*УДК 58.002* DOI: 10.25695/AGRPH.2024.02.06

# ИССЛЕДОВАНИЕ СЕМЯН ПОДСОЛНЕЧНИКА МЕТОДАМИ СКАНИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ И РЕНТГЕНОСПЕКТРАЛЬНОГО МИКРОАНАЛИЗА

Я. О. Гуттовский, Н. Н. Потрахов, А. В. Тимчук

*СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина),*
*197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5,*
*E-mail: kzhamova@gmail.com*

*Поступила в редакцию 09.06.2024, принята к печати 25.06.2024*

Статья посвящена исследованию семян подсолнечника однолетнего (*Helianthus annuus*), которое проводилось с использованием следующих методов контроля и диагностики: цифровая микрофокусная рентгенография, сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ. Благодаря возможностям сканирующей электронной микроскопии удалось исследовать поперечные срезы семян подсолнечника на клеточном уровне и получить необходимую информацию о содержимом клеток, а также наглядные данные о распределении макроэлементов по поверхности среза. Проведено сопоставление данных, полученных с помощью сканирующей электронной микроскопии и цифровой микрофокусной рентгенографии, по итогам которого была дана интерпретация результатам рентгенографического исследования. На основании совокупности данных сделано предположение, что различия в ослаблении рентгеновского излучения разными областями семян обусловлены особенностями их внутреннего строения, например, неодинаковой плотностью расположения содержимого в клетках разной формы. Результаты исследования дополнены сведениями об элементном составе поперечных срезов. Установлено, что области неодинакового ослабления рентгеновского излучения наряду с различиями по микроструктуре характеризуются разной концентрацией фосфора. В ходе исследования была проанализирована микроструктура нескольких семян с визуальными признаками порчи. Микроскопических признаков, которые однозначно указывали бы на данный факт, выявлено не было. Выдвинуто предположение, что данные признаки могут быть выявлены у сильно прелых семян. Проведенные исследования наглядно демонстрируют широкие возможности перечисленных методов контроля и диагностики для решения различных задач в области семеноведения. Данные методы могут быть полезны для развития сельского хозяйства, пищевой промышленности и биотехнологий.

**Ключевые слова:** семена подсолнечника, микрофокусная рентгенография, сканирующая электронная микроскопия, рентгеноспектральный микроанализ.

# STUDY OF SUNFLOWER SEEDS WITH SCANNING ELECTRON MICROSCOPY AND X-RAY MICROANALYSIS

Ya. O. Guttovskiy, N. N. Potrakhov, A. V. Timchuk

*Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»,*
*5, Professora Popova St., St. Petersburg, 197022,*
*E-mail: kzhamova@gmail.com*

The paper is devoted to the study of annual sunflower seeds (*Helianthus annuus* L), which was carried out using the following control and diagnostic methods: digital microfocus radiography, scanning electron microscopy and X-ray spectral microanalysis. Due to the capabilities of scanning electron microscopy, it was possible to examine cross sections of sunflower seeds at the cellular level and obtain the necessary information about the contents of the cells, as well as visual data on the distribution of macroelements over the cut surface. A comparison of the data obtained using scanning electron microscopy and digital microfocus radiography was carried out, based on which the results of the radiographic study were interpreted. Based on the aggregated data, it was assumed that differences in the attenuation of X-ray radiation by different areas of the seeds were due to the peculiarities of their internal structure, for example, the unequal density of the contents in the cells of different shapes. The study results were complemented by the information on the elemental composition of the cross sections. It was established that areas of unequal attenuation of X-ray radiation, along with differences in microstructure, were characterized by different phosphorus concentrations. During the study the microstructure of several seeds with visual signs of spoilage was analyzed. There were no microscopic signs that would clearly indicate this fact. It has been suggested that these signs can be detected for highly rotted seeds. The conducted studies clearly demonstrated the wide capabilities of the listed control and diagnostic methods for solving various problems in the field of seed science. These methods can be useful for the development of agriculture, the food industry and biotechnology.

**Key words:** sunflower seeds, microfocus radiography, scanning electron microscopy, X-ray microanalysis.

## ВВЕДЕНИЕ

Применение рентгеновских приборов и электронно-лучевой техники для исследования биологических объектов, в том числе семян растений, началось практически сразу после их появления (Willan, 1986; Stant, 1973). В качестве примера можно привести серию рентгенографических исследований семян хвойных, в том числе сосны обыкновенной (*Pinus silvestris*), проведенных в 1950-х годах, в которых отмечены достоинства и перспективы данного метода (Simak, 1953). В Советском Союзе активная работа по внедрению неразрушающего метода рентгенографии в систему контроля качества семян началась в 60-х годах прошлого века (Некрасов, 1961).

