



Biogeosystem Technique

Issued since 2014.

E-ISSN 2413-7316
2024. 11(1). Issued 2 times a year

EDITORIAL BOARD

Editors in Chief

Cerdà Artemi – University of Valencia, Spain
Kalinichenko Valery – Institute of Soil Fertility of South Russia, Persianovsky, Russian Federation

Deputy Editor in Chief

Ghazaryan Karen – Yerevan State University, Yerevan, Armenia

Blagodatskaya Evgeniya – Institute of Physical Chemical and Biological Problems of Soil Science of the Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russian Federation

Elizbarashvili Elizbar – Iakob Gogebashvili Telavi State University, Telavi, Georgia

Glazko Valery – Moscow agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Russian Federation

Lisetskiy Fedor – Belgorod State University, Russian Federation

Minkina Tatiana – Southern Federal University, Russian Federation

Kizilkaya Ridvan – Ondokuz Mayis Üniversitesi, Samsun, Turkey

Okolelova Alla – Volgograd State Technical University, Russian Federation

Shein Evgeny – Moscow State University named M.V. Lomonosov, Russian Federation

Srivastava Sudhakar – Banaras Hindu University, Varanasi, India

Swidzinski Alexander – Molecular Genetic Laboratory for Polymicrobial Infections und Biofilms, Charite University Hospital, Berlin, Germany

Rajput Vishnu – Academy of Biology and Biotechnology, Rostov-on-Don, Russian Federation

Surai Peter – Feed-Food.ltd, Scotland, UK

Zhao Xionghu – China University of Petroleum, Beijing, China

Journal is indexed by: **Cross Ref** (USA), **Electronic scientific library** (Russia), **MIAR** (Spain), **Open Academic Journals Index** (USA), **CiteFactor – Directory of International Research Journals** (Canada).

All manuscripts are peer reviewed by experts in the respective field. Authors of the manuscripts bear responsibility for their content, credibility and reliability.

Editorial board doesn't expect the manuscripts' authors to always agree with its opinion.

Postal Address: 1717 N Street NW, Suite 1, Washington, District of Columbia 20036 Release date 25.06.2024 Format 21 x 29,7/4.

Website: <https://bgt.cherkasgu.press>
E-mail: kalinitch@mail.ru

Founder and Editor: Cherkas Global University Order № B-25.

© Biogeosystem Technique, 2024

Biogeosystem Technique

2024

Is. 1

Articles

Soil Erosion in Desert Region and Its Impact on Meliorative Condition G.M. Nabiyeva, N.A. Nurgaliev	3
The Study of Pathogenic Factors in Grain Raw Materials S.N. Mikhaleva, L.N. Ulyanenko, Yu.V. Zueva, M.A. Sevostyanov, D.A. Valiullina, P.P. Mukovoz, D.V. Demin, L.R. Valiullin, M.G. Baryshev, J.L. Hernandez-Caceres, W. Xiao, Z.A. Jabbarov, N. Patel, P. Kováčik, B. A. Wiłkomirski	14
Application of Digital Correlation-Spectral Analysis for Identification, Classifiaktion and Separation of Plant Roots and Plant Root Tissues: Simple Low-Cost Alternatives for Laser Diffractometer Based 2D FFT Pattern Recognition Techniques F.K. Orekhov, N.A. Rubtsova	27

Copyright © 2024 by Cherkas Global University



Published in the USA
Biogeosystem Technique
Issued since 2014.
E-ISSN: 2413-7316
2024. 11(1): 3-13

DOI: 10.13187/bgt.2024.1.3
<https://bgt.cherkasgu.press>



Articles

Soil Erosion in Desert Region and Its Impact on Meliorative Condition

Gulchekhra M. Nabiyeva ^a, Najmiddin A. Nurgaliev ^{a,*}

^a National university of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek, Tashkent, Uzbekistan

Paper Review Summary:

Received: 2024, March 21

Received in revised form: 2023, June 11

Acceptance: 2023, June 18

Abstract

This article presents the research on the deterioration of soil properties under the influence of wind erosion in the "Todakol massivi" in the northern part of Qorovulbazar district of Bukhara region. In particular, the effects of natural stress factors on the growth and development of pasture plants such as white haloxylon (*Haloxylon persicum L.*), black haloxylon (*Haloxylon aphyllum L.*), sagebrush (*Artemisia tenuisecta L.*), tamarisk (*Tamarix hispida L.*), harmel (*Peganum harmala L.*), seta (*Salsola sclerantha L.*), alhagi (*Alhagi sparsifolia L.*), sagebrush (*Salsola arbuscula L.*), black redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus L.*), sedges (*Carex physodes L.*), downy brome (*Bromus tectorum L.*), barley (*Eremopyrum Orientale L.*), salty crabgrass (*Aeluropus litoralis L.*), alhagi (*Alhagi psudoalhagi L.*), which are widespread in the region, are highlighted. In particular, soil erosion due to the wind in the area and the amount of easily soluble salts in water were determined and analyzed.

Keywords: wind erosion, desertification, soil degradation, soil pollution, soil salinity, flora.

1. Introduction

In recent years, soil pollution, increased salinization and desertification, water and wind erosion have affected the loss of the fertile soil layer. Such processes are clearly felt as a result of the soil spread in the basins of the Zarafshan River and anthropogenic effects on them (Karimov et al., 2021; Namazov, Amonov, 2019; Jabborova et al., 2023). The experience of using remote sensing services of soil and vegetation cover in arid regions has been widely used, including in 2020 and 2021, unfavorable weather and unscientific use of pasture lands caused the rise of dust storms, which resulted in the sand cover of pastures and accelerated the degradation process (Biorslanov et al., 2021, Shinkarenko et al., 2021). Analysis of modern desertification dynamics using geo-information technologies and aerospace data has shown that the area of degraded and desert lands in the region is increasing due to the influence of human factors (Kulik et al., 2020).

* Corresponding author

E-mail addresses: nurgaliyev@mail.ru (A.N. Najmuddin)

Desertification and degradation of drylands have been studied through years of research to quantify the desertification process ([Lazareva et al., 2020](#)).

In recent years, the degradation processes of sandy desert grasslands have become a serious problem in some regions. This process depends on several factors. Quantitative assessment, the effects of the degradation processes of arid windy sandy areas on soil properties and their changes have been studied ([Ma et al., 2022; Abdullaev, Nomozov, 2024](#)). Effects on desert soils resulted in reductions in soil microbial biomass, enzyme activity, and nematodes ([Yang et al., 2018; Jabbarov et al., 2024](#)). Dunes were formed as a result of wind erosion in desert regions where vegetation is sparse ([Zang et al., 2018](#)).

In recent years, as a result of sudden changes in climate, the level of soil and vegetation degradation in the sandy desert areas has reached 35.7 %, and it has been determined that the current state of grassland ecosystems in the Kyzylkum desert will undergo serious changes ([Yusupov et al., 2010](#)). The condition of grassland ecosystems in the sandy desert massif was comprehensively evaluated, and according to the research results, the development of degradation processes and the loss of natural fertility were observed as a result of irregular use of pastures ([Bayrakov, 2012; Jabbarov et al., 2024](#)). In the desert zone, pastures, which are being excessively lost due to long-term monitoring of their land, occupy a small part of the Caspian lowland ([Mashtikov, 2018, 2021](#)). Biodiversity has been significantly damaged by changes in soil properties in the desert region by disrupting the water requirements of plants ([Tashninova, 2018; Djapova et al., 2019](#)). The process of desertification is active in various regions and is considered a major problem in changing the soil and vegetation cover ([Badmaeva et al., 2019](#)).

FAO and UNESCO organizations have studied the desert region into several groups and named them as gray-brown, barren, sandy desert soils ([Pankova, Gerasimova, 2012](#)). In the Bukhara oasis, scientists conducted extensive research on the formation of desert soils, the hydrogeological regime of their origin, climate, and soils ([Shadieva et al., 2021](#)). In order to study the degradation of sandy desert soils, their distribution, mechanical composition, humus content, presence of total and mobile nutrients in the soil, salinity level were studied ([Sattorova, Turaeva, 2022; Abdrahmanov et al., 2024](#)).

Based on research conducted in desert areas, it is scientifically proven that various ecological problems and changes in vegetation cover are caused by relief features, soil-forming rocks, and moisture conditions ([Shulgina et al., 2018; Kalibekova, Kojabergenova, 2021; Abdrahmanov et al., 2024](#)).

It has been scientifically proven that the soils of the desert zone located in different regions of Kazakhstan differ in terms of regional climate characteristics, morphogenetic and chemical properties of soils, organic substances in their composition, and their group composition ([Razakov et al., 2019; Jarnikova, Alimbaeva, 2018](#)). The formation processes of sandy desert soils, the formation of soils, their specific water regime and capillarity create a specific water regime ([Khodorov et al., 2023; Valeysha, 2020](#)). It has been found that plants in desert soils are severely damaged by wind erosion ([Turdaliyev et al., 2022](#)). In the desert region, the reduction of vegetation as a result of degradation leads to the activation of soil salinization ([Neronov, 2018; Jabbarov et al., 2023](#)).

2. Study area

The research was carried out in the "Todakol massif" in the northern part of Qorovulbazar district of Bukhara region. This area is mainly degraded and used as pasture, hilly semi-fortified sandy desert and alluvial-proluvial and lacustrine deposits ([Figure 1](#)).

Qorovulbazar district of Bukhara region was established on January 12, 1993. This district borders with Bukhara district in the north, Mubarak district of Kashkadarya region in the south, Olot district in the west, and Kyzyltepa district of Navoi region in the east. The relief consists of low and high hills, divided by old riverbeds. The total area of the district is 219,580 hectares.

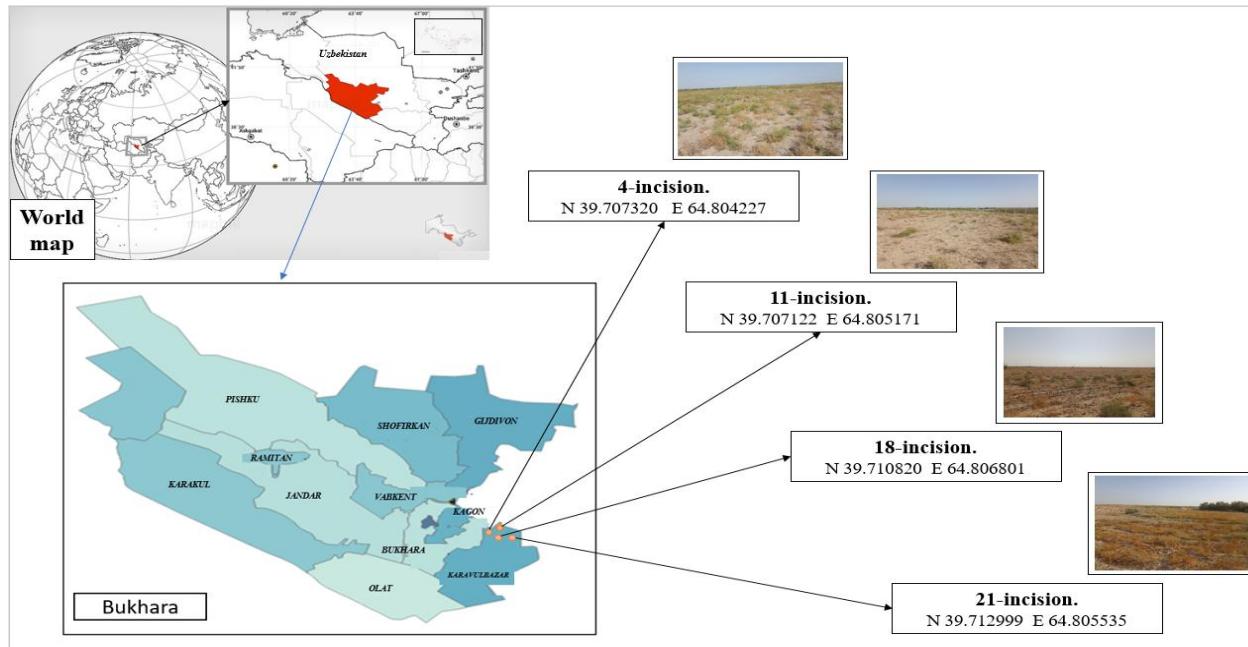


Fig. 1. Geographic location coordinates of the research area , 2024

3. Materials and methods

3.1. Flora distributed in the study area

The geographical distribution of plants in the research area is divided into two groups: that is, plants distributed in sandy desert and irrigated areas. Grasslands are the main part of the plants scattered in the sandy deserts of the oasis. These plants also protect the soil from wind erosion. Their vegetation period is short, 210–215 days plants such as white haloxylon (*Haloxylon persicum* L.), black haloxylon (*Haloxylon aphyllum* L.), sagebrush (*Artemisia tenuisecta* L.), tamarisk (*Tamarix hispida* L.), harmel (*Peganum harmala* L.), seta (*Salsola sclerantha* L.), alhagi (*Alhagi sparsifolia* L.), sagebrush (*Salsola arbuscula* L.), black redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus* L.), sedges (*Carex physodes* L.), downy brome (*Bromus tectorum* L.), barley (*Eremopyrum Orientale* L.), salty crabgrass (*Aeluropus litoralis* L.), alhagi (*Alhagi psudoalhagi* L.) are common (Figure 2).



Fig. 2. Plant species distributed in the study area

Note: (A)- alhagi *Alhagi sparsifolia* L., (B)-harmel *Peganum harmala* L., (C) – black haloxylon *Haloxylon aphyllum* L., (D)-tamarisk *Tamarix hispida* L.

Currently, 528 unique species of plants can be found in the Bukhara oasis. These plants are common in oasis desert, sandy desert and irrigated areas. 220 types of weeds were found among agricultural crops in irrigated fields. Among them, there are 89 species with a wide geographic distribution specific to this ecological environment (Gafurova et al., 2020).

