма привойные сорта с карбонатоустойчивыми подвоями, нами был проведён сравнительный анализ между результатами анатомии саженцев и их рентгеновскими снимками, которые являются легко читаемыми с точки зрения выявления некрозов и отклонений в росте и развитии растений (рис. 1) [13].

Так, на представленном рисунке, сопоставлены результаты анатомического разреза саженца винограда, не прошедшего отбор по соответствию, действующему ГОСТ (Межгосударственный стандарт ГОСТ 31783-2012 Посадочный материал винограда (саженцы). Технические условия. – М. – Стандартинформ, 2013). Красными стрелками отмечены место прободения в сращивании подвоя с привоем, которое и является фактом нестандартности. Уплотнения же клеток в местах полного сращивания компонентов между собой и, как следствие, формирование проводящей системы имплантного растения (отмечено на рисунке зелёной стрелкой), также легко

интерпретируется не только при анатомическом разрезе саженца, но и при прочтении рентгеновского снимка, что может интерпретироваться и без проведения последующего разрушающего изучения растения.

Помимо такого изучения отдельных растений в рентгенографическом аппарате, нами была проведена серия сравнения растений в массе партии, состоящей из пяти саженцев, соответствующих ГОСТ, за одну загрузку в аппарат (рис. 2), в которой видно, что в целом, они имеют хорошее срастание мест прививки, а также по отдельным частям растений можно проводить дополнительные учёты без проведения сложных измерений или разрушающего исследования.