Результатом длительной работы в области рентгенотехники стало создание специалистами СПбГЭТУ «ЛЭТИ» многофункциональной исследовательской рентгеновской установки ПРДУ, предназначенной для цифровой микрофокусной рентгенографии различных объектов, в том числе плодов растений (Землянова, 2021). В настоящее время в России идет активная методическая работа и проводятся научные исследования в данном направлении: создан и вступил в силу национальный стандарт ГОСТ Р 59603-2021 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы цифровой рентгенографии», разработаны методические указания по оценке качества семян сельскохозяйственных культур, в т.ч. сахарной свеклы (*Beta vulgaris*) (Подвигина, 2021).

В ходе исследований, проведенных в СПбГЭТУ «ЛЭТИ», было установлено, что при помощи метода цифровой микрофокусной рентгенографии возможно эффективно выявлять дефектные семена. Также считается, что данный метод пригоден для определения порчи семян подсолнечника (*Helianthus annuus*) за счет биохимических изменений (Гончаренко, 2017; Егорова, 2015). В результате анализа рентгеновских снимков поперечных срезов семян подсолнечника также было установлено, что существуют две области, по-разному поглощающие рентгеновское излучение. Данному факту может быть дано несколько объяснений. Поэтому для корректной интерпретации полученных результатов требуется детальное исследование структуры и состава семян независимыми методами.

Таким образом, можно выделить следующие цели данного исследования:

– сопоставление рентгеновских снимков поперечных срезов семян с изображениями, полученными методом сканирующей электронной микроскопии;

– выявление особенностей клеточного строения семян подсолнечника, которые могут повлиять на прохождение рентгеновского излучения;

– определение элементного состава двух обозначенных ранее характерных областей поверхности срезов семян с помощью рентгеноспектрального микроанализа;

– определение микроскопических признаков, свидетельствующих о порче семян или о наличии аномалий в их развитии.

Стоит отметить, что методы СЭМ и РСМА широко применяются в различных областях науки и техники, в том числе в фармакогнозии и ботанике, а также в интересах агропромышленного комплекса (Цветков, 2021).

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводилось в лаборатории электронной микроскопии СПбГЭТУ «ЛЭТИ» на оборудовании кафедры ЭПУ при поддержке кафедры ФХ и в партнерстве со специалистами ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова».

Объектом данного исследования являлись поперечные срезы семян подсолнечника, изготовленные при помощи микротомного лезвия. Исследование осуществлялось методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) с помощью электронного микроскопа Hitachi S-570 при напряжении 15 кВ и системы энергодисперсионного анализа Bruker QUANTAX 200. Количественный рентгеноспектральный микроанализ проводился безэталонным методом P/B-ZAF.

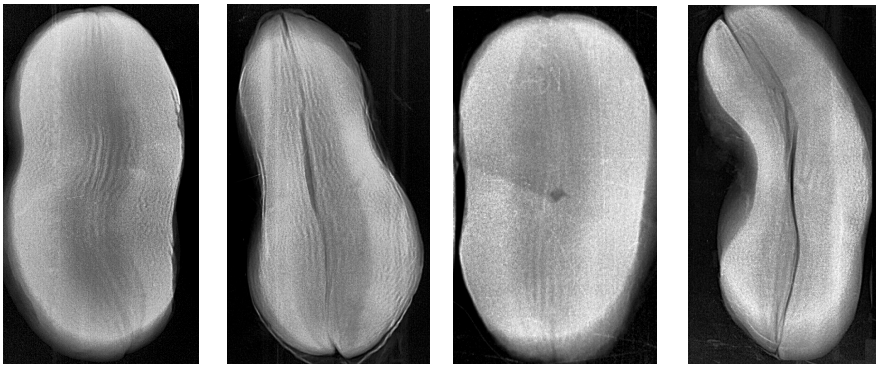
Для изучения поперечных срезов при помощи электронного микроскопа осуществлялось напыление на них проводящего покрытия (золото или углерод) с использованием установки SPI Supplies – Structure Probe, Inc. USA (SPI-MODULE Sputter/Carbon Coater). Специальная подготовка образцов не проводилась.