3.2. Soils distributed in the study area

Different soil covers are found in the territory of Bukhara oasis, which is directly related to the low location of the area, the complex structure of the earth's surface, the variety of soil-forming rocks, climatic conditions, the character of the flora and human activities. Subsoils are not compacted, have good water permeability, and have varying degrees of salinity. The main part of

the territory is occupied by the desert region. The soils are sandy desert grassland and grassy desert soils, and their deep layers are mainly covered with humus deposits containing quaternary sediments (Artikova, 2019). Sandy desert soils are different from other types of soils, they are automorphic soils, groundwater is very deep, they are distributed in the deltas of subaerial rivers in the Karakum and Kyzylkum regions of Central Asia, and ancient alluvial and marine deposits are considered the parent rock. Such soils are distributed in Fergana, Kyzylkum, Karshi, Sherabad, Bukhara, Khorezm and Aral regions. The parent rock is of great importance in the process of soil formation. This process has a number of unique important features, as a result of this process, new substances are formed depending on the composition of the initial parent rock that forms the soil. According to the morphological structure of the soil of the study area, it is sandy desert soil, consolidated sand, sandy land with sparse vegetation covers very large areas. They belong to weakly saline soils, and due to the complexity of the terrain and the composition of scattered sands, they cause difficulties for development (Table 1).

Table 1. Morphological classification of soil layers of the study area

Soil cross section number	Section depth	Morphological classification
Cross section 4	0-28	Light gray, dry, sandy, with a soft, fine powdery structure, small roots are found in small quantities, there are no salt spots, the transition is according to the clear structure.
	28-48	Light gray, dry, weakly compacted, sand, small amount of fibrous rootstocks, low moisture, few salt points, transition gradually according to the structure.
	48-71	It consists of light clay sometimes gray, dry, sandy, loose sand, moderately compacted, small amount of salt spots, moisture is present, small calcareous stones are very rare, hairy rhizomes of flowing color are found, the transition is gradual.
	71-93	Light yellowish gray, sandy, moderately compacted, loose sand, hairy rootlets occur, moisture present, carbonates punctate and veined, transition gradual.
	93-131	The flow is gray, dry, sandy, moderately compacted, floury gypsum fragments and small CO ₂ concretions are present, moisture is present, calcareous stones are present but very few, transition is noticeable.
Cross section 11	0-25	Light gray, sometimes runny, dry, sand has a soft powdery structure, granular rhizomes are found in small quantities, there are no salts, the transition is clear in structure.
	25-52	Light gray, dry, weakly compacted, sandy, with a small amount of filamentous rhizomes, consisting of loose sand, with a small amount of moisture, with a small amount of salt spots, the transition is gradual in structure
	52-83	Consisting of light gray sometimes gray, dry, scattered sand, moderately compacted, few salt spots, moisture present, small pebbles few, oozing hairy rhizomes few, sparse salt spots, gradual transition in texture
	83-115	Light yellowish-gray sand, moderately compacted, with hairy roots, loose sand, carbonates punctate and veined, moisture present, transition slow.
	115-140	The flow is gray, dry, sandy, moderately compacted, floury gypsum fragments and small CO ₂ concretions are present, moisture is present, calcareous stones are present but very few, transition is noticeable.
Cross section 18	0-15	Light gray, sometimes tinged, dry, the sand is soft powdery, granular roots are found, there are no salts, the transition is according to the clear structure.

Soil cross section number	Section depth	Morphological classification
Cross section 21	15-32	Light gray, dry, weakly compacted, sand, small amount of fibrous roots, small amount of dusty salt spots, gradual transition in structure.
	32-55	It consists of light clay-colored sometimes gray, dry, sandy, moderately compacted, loose sand, small amount of salt spots, small amount of moisture, small calcareous stones, small amount of hairy rootlets, transition is gradual.
	55-83	Light yellowish-gray, sandy, moderately compacted, scattered sands, hairy rootlets are found, moisture is present, carbonates are punctate and veined, transition is gradual.
	83-125	The flow is grey, dry, sandy, moderately compacted, flocculent gypsum flakes and small CO ₂ concretions are present, moisture is present, calcareous stones are present but very few, transition is noticeable.
Cross section 21	0-18	Light gray, sometimes tinged, dry, sand is soft powdery, granular roots are found, salts are not present, the transition is by clear structure.
	18-38	Light gray, dry, weakly compacted, sand, small amount of fibrous roots, small amount of dusty salt spots, gradual transition in structure.
	38-47	It consists of light clay-colored sometimes gray, dry, sandy, moderately compacted, loose sand, small amount of salt spots, small amount of moisture, small calcareous stones, small amount of hairy rootlets, transition is gradual.
	47-78	Light yellowish-gray, sandy, moderately compacted, scattered sands, hairy rootlets are found, moisture is present, carbonates are punctate and veined, transition is gradual.
	78-108	The flow is grey, dry, sandy, moderately compacted, flocculent gypsum flakes and small CO ₂ concretions are present, moisture is present, calcareous stones are present but very few, transition is noticeable.

Sandy desert soils distributed in the desert region have their own morphological and genetic characteristics. Sandy desert soils are formed on sand, according to the origin of sand, it is divided into alluvial and parent rock sand. Alluvial sands were formed from the modern deposits of the Zarafshan River. One of the characteristics of irrigated sandy desert soils is the weak expression of genetic layers on the outside. One of the unique features of these soils is the low amount of carbonate and the absence of silt formation in the upper layer. All processes taking place in the soil are related to their mechanical composition. According to the mechanical composition of the soil, the research area is light, medium and heavy sand, and some places are sandy loam ([Gafurova et al., 2020](#)).

3.3. Laboratory analysis methods

In the study of the properties of degraded sandy desert soils distributed in the Todakul massif of the Qorovulbazar district of Bukhara region, the generally accepted profile in soil science was studied on the basis of methods such as genetic, morphological, comparative geographical, and on the basis of methods generally accepted in laboratory conditions. V. Sayfutdinova's study guide was used to take soil samples and determine the amount of water-soluble cations and anions in the soil ([Sayfutdinova, 1992](#)).

The following work was carried out under field conditions:

- Studies were carried out on the study of the natural geographical location, soil cover, distribution of vegetation, and ecological conditions of the research area;
- Studies of climate conditions and drought level of the research area were carried out;
- Work was carried out to study the effect of wind erosion on the soils of the research area;
- Soil samples were taken from the research area;
- In order to improve the degraded soils of the research area, artificial planting of desert pasture plants was carried out;

- To improve the degraded soils of the research area, field experiments were conducted using eco-gumin organic fertilizer and hydrogel polymer substance on desert pasture plants;
- The number of naturally distributed pasture plants in the research area was calculated using the 4x100 transect method.

Soil analyzes were carried out in the following ways:

- Determination of soil salinity types according to Yu.P. Lebedev's classification;
- Determination of soil salinity according to O.K.Komilov, A.U.Akhmedov classification;
- Chlorine ion according to Mor's method;
- Dry residue based on evaporation of the solution and weighing of the precipitate;
- Correlation coefficient was performed in Microsoft Excel program and statistical analysis of obtained results was performed in Excel STAT interface.

4. Results and discussion

4.1. Indicators of soil deflation in the study area under the influence of wind

Today, desertification and land cover degradation caused by climate change is one of the major problems around the world. The desertification causes the formation and evolution of sandy soils, especially in areas with limited water resources. This is typical in many areas of the Bukhara region. In the Bukhara region, the soil fertile upper part is blown away in a deflation process under the influence of the wind. According to the information of the Hydrometeorological Service Center of the Republic of Uzbekistan, it was observed that during the period of 2012-2022, due to the influence of wind erosion, soil particles with a size of 0.25 mm were regularly eroded by wind ([Table 2](#)).

Table 2. Variation of wind speed and erosion rates of sandy desert soils in the study area (Hydrometeorological Service Center of the Republic of Uzbekistan, 2023)

No	Year	Maximum wind speed, m/s	Erodible soil particles, mm	Average wind speed, m/s	Erodible soil particles, mm
1	2012	15.8	0.25; 0.25-0.5; 0.5-1.0; 1-2; 2-3	3.3	0.25
2	2013	16.6	0.25; 0.25-0.5; 0.5-1.0; 1-2; 2-3	3.3	0.25
3	2014	15.6	0.25; 0.25-0.5; 0.5-1.0; 1-2; 2-3	3.2	0.25
4	2015	16.0	0.25; 0.25-0.5; 0.5-1.0; 1-2; 2-3	3.3	0.25
5	2016	17.0	0.25; 0.25-0.5; 0.5-1.0; 1-2; 2-3	3.1	0.25
6	2017	17.3	0.25; 0.25-0.5; 0.5-1.0; 1-2; 2-3	3.3	0.25
7	2018	16.9	0.25; 0.25-0.5; 0.5-1.0; 1-2; 2-3	3.5	0.25
8	2019	15.4	0.25; 0.25-0.5; 0.5-1.0; 1-2; 2-3	3.4	0.25
9	2020	16.8	0.25; 0.25-0.5; 0.5-1.0; 1-2; 2-3	3.2	0.25
10	2021	17.2	0.25; 0.25-0.5; 0.5-1.0; 1-2; 2-3	3.4	0.25
11	2022	16.6	0.25; 0.25-0.5; 0.5-1.0; 1-2; 2-3	3.3	0.25

According to the results of the analysis, the maximum wind speed of the soils in the study area varied by 0.3-2.3 m/s between 2012 and 2022. The wind speed index increased, which led to an increase in the wind erosion. Therefore, in the last 11 years in the study area, it was found that

0.25; 0.25-0.5; 0.5-1.0; 1-2; 2-3 mm particles in the soil were eroded, 0.25 mm particles in the soil were eroded at the average speed of the wind.

4.2. The amount of easily soluble salts in the soils of the study area

Various salts in the soil have a negative effect on the growth and development of plants. As a result of an increase in the amount of salt in the soil, an increase in soda, chloride and sulfates in it, the quality of the soil deteriorates, its productivity decreases and the degradation processes increase. In this regard, in order to determine the soil mineralization in the scientific research area, the samples taken from the soil sections were analyzed in laboratory conditions using the methods that passed the state standards (Table 3).

Table 3. The amount of easily soluble salts in the soil of the study area

Layer thickness, cm	Dry residue, %	HCO ₃	Cl-	SO ₄ ²⁻	Ca ⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	Salinity	
								Type	Degree
Section 1									
0-28	0.118± 0.2	0.037± 0.02	0.016±0 .03	0.022± 0.02	0.003± 0.002	0.002± 0.001	0.018± 0.02	ch. s	weakly saline
28- 48	0.116± 0.3	0.035± 0.03	0.015±0 .02	0.018± 0.01	0.008±0. 001	0.002±0. 002	0.017± 0.03	ch. s	
48- 71	0.115± 0.2	0.034± 0.04	0.016± .01	0.020± 0.03	0.009± 0.001	0.004± 0.001	0.012± 0.02	ch. s	
71- 93	0.176± 0.4	0.030± 0.03	0.018± .02	0.026± 0.02	0.056± 0.002	0.005± 0.001	0.021± 0.03	ch. s	
93- 131	0.131± 0.2	0.035± 0.02	0.022± 0.03	0.026± 0.04	0.002± 0.001	0.004± 0.002	0.023± 0.04	ch. s	
Section 11									
0-25	0.125± 0.3	0.035± 0.02	0.015± .04	0.024± 0.02	0.008± 0.001	0.002± 0.001	0.020± 0.02	ch. s	weakly saline
25- 52	0.115± 0.2	0.036± 0.03	0.017± .02	0.019± 0.03	0.009± 0.002	0.004± 0.002	0.011± 0.01	ch. s	
52- 83	0.122± 0.4	0.034± 0.02	0.018± .03	0.021± 0.01	0.011± 0.01	0.004± 0.001	0.014± 0.02	ch. s	
83- 115	0.150± 0.3	0.034± 0.03	0.021± .02	0.026± 0.02	0.025± 0.02	0.004± 0.002	0.021± 0.03	ch. s	
115- 140	0.169± 0.2	0.032±0 .02	0.018± .04	0.026± 0.03	0.046± 0.03	0.005± 0.002	0.022± 0.02	ch. s	
Section 18									
0-15	0.127± 0.2	0.037± 0.04	0.018± .02	0.024± 0.03	0.008± 0.002	0.002± 0.001	0.018± 0.02	ch. s	weakly saline
15- 32	0.128± 0.3	0.037± 0.02	0.024± .03	0.018± 0.02	0.011± 0.02	0.003± 0.001	0.016± 0.03	s.c h	
32- 55	0.118± 0.2	0.035± 0.03	0.015± .02	0.020± 0.03	0.009± 0.002	0.004± 0.002	0.015± 0.02	ch. s	
55- 83	0.152± 0.3	0.034± 0.02	0.023± 0.03	0.026± 0.01	0.021± 0.02	0.005± 0.003	0.023± 0.03	ch. s	

Layer thickness, cm	Dry residue, %	HCO_3	Cl^-	SO_4^{--}	Ca^{++}	Mg^{++}	Na^+	Salinity	
								Type	Degree
83-125	0.190±0.4	0.030±0.03	0.018±0.01	0.024±0.02	0.071±0.03	0.005±0.002	0.022±0.01	ch.s	
Section 21									
0-18	0.139±0.2	0.034±0.02	0.016±0.02	0.036±0.02	0.012±0.02	0.002±0.001	0.019±0.02	ch.s	weakly saline
18-38	0.117±0.4	0.037±0.03	0.019±0.01	0.018±0.03	0.008±0.001	0.002±0.001	0.013±0.01	s.ch	
38-47	0.133±0.3	0.035±0.02	0.025±0.02	0.020±0.01	0.009±0.002	0.004±0.002	0.019±0.02	s.ch	
47-78	0.174±0.2	0.030±0.04	0.018±0.03	0.026±0.02	0.053±0.03	0.005±0.003	0.022±0.03	ch.s	
78-108	0.188±0.3	0.030±0.02	0.018±0.02	0.026±0.03	0.066±0.02	0.005±0.002	0.023±0.02	ch.s	

Notes: (ch.s) – Chloride sulfate, (s.ch) Sulphate chloride. The results of the laboratory analysis were carried out in 3 repetitions and the average values were obtained

In the northern part of the Qorovulbazar district of Bukhara region, the total soil dry residue content fluctuated between $0.115\pm0.2\%$ and $0.190\pm0.4\%$ according to the amount of easily soluble salts in the soil layers. The 21st soil cross section with the highest amount of dry residue was considered. The amount of HCO_3 in terms of total alkalinity was from $0.030\pm0.04\%$ to $0.037\pm0.03\%$. Among the anions distributed in this cross section, a Cl^- ion content was from $0.016\pm0.02\%$ to $0.025\pm0.02\%$, a SO_4^{--} ion content was from $0.018\pm0.03\%$ to $0.036\pm0.02\%$. According to the amount of cations, it was determined that a Ca^{++} ion content fluctuated from $0.008\pm0.001\%$ to $0.066\pm0.02\%$, a Mg^{++} ion content ranged from $0.002\pm0.001\%$ to $0.005\pm0.003\%$, and a Na^+ ion content was from $0.019\pm0.02\%$ to $0.023\pm0.02\%$. The soil salinity degree was determined to be weakly saline and chloride-sulfate (ch.s) and sulfate-chloride (s.ch) types according to the type of salinity.