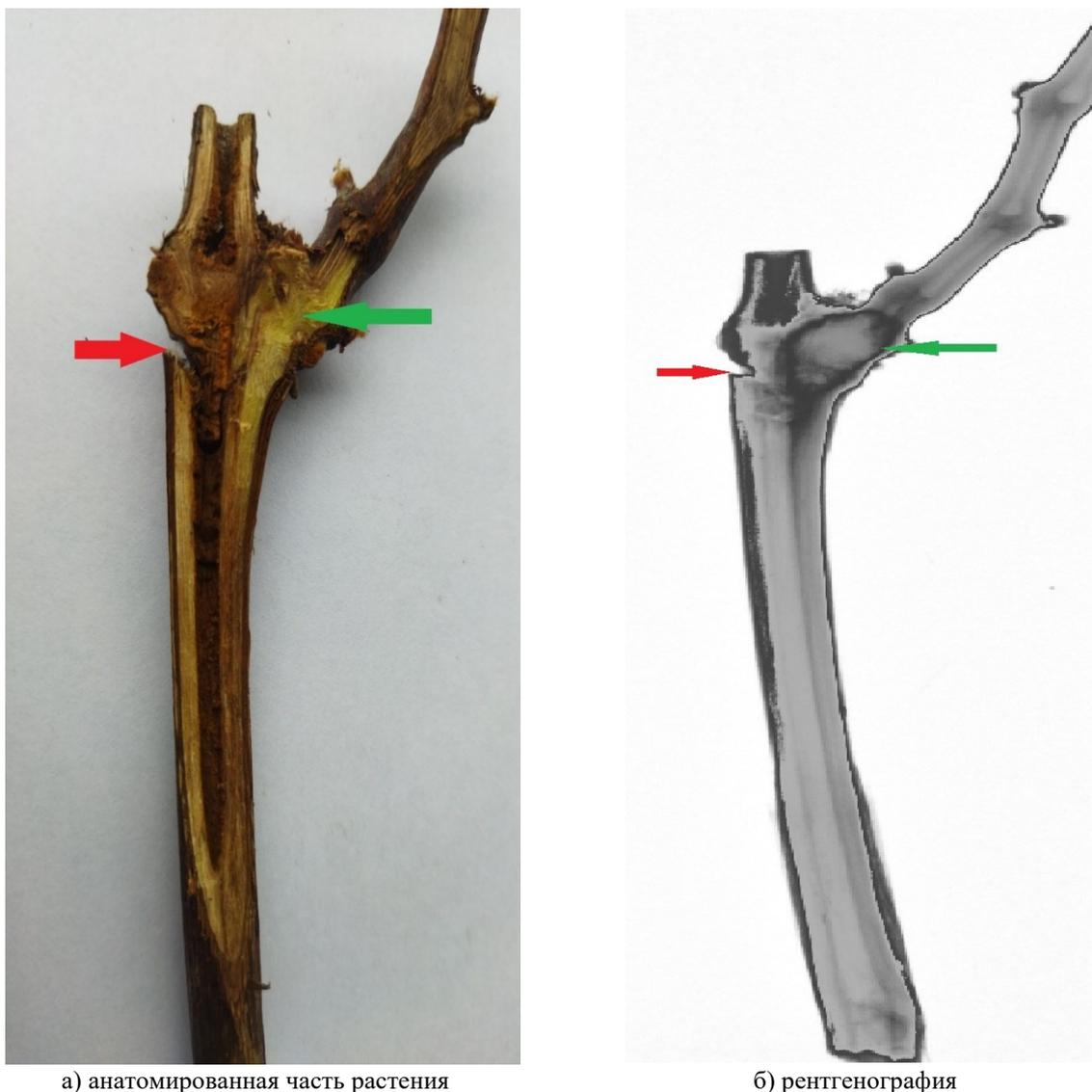


Рис. 1 Сравнение результатов анатомирования (а) и рентгеновской съёмки (б) места изготовления прививки у не прошедшего отбор на соответствие ГОСТ саженца винограда привойно-подвойной комбинации Джеват Кара на Рипариа х Рупестрис 101-14

Так, при рассмотрении рентгеновских снимков, можно установить качество срастания места прививки (на рисунке 2 отмечено цифрой 1), а также способ, которым был непосредственно изготовлен привитой саженец. Причём, это не требует не только разреза самого саженца, но и снятия защитного покрытия, если на саженце таковое имелось.

Кроме этого, на снимках отчётливо видно место формирования узла на лозе (на рисунке 2 отмечено цифрой 2). Известно, что у виноградной лозы место узла с глазком может быть закрытого и открытого типа. При этом, в основном формирование корневой системы, а также массовое накопление питательных веществ осуществляется из узлов, сформировавших мембрану, то есть, закрытого типа. На представленном групповом рисунке все узлы на подвойной части саженцев чётко отмечаются как сформировавшие мембрану, поскольку отделяют тяжами нижнее и верхнее междоузлие.