Рентгеновские снимки, с которыми проводилось сопоставление данных сканирующей электронной микроскопии, были получены с помощью многофункциональной установки ПРДУ, оснащенной микрофокусным источником излучения и обеспечивающей изменение анодного напряжения и тока в диапазоне 5–50 кВ и 20–200 мкА соответственно. В качестве приемника рентгеновского излучения использовался экран с фотостимулируемым люминофором (ФСЛ-экран). Преобразование скрытого изображения в цифровое осуществлялось при помощи лазерного сканера DIGORA PCT. Для получения изображений поперечных срезов использовался следующий режим: $U = 20$ кВ, $I = 73$ мкА и $t_{эксп} = 5$ с.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

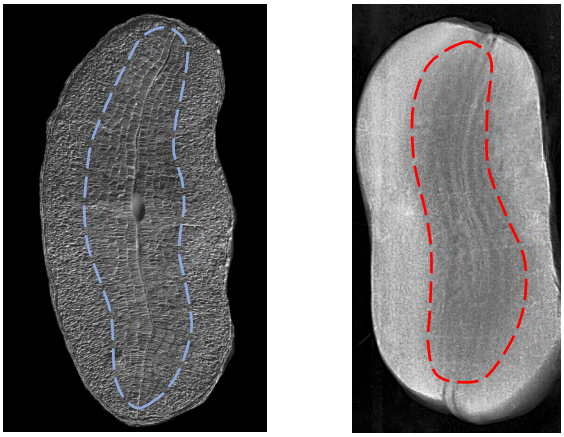
Рентгеновские изображения нескольких поперечных срезов семян подсолнечника, полученные в ходе рентгенографического анализа их качества, показаны на рис. 1. На данных изображениях наблюдаются области неодинакового ослабления рентгеновского излучения, которое проявляется в разной плотности почернения (яркости пикселей).

При непосредственном сравнении изображения поперечного среза семени подсолнечника, полученного методом сканирующей электронной микроскопии в обратно рассеянных электронах, и рентгеновского снимка, представленного на рис. 2, становится понятно, что области различного ослабления рентгеновского излучения соответствуют областям среза с клетками разной формы.



*а* *б* *в* *г*

Рис. 1. Рентгеновские снимки поперечных срезов семян подсолнечника ($X = 7$):
*а* – образец 1; *б* – образец 2; *в* – образец 3; *г* – образец 4

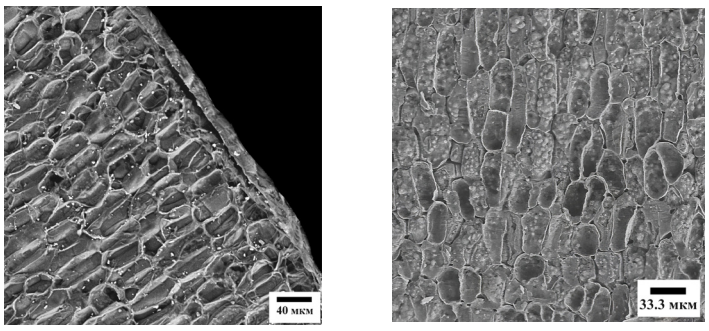


*а* *б*

Рис. 2. Изображения поперечных срезов семян подсолнечника:
*а* – СЭМ; *б* – микрофокусная рентгенография

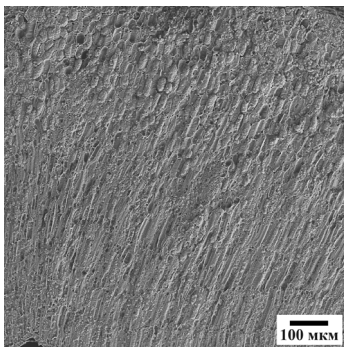
Как видно из рис. 3, пробоподготовка, которая заключалась в шлифовке и полировке образцов, залитых в эпоксидную смолу, позволяет получить изображения с четкими клеточными границами, но без содержимого клеток. Поскольку важно также проанализировать особенности локализации содержимого клеток, для исследования были изготовлены поперечные срезы без обработки поверхности и заливки в смолу.

В ходе исследования была проанализирована микроструктура порядка десяти поперечных срезов семян подсолнечника. Установлено, что в клетках паренхимы масло запасается в виде сферосом, при этом данные клетки имеют разную форму: во внутренней области полиэдрические клетки более вытянутые, а во внешней – менее вытянутые, или изодиаметрические (Эверт, 2015). На рис. 4 показан общий план среза семени.