The amount of dry residue was determined at least in the 4th cross section. The amount of dry residue fluctuated between $0.115\pm0.2\%$ and $0.131\pm0.2\%$ in the layers. According to the total alkalinity, the amount of HCO_3 was from $0.030\pm0.03\%$ to $0.037\pm0.02\%$. Among the anions distributed in this section, a Cl^- ion content was from $0.015\pm0.02\%$ to $0.022\pm0.03\%$, a SO_4^{--} ion content was from $0.018\pm0.01\%$ to $0.026\pm0.02\%$. According to the amount of cations, it was determined that a Ca^{++} ion content oscillated from $0.002\pm0.001\%$ to $0.056\pm0.002\%$, a Mg^{++} ion content was from $0.002\pm0.001\%$ to $0.005\pm0.001\%$, and a Na^+ ion content was from $0.012\pm0.02\%$ to $0.023\pm0.04\%$. The salinity degree is weakly saline, and according to the type of salinity, it was determined that all layers are of chloride-sulfate (ch.s) type.

5. Conclusion and recommendations

The analysis of the data over the years shows that the soil layers in the northern part of Qorovulbazar district of Bukhara region are exposed to increase in wind speed and as a result the erosion of soil particles is one of the main factors that reduce soil fertility. In overcoming the soil erosion, the force of the wind can be reduced by planting trees and shrubs. These measures can be effective in maintaining soil fertility and preventing wind erosion.

According to the degree of salinity, it was determined that the soils are weakly saline, and the type of salinity belongs to chloride sulfate (ch.s) and sulfate chloride (s.ch) types. These results indicate that the soils in the area are in the early stages of the salinization process, and the composition and amount of salts may have a negative impact on soil fertility. Therefore, it is necessary to take these factors into account when carrying out agricultural activities on the soils of the area. Special agrotechnical measures are required to take additional reclamation measures and increase soil fertility.

References

- [Abdrahmanov et al., 2024](#) – Abdrahmanov, T., Jabbarov, Z.A., Mahammadiyev, S.Q., Fayzullayev, O., Abdullaev, Sh.Z., Yagmurova, D.A. (2024). Mechanical properties of soil-grunts formed in the dry bottom of the Aral Sea. Zenodo. 1. DOI: <https://doi.org/10.5281/ZENODO.12507402>
- [Abdrahmanov et al., 2024](#) – Abdrakmanov, T., Jabbarov, Z., Fayzullaev, O., Abdullaev, S., Shomurodova, K. (2024). Chemical and agrochemical properties of soil-grunts formed in the dry bottom of the Aral Sea. Zenodo. 1. DOI: <https://doi.org/10.5281/ZENODO.12531202>
- [Abdullaev, Nomozov, 2024](#) – Abdullaev S., Nomozov U. (2024). A biochar product can enhance soil fertility during drought conditions / 5th International Istanbul Current Scientific Research Congress. Zendo. 1. DOI: <https://doi.org/10.5281/ZENODO.11032960>
- [Artikova, 2019](#) – Artikova, H.T. (2019). Evolution, ecological status and fertility of the soils of the Bukhara oasis / Dissertation written for the degree of Doctor of Science. Toshkent. Pp. 56-60.
- [Badmaeva et al., 2019](#) – Badmaeva, N.V., Sangadjiev, M.M., Erdniev, O.V., Dordjiev, M.V. (2019). Deserts in Kalmykia: Impact on the Natural Environment. *Security in the Globalization of the World*. Elista, 19-20 December. Pp. 79-86.
- [Bayrakov, 2012](#) – Bayrakov, I.A. (2012). Degraded pasture ecosystems. *Geology, geography and global energy*. 4(47): 165-170.
- [Biarslanov et al., 2021](#) – Biarslanov, A.B., Zalibekov, Z.G., Gasanova, Z.U. (2021). Magomedova M.X., Gadjiev I.R. Experiment on the use of a vegetative index in long-term studies of the dynamics of soil cover productivity in the Terek-Kumskoy lowlands. *Biological sciences*. 4: 81-89. DOI: [10.18522/1026-2237-2021-4-81-89](https://doi.org/10.18522/1026-2237-2021-4-81-89)
- [Djapova et al., 2019](#) – Djapova, V.V., Gavina, A.N., Martishkina, V.V., Xaglishova, R.B. (2019). Formation of Kochia prostrata (L.) Schrad. in the desert zone of the Republic of Kalmykia. *Field Research*. 6: 21-30. DOI: [10.22162/2500-4328-2019-6-21-30](https://doi.org/10.22162/2500-4328-2019-6-21-30)
- [Gafurova et al., 2020](#) – Gafurova, L.A., Sharipov, O.B., Maxkamova, D.Yu. (2020). Biological activity of irrigated soils of Bukhara oasis and ways of their optimization. Toshkent. Pp. 31-32.
- [Gafurova et al., 2020](#) – Gafurova, L.A., Sharipov, O.B., Maxkamova, D.Yu. (2020). Biological activity of irrigated soils of Bukhara oasis and ways of their optimization. Toshkent. Pp. 39-40.
- [Jabbarov et al., 2023](#) – Jabbarov, Z.A., Imomov, O.N., Nomozov, U.M. (2023). Effect of Improvement Drug on Chemical Degradation of Soils. *International Journal of Biological Engineering and Agriculture*. e2(10): 3-5.
- [Jabbarov et al., 2024](#) – Jabbarov, Z., Abdurakhmanov, T., Sultonova, N., Abdullaev, S., Nomozov, U., Cabelkova, I., & Smutka, L. (2024). Soil contamination and changes in some properties of the soils scattered around the Almalyk mining and metallurgical combine. *E3S Web of Conferences*. 508: 07001. EDP Sciences. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450807001>
- [Jabbarov et al., 2024](#) – Jabbarov, Z., Fakhrutdinova, M., Imomov, O., Abdullaev, S. (2024). Assessment of changes in indicators of chemically degraded soil through soil health and quality indicators. 1ST International Conference on Natural Resource Management and Environmental Sustainability for Future Generations. Zenodo. DOI: <https://zenodo.org/doi/10.5281/zenodo.12194947>
- [Jabborova et al., 2023](#) – Jabborova, D., Abdurakhmanov, T., Jabbarov, Z., Abdullaev, Sh., Azimov, A., Mohamed, I., AlHarbi, M., Abu-Elsaoud, A., Elkelish, A. (2023). Biochar improves the growth and physiological traits of alfalfa, amaranth and maize grown under salt stress. *PeerJ*. 11:e15684. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj.15684>

- Jarnikova, Alimbaeva, 2018 – Jarnikova, M.A., Alimbaeva, J.B. (2018). Phytogeographical features and conditions of steppe communities in Mongolia (Based on the model polygon "Mandalgobi"). *Buryat State University Bulletin. Biology. Geography.* 46-56. DOI: 10.18101/2587-7143-2018-2-46-56
- Kalibekova, Kojabergenova, 2021 – Kalibekova, J.T., Kojabergenova, A.B. (2021). Biodiversity of the flora of the Kokzhide sands. *Vavilov readings. November 24-25:* 94-99.
- Karimov et al., 2021 – Karimov, M., Namozov, N., Teshaboev, B. (2021). Agrochemical properties of degraded desert sandy soils of Uzbekistan. XXII International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies. Pp. 1-5. DOI: doi.org/10.1051/e3sconf/202124402025
- Kholdorov et al., 2023 – Kholdorov, S., Lakshmi, G., Jabbarov, Z. et al. (2023). Analysis of Irrigated Salt-Affected Soils in the Central Fergana Valley, Uzbekistan, Using Landsat 8 and Sentinel-2 Satellite Images, Laboratory Studies, and Spectral Index-Based Approaches. *Eurasian Soil Sc.* 56: 1178-1189. DOI: https://doi.org/10.1134/S1064229323600185
- Kulik et al., 2020 – Kulik, K.N., Petrov, V.I., Yuferev, V.G., Tkachenko, N.A., Shinkarenko, S.S. (2020). Geoinformation analysis of the deforestation of the northwestern Caspian Sea. *Arid ecosystems.* 26. 2(83): 16-24. DOI: 10.24411/1993-3916-2020-10091
- Lazareva et al., 2020 – Lazareva, V.G., Bananova, V.A., Nguen, V.Z. (2020). Dynamics of modern vegetation during pastoral use in northwestern agriculture. *Arid ecosystems.* 26. 4(85): 26-34. DOI: 10.24411/1993-3916-2020-10115
- Ma et al., 2022 – Ma, J., Qin, J., Ma, H., Zhou, Y., Shen, Y., Xie, Y., & Xu, D. (2022). Soil characteristic changes and quality evaluation of degraded desert steppe in arid windy sandy areas. *PeerJ.* 10. e13100. DOI: 10.7717/peerj.13100
- Mashtikov, 2018 – Mashtikov, K.V. (2018). Changes in pasture vegetation of the desert zone of the Republic of Kalmykia. *Vestnik of the Institute.* 2(37): 22-29. DOI: 10.24411/2071-7830-2018-10016
- Mashtikov, 2021 – Mashtikov K.V. (2021). Comparative characteristics of the species composition of pasture plant communities in the desert zone. *Vestnik of the Institute.* 1(42): 36-44. DOI:10.24412/2071-7830-2021-142-36-44.
- Namazov, Amonov, 2019 – Namazov, X.K., Amonov, O.S. (2019). Soil-improvement provisions of the Bukhra and Navoi regions. *Promovarea valorilor social-economice in contextual integrarii europene.* Pp. 345-353.
- Neronov, 2018 – Neronov, V.V. (2018). Transitional structure and sessional dynamics of plant communities during the cultivation of sand massifs in southern Kalmykia. *Botany in the modern world.* 2: 100-103.
- Pankova, Gerasimova, 2012 – Pankova, Ye.I., Gerasimova, M.I. (2012). Desert soils: development, soil-forming processes, classification. *Arid ecosystems.* 18 2(51): 5-16.
- Razakov et al., 2019 – Razakov, A.M., Gafurova, L.A., Sektimenko, V.Ye., Nabieva, G.M., Madrimov, R.M. (2019). Evolutionary-genetic aspects of soil formation of gray-brown soils of the desert zone of Uzbekistan and the possibilities of their use. *Soil Science and Agronomy.* 4: 45-57.
- Sattorova, Turaeva, 2022 – Sattorova, M.M., Turaeva, N.N. (2022). Genesis, expansion, plentiful land and agricultural use of sandy desert soils in the Bulgarian region. *Current issues of modern science.* 3: 51-56.
- Sayfutdinova, 1992 – Sayfutdinova, V. (1992). Practical exercises in soil chemistry. Study guide. Toshkent, Universitet Publishing.
- Shadieva et al., 2021 – Shadieva, N.Sh., Safarova, G.T., Rustamova, I.I. (2021). Hydrogeological regime of the Bukhara oasis. *Ekonomika i sotsium.* [Electronic resource]. URL: www.iupr.ru
- Shinkarenko et al., 2021 – Shinkarenko, S.S., Djamirzoev, G.S., Vasilchenko, A.A. (2021). Problems of depletion in the biosphere reserve Yunesko "Kizlyarskiy Zaliv". *Geograficheskiy Vestnik.* 4(59): 99-112. DOI: 10.17072/2079-7877-2021-4-99-112
- Shulgina et al., 2018 – Shulgina, S.V., Azarenok, T.N., Matichenkov, D.V., Matichenkova, O.V., Shibut, L.I., Didishko, S.V. (2018). Features of transformation of dernovo-podzolic soils of arable lands of Belarus under the influence of anthropogenic factors. *Soils in the biosphere. Collection of materials of the World Scientific Conference with international*

participation, dedicated to the 50th anniversary of the Institute of Soil Science and Agriculture SO RAN 10-14 September. Pp. 150-153.

[Tashninova, 2018](#) – Tashninova, A.A. (2018). Main types of soils of the Kalmiki suxosteppe pastures. *Northern steppes of Europe materials of the large international symposium. International Steppe Forum of the Russian Geographical Society.* Pp. 965-966.

[Turdaliyev et al., 2022](#) – Turdaliyev, A.T., Quldasheva, M.I., Shoxobidinov, A.Z. (2022). The problem is that the eroziyasini of the hospitable spirit of the people are not good enough. *Science and innovation international scientific journal.* 1(2181-3337): 189-197. DOI: doi.org/10.5281/zenodo.7338309

[Valeysha, 2020](#) – Valeysha, Y.F. (2020). *Geografiya pochv. Gorki BGSXA.* 207 p.

[Yang et al., 2018](#) – Yang, H., Liu, CH., Liu, Y., Xing, Z. (2018). Impact of human trampling on biological soil crusts determined by soil microbial biomass, enzyme activities and nematode communities in a desert ecosystem. *European Journal of Soil Biology.* 87: 61-71. DOI: doi.org/10.1016/j.ejsobi.2018.05.005

[Yusupov et al., 2010](#) – Yusupov, S.Yu., Rabbimov, A.R., Mukimov, T.X. (2010). The modern state of the Karakulevodcheskie pastbish Kizylkumov and their ways of rational use. *Arid ecosystems.* 6. 2(42): 38-46.