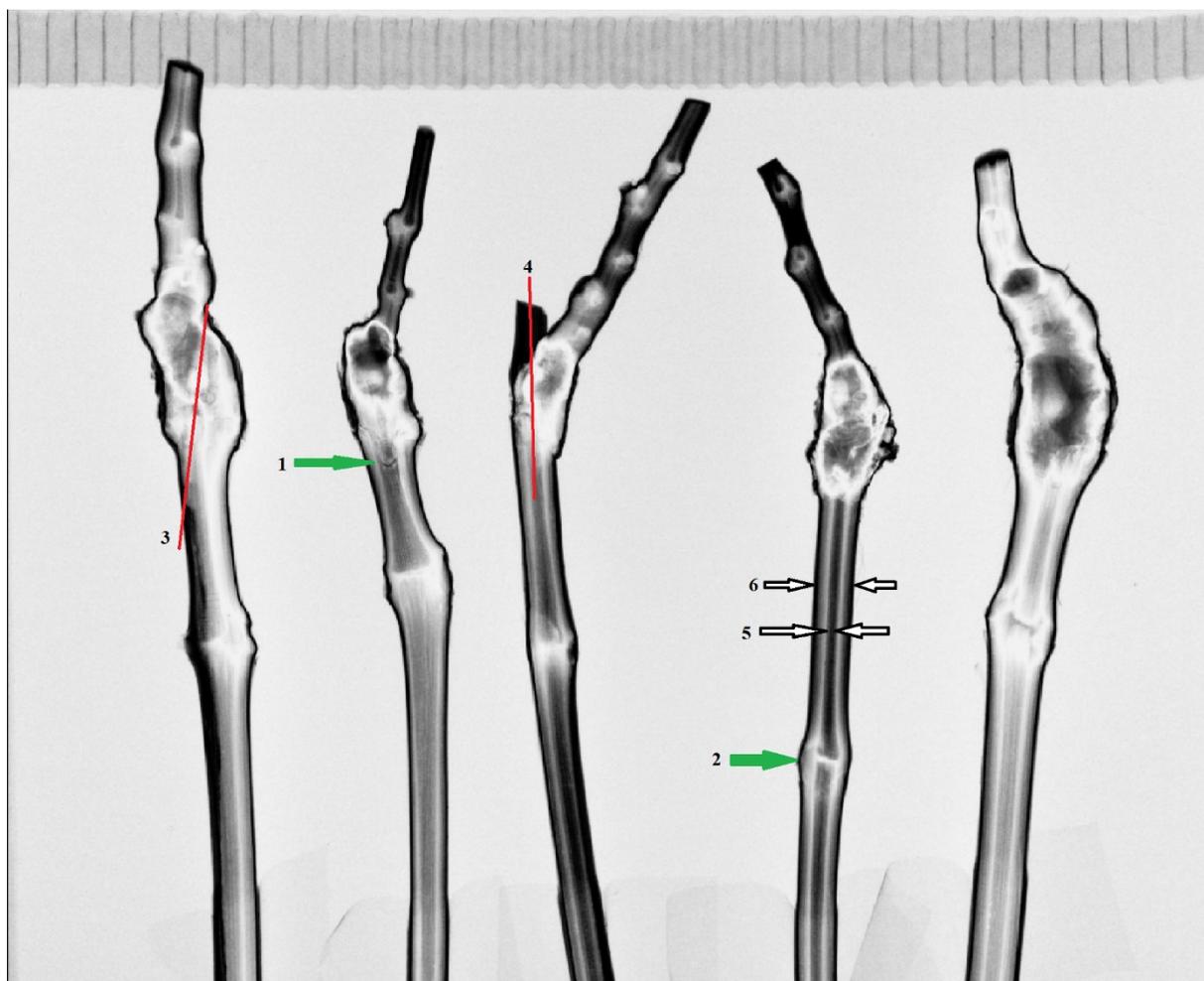


Рис. 2 Возможные измерения по результатам рентгенологических снимков растений винограда

Естественно, что при изучении лозы, вместо саженцев, имея шкалу сравнения, можно рассчитать реальную длину междоузлий, а также количество узлов на ней. Кроме этого, у привитых саженцев видно и место срастания с отклонениями, которые визуально не наблюдались или не были отмечены. Так, на рисунке под значениями 3 и 4 красными линиями проведены вертикали расположения сросшихся привойных частей саженцев относительно проекции подвойной лозы. Видно, что в случае саженца со значением 3 каллюсная ткань в месте прививки изменила направление расположения привойной части от вертикальной проекции. В случае же саженца со значением 4 угол изменения практически незначителен и почти полностью совпадает с центром расположения подвойной лозы. В ходе дальнейших исследований и интерпретаций данных рентгенологических исследований и сопоставления партий саженцев стандартных и нестандартных, ещё предстоит выработать рабочую гипотезу по

влиянию такого изменения углов проекций совмещения привойных и подвойных частей растений и влияние на дальнейший его жизненный цикл.

Кроме этого, анализируя снимки можно отметить, что достаточно чётко идентифицируются и сами структуры тканей лозы в его междоузлиях. Так, на рисунке 1 видно, что сердцевина и древесина лозы совпадают по цветовому изменению (рис. 1.а) на анатомическом снимке и изменению засветки на рентгеновской части (рис. 1.б). Подобно этому в групповом снимке рисунка 2 также легко можно идентифицировать древесину и сердцевину на каждом участке отдельных саженцев. Имея масштабируемую шкалу, можно определить расстояния или диаметры сердцевины (на рисунке 2 отмечено цифрой 5), лозы (на рисунке 2 отмечено цифрой 6), а через переводные формулы и площади: сечения сердцевины, сечения лозы. Также, вычитанием площади сечения сердцевины из общей площади сечения лозы можно установить площадь сечения древесины. Причём такое возможно без разрезания лоз в любой её части. Данные расчёты можно проводить не только вручную, что потребует больших затрат времени исследователя, но также и с применением компьютерных программ по формулам:

$$S_{\text{сечения лозы}} = \pi \times \left(\frac{d_{\text{общий}}}{2}\right)^2; \quad 1)$$

$$S_{\text{сердцевины}} = \pi \times \left(\frac{d_{\text{сердцевины}}}{2}\right)^2; \quad 2)$$

$$S_{\text{древесины}} = S_{\text{сечения лозы}} - S_{\text{сердцевины}}; \quad 3)$$

$$K_{\text{в}} = \frac{S_{\text{древесины}}}{S_{\text{сечения лозы}}}; \quad 4)$$

где:

S – площадь, мм²;

d – диаметр, мм;

π - математическая константа, равная 3,14;

$K_{\text{в}}$ - условный коэффициент вызревания побега.