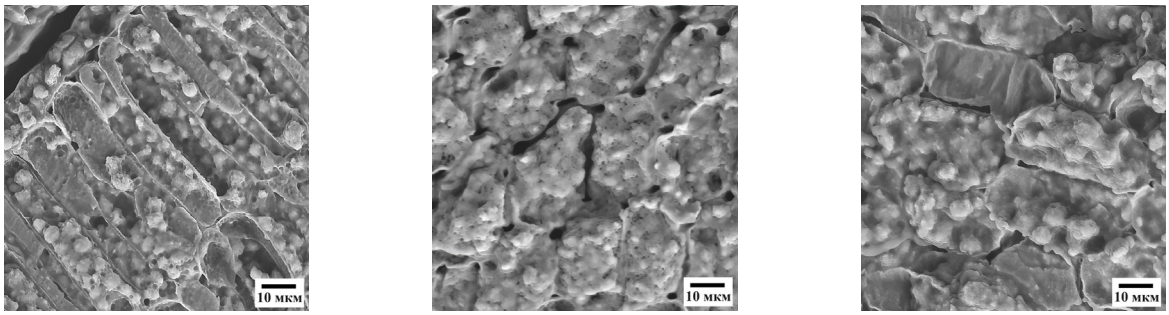

*а* *б*

Рис. 3. Изображения поперечных срезов семян подсолнечника:
*а* – шлифовка и полировка; *б* – без специальной обработки поверхности



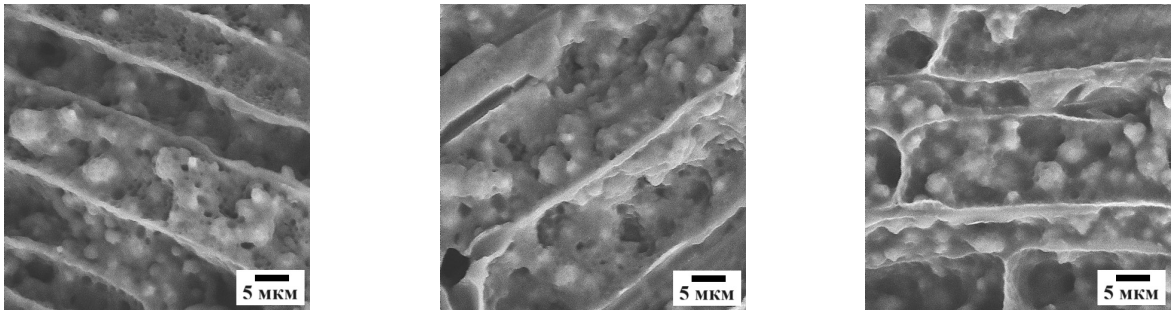

Ри. 4. Общий план поверхности среза, увеличение $X = 100$

Анализ экспериментальных данных (изображений), полученных при большом увеличении, позволяет предположить, что причиной того, что рентгеновское излучение по-разному ослабляется в указанных областях, является то, что в вытянутых клетках сферосомы располагаются более разреженно (рис. 5, *а* и рис. 6), чем в изодиаметрических (рис. 5, *б* и *в*).




*а* *б* *в*

Рис. 5. Изображения поперечных срезов семян, увеличение $X = 1$k:
*а* – вытянутые клетки (образец 1); *б*, *в* – шарообразные (образец 1 и 2 соотв.)




*а* *б* *в*

Рис. 6. Вытянутые клетки семян подсолнечника, увеличение $X = 2$k:
*а* – образец 1; *б* – образец 2; *в* – образец 3

Ослабление рентгеновского излучения слоем вещества некоторой толщины описывается приведенной ниже формулой Бугера – Ламберта – Бера:

$$I_{\mathrm{D}} = I_0 \exp(-\mu D),$$

где $I_{\mathrm{D}}$ – интенсивность рентгеновского излучения после ослабления; $I_0$ – начальная интенсивность излучения до ослабления; μ – линейный коэффициент ослабления; $D$ – толщина слоя ослабления.

Таким образом, за счет разной плотности расположения содержимого в клетках рентгеновское излучение в среднем проходит различный по эквивалентной толщине слой и, в связи с этим, по-разному ослабляется. Подобное явление возникает, например, при прохождении рентгеновского излучения через поперечные срезы пористых образцов.

Дополнительно проведен рентгеноспектральный микроанализ (выбран ряд определенных химических элементов). Данные рентгеновского элементного картирования и локального рентгеноспектрального анализа областей, имеющих разную плотность, определенную по результатам ранее проведенных рентгенографических исследований, свидетельствуют о наличии локальных неоднородностей по элементному составу при относительно равномерном их распределении по поверхности в целом.