[Zang et al., 2018](#) – Zang, Ch., Shen, Y., Li, Q., Jia, W., Li, J., Wang, X. (2018). Sediment grain-size characteristics and relevant correlations to the aeolian environment in China's eastern desert region. *Science of The Total Environment.* 627: 586-599. DOI: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.270

Copyright © 2024 by Cherkas Global University



Published in the USA
Biogeosystem Technique
Issued since 2014.
E-ISSN: 2413-7316
2024. 11(1): 14-26



DOI: 10.13187/bgt.2024.1.14
<https://bgt.cherkasgu.press>

The Study of Pathogenic Factors in Grain Raw Materials

Svetlana N. Mikhaleva ^a, Lilia N. Ulyanenko ^a, Yulia V. Zueva ^a, Mikhail A. Sevostyanov ^a, Daria A. Valiullina ^a, Petr P. Mukovoz ^a, Dmitrii V. Demin ^a, Lenar R. Valiullin ^{a, b, *}, Mikhail G. Baryshev ^a, Jose L. Hernandez-Caceres ^c, Wei Xiao ^d, Zafarjon A. Jabbarov ^e, Nilanchal Patel ^f, Peter Kováčik ^g, Bogusław A. Wilkomirski ^h

^a All-Russian Research Institute of Phytopathology Bolshie Vyazemy, Russian Federation

^b Federal Center for Toxicological, Radiation and Biological Safety, Kazan, Russian Federation

^c Neurodevelopment Branch, Cuban Center for Neurosciences, La Habana, Cuba

^d Hunan Economic Geography Research Institute, Changsha, China

^e National University of Uzbekistan, Department of Soil Science, Tashkent, Uzbekistan

^f Birla Institute of Technology Mesra, Department of Remote Sensing, Jharkhand, India

^g Slovak University of Agriculture in Nitra, Slovak Republic

^h University of Warsaw and Jan Kochanowski University in Kielce, Poland

Paper Review Summary:

Received: 2024, May 23

Received in revised form: 2023, June 09

Acceptance: 2023, June 12

Abstract

Microscopic fungi are microorganisms commonly found in grain crops. They typically reproduce asexually with the formation of spores of various types. Most species also have sexual reproduction, but many mushrooms can exist without it for several generations. Spores of microscopic fungi can remain viable for a long time in dry and cold environments. Spores are spread passively by wind and rain, and insects can also serve as a transmission factor by carrying spores on their bodies. Insects increase the growth surface for mold fungi, breaking the outer protective shells of grains. In the presence of sufficient conditions for growth (temperature, humidity, etc.), micromycetes can reduce the nutritional value of grain products and release metabolites in food raw materials that have toxic properties even in low quantities, as well as lead to a deterioration in the technological value of grain. The purpose of this study was to determine the level of contamination of winter wheat by pathogenic and saprotrophic fungi in the Rostov region in the period 2015–2021. In the studied samples, the presence of external infection was noted up to 75.4 %, internal infection – up to 54.6 %, which indicates high contamination during the growing season and harvesting of the grain crop. The scale of the average annual values of the proportion of samples infected with *F. moniliforme* over a seven-year period was 58–95 % for external infection, and 31–86 % for internal infection. There was a dominance of external infection over internal infection by 20.8 %. In field agrocenoses, *F. moniliforme* is a pathogen of many crops,

* Corresponding author

E-mail addresses: lvaliullin@yandex.ru (L.R. Valiullin)

especially corn, wheat, and barley, causing the development of rot, vascular diseases, and toxicosis. The main mycotoxins produced by this species are fumonisins; beauvericin, fusaric acid and fusarin were also found among the metabolites of individual strains of the fungus.

Keywords: winter wheat, predecessor crop, facultative fungal parasites, colonization, pathogens, mycotoxins, crop rotation, agrocenosis.

1. Введение

Болезни пшеницы наносят существенный ущерб её урожайности и качеству получаемого зерна. Важнейшим моментом этиологии болезней является источник инфекции ([Valiullin, 2020](#)). Инфекция может быть, как залётной (аэробенной) с других полей, с сорняков-накопителей вблизи полей, из других регионов Земного шара, так и эндемной – накапливающейся на полях в соответствии с применяемыми технологиями возделывания культур. При благоприятных погодных условиях может начаться эпифитотийное развитие. Из болезней, вызываемых инфекциями первой группы следует отметить эпифитотии желтой ржавчины на озимой пшенице в Ставропольском крае (2009 г.), стеблевой ржавчины на яровой пшенице в Нижнем Поволжье (2016 г.) – они сопровождались серьёзными потерями урожая. В сентябре 2019 г. в Волгоградской области началась эпифитотия бурой ржавчины на озимой пшенице, но затем засушливый полуторамесячный период вызвал депрессию болезни, без дальнейшего возобновления. Болезни данного типа проявляются на юге Европейской части России редко, хотя и могут быть весьма вредоносными. В то же время, практически ежегодно наблюдается эпифитотийное развитие эндемных факультативных грибных паразитов, возбудителей листовых пятнистостей, гнилей, сосудистых заболеваний. Их вредоносность в большинстве зернопроизводящих хозяйств из года в год возрастает ([Budynkov et al., 2021](#); [Valiullin et al., 2023](#)).

Потенциал эпифитотии эндемных возбудителей грибных болезней определяется особенностями сезонной циркуляции микробиоты и накоплением её важнейших видов на основных экологических нишах агроценозов – на растениях, на растительных остатках, на зерне, в почве. Зерновая (семенная) инфекция является одним из практических итогов функционирования полевого агроценоза, микробные компоненты которого в период налива обеспечивают инфицирование развивающихся зерновок ([Valiullin et al., 2021](#); [Chami et al., 2023](#)). В то же время, семенная инфекция – один из определяющих источников для формирования специфических грибных консорций на полях, где в последующих звеньях севооборотов высеваются партии семян, полученных на разных агрофонах, при различных схемах химического и биологического контроля болезней, по различным предшественникам и др. ([Lucioli et al., 2013](#); [Kosolapov et al., 2023](#)). Конструктивная коррекция качественных и количественных показателей семенного микробиома – один из важных факторов получения высоких урожаев полноценной продукции, а также оптимизации микробиологической структуры полевых агроценозов ([Valiullin et al., 2023](#)); она возможна при наличии достоверной информации о присутствии эпифитотийно значимых микроорганизмов на экологических нишах полей и в хранилищах семенного материала ([Shcherbakova et al., 2022](#)). Несмотря на традиционные усилия селекционеров по обеспечению генетической защиты от болезней, химическая и биологическая защита продолжают занимать при выращивании пшеницы весьма важное место ([Valiullin et al., 2020](#); [Dzhavakhiya et al., 2022](#); [Bikmullin et al., 2023](#)).

Данная статья посвящена микробиологической структуре грибных консорций зерна озимой пшеницы в зернопроизводящих хозяйствах Ростовской области.

Цель настоящего исследования – обобщение многолетних результатов мониторинга динамики возбудителей болезней, микотоксикантов, нейтральных и полезных микромицетов на зерне озимой пшеницы в хозяйствах Ростовской области (2015–2021 гг.), оценка потенциальной опасности микромицетов зерновой инфекции.

2. Методика исследований

Исследования проводились на образцах зерна озимой пшеницы с производственных полей Ростовской области в лаборатории ФГБНУ ВНИИФ в 2015–2021 гг.

Образцы зерна отбирались с пунктов временного хранения (токов, зернохранилищ) хозяйств региона после уборки урожая.

Микробиологические анализы в условиях лаборатории ФГБНУ ВНИИФ проводили по методике с использованием искусственной питательной среды Чапека ([Valiullin et al., 2020](#)). Зерновки озимой пшеницы закладывали на питательную среду с целью оценки уровня их наружной и внутренней колонизации микроорганизмами грибной природы. Анализ видового состава микробиоты *in vitro* проводили на седьмой день инкубации. Видовую принадлежность образующихся на питательной среде колоний микромицетов определяли по морфолого-культуральным показателям и форме органов споруляции (конидиеносцев, конидий, асков, спор и др.) с помощью микроскопирования ([Budynkov, Mikhaleva, 2022](#); [Chami et al., 2023](#); [Valiullin et al., 2023](#)).

Учитывали количество колоний микроорганизмов разных видов, выделенных *in vitro*. Далее вычисляли долю каждого выделенного микроорганизма относительно числа зерновок, размещенных на питательной среде; проводили подсчет доли проанализированных образцов зерна с колонизацией тем или иным микроорганизмом. На основании полученных данных вычисляли ежегодные и средние за 2015–2021 гг. показатели.

3. Результаты и обсуждение

Партии семенного и продовольственного зерна озимой пшеницы в хозяйствах юга России колонизирует большое количество видов патогенной и сапротрофной микробиоты, но доминирует относительно стабильный небольшой круг микромицетов: несколько видов фузариев (возбудители гнилей и сосудистых заболеваний, продуценты микотоксичных метаболитов), биполярис (возбудитель гельминтоспориозной или обыкновенной корневой гнили – часто встречается севернее Саратова и восточнее Урала), виды *Alternaria*, реже – аскохита, и др. Среди перечисленных групп грибов, есть стабильно доминирующие, есть встречающиеся единично и не каждый год. В предлагаемой работе упор делался на два показателя: доля образцов, в которых встречался тот или иной микромицет, и среднегодичный показатель доли колонизированных им зерновок в образцах. Данные показатели учитывались относительно наружной и внутренней инфекции. Высокий уровень встречаемости на зерне ростовских образцов озимой пшеницы проявили патогенные микромицеты *Fusarium moniliforme* (*sin.F. verticillioides*), *Bipolaris sorokiniana*, *F. solani*, *F. sambucinum*, *F. sporotrichioides*, *Alternaria alternata*, *Epiconium purpurascens*, сапротрофные неспорулирующие грибы, *Trichoderma viride* (табл. 1). Относительно низкая встречаемость наблюдалась у видов *Fusarium culmorum*, *F. oxysporum*, *F. semitectum*, *F. poae*, *Ascochytagraminicola*, *F. heterosporum*, *Verticilliumalbo-atrum*, *Botrytiscinerea*.

Сильные патогены и токсиканты могут наносить существенный вред, как при выращивании пшеницы – вызывать снижение всхожести, депрессию и гибель проростков, развитие гнилей и сосудистых заболеваний, депрессию и отмирание продуктивных побегов, снижение продуктивности и урожайности, так и при хранении зернопродукции – способствовать ухудшению качества зерна, снижению массы зерен, содержания клейковины, хлебопекарных качеств, накоплению микотоксинов ([Chami et al., 2023](#)) ([Таблица 1](#)).

Таблица 1. Доля образцов зерна озимой пшеницы с колонизацией патогенными и сапротрофными грибами. Ростовская область. 2017–2023 гг.

Патогены	Принадлежность контаминации	Средняя за 2017–2023 гг.
<i>Fusarium moniliforme</i>	Внутренняя	54.6
	Наружная	75.4
<i>F. culmorum</i>	Внутренняя	0.9
	Наружная	1.8
<i>Bipolarissorokiniana</i>	Внутренняя	5.1
	Наружная	3.6
<i>F. solani</i>	Внутренняя	2.7
	Наружная	5.3

<i>F. sambucinum</i>	Внутренняя	0.4
	Наружная	1.8
<i>F. sporotrichioides</i>	Внутренняя	13.9
	Наружная	28.4
<i>F. oxysporum</i>	Внутренняя	0.3
	Наружная	1.5
<i>F. semitectum</i>	Внутренняя	2.6
	Наружная	1.8
<i>F. poae</i>	Внутренняя	1.3
	Наружная	2.6
<i>Alternaria alternata</i>	Внутренняя	100
	Наружная	100
<i>Ascochytagraminicola</i>	Внутренняя	1.8
	Наружная	1.0
<i>Verticilliumalbo-atrum</i>	Внутренняя	0.9
	Наружная	0.9

По результатам проведенных нами исследований, среди сильных токсинообразующих фитопатогенов на зерне озимой пшеницы доминировали представители рода *Fusarium* (порядок *Hypocreales*, семейство *Nectriaceae*). Наиболее часто встречался *Fusarium moniliforme* (*sin F. verticillioides*), телеоморфа – *Gibberella moniliformis* (*sin Gibberella fujikuroi*). Гриб относится к секции *Liseola*, комплексу видов FFSC. В образцах из Ростовской области в среднем за 2015–2023 гг. отмечалось его присутствие в виде наружной инфекции до 74.6 % образцов, внутренней – до 53.9 %, и было практически бессимптомным. Размах среднегодовых значений доли образцов, инфицированных *F. moniliforme*, составлял за семилетний период для наружной инфекции 59–94 %, для внутренней – 32–87 %. Отмечалось превалирование наружной инфекции над внутренней 20.8 % (Таблица 1). В полевых аgroценозах *F. moniliforme* является патогеном многих культур (Budynkov, Mikhaleva, 2022), особенно кукурузы, пшеницы, ячменя, вызывающим развитие гнилей, сосудистых заболеваний, токсикозов. Основными микотоксинами, продуцируемыми данным видом, являются фумонизины, среди метаболитов отдельных штаммов гриба были обнаружены также боверицин, фузариевая кислота и фузарин (Munkvold et al., 2019).

Более агрессивным и токсичным, но гораздо реже встречающимся на зерне, был *Fusarium culmorum*. В образцах из Ростовской области 2015–2021 гг. его встречаемость в виде наружной инфекции отмечалась в 1.8 % образцов, внутренней – в 0.9 %, присутствие гриба здесь также было практически бессимптомным. Среднегодовые значения доли образцов, инфицированных *F. culmorum*, составляли для наружной инфекции 0–9 %, для внутренней 0–6 %. Отмечалось превалирование наружной инфекции над внутренней (Таблица 1). В полевых аgroценозах *F. culmorum* является в основном патогеном мелкосемянных зерновых культур – пшеницы, ячменя. Микотоксинами, продуцируемыми данным видом, являются дезоксиниваленол, валенол, зеараленон, фузарин, монилиформин (Munkvold et al., 2019).