Учитывая, что все исследования лоз, привитых черенков и саженцев, с применением методов рентгенологии не являются разрушающими, можно разработать подходы отслеживания жизненного цикла каждого растения винограда, начиная от лозы подвоя и привоя и завершая жизнью растения в промышленных насаждениях. При этом не будет необходимости использовать методы анатомического анализа, которые являются вмешательством в жизненный цикл исследуемого растения, что может привести к изменению его сравнительной характеристики относительно других объектов данной генеральной совокупности. С таким подходом будут создаваться более точные результаты для вычисления высокофункциональных зависимостей факторов с минимальными уровнями размаха варьирования между исследуемым фактором или группой факторов и создаваемой функцией при разработке математических моделей виноградного растения. Это уже можно будет считать качественно новым уровнем – доказательное экспериментальное виноградарство.

Применение чувствительных датчиков фиксации рентгеновского излучения, кроме описанного выше, можно также проводить более глубокие исследования глазков винограда с целью определения их жизнеспособности. Подобные исследования проводились М.А. Никольским, Н.Н. Потраховым и др. учёными [8, 14], которые установили, что существует возможность анализа по рентгеновским снимкам жизнеспособности отдельных глазков на виноградной лозе. С применением

фотоувеличения и компьютерного обучения для анализа получаемых данных, становится перспективным направлением не только идентификации выживаемости отдельных глазков или почек (центральной и двух замещающих) внутри них, но также и идентификация зачатков цветonoсов с целью определения коэффициентов: перезимовки лозы, плодоношения и плодоносности. Эти параметры в большей степени необходимы не только для научного процесса, но и в производстве, для определения оптимальной высоты обрезки лоз плодоношения с целью достижения планового урожая, сложившегося в каждый конкретный год в зависимости от степени повреждения лоз вследствие зимних морозов и ожидаемой плодоносности глазков. Таким образом можно достичь параметров планирования урожайности промышленных насаждений, а в случаях повреждения лоз зимними морозами – оперативной корректировки подходов в нормирующей обрезке.

Кроме изучения методами рентгенологического анализа анатомии растений и отдельных его органов, науке известен метод рентгенофлуоресцентного анализа, который достаточно широко сегодня применяется при определении металлов и других элементов в минералогии, почвоведении [15, 16]. При этом современные подходы позволяют не только качественно, но и количественно показать наличие и концентрации отдельных элементов в исследуемых образцах. В минералогии, зачастую, таким образом определяют содержание ценных соединений для их добычи, однако при исследованиях в почве макро- и микроэлементов таким методом возможно определение только валового их содержания, что не всегда объективно отображает картину обеспеченности почв доступными для растений соединений [10, 11, 17, 18]. С другой стороны, определение концентраций элементов питания в растениях позволит уже объективно изучить степень взаимодействия между почвой и растением и при проведении количественного анализа методом рентгенофлуоресценции оперативно, без применения длительных принятых сегодня в аналитической химии анализов определить концентрации веществ для принятия решения о необходимости в дополнительных удобрительных подкормках. Однако, если при определении данным методом веществ, тормозящих рентгеновские лучи, можно получить достоверные данные, то сложные органические соединения, содержащие кислород, водород, углерод, а также азот требуют совершенно иного подхода [19, 20]. В отечественной и зарубежной литературе известны подходы разработки программных алгоритмов прогнозирования концентраций сложных органических соединений по уже известным и занесённым в базы данных регрессионным зависимостям между спектральным рентгенофлуоресцентным линиям и концентрациям, а также видам сложных молекулярных соединений углеводов (в том числе и углеводоов) [21, 22]. На сегодня такие разработки применяются при определении таких соединений как взрывчатые вещества при рентгенологическом исследовании грузов, а также в нефтехимии для выяснения качества нефтепродуктов. В виноградарстве данных о проведении подобных исследований нами не выявлено, несмотря на то, что для других сельскохозяйственных культур уже подобные разработки ведутся зарубежными учёными для быстрого определения содержания углеводов в сахарной свекле, белков в сое и соевых продуктах, а также других культур и пищевых, а также кормовых продуктах [23]. Разработка соответствующих алгоритмов по определению содержания крахмалов, элементов питания в виноградной лозе позволит, в перспективе, определять качество лозы на пригодность её к прививочной кампании как подвойного и привойного материалов. Также появится возможность прогноза степени устойчивости растений к стрессу в зимний период, перспективы активного роста и развития виноградных кустов в начале вегетации.