На неоднородность указывает достаточно большая погрешность $\Delta C$ для концентрации ряда элементов, определенная на основе данных по нескольким участками, на которые условно был разделен поперечный срез (табл. 1, табл. 2).

Таблица 1. Концентрация элементов (вытянутые клетки), массовые % (норм.)

| Участок | Na | Mg | P | S | Cl | K | Ca |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 6,9 | 8,4 | 19,6 | 15,2 | 6,2 | 24,0 | 19,7 |
| 2 | 10,2 | 16,1 | 19,3 | 12,3 | 5,2 | 21,7 | 15,3 |
| 3 | 5,7 | 6,8 | 20,2 | 14,7 | 6,1 | 27,5 | 18,9 |
| 4 | 7,0 | 12,5 | 22,7 | 15,1 | 7,6 | 20,2 | 14,9 |
| 5 | 10,6 | 11,9 | 19,6 | 11,7 | 4,4 | 23,2 | 18,6 |
| 6 | 6,9 | 5,9 | 21,3 | 13,1 | 8,8 | 19,3 | 24,6 |
| $C_{ср}$ | 7,9 | 10 | 20,4 | 13,7 | 6,4 | 23 | 19 |
| $\Delta C$ | 2,1 | 4 | 1,4 | 1,6 | 1,7 | 3 | 4 |

Таблица 2. Концентрация элементов (изодиаметрические клетки), массовые % (норм.)

| Участок | Na | Mg | P | S | Cl | K | Ca |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 6,6 | 14,2 | 24,1 | 13,8 | 4,9 | 19,1 | 17,3 |
| 2 | 4,7 | 9,6 | 25,2 | 14,3 | 4,8 | 22,8 | 18,7 |
| 3 | 4,5 | 11,3 | 24,8 | 14,4 | 4,8 | 24,0 | 16,1 |
| 4 | 6,8 | 11,9 | 24,1 | 14,3 | 4,6 | 20,1 | 18,3 |
| 5 | 4,9 | 9,1 | 25,3 | 15,2 | 5,1 | 23,0 | 17,4 |
| 6 | 5,6 | 8,6 | 23,2 | 14,6 | 6,0 | 23,1 | 18,9 |
| $C_{ср}$ | 5,5 | 10,8 | 24,5 | 14,4 | 5 | 22 | 17,8 |
| $\Delta C$ | 1 | 2,2 | 0,9 | 0,5 | 0,5 | 2,1 | 1,1 |

В ходе исследований также установлено, что в указанных областях семян подсолнечника содержится разное количество фосфора (табл. 1, табл. 2). По рентгеновским спектрам, представленным на рис. 7 и рис. 8, видно, что интенсивность характеристической линии фосфора в области с изодиаметрическими клетками существенно больше.

Наглядно это продемонстрировано на рентгеновской карте: количество детектированных квантов рентгеновского излучения в некоторой точке соотносится с соответствующей яркостью пикселя, а из рис. 9 видно, что в области с изодиаметрическими клетками сигнал является более интенсивным.

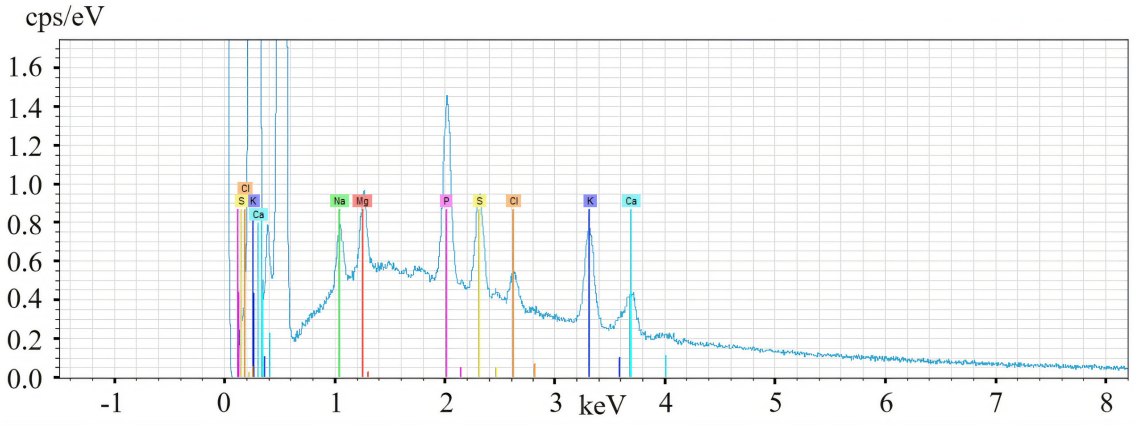



Рис. 7. Спектр области с вытянутыми клетками (участок 1)