Опасным, но не доминирующим патогеном, встречающимся на зерне озимой пшеницы юга Европейской территории России, является гриб *Bipolaris sorokiniana*. В Ростовской области в 2015–2021 гг. его наличие в виде наружной инфекции отмечалось в 5.1 % образцов, внутренней – в 3.6 % образцов. *B. sorokiniana* вызывает черный зародыш зерновок, а также обыкновенную корневую гниль пшеницы и ячменя, листовую пятнистость (Acharaya et al., 2011; Abdullah, 2021). Заражение семян обуславливает снижение всхожести, гибель проростков. Авторы отмечают в хозяйствах Зауралья среднюю зараженность семян

биполярисом на уровне 2–15 %, но этот показатель может достигать 67–100 %. Среднегодовые значения доли образцов, инфицированных *B. sorokiniana* в Ростовской области, составляли за годы исследования, как для наружной, так и для внутренней инфекции 0–14 %. Отмечалось превалирование внутренней инфекции над наружной (Таблица 1). В полевых агроценозах *B. sorokiniana* является патогеном в основном мелкосемянных зерновых культур – пшеницы, ячменя. Продуцирование микотоксинов биполярисом не выявлено. Потери урожая в странах Юго-Восточной Азии, Австралии, где наблюдается активное развитие гельминтоспориозной тёмно-бурой пятнистости, могут составлять 20–50 % и более. В Зауралье этот показатель может достигать 15 % (Iftikhar et al., 2009).

Незначительная доля образцов зерна была колонизирована слабопатогенным грибом *Fusarium solani* (*Nectriahaematozoccca*), телеоморфа *Naetanectriahaematozoccca* относится к секции *Venyricosum*, комплексу видов *FSSC* (Zemankova, Lebeda, 2001). Наибольшая встречаемость его среди зерновой инфекции на территории России отмечается на Дальнем Востоке (до 5 %), на Европейской территории – ниже (Chowdhury et al., 2009). В Иране *F. solani* считается возбудителем гнили пшеницы (Abass et al., 2021). В большинстве полевых агроценозов Юга России встречается с высокой частотой в ризосфере и ризоплане растений, сопровождает прикорневые гнили, вызванные более патогенным *F. moniliforme*. В проанализированных нами в 2015–2021 гг. образцах зерна озимой пшеницы из Ростовской области его наличие в виде наружной инфекции отмечалось в 5,3 % образцов, внутренней – в 2,7%; присутствие гриба также было практически бессимптомным. Среднегодовые значения доли образцов, инфицированных *F. solani*, составляли и для наружной, и для внутренней инфекции 0–12 %. Отмечалось превалирование наружной инфекции над внутренней.

Основными микотоксинами, продуцируемыми данным видом, являются фузариевая кислота и, возможно, трихотеценовые соединения (Munkvold 2019).

Среди проанализированных образцов зерна с небольшой частотой встречались, колонизированные *Fusarium sambucinum* (телеоморфа *Gibberellapulicaris*). Гриб относится к секции *Discolor*. В Ростовской области (2015–2021 гг.) наличие патогена в виде наружной инфекции отмечалось нами в 1,8 % образцов, внутренней – в 0,4 %; присутствие гриба на зерновках было бессимптомным. Среднегодовые значения доли образцов, инфицированных *F. sambucinum*, за тот же период составляли для наружной инфекции 0–6 %, для внутренней 0–3%. Отмечалось превалирование наружной инфекции над внутренней. В полевых агроценозах *F. sambucinum* является патогеном ряда культур двудольных – картофеля, клубники, авокадо, перца Мансано и др. Он способен также продуцировать микотоксичные соединения. Основными микотоксинами, выделяемыми данным видом, являются эннатины (Leslie, Summerell, 2006), трихоцены группы A, боверицин, фузарин C, фузариновая кислота, самбутоксин и др. Сухая гниль на картофеле, вызываемая *F. sambucinum*, может подавляться штаммами различных видов триходермы (Aydin et al., 2016), аспергиллов и пенициллов (Ojha, Agarwal, 2015). Из значительного количества проанализированных образцов зерна выделялся *Fusarium sporotrichioides*. Телеоморфа неизвестна. Гриб относится к секции *Arthrosporiella*, комплекс видов *FSAMSC*. В Ростовской области (2015–2021 гг.) его наличие в виде наружной инфекции отмечалось нами в 28,4% образцов, внутренней – в 13,9% и было практически бессимптомным. Размах среднегодовых значений доли образцов, инфицированных *F. sporotrichioides*, за тот же период составлял для наружной инфекции 14–38 %, для внутренней – 7–25 %. Отмечалось практически двукратное превалирование наружной инфекции над внутренней. В полевых агроценозах *F. sporotrichioides* является патогеном ряда культур – мелкосемянных зерновых, кукурузы, сои и др. (Leslie, Summerell, 2006). Он способен также продуцировать микотоксичные соединения – трихоцены A: T-2 токсин и НТ-2 токсин, диацетоксисцирпенол (Leslie, Summerell, 2006), неосоланил, фузаренон-X, также – зеараленон. Потребление кормов, колонизированных *F. Sporotrichioides* оказывает острое токсическое действие на животных. *F. sporotrichioides* является прогрессирующим патогеном полевых культур и микотоксикантом (Šudyova, Šlikova, 2011). По результатам исследований в ЦЧР России гриб был включен в группу доминантов. Статус экологически пластичных грибов, широко распространенных на озимой и яровой пшенице в ЦЧР России, имеют *F. Sporotrichioides* и *F. roae*, доля которых в разные годы колебалась в пределах 24,0–40,9 % и 16,0–31,9 %

соответственно. Наиболее стабильный в Тамбовской области доминант *F. Sporotrichioides* имел в 2011 г. в образцах зерна встречаемость 55.6% – более высокий показатель, чем в это же время в Белгородской и Курской областях – 39.8 %.

По результатам наших исследований с использованием искусственных питательных сред, уровень колонизации зерна озимой пшеницы грибом *Fusarium sporotrichioides* в период 2014–2020 гг. в Ставропольском крае, Волгоградской, Ростовской и Курской областях среднем за год не превышал 8 %. Наименьшая колонизация зерна *F. Sporotrichioides* отмечена в Волгоградской обл. – она стабильно находилась по средним значениям на уровне 1-2% в течение всего 7-летнего периода мониторинга, при максимальных значениях на отдельных образцах 2-8 %. Аналогичная тенденция прослежена до 2016 г. и в Ростовской области, но затем наблюдали 2-летнее увеличение колонизации в 2.0-2.5 раза и относительную стабилизацию этого процесса в 2019–2020 гг. на уровне 2-3 %, максимальные значения в отдельных образцах достигали 5-24 %. Наибольшая нестабильность колонизации зерна грибом *F. Sporotrichioides* с размахом вариации среднегодовых значений 1-6 % отмечена в Ставропольском крае: к 2015 г. произошло 4-кратное увеличение уровня колонизации в сравнении с 2014 г., в 2015–2017 гг. – стабилизация на уровне 3-4 %, затем – резкое уменьшение показателя с 4% до 1% в 2017–2018 гг., после этого 6-кратный рост в 2019 г. и уменьшение до 4 % в 2020 г. Максимальные значения в отдельных образцах достигали здесь 12-30%. Стабильным и довольно высоким (7-8 %) за период 2014–2020 гг. был уровень колонизации зерна грибом *F. Sporotrichioides* в Курской области при максимальных значениях в отдельных образцах 8–29 %. На юге европейской части России часто встречается на двудольных культурах открытого и защищенного грунта – зернобобовых, овощных и др., реже – на мелкосемянных зерновых. Литературные данные по его встречаемости на зерновых культурах довольно контрастны: до 2017 г. его встречаемость на зерне пшеницы в Центральном Черноземье составляла около 4,9 %, а в Волго-Вятском регионе – до 26 %. Из 5559 штаммов фузариев грибов, выделенных из сортов гексаплоидноготритикале за 2009–2023 гг. не было обнаружено ни одного, относящегося к виду *F. Oryxsporum*. В регионах Западной Сибири гриб встречался на зерне пшеницы и ячменя наряду с другими фузариями и биполярисом. Большинство выделенных в Республике Мордовия штаммов *F. oxysporum* показали низкий уровень патогенности на проростках пшеницы. В опытах китайских исследователей *F. oxysporum* вызывал фузариозное увядание перистощетинника *Pennisetumchinese* (сем. Злаковые, Мятликовые – Poaceae) (Zheng et al., 2022). По результатам наших анализов зерновой инфекции озимой пшеницы в Ростовской области в 2015–2021 гг. его встречаемость в виде наружной инфекции составляла 1.5 % образцов, внутренней – 0.3%; присутствие гриба было практически бессимптомным. Среднегодовые доли образцов, инфицированных *F. oxysporum*, за тот же период достигали для наружной инфекции 0–6 %, для внутренней – 0,2 %. Основными микотоксинами, выделяемыми данным видом, являются монилиформин, боверицин, эннатины, фузариевая кислота, отдельные штаммы способны продуцировать фумонизины (Leslie, Summerell, 2006).

Fusarium semitectum (sin *Fusarium pallidoroseum*, *Fusarium incarnatum*) относится к секции *Arthrosporiella*. Гриб изредка выявлялся нами среди образцов зерна озимой пшеницы. Тамбовские исследователи считают, что видовой состав патогенного комплекса грибов рода *Fusarium* на посевах озимой и яровой пшеницы недостаточно изучен: *F. semitectum* на семенах озимой пшеницы ими не был выявлен, на яровой его встречаемость не превышала 10 %. (Гагкаева, 2009) относят его к слабым патогенам, имеющим невысокий процент встречаемости. Аналогичное мнение высказывает и многие авторы «*Fusarium semitectum* Berk. et Rav.; синонимы *F. incarnatum* (Roberge) Sacc., *F. pallidoroseum* (Cooke) Sacc. распространён в тропиках и субтропиках» (Хасанов, 2021). Данный почвенный гриб, часто выделяется из надземных частей различных растений и гниющих бананов при хранении. Он не считается важным патогеном растений. *F. semitectum* иногда выделяют также из растений пшеницы с симптомами корневой гнили, однако, он не обладает патогенностью к пшенице и другим мелкосемянным зерновым культурам (Leslie, Summerell, 2006).

Семена Дальбергиясиссу Рохб (североиндийское розовое дерево или Шишам) с естественной инфекцией *F. semitectum* имели либо темно-коричневую окраску со

сдавленной бугристой областью 13.0–23.75 %, либо были покрыты белой мицелиальной коркой 0.50–6.25 %, у проростков из таких семян часто отмечалось увядание. Выделялся из трети томатов с гнилью плодов (Zheng et al., 2022). *F. semitectum* вызывал также заболевания бананов, дынь, фасоли, сорго, грецкого ореха и грибную гниль при хранении.

В работе египетских учёных сообщалось о выявлении *F. semitectum* из почвы, сорго, зерна, корневищ, кунжута, о его присутствии в почве, зерне пшеницы и ячменя, ризосфере фасоли, о сопровождении заболеваний томатов и стеблевой гнили кукурузы. *F. semitectum* чрезвычайно распространён, особенно в тропических и субтропических странах (Ismail et al., 2015). Его обычно выделяют из возделываемых почв и пустынь, из различных надземных частей растений, например, плодов банана и пальмовых листьев. Сообщалось, что это вызывает проблемы с гнилью грибов при хранении. *F. semitectum* является одним из доминирующих грибов на зернах жемчужного проса. Авирулентные штаммы *F. semitectum* могут быть биологическим средством борьбы со спорыней на перловом просе за счет уменьшения темпов формирование и развития склероций. *F. semitectum* был связан с эмфиземой легких крупного рогатого скота. В зерне озимой пшеницы в Ростовской области в 2015–2021 гг. его наличие в виде наружной инфекции отмечалось в 1.8 % образцов, внутренней – в 2.6 %; присутствие гриба также было практически бессимптомным. Среднегодовые значения доли образцов, инфицированных *F. semitectum*, составляли для наружной инфекции 0–7 %, для внутренней – 0–12 %. Отмечалось превалирование внутренней инфекции над наружной (Таблица 1). В полевых агроценозах *F. Semitectum* наносит определённый вред овощным и зернобобовым культурам. Основными микотоксинами, продукирующими данным видом, являются боверицин, монилифлормин, зеараленон, диацетоксисцирепенол, токсичный метаболит фузаперон, трихотеценовые соединения.

Fusarium roae выделялся из незначительного количества образцов зерна. Телеоморфа неизвестна. Относится к секции *Sporotrichiella*, комплекс видов FSAMSC. В Ростовской области в 2015–2021 гг. его наличие в виде наружной инфекции отмечалось нами в 2.6 % образцов, внутренней – в 1.3 %; присутствие гриба было бессимптомным. Размах среднегодовых значений доли образцов, инфицированных *Fusarium roae*, за тот же период составлял для наружной инфекции 0–18 %, для внутренней – 0–4 %. Отмечалось практически двукратное превалирование наружной инфекции над внутренней.

Fusarium roae выделяется из зерновых культур, семян многих сельскохозяйственных культур. *F. roae* считается слабым патогеном, и, хотя он бывает связан с фузариозом пшеницы, но уступает по патогенности *F. graminearum* и *F. culmorum*. Отдельные изоляты *F. roae* способны заражать несколько филогенетически отдалённых видов растений. В условиях Хорватии было отмечено негативное влияние *F. roae*, наряду с *F. graminearum* и *F. culmorum* на формирование урожая пшеницы – ухудшение выполненности зерна, снижение массы 1000 зерен, всхожести семян. Его встречаемость на зерне различных сортов находилась в диапазоне 40–50 %.

Наряду с опасными патогенами на зерне часто встречаются виды микромицетов, имеющие неоднозначные оценки их вредоносности, например, альтернариевые грибы. Они встречаются на зерне пшеницы всех регионов планеты с высокой частотой (до 100 %), их часто относят к возбудителям опасных заболеваний, в частности, черни, “черного зародыша” зерновок. Есть также австралийский прецедент карантинных проблем с экспортом зерна пшеницы, зараженного *Alternaria triticina*. Грибы рода *Alternaria*, видимо, чаще других грибов и бактерий встречаются на семенах основных зерновых культур (пшеницы, ячменя, овса, ржи и др.) во всём мире и представляют собой наиболее обычный компонент микробиома зерна.