Выводы

Применение в качестве неразрушающего метода исследований рентгенографии, позволяет, помимо изучения срачиваемости компонентов в месте прививки подвойно-привойных комбинаций, проводить индивидуально, на каждом растении, ряд учётов, которые ранее выполнялись только для целой партии подвойного и привойного материала: степень вызревания лозы, длину и диаметры у подвоев и привоев, а также жизнеспособность глазков.

Показано, что применение методов рентгеноскопии возможно и в промышленном виноградарстве, при определении потенциальной плодородности глазков на лозе, а также их выживаемость в зимний период, что позволит точно определять длину обрезки кустов для достижения планового урожая.

Показаны перспективные пути развития экспериментальной рентгенографии при разработке методов рентгенфлуоресцентного анализа для определения содержания основных макро- и микроэлементов, а также необходимость поиска методов определения концентраций основных пластических веществ (крахмала, белков, полисахаридов и др.) на основе программных алгоритмов прогнозирования на основе регрессионных зависимостей между спектральным рентгенфлуоресцентным линиям и их концентрациям.

Список литературы

1. Базарнова Ю.Г., Кузнецова Т.А., Прияткин Н.С. Исследование структурной целостности семян ореха грецкого (*Juglans regia* L.) селекции Никитского ботанического сада методом микрофокусной рентгенографии и компьютерного анализа изображений // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2020. – № 84. – С. 72-78.
2. Безух Е.П. Определение качества семян голубики путем использования мягколучевой рентгенографии // Селекция и сорторазведение садовых культур. – 2019. – Т. 6, № 1. – С. 18-21.
3. Иванова М.И., Иванченко В.И., Потрахов Н.Н., Потанин Д.В. Перспективы применения метода рентгенографии для автоматизированного определения качества привитого материала винограда // Виноградарство и виноделие. – 2023. – Т. 52. – С. 40-42.
4. Иванченко В.И., Потрахов Н.Н., Иванова М.И. Анализ совместимости подвойно-привойных комбинаций винограда по водопроводимости тканей саженцев с применением метода рентгенографии // Земледелие. – 2024. – № 2. – С. 42-47.
5. Никольский М.А., Ткаченко К.Г., Грязнов А.Ю., Староверов Н.Е., Холопова Е.Д., Клонов В.А. Рентгеновский сепаратор семян на основе метода съемки с прямым увеличением изображения // Успехи современного естествознания. – 2017. – № 10. – С. 41-47.
6. Applications of Computed Tomography (CT) in environmental soil and plant sciences // Soil & Tillage Research. – 2023. – Vol. 226. – P. 105574.
7. Feng X, Zhang H, Yu P. X-ray fluorescence application in food, feed, and agricultural science: a critical review // Crit Rev Food Sci Nutr. – 2021. – Vol. 61(14). – P. 2340-2350.
8. Jang Min. “Application of portable X-ray fluorescence (pXRF) for heavy metal analysis of soils in crop fields near abandoned mine sites.” // Environmental Geochemistry and Health. – 2010. – P. 207-216.