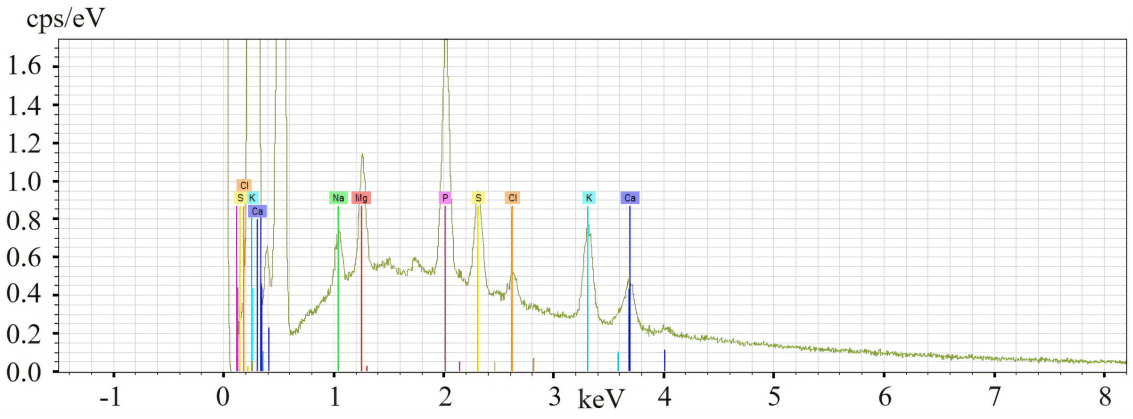
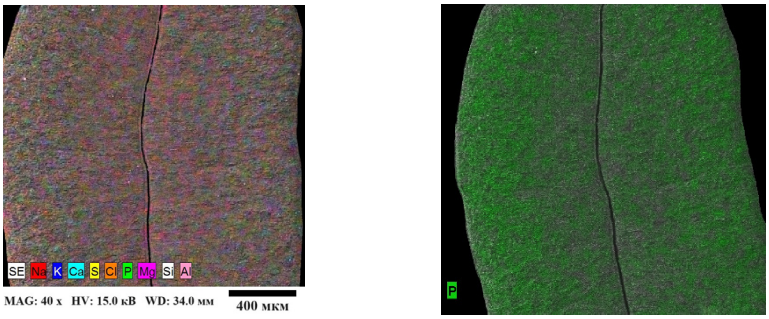



Рис. 8. Спектр области с изодиаметрическими клетками (участок 1)




*а* *б*

Рис. 9. Данные рентгеновского картирования ($X = 40$): *а* – карта по всем элементам; *б* – карта по фосфору

При этом стоит отметить, что такая особенность, характерная для фосфора (в отличие от других элементов), сохранялась при каждом измерении. Согласно экспериментальным данным, концентрация фосфора в области с вытянутыми клетками оказалась меньше на 16,7%, чем в области с изодиаметрическими. Это может быть связано с обсуждаемым в данной статье вопросом, но требует отдельного изучения.

Весьма важными задачами являются исследование проблем хранения семян масличных, разработка новых методов выявления испорченных семян и т.д. (Лисицын, 2023; Овсянникова, 2022).

Как показывает практика, в первую очередь испорченными оказываются семена с макроскопическими аномалиями развития (например, уродливость). Испорченными (или прелыми) семенами считаются семена подсолнечника, имеющие признаки порчи вследствие протекания в них различных биохимических процессов, которые выражаются в ненормальном для данного сорта цвете, а также в изменениях кислотного и перекисного числа (Еремеева, 2022).

Микроскопические признаки в целом соответствуют макроскопическим: можно говорить о меньшей упорядоченности структуры и наличии искривлений контура семядолей. Предполагается, что в явном виде различия между неиспорченными и прелыми семенами на электронных изображениях проявляются при высокой степени прелости.

## ВЫВОДЫ

Сопоставляя данные, полученные методом сканирующей электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа, с результатами, полученными при помощи метода цифровой микрофокусной рентгенографии, можно прийти к выводу, что последний метод позволяет дифференцировать ткани семян. В сочетании с простотой реализации и экспрессностью это является весьма существенным достоинством рентгенографического метода.