В проанализированных нами в 2015–2021 гг. образцах зерна озимой пшеницы из Ростовской области наличие альтернариевых грибов, как в виде наружной, так и в виде внутренней инфекции отмечалось в 100 % случаев. При встречаемости зерновок с чёрным зародышем на уровне ниже 1 % образцов при уровне колонизации, превышающем 50 %, присутствие гриба также можно считать практически бессимптомным. Среднегодовые значения доли образцов, инфицированных видами *Alternaria*, составляли и для наружной, и для внутренней инфекции 100 % (Таблица 1).

Альтернариевые грибы относят к 3-м разным секциям р. *Alternaria*, различающимся по морфологическим признакам, экологическим свойствам и практическому значению.

Из числа мелкоспоровых видов (секция *Alternaria*, род *Alternaria*) на зерновых и других культурах значительно чаще других встречается *A. tenuissima*, повсеместно, выявляют также *A. alternata* и *A. arborescens*. Виды *Alternaria* способны синтезировать микотоксины альтенуен, альтернариол, альтернариол-метиловый эфир. Вид *A. avenicola* вероятно также является неспециализированным сапротрофом. Комплекс видов *A. Infectoria* по молекулярным признакам сильно отличается от остальных видов *Alternaria*. Виды комплекса *A. Infectoria* обычно являются сапротрофами и не синтезируют известные микотоксины. Комплекс включает около 40 филогенетически близких видов, многие из которых трудноотличимы друг от друга. В том числе в данный комплекс включают *A. Infectoria* E.G. Simmons и, судя по всему, довольно патогенный вид *A. Triticina* Prasada et Prabhu. Для 9-ти видов известно несколько случаев обнаружения в природе телеоморф из рода *Lewia*. Виды *Alternaria* могут проявлять дифференцированную патогенную активность. В работе индийских ученых-биохимиков при изучении различной активности изолятов *Alternaria alternata* один из 15-ти изолятов (AA1) оказался высоковирулентным, другой (AA6) – авибулентным. Вирулентный изолят *A. Alternata* продуцировал больше целлюлолитических (*C1* и *Cx*) и пектинолитических (ферменты мацерации, пектиновая метил-эстераза и эндо-полигалактуроназа) ферментов *in vitro*, чем авибулентный. Активность целлюлолитических ферментов повышалась с увеличением возраста культуры. По деградации энзимов пектинметилэстеразы и эндополигалактуроназы были выявлены 3–5-кратные различия между вирулентным и авибулентными штаммами *A. alternata*, а также – по величине массы сухого мицелия альтернарии ([Ганибал, 2014](#)).

Встречаемость видов рода *Alternaria* на зерне в большинстве регионов мира высокая. Так, в работе словацких исследователей была проведена оценка колонизации зерна суслового ячменя видами патогенных и сапротрофных микромицетов. Встречаемость альтернариевых грибов находилась в диапазоне 32–97 %, аспергиллов – 0–39 %, гельминтоспориума – 1–49 % ([Rohačík, Hudec, 2018](#)).

Многие виды альтернарии сопровождают заболевание “черный зародыш” зерна озимой пшеницы. Делаются попытки назвать альтернарию возбудителем этого заболевания по причине ее очень частой встречаемости на зернах с черным зародышем, но ряд исследований ставит под сомнение данное допущение. Например, исследования, проведенные в Австралии на восприимчивом к заболеванию “черный зародыш” сорте *SUN239V*, показали, вопреки устоявшемуся мнению, что никаких белков грибного и бактериального происхождения в потемневшей ткани не было; очевидно, ее потемнение не было связано с микробной активностью. В то же время здесь присутствовали стрессовые растительные белки, т.е. продукты генов, связанных со стрессом, болезнями и защитой. Были обнаружены более высокие уровни содержания этих белков в зерне без черного зародыша. Авторы предполагают, что защита от болезни может быть обеспечена повышенным уровнем “стрессовых” белков ([Miftakhov et al., 2022](#)). В проведенном нами исследовании при высоком уровне колонизации альтернариевыми грибами семена имели хорошие посевные качества и было незначительное количество зерен с черным зародышем. Это свидетельствует о том, что зерно озимой пшеницы на юге европейской территории России колонизируют в основном непатогенные виды *Alternaria*.

Микологический анализ зерна сортов озимой пшеницы с черным зародышем показал, что потемнение зерновок зачастую не связано с альтернариевыми грибами – данные микромицеты отсутствовали на части локально потемневших зерен.

В проводимых нами в 2015–2021 гг. исследованиях в Ростовская области возбудитель аскохитоза пшеницы выявлялся на зерне. Его наличие в виде наружной инфекции отмечалось нами в 1.0 % образцов, внутренней – в 1.8 % образцов, присутствие гриба на зерновках было бессимптомным. Среднегодовые значения доли образцов, инфицированных возбудителем аскохитоза, за тот же период составляли для наружной инфекции 0–7 %, для внутренней – 0–9 %. Наиболее часто инфицированные образцы встречались в 2019, 2020 гг., когда погодные условия способствовали развитию патогена и накоплению инфекции. Отмечалось, практически, двукратное превалирование наружной инфекции над внутренней.

Вертициллы (*Verticillium albo-atrum*, *Verticillium dahliae*) – широко распространенные патогены, возбудители увядания двудольных культур. Злаковые культуры, в том числе озимая пшеница, устойчивы к поражению возбудителями вертициллоза и являются в

севообороте фитосанитарами болезни. На пшенице патоген иногда выделяется с корневой системы, видимо, как следствие его накопления на двудольных культурах предыдущих звеньев севооборота (подсолнечнике, зернобобовых, льне, картофеле и др.), возможно – на сорных растениях, редко на зерне. Его наличие в виде наружной и внутренней инфекции отмечалось нами в 0,9 % образцов; присутствие гриба на зерновках было бессимптомным. Среднегодовые значения доли образцов, инфицированных возбудителем вертициллёза, за тот же период составляли и для наружной, и для внутренней инфекции 0–6 %.

Доминирование по проценту образцов с наружной инфекцией над внутренней наблюдалось у *F. moniliforme*, *F. culmorum*, *F. solani*, *F. sambucinum*, *F. sporotrichiella*, *F. oxysporum*, *F. roae*. Преобладание внутренней инфекции над наружной – у *B. sorokiniana* и *F. semitectum*. Связать доминирование с патогенностью, эпифитотийной опасностью перечисленных грибов невозможно, у трех наиболее опасных патогенов они различаются: доминирование наружного инфицирования над внутренним наблюдается у *F. moniliforme* и *F. culmorum*, внутреннего над наружным – у *B. sorokiniana*.

4. Заключение

Важнейшим показателем состояния зараженности семян микромицетами является доля инфицированных зёрен в образце. Она является индикатором опасности для использования соответствующих партий зерна в качестве семенного, а также в качестве пищевого или фуражного. Ограничения на использование зерна в качестве семенного накладывает уровень колонизации зерновок опасными патогенами, которые могут вызвать депрессию или гибель проростков, заболевание растений и редукцию элементов продуктивности. О необходимой осторожности в использовании зерна для пищевых или фуражных целей предупреждает зараженность грибами – потенциальными микотоксикантами, особенно продуцентами микотоксинов с низкими ПДК: Т-2 токсин (0,1 мг/кг), охратоксин А (0,005 мг/кг), афлотоксин В₁ (0,005 мг/кг), *F. sporotrichiella*, виды *Penicillium*, *Aspergillus glaucus*, *A. niger*, *A. flavus*. Не все штаммы микотоксикогенных грибов обладают способностью к продуцированию микотоксинов. Даже в случае незначительной колонизации зерна штаммами-продуцентами перечисленных микотоксинов велика вероятность опасности его использования без токсикологической оценки. Об этом же может свидетельствовать существующий высокий уровень колонизации зерна продуцентами менее «концентрированных» микотоксинов, например, фумонизина, если зараженность *F. moniliforme* достигает 70–90 %.

5. Благодарности

Работа выполнена за счет средств гранта РНФ проект № 23-26-00161.

Авторы выражают глубокую благодарность Шамилю Завдатовичу Валидову (Руководитель НИЛ «Лаборатория молекулярно-генетических и микробиологических методов» ФИЦ КазНЦ РАН), Алексею Анатольевичу Набатову (кафедра биохимии Казанского государственного медицинского университета) и Николаю Ивановичу Будынкову (ФГБНУ «ВНИИФ») за помощь и ценные советы по проведению аналитических экспериментов.

Литература

[Гагкаева и др., 2009](#) – Гагкаева Т.Ю., Левитин М.М., Санин С.С., Назарова Л.Н. (2009). Зараженность зерна и видовой состав грибов рода *Fusarium* на территории РФ в 2004–2006 гг. *АгроХХI*. 6: 4–6.

[Ганнибал, 2014](#) – Ганнибал Ф.Б. (2014). Альтернариоз зерна – современный взгляд на проблему. *Защита и карантин раст.* 6: 11–15.

[Хасанов и др., 2021](#) – Хасанов Б.А., Сафаров А.А., Турдиева Д.Т. (2021) Фузариозные корневые и прикорневые гнили пшеницы в мире и в Узбекистане (Обзор). Рукописный. 15.

[Abass et al., 2021](#) – Abass M.H., Madhi Q.H., Matrood A.A. (2021). Identity and prevalence of wheat damping-off fungal pathogens in different fields of Basrah and Maysan provinces // *Bull Natl Res Cent.* 45: 51.

[Abdullah, 2021](#) – Abdullah M. Al-Sadi Bipolaris sorokiniana-Induced Black Point, Common Root Rot, and Spot Blotch Diseases of Wheat: A Review // *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*. 2021. 1–9.

- Acharya et al., 2011 – Acharya K., Dutta A.K., Pradhan P. *Bipolaris sorokiniana* (Sacc.) Shoem.: The most destructive wheat fungal pathogen in the warmer areas // *Aust. J. Crop Sci.* 2011. 5: 1064-1071.
- Afordoanyi et al., 2022 – Afordoanyi D.M., Diabankana R.G.C., Miftakhov A.K., Kuchaev E.S., Validov S.Z. Genomic features of *Pseudomonas putida* pcl1760: a biocontrol agent acting via competition for nutrient and niches *Applied Microbiology*. 2022. 2(4): 749.
- Aydin et al., 2016 – Aydin M.H., Pala F., Kaplan C. Potato tuber sprout rot caused by *Fusarium sambucinum* in Turkey // *Scientific Papers. Series A. Agronomy* LIX. 2016. Pp. 189-193.
- Bikmullin et al., 2023 – Bikmullin A.G., Fatkhullin B., Stetsenko A., Gabdulkhakov, A. et al. Yet another similarity between mitochondrial and bacterial ribosomal small subunit biogenesis obtained by structural characterization of rbfa from *s. aureus* // *International Journal of Molecular Sciences*. 2023. 24: 2118.
- Budynkov et al., 2021 – Budynkov N.I., Mikhaleva S.N., Proskurin A.V. Dynamics of Dominant Facultative Parasites of Fungal Nature in Field Agrocenoses with Minimal Soil Treatment in the Western Part of the Volgograd Region // *Agrochimia*. 2021. 1: 64-71.
- Budynkov, Mikhaleva, 2022 – Budynkov N.I., Mikhaleva S.N. Monitoring of *Alternaria* fungi on winter wheat grain in farms in the south of Russia (2014–2020) // *Agrochimia*. 2022. 1: 75-87.
- Chami et al., 2023 – Chami J. El, Chami E. El, Tarnawa B. Kassai K. M, Kende Z., Jolnkai M. Effect of *Fusarium* infection on wheat quality parameters // *Cereal Research Communications*. 2023. 51: 179-187.
- Chowdhury et al., 2009 – Chowdhury A.K., Singh G., Tyagi B.S., Ojha A., Dhar T., Bhattacharya P.M. Spot blotch disease of wheat – a new thrust area for sustaining productivity // *J. Wheat Res.* 2009. 5: 1-11.
- Dzhavakhiya et al., 2022 – Dzhavakhiya V.G., Statsyuk N.V., Mikityuk O.D., Voinova T.M., Shcherbakova, L.A. 6-Demethylmevinolin as a blocker of the biosynthesis of aflatoxin B₁, zearalenone and deoxynivalenol by toxicogenic fungi-contaminants of agricultural products // *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2022. 36: 97-102.
- Iftikhar et al., 2009 – Iftikhar S.H., Asad S., Munir R.A., Sultan A., Ahmad I. Hosts of *Bipolaris sorokiniana*, the major pathogen of spot blotch of wheat in Pakistan. *Pak. J. Bot.* 2009. 41: 1433-1436.
- Ismail et al., 2015 – Ismail M.A., Abdel-Hafez S.I.I., Hussein N.A., Abdel-Hameed N.A. Contributions to the genus *Fusarium* in Egypt with dichotomous keys for identification of species. TMKARPIŃSKI PUBLISHER, Suchy Las, Poland. 2015. P. 175.
- Kosolapov et al., 2023 – Kosolapov V.M., Cherniavskih V.I., Dumacheva E.V. et al. Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Ecotypes Response to Accumulation of Heavy Metals during Reforestation on Chalk Outcrops // *Forests*. 2023. 14: 1492.
- Leslie, Summerell, 2006 – Leslie J.F., Summerell B.A. The *Fusarium* Laboratory Manual. Blackwell Publishing. 2006. P. 388.
- Lucioli et al., 2013 – Lucioli J., Pinton P., Callu P. et al. The food contaminant deoxynivalenol activates the mitogen activated protein kinases in the intestine: interest of ex vivo models as an alternative to in vivo experiments // *Toxicon*. 2013. 66: 31.
- Miftakhov et al., 2022 – Miftakhov, A.K., Diabankana, R.G., Frolov, M.A., Yusupov, M.M., Validov, S.Z., Afordoanyi, D.M. (2022). Persistence as a constituent of a biocontrol mechanism (competition for nutrients and niches) in *Pseudomonas putida* pcl1760. *Microorganisms* 11: 19.
- Munkvold et al., 2019 – Munkvold G.P., Arias S., Taschl I., Gruber-Dorninger C. (2019). Mycotoxins in Corn: Occurrence, Impacts, and Management // *Corn. Ch.* 9: 235-287.
- Ojha, Agarwal, 2015 – Ojha B.M., Agarwal R. Antagonistic Effect of Some Fungi on *Fusarium sambucinum* Var. Coeruleum Causing Roots Diseases in Acacia catechu (Khair) // *Paripex – Indian J. Res.* 2015. 4: 60-62.
- Rohačík, Hudec, 2018 – Rohačík T., Hudec K. Fungal infection of malt barley kernels in Slovak Republic. *Plant Protect. Sci.* 2018. 43: 86-93.
- Shcherbakova et al., 2022 – Shcherbakova L.A., Dzhavakhiya V.G., Popletaeva S.B., et al. Augmenting the protective effect of two difenoconazole-containing fungicides against stem canker of potato using plant resistance inducing bacterial protein MF3 // *AIP Conference Proceedings. Proceedings of the International Scientific Conference*. AIP PUBLISHING. 2022. 2390: 1, 030086.