9. Singh Vivek & Sharma, Neha & Singh Virendra. Application of X-ray fluorescence spectrometry in plant science: Solutions, threats, and opportunities // X-Ray Spectrometry. – 2021. – Vol. 51.
10. Vogel-Mikus, Katarina & Pongrac, Paula & Kump, Peter & Kodre, Alojz & Arčon, Iztok. Synchrotron Radiation Based Micro X-Ray Fluorescence Spectroscopy of Plant Materials // In book: X-Ray Fluorescence in Biological Sciences. – 2022. – p.151-162
11. Ribeiro José & Santos, Felipe & Oliveira, José & Barbosa, Graziela & Melquiades, Fábio. Optimization of pXRF instrumentation conditions and multivariate modeling in soil fertility attributes determination // Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. – 2023. – P. 211.
12. Musaeov Farkhad & Potrakhov, N. & Beletskiy, Sergey. History and prospects of the application of X-ray in seed production and seed studies // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 224.
13. Grigor'evich, Revenko & Pashkova, Galina. X-Ray Fluorescence Spectrometry: Current Status and Prospects of Development // Журнал аналитической химии. – 2023. – Vol. 78. – P. 980-1001.
14. From light microscopy to X-ray microtomography: observation and analysis technologies in transdisciplinary approaches for bionic design and botany // Cuadernos del Centro de Estudios de Diseño y Comunicación. – 2021. – No. 149. – P. 61-74.
15. Gozetto, Jonatha & Almeida, Eduardo & Brasil, Marcos & Virgilio, Alex & Santos, Eduardo & Furlan, Gil & Carvalho, Hudson. In-house manufactured benchtop XRF spectrometer // X-Ray Spectrometry. – 2023. – Vol. 53.
16. Dirks, Matthew & Poole, David. Auto-encoder neural network incorporating x-ray fluorescence fundamental parameters with machine learning // X-Ray Spectrometry. – 2023.
17. Zhang Huan & He Hailong & Gao Yanjun & Mady Ahmed & Filipović Vilim & Dyck Miles & Lv Jialong & Liu Yang. Applications of Computed Tomography (CT) in environmental soil and plant sciences // Soil and Tillage Research. – 2023. – Vol. 226. – P. 105574.
18. Indore, Navnath & Karunakaran, Chithra & Jayas, Digvir. Synchrotron tomography applications in agriculture and food sciences research: a review // Plant Methods. – 2022. – Vol. 18. – P.1-26.
19. Breuckmann Michael & Wacker Georg & Hanning Stephanie & Otto Matthias & Kreyenschmidt Martin. Quantification of C, H, N and O in polymers using WDXRF scattering spectra and PLS regression depending on the spectral resolution // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. – 2022. – Vol. 37. – P. 861-869.
20. Duncan Keith & Czymmek Kirk & Jiang Ni & Thies August & Topp Christopher. X-ray microscopy enables multiscale high-resolution 3D imaging of plant cells, tissues, and organs // Plant Physiology. – 2021.
21. Nascimento Paloma & Sperança Marco Aurelio & Beletti Douglas & Filho Edenír & Verbi Pereira, Fabiola. White Crystal Cane Sugar Analysis Using a Noninvasive Method for Detection of Tampering with Sand // Food Analytical Methods. – 2021.
22. Chen Ke & Wenting Zhang & La Ting & Bastians Philipp & Guo Tao & Cao Chunjie. Microstructure investigation of plant architecture with X-ray microscopy // Plant Science. – 2021. – Vol. 311. – P. 110986.
23. Camargo Rachel & Rodrigues Tavares, Tiago & Silva Nicolas & Almeida Eduardo & Carvalho Hudson. Soybean sorting based on protein content using X-ray fluorescence spectrometry // Food Chemistry. – 2023. – Vol. 412. – P. 135548.

Статья поступила в редакцию 20.07.2024 г.

Potantin D.V., Ivanova M.I. Prospects for the application of x-ray methods in industrial viticulture
// Bull. of the State Nikita Botan. Gard. – 2024. – № 152. – P. 76-84.

In the article, on the basis of previous research, promising ways of using X-ray methods in the scientific process and industrial production in the viticulture industry are identified. Radiography, as a non-destructive complex of studies, allows for a number of calculations: the degree of maturation of the vine, the length and diameters of rootstocks and grafts, as well as the viability of buds. Fluoroscopy in industrial viticulture can be used to determine the potential fruitfulness of the buds on the vine, as well as their survival in winter. Promising ways of using X-ray fluorescence analysis to determine the content of basic macro- and microelements, as well as concentrations of basic plastic substances (starch, proteins, polysaccharides, etc.) are shown.

Key words: *grapes; X-ray spectroscopy; dark-field radiography; microfocus radiography; X-ray fluorescence spectroscopy*