Выявлены особенности клеточной структуры семян: содержащие полезное вещество клетки различаются по форме. Экспериментальные данные рентгенографии и сканирующей электронной микроскопии свидетельствуют о связи между анатомией семян подсолнечника и ослаблением рентгеновского излучения. Считается, что основное влияние на процесс прохождения излучения оказывают особенности локализации содержимого клеток (например, его более или менее плотное расположение). Также на толщину слоя ослабления могут влиять различия данных областей по масличности, о чем могут свидетельствовать данные РСМА (Степуро, 2009).

По мнению авторов, комбинирование методов анализа способно повысить эффективность исследований. Достоинствами использования СЭМ и РСМА при решении подобных задач являются возможность проведения комплексного анализа, а также относительная простота пробоподготовки (в случае экспресс-оценки) и интерпретации результатов. Использованные методы контроля и диагностики, в том числе цифровая микрофокусная рентгенография, показывают свою эффективность при решении задач семеноведения в практической и научной плоскости. Например, указанные методы способствуют изучению проблем, связанных с порчей семян подсолнечника.

## Список литературы

Гончаренко О.А. Сравнительная характеристика отечественных и международных требований к качеству растительных масел // Евразийское Научное Объединение. 2017. Т. 2. № 2. С. 107–109.

Егорова А.М., Решетникова О.В. Методы исследования качества эфирных масел // Актуальные вопросы теории и практики современной биотехнологии: материалы всероссийской научно-практической конференции. СПб.: Изд-во Ленинградского государственного университета им. А. С. Пушкина, 2015. С. 87–93.

Еремеева Н.Б. Методы исследования пищевых продуктов: учебное пособие. СПб.: НИУ ИТМО, 2022. 131 с.

Землянова В.Е., Жавкина Т.М., Помогайбин А.В., Кавеленова Л.М., Родионова П.В., Розно С.А., Янков Н.В., Потрахов Н.Н. О возможностях экспресс-оценки качества плодов и семян древесных растений с помощью рентгенографического скрининга // ЭкоБиоТех 2021: материалы VII Всероссийской конференции с международным участием. Уфа, 04–07 октября 2021 года. Уфа: Уфимский институт биологии – обособленное структурное подразделение ФГБНУ Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, 2021. С. 207–211.

Лисицын А.Н., Федоров А.В., Григорьева В.Н., Марков В.Н., Доморощенкова М.Л. Хранение и переработка масличного сырья в современных условиях // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института жиров. 2023. № 1–2. С. 5–12.

Некрасов В.И., Смирнова Н.Г. К использованию рентгенографического метода при изучении развития семян интродуцируемых древесных растений // Бюл. ГБС РАН. 1961. № 43. С. 47–52.

Овсянникова О.В., Францева Т.П. Влияние условий хранения семян подсолнечника на экологическую безопасность и стойкость масел к окислению: монография. СПб.: Лань, 2022. 108 с.

Подвигина О.А., Потрахов Н.Н., Староверов Н.Е., Потрахов Ю.Н. Рентгенографический метод оценки качества семян сахарной свеклы // Нанотехнологии: разработка, применение-XXI век. 2021. Т. 13. № 2. С. 51–65.

Степуро М.В., Лобанов В.Г. Фосфор в семенах подсолнечника // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2009. №2–3. С. 123–124.

Цветков М.В., Подлесный Д.Н., Зайченко А.Ю., Салганская М.В., Цветкова Ю.Ю., Фрейман В.М., Салганский Е.А. Плавкость золы отходов растениеводства в условиях высокотемпературной переработки // Журнал прикладной химии. 2021. Т. 94. №3. С. 371–379.

Эверт Р.Ф. Анатомия растений Эзау. Меристемы, клетки и ткани растений: строение, функции и развитие: монография. М.: Лаборатория знаний, 2015. 603 с.

Simak M., Gustafsson Å. X-ray photography and sensitivity in forest tree species // Hereditas. 1953. Vol. 39. №3–4. pp. 458–468.

Stant M.Y. The role of the scanning electron microscope in plant anatomy // Kew Bulletin. 1973. №28(1). pp. 105–115.

Willan R.L. A guide to forest seed handling: with special reference to the tropics. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1986. 392 p.