Šudyova, Šlikova, 2011 – Šudyova V., Šlikova S. Contamination of wheat grain with species of genera *Fusarium* in different localities of Slovakia in 2006–2008. *Agriculture (Poľnohospodárstvo)*. 2011. 57: 110-117.

Valiullin et al., 2020 – Valiullin L.R., Mukhammadiev Rish.S., Mukhammadiev Rin.S. et al. Neutralization of *Fusarium* metabolites in plant materials // *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2020. 34:73-78.

Valiullin et al., 2021 – Valiullin L.R., Titova V.Y., Skvortsov E.V. et al. Search for antagonists to protect plant raw materials from pathogens // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. "All-Russian Conference with International Participation Economic and Phytosanitary Rationale for the Introduction of Feed Plants". 2021: 012005.

Valiullin et al., 2023 – Valiullin L.R., Mukhammadiev R.S., Sevostyanov M.V. et al. Exploring the potential of *Bacillus subtilis* as an additive for decontamination of feed // *E3S Web of Conferences*. 2023. 462: 00017.

Valiullin et al., 2023 – Valiullin L.R., Skvortsov E.V., Egorov V.I. et al. Interaction of endophytic microorganisms with respect to cypermethrin // *South of Russia: Ecology, Development*. 2023. 18: 53-69.

Zemankova, Lebeda, 2001 – Zemankova M., Lebeda A. *Fusarium* species. their taxonomy, variability and significance in plant pathology // *Plant protection science*. 2001. 37: 25-42.

Zheng et al., 2022 – Zheng J., Wang L., Hou W., Han Y. *Fusarium oxysporum* Associated with *Fusarium* Wilt on *Pennisetum sinese* in China // *Pathogens* 2022. 11: 999.

References

Abass et al., 2021 – Abass, M.H., Madhi, Q.H., Matrood, A.A. (2021). Identity and prevalence of wheat damping-off fungal pathogens in different fields of Basrah and Maysan provinces. *Bull Natl Res Cent*. 45: 51.

Abdullah, 2021 – Abdullah, M. (2021). Al-Sadi *Bipolaris sorokiniana*-Induced Black Point, Common Root Rot, and Spot Blotch Diseases of Wheat: A Review. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*. 1-9.

Acharya et al., 2011 – Acharya, K., Dutta, A.K., Pradhan, P. (2011). *Bipolaris sorokiniana* (Sacc.) Shoem.: The most destructive wheat fungal pathogen in the warmer areas. *Aust. J. Crop Sci.* 5: 1064-1071.

Afndoanyi et al., 2022 – Afndoanyi, D.M., Diabankana, R.G.C., Miftakhov, A.K., Kuchaev, E.S., Validov, S.Z. (2022). Genomic features of *Pseudomonas putida* pcl1760: a biocontrol agent acting via competition for nutrient and niches. *Applied Microbiology*. 2(4): 749.

Aydin et al., 2016 – Aydin, M.H., Pala, F., Kaplan, C. (2016). Potato tuber sprout rot caused by *Fusarium sambucinum* in Turkey. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*. LIX: 189-193.

Bikmullin et al., 2023 – Bikmullin, A.G., Fatkhullin, B., Stetsenko, A., Gabdulkhakov, A. et al. (2023). Yet another similarity between mitochondrial and bacterial ribosomal small subunit biogenesis obtained by structural characterization of rbfa from *S. aureus*. *International Journal of Molecular Sciences* 24: 2118.

Budynkov et al., 2021 – Budynkov, N.I., Mikhaleva, S.N., and Proskurin, A.V. (2021). Dynamics of Dominant Facultative Parasites of Fungal Nature in Field Agrocenoses with Minimal Soil Treatment in the Western Part of the Volgograd Region. *Agrochimia*. 1: 64-71.

Budynkov, Mikhaleva, 2022 – Budynkov, N.I., Mikhaleva, S.N. (2022). Monitoring of *Alternaria* fungi on winter wheat grain in farms in the south of Russia (2014–2020). *Agrochimia* 1: 75-87.

Chami et al., 2023 – Chami, J.El, Chami E.El, Tarnawa, B., Kassai, K.M, Kende, Z., Jolnkai, M. (2023). Effect of *Fusarium* infection on wheat quality parameters. *Cereal Research Communications* 51: 179-187.

Chowdhury et al., 2009 – Chowdhury, A.K., Singh, G., Tyagi, B.S., Ojha, A., Dhar, T., Bhattacharya, P.M. (2009). Spot blotch disease of wheat – a new thrust area for sustaining productivity. *J. Wheat Res.* 5: 1-11.

Dzhavakhiya et al., 2022 – Dzhavakhiya, V.G., Statsyuk, N.V., Mikityuk, O.D., Voinova, T.M., Shcherbakova, L.A. (2022). 6-Demethylmevinolin as a blocker of the biosynthesis of aflatoxin B1, zearalenone and deoxynivalenol by toxigenic fungi-contaminants of agricultural products. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 36: 97-102.

- [Gagkaeva i dr., 2009](#) – Gagkaeva, T.Yu., Levitin, M.M., Sanin, S.S., Nazarova, L.N. (2009). Zarazhennost' zerna i vidovoi sostav gribov roda Fusarium na territorii RF v 2004–2006 gg. [Infection of grain and species composition of fungi of the genus Fusarium on the territory of the Russian Federation in 2004–2006]. *AgroXXI*. 6: 4-6. [in Russian]
- [Gannibal, 2014](#) – Gannibal, F.B. (2014). Al'ternarioz zerna – sovremennyi vzglyad na problem [Alternaria grain blight – a modern view of the problem]. *Zashchita i karantin rast.* 6: 11-15. [in Russian]
- [Iftikhar et al., 2009](#) – Iftikhar, S.H., Asad, S., Munir, R.A., Sultan, A., Ahmad, I. (2009). Hosts of *Bipolaria sorokiniana*, the major pathogen of spot blotch of wheat in Pakistan. *Pak. J. Bot.* 41: 1433-1436.
- [Ismail et al., 2015](#) – Ismail M.A., Abdel-Hafez S.I.I., Hussein N.A., Abdel-Hameed N.A. (2015). Contributions to the genus *Fusarium* in Egypt with dichotomous keys for identification of species. TMKARPIŃSKI PUBLISHER, Suchy Las, Poland. 175.
- [Khasanov i dr., 2021](#) – Khasanov, B.A., Safarov, A.A., Turdieva, D.T. (2021). Fuzarioznye kornevye i prikornevye gnili pshenitsy v mire i v Uzbekistane (Obzor) [Fusarium root and root rots of wheat in the world and in Uzbekistan (Review)]. *Rukopisnyi*. 15. [in Russian]
- [Kosolapov et al., 2023](#) – Kosolapov, V.M., Cherniavskih, V.I., Dumacheva, E.V. et al. (2023). Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Ecotypes Response to Accumulation of Heavy Metals during Reforestation on Chalk Outcrops. *Forests*. 2023. 14: 1492.
- [Leslie, Summerell, 2006](#) – Leslie, J.F., Summerell, B.A. (2006). The *Fusarium* Laboratory Manual. Blackwell Publishing. 388.
- [Lucioli et al., 2013](#) – Lucioli, J., Pinton, P., Callu, P. et al. (2013). The food contaminant deoxynivalenol activates the mitogen activated protein kinases in the intestine: interest of ex vivo models as an alternative to in vivo experiments. *Toxicon*. 66: 31.
- [Miftakhov et al., 2022](#) – Miftakhov, A.K., Diabankana, R.G., Frolov, M.A., Yusupov, M.M., Validov, S.Z., Afordoanyi, D.M. (2022). Persistence as a constituent of a biocontrol mechanism (competition for nutrients and niches) in *Pseudomonas putida* pcl1760. *Microorganisms* 11: 19.
- [Munkvold et al., 2019](#) – Munkvold, G.P., Arias S., Taschl, I., Gruber-Dorninger, C. (2019). Mycotoxins in Corn: Occurrence, Impacts, and Management. *Corn. Ch.* 9: 235-287.
- [Ojha, Agarwal, 2015](#) – Ojha, B.M., Agarwal, R. (2015). Antagonistic Effect of Some Fungi on *Fusarium sambucinum* Var. Coeruleum Causing Roots Diseases in Acacia catechu (Khair). *Paripex – Indian J. Res.* 4: 60-62.
- [Rohačík, Hudec, 2018](#) – Rohačík, T., Hudec, K. (2018). Fungal infection of malt barley kernels in Slovak Republic. *Plant Protect. Sci.* 43: 86-93.
- [Shcherbakova et al., 2022](#) – Shcherbakova, L.A., Dzhavakhiya, V.G., Popletaeva, S.B. et al. (2022). Augmenting the protective effect of two difenoconazole-containing fungicides against stem canker of potato using plant resistance inducing bacterial protein MF3. *AIP Conference Proceedings. Proceedings of the International Scientific Conference. AIP PUBLISHING*. 2390: 1, 030086.
- [Šudyova, Šlikova, 2011](#) – Šudyova, V., Šlikova, S. (2011). Contamination of wheat grain with species of genera *Fusarium* in different localities of Slovakia in 2006–2008. *Agriculture (Poľnohospodárstvo)* 57: 110-117.
- [Valiullin et al., 2020](#) – Valiullin, L.R., Mukhammadiev, Rish, S., Mukhammadiev, Rin, S. et al. (2020). Neutralization of *Fusarium* metabolites in plant materials. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* 34:73-78.
- [Valiullin et al., 2021](#) – Valiullin, L.R., Titova, V.Y., Skvortsov, E.V. et al. (2021). Search for antagonists to protect plant raw materials from pathogens. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. "All-Russian Conference with International Participation Economic and Phytosanitary Rationale for the Introduction of Feed Plants".* 012005.
- [Valiullin et al., 2023](#) – Valiullin, L.R., Mukhammadiev, R.S., Sevostyanov M.V. et al. (2023). Exploring the potential of *Bacillus subtilis* as an additive for decontamination of feed E3S Web of Conferences. 462: 00017.
- [Valiullin et al., 2023](#) – Valiullin, L.R., Skvortsov, E.V., Egorov, V.I., et al. (2023). Interaction of endophytic microorganisms with respect to cypermethrin. *South of Russia: Ecology, Development.* 18: 53-69.
- [Zemankova M., Lebeda A. 2001](#) – Zemankova, M., Lebeda, A. (2001). *Fusarium* species. their taxonomy, variability and significance in plant pathology. *Plant protection science* 37: 25-42.

Zheng et al., 2022 – Zheng, J., Wang, L., Hou, W., Han, Y. (2022). *Fusarium oxysporum* Associated with *Fusarium* Wilt on *Pennisetum sinense* in China. *Pathogens* 11: 999.

Изучение патогенных факторов в зерновом сырье

Светлана Николаевна Михалева ^a, Лилия Николаевна Ульяненко ^a, Юлия Варисовна Зуева ^a,
Михаил Анатольевич Севостьянов ^a, Дарья Александровна Валиуллина ^a,
Петр Петрович Муковоз ^a, Дмитрий Владимирович Демин ^a, Ленар Рашитович Валиуллин ^{a,b,*},
Михаил Геннадьевич Барышев ^a, Jose L. Hernandez-Caceres ^c, Wei Xiao ^d, Zafarjon A. Jabbarov ^e,
Nilanchal Patel ^f, Peter Kováčik ^g, Bogusław A. Wilkomirski ^h

^a Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии Большие Вяземы,
Российская Федерация

^b Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности,
Казань, Российская Федерация

^c Neurodevelopment Branch, Cuban Center for Neurosciences, La Habana, Cuba

^d Hunan Economic Geography Research Institute, Changsha, China

^e National University of Uzbekistan, Department of Soil Science, Tashkent, Uzbekistan

^f Birla Institute of Technology Mesra, Department of Remote Sensing, Jharkhand, India

^g Slovak University of Agriculture in Nitra, Slovak Republic

^h University of Warsaw and Jan Kochanowski University in Kielce, Poland

Аннотация. Микроскопические грибы являются микроорганизмами, обычно встречающимися в зерновых культурах. Для них типично бесполое размножение с образованием спор различных типов. У большинства видов есть и половое размножение, но многие грибы, могут существовать без него в нескольких поколениях. Споры микроскопических грибов могут сохранять жизнеспособность долгое время в сухой и холодной среде. Споры распространяются пассивно ветром и дождем, насекомые также могут служить фактором передачи, перенося споры на своих тела. Насекомые увеличивают поверхность роста для плесневых грибов, нарушая наружные защитные оболочки зерен. При наличии достаточных условий для роста (температура, влажность и т.д.) микромицеты могут снижать питательную ценность зерновой продукции и выделять метаболиты в продовольственном сырье, обладающие токсическими свойствами даже в низких количествах, а также приводить к ухудшению технологической ценности зерна. Целью настоящего исследования было определить уровень контаминации озимой пшеницы патогенными и сапротрофными грибами в Ростовской области в период 2015–2021 гг. В исследованных образцах отмечалось присутствие наружной инфекции до 75.4 %, внутренней – до 54.6 %, что указывает на высокую контаминацию в период вегетации и уборки зерновой культуры. Масштаб среднегодовых значений доли образцов, инфицированных *F. moniliforme*, составлял за семилетний период для наружной инфекции 58–95 %, для внутренней – 31–86 %. Наблюдалось доминирование наружной инфекции над внутренней, на 20.8 %. В полевых агроценозах *F. moniliforme* является патогеном многих культур, особенно кукурузы, пшеницы, ячменя, вызывающим развитие гнилей, сосудистых заболеваний, токсикозов. Основными микотоксинами, продуцируемыми данным видом, являются фумонизины, среди метаболитов отдельных штаммов гриба были обнаружены также боверицин, фузариевая кислота и фузарин.