**References**

Goncharenko O.A. Sravnitel'naya kharakteristika otechestvennykh i mezhdunarodnykh trebovaniy k kachestvu rastitel'nykh masel [Comparative characterization of domestic and international requirements for the quality of vegetable oils] // *Yevraziyskoye Nauchnoye Ob'yedineniye*, 2017, vol. 2, no. 2, pp. 107–109.

Yegorova A.M., Reshetnikova O.V. *Metody issledovaniya kachestva efirnykh masel* [Methods of studying the quality of essential oils] // Aktual'nyye voprosy teorii i praktiki sovremennoy biotekhnologii: materialy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. SPb.: Izd-vo Leningradskogo gosudarstvennogo universiteta im. A.S. Pushkina, 2015, pp. 87–93.

Yeremeyeva N.B. *Metody issledovaniya pishchevykh produktov: uchebnoye posobiye* [Methods of food research: textbook]. SPb.: NIU ITMO, 2022, 131 p.

Zemlyanova V.Ye., Zhavkina T.M., Pomogaybin A.V., Kavelenova L.M., Rodionova P.V., Rozno S.A., Yankov N.V., Potrakhov N.N. O vozmozhnostyakh ekspress-otsenki kachestva plodov i semyan drevesnykh rasteniy s pomoshch'yu rentgenograficheskogo skrininga [On the possibilities of express-assessment of the quality of fruits and seeds of woody plants using radiographic screening] // *EkoBioTekh 2021: materialy VII Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem.* Ufa, 04–07 oktyabrya 2021 goda. Ufa: Ufimskiy institut biologii – obosoblennoye strukturnoye podrazdeleniye FGBNU Ufimskogo federal'nogo issledovatel'skogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk, 2021, pp. 207–211.

Lisitsyn A.N., Fedorov A.V., Grigor'yeva V.N., Markov V.N., Domoroshchenkova M.L. Khraneniye i pererabotka maslichnogo syr'ya v sovremennykh usloviyakh [Storage and processing of oilseed raw materials in modern conditions] // *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zhirov*, 2023, no. 1–2, pp. 5–12.

Nekrasov V.I., Smirnova N.G. K ispol'zovaniyu rentgenograficheskogo metoda pri izuchenii razvitiya semyan introdutsiruyemykh drevesnykh rasteniy [To the use of X-ray method in studying the development of seeds of introduced woody plants] // *Byul. GBS RAN*, 1961, no. 43, pp. 47–52.

Ovsyannikova O.V., Frantseva T.P. *Vliyaniye usloviy khraneniya semyan podsolnechnika na ekologicheskuyu bezopasnost' i stoykost' masel k okisleniyu: monografiya* [The influence of sunflower seed storage conditions on the environmental safety and oxidation resistance of oils: monograph]. SPb.: Lan', 2022, 108 p.

Podvigina O.A., Potrakhov N.N., Staroverov N.Ye., Potrakhov Yu.N. Rentgenograficheskiy metod otsenki kachestva semyan sakharnoy svekly [Radiographic method for assessing the quality of sugar beet seeds] // *Nanotekhnologii: razrabotka, primeneniye-XXI vek,* 2021, vol. 13, № 2, pp. 51–65.

Stepuro M.V., Lobanov V.G. Fosfor v semenakh podsolnechnika [Phosphorus in sunflower seeds] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Pishchevaya tekhnologiya*, 2009, no. 2–3, pp. 123–124.

Tsvetkov M.V., Podlesnyy D.N., Zaychenko A.Yu., Salganskaya M.V., Tsvetkova Yu.Yu., Freyman V.M., Salganskiy Ye.A. Plavkost' zoly otkhodov rasteniyevodstva v usloviyakh vysokotemperaturnoy pererabotki [Melting behavior of crop waste ash under conditions of high-temperature processing] // *Zhurnal prikladnoy khimii*, 2021, vol. 94, no. 3, pp. 371–379.

Evert R.F. Anatomiya rasteniy Ezau. Meristemy, kletki i tkani rasteniy: stroyeniye, funktsii i razvitiye: monografiya [Ezau Plant Anatomy. Meristems, cells and tissues of plants: structure, functions and development: monograth]. M.: Laboratoriya znaniy, 2015, 603 p.

Simak M., Gustafsson Å. X-ray photography and sensitivity in forest tree species // Hereditas, 1953, vol. 39, no. 3–4, pp. 458–468.

Stant M.Y. The role of the scanning electron microscope in plant anatomy // Kew Bulletin, 1973, no. 28 (1), pp. 105–115.

Willan R.L. A guide to forest seed handling: with special reference to the tropics. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1986, 392 p.