Ключевые слова: озимая пшеница, культура-предшественник, факультативные паразиты грибной природы, колонизация патогенами, возбудители болезней, микотоксины, севооборот, агроценоз.

* Корреспондирующий автор

Адреса электронной почты: lrvaliullin@yandex.ru (Л.Р. Валиуллин)

Copyright © 2024 by Cherkas Global University



Published in the USA
Biogeosystem Technique
Issued since 2014.
E-ISSN: 2413-7316
2024. 11(1): 27-81

DOI: 10.13187/bgt.2024.1.27
<https://bgt.cherkasgu.press>



Application of Digital Correlation-Spectral Analysis for Identification, Classification and Separation of Plant Roots and Plant Root Tissues: Simple Low-Cost Alternatives for Laser Diffractometer Based 2D FFT Pattern Recognition Techniques

Fedor K. Orekhov ^{a,*}, Natalja A. Rubtsova ^a

^a Semenov Institute of Chemical Physics, CHEMBIO Dept., Moscow, Russian Federation

Paper Review Summary:

Received: 2024, March 11

Received in revised form: 2023, June 21

Acceptance: 2023, June 26

Abstract

In this article, we propose to use real-time correlation-spectral analysis systems (developed in FEB RAS) to identify morphometric classes of plant roots and consider this solution as a full-fledged alternative to outdated analog laser/optical diffractometry and laser Fourier technology with the calculation of Lendaris parameters/indices and the construction of projection transformants. The proposed technique can be implemented using a PC, laptop or tablet with older operating systems. Simplicity and low cost make this technique accessible to users from the agricultural industry who are not specialists in the field of optics or laser physics. In this article, we tried, in clear language, without resorting to formulas, to explain to botanists and agricultural specialists what, in essence, the method under consideration is, what advantages it brings to practicing botanists and what information can be extracted using it (not excluding the description of artifacts and errors, which can lead to disappointment in the method, which is based on an error rather than the incorrectness of the proposed method). The second part of the article provides an atlas catalog of Fourier spectra and microphotographic images of corresponding botanical forms and structures.

Keywords: roots, 2D FFT, laser diffractometer, agricultural qualimetry.

1. Введение

Среди известных агротехнических целей использования лазерной техники – как в качестве средств измерений, так и в качестве инструмента воздействия на растение (Dinoev, 2006; Hernandez, 2010; Askaraba et al., 2016) – одним из наименее исследованных объектов исследования или воздействия, среди прочих вегетативных органов растений, является корень. Это связано, по-видимому, с его низкой доступностью для оптических методов *in situ* (в ходе вегетации) в естественных условиях и затрудненностью поддержания его нативных фитофизиологических характеристик вне среды. Вместе с тем, работая в режимах аэропоники и гидропоники, можно облегчить доступ лазера к корням, как в случае необходимости воздействия на них, так и в случае метрологической потребности в доступе.

* Corresponding author

E-mail addresses: theorehov@gmail.com (F.K. Orekhov)

Вероятно, отсутствие подобной практики обусловлено не биологическими и физико-техническими противоречиями, но пренебрежительно малым числом прецедентов использования лазеров в аэропонике и гидропонике как таковой (в том числе – в качестве средства измерений параметров вегетации или размеров фитоанатомических структур ([Ueno et al., 2016; Bawiec et al., 2019](#)). Существующие «ризотроны» и «миниризотроны», предназначенные для отслеживания компонентной динамики архитектуры корневой системы с течением времени, даже имплементируемые на многоволновых/мультиспектральных принципах реегистрации сигнала, обычно не являются позиционно-чувствительными (картирующими фитоанатомические/«органографические» особенности в распределениях свойств корневой системы) устройствами – именно в силу специфики работы через почвенный покров ([Rahman et al., 2020](#)).

В то же время, наличие множества работ с использованием лазерной техники, в том числе картирующей лазерно-аналитической техники высокого разрешения, для исследования корней в лабораторных условиях, говорит о информативности, а также позиционной чувствительности лазерных измерений корневых структур. В качестве наиболее общеупотребительных примеров подобных измерений (без учета экзотических лазерных техник, в частности мембранных фемтосекундных ([Tirlapur & König, 1999](#)) или терагерцовых аналитических измерений, которые могут реализовываться и не в лазерном исполнении ([Su et al., 2008](#)), позволяющих извлекать фитофизиологическую и фитохимическую информацию при анализе корней, можно назвать:

1. Флуоресцентную конфокальную лазерную сканирующую микроскопию ([Yu et al., 2001; Dubrovsky et al., 2006](#)), позволяющую отслеживать химические градиенты, в частности – редокс-градиенты с введением «рациометрических», стехиометрически фиксируемых аналитом красителей ([Ghosh et al., 2016; Martinière et al., 2018](#)), изменяющих интенсивность сигнала в зоне ROI пропорционально локальной концентрации аналита (для лазерно-опосредованной визуализации редокс-градиента в органах растений существуют как синтетические красители, так и специфичные белковые маркеры – типа НуРег-подобных белков в методах измерения восстановления флуоресценции после фотообесцвечивания, известных под аббревиатурой FRAP); технические вариации применения методов CLSM (в том числе двухфотонные и многофотонные ([Meyer, Fricker, 2000](#)), динамические и кинетические ([Roberts et al., 2010](#))) для корней, извлеченных из их нативной среды, не имеют значения, так как, когда речь идёт о секционировании образцов / микротомии, внедрении красителей, экспериментах с фотовыжиганием и наработкой активных форм кислорода, подобные техники измерений, в принципе, не относятся к методам неразрушающего контроля (целью которых является совместимость с нормальным фитофизиологическим состоянием препарата и, как следствие, имплементируемость метода на длительных промежутках *in situ* мониторинга в естественных условиях произрастания);

2. Методы лазерно-опосредованной масс-спектрометрии – в особенности с матрично-активированной лазерной десорбцией/ионизацией (MALDI) ([Sun et al., 1998; Choudhary et al., 2015](#)), допускающей мультиплексированную химическую диагностику/«футпринтинг» фитофизиологических состояний и патологий растений по множеству коррелируемых и колокализуемых факторов (ферментов, фитогормонов ([Shiono, Taira, 2020; Shiono et al., 2017](#))), в том числе – в позиционно-чувствительном либо «имэджинговом» (картирующем) режиме; недостатком MALDI обычно считается необходимость пробоподготовки до диспенсирования образа на MALDI target или изготовление срезов образца для MALDI imaginga, однако, с нашей точки зрения, основная проблема состоит также, как и в предыдущем случае, в невозможности исследования корней *in situ* – в силу несоблюдения критериев неразрушающего контроля (речь идёт, в том числе, и о наличии матрицы, препятствующей культивированию/поддержанию экспланта или культуры клеток, извлеченных из корня);

3. Более ранние методы лазерно-опосредованной масс-спектрометрии, как правило, не удовлетворяющие критериям неразрушающего контроля, в силу высокой удельной энергии, поступающей на образец при аблации, используемой, как правило, при элементном анализе или картировании распределения элементов в корнях ([Eeckhaoudt et al., 1992; Moradi et al., 2010; Shelden et al., 2020; Richter-Brockmann et al., 2020](#)) (исключая сопряженные с электроспрей-ионизацией современные методы анализа метаболитов, в том числе – идентифицирующие метаболиты почвенной микрофлоры и симбиотических

азотфиксирующих клубеньковых бактерий корня (Stopka et al., 2017), не допускающие картирования и позиционно-чувствительного анализа биоматериала);

4. Лазерно-опосредованный атомно-эмиссионный спектральный анализ, в частности – лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия (LIBS, LIPS) в анализе элементного состава корней растений и состава окружающей среды, элементный обмен с которой они осуществляют (Hassan et al., 2013; Liu et al., 2018; Wang et al., 2018); метод, по определению, не неинвазивный, требующий изъятия пробы корня из среды (равно как и в целом для агротехнической квалиметрии (Peng et al., 2016), при стандартной длительности лазерных импульсов (обычно более 1000 фс) приводящий к несовместимой с жизнью клетки теплопередаче в объеме образца, испаряющей биологические жидкости в плазменном факеле;

5. Методы лазерной микродиссекции как тканей корня (преимущественно, от ризодермы/эпидермы до эндодермы, не достигая перицикла) (Klink et al., 2009; Mounier, et al., 2020), реализуемые для химического и транскрипционного профилирования в индивидуальной норме и патологии (Klink et al., 2005; Schuller et al., 2014; Jaiswal et al., 2018; Youssef et al., 2019; Popp et al., 2020), а также при контроле аллелопатии и симбиогенетических биохимических/семиохимических эффектов, включая клеточный сигналлинг условно-патогенных видов и видов-комменсалов (от микробиома до нематод почвы (Klink et al., 2005, 2007; Hogekamp et al., 2011; Roux et al., 2014); этот класс методов можно считать комплементарным для другого лазерного класса методов, используемого для анализа явлений колонизации корня – методов конфокальной лазерной сканирующей микроскопии (см. п. 1 настоящего списка), являющихся эффективным средством контроля не только формирования микоризы, но и имеющих значение для практики карантина растений процессов контаминации и внутреннего корневого распространения инфекции либо ингибирования микроорганизмом той или иной активности корня на интерфейсе с ним (Hansen et al., 1997; Vierheiling et al., 1999; Vierheiling et al., 2001; Qianli et al., 2001; An et al., 2010; Krzyzanowska et al., 2012; Hulse, Braselton, 2019).

Итак, очевидно, что все перечисленные распространенные методики, увы, не являются применимыми для фитофизиологического анализа состояния корня как *in vivo*, так и *in situ*, на временных масштабах, соответствующих вегетационным и фенологическим постоянным (в том числе циркадианным и феноспектральным ритмам), и не являются методами неразрушающего контроля состояния корня – в смысле отсутствия возможности возврата образца в естественные условия после измерений с целью дальнейшего наблюдения в хроническом эксперименте.

Кроме того, уникальность изъятых образцов без привязки к физиологически релевантным условиям эксперимента и морфо-анатомическим дескрипторам, как правило, делает невозможным корреляционный мета-анализ данных, в контексте реального состояния растения в момент эксперимента или же выборки образцов. Поэтому, несмотря на обширные приложения современного статистического (Honghong, Zhengu, 1998), «data mining»-ового (Pradhan, Mezaal, 2018) и хемометрического (в том числе в анализа результатов агрохимических приложений лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии (Erler et al., 2020)) программного обеспечения в лазерных исследованиях агрофизических систем или отдельных серий образцов растений на разных пространственных масштабах (от клеток до ландшафтов и экосистем, наблюдаемых методом мультиспектральной аэрофотосъемки и же с использованием спутниковых и суборбитальных систем регистрации, в том числе – для анализа корневых патологий либо недостаточной ирригации корней (Yang et al., 2016; Espinoza et al., 2018; Veysi et al., 2020)), корректный статистический корреляционный анализ с необходимым пространственным разрешением для корневых структур обычно, увы, не реализуется. Как следствие этого, и кластеризация корней по размерам и спектрозональным геометрически-морфометрическим показателям, выявляемым методами машинного обучения без учителя, на таких данных не осуществляется. Корреляционно-морфологический анализ, позволяющий выявить тренды тех или иных процессов роста и развития или патогенеза, также не производится *in situ*, а методы анализа после выемки из почвы, в большинстве случаев, реализуются как средство индустриальной квалиметрии (например – «предфасовочный контроль» в хранилищах корнеплодов в ФРГ) и, для простоты, обединены дескрипторами.

Между тем, как обычная морфометрия структур тканей корней (с клеточным разрешением (Scherer et al., 1992; Kuya, Sato, 2011), так и динамическая (с привязкой к точке в росте и развитии растения (Dong et al., 2015) оптическая морфометрия до сих пор не потеряли ценность, а метод трёхмерного лазерного сканирования и объёмной морфометрии структур корней (Wagner, 2010), равно как и методы оптической когерентной (лазерной) томографии (Sekulska-Nalewajko et al., 2014) ещё только начинают входить в повсеместное использование. Поэтому целесообразна разработка статистических методов анализа формы корней и их консолидации на трёхмерных массивах данных, по крайней мере, начиная с двумерных проекций, позволяющих извлекать интегральные пространственные характеристики корней и визуализировать ориентацию их в пространстве (валидируя, параллельно с тем, роль геотропизма / гравитропизма и других тропизмов, которые можно свободно наблюдать только в условиях аэропоники, гидропоники). Однако современными авторами используются намного менее автоматизированные, но более простые, с эвристических позиций, подходы к анализу результатов лазерного сканирования корней (Heeren et al., 2020). При этом, возможностью анализа в реальном времени пренебрегают, в силу отсутствия программного обеспечения для выдачи статистики параметров изображений в реальном времени. Нужно отметить, что корреляционный анализ, в принципе, часто используется ботаниками и агротехниками при анализе целого ряда индивидуальных биохимических (Meng et al., 2013; Zheng et al., 2014; Zargar et al., 2015) и аддитивно-массовых параметров (Yong-ping, 2009), в том числе – в биометрии, используемой для целей гибридизации/селекции (Levy et al., 1983). Поэтому можно полагать, что при наличии программы для корреляционного анализа параметров изображений корневых структур, она была бы задействована в автоматизированном анализе с учетом полных гистограмм распределений – как интегральных пространственных характеристик, так и интегральных частотных/компонентных (структурометрических – гранулометрических, цитометрических) характеристик на соответствующих выборках. Подобный метод корреляционноспектральной морфометрии мог бы использоваться и в полевых условиях.

Учитывая возможность использования лазера как средства воздействия на корневую систему (Wójcik, 1994; van den Berg et al., 1998; Koper et al., 1996; Li et al., 2012; Suhua et al., 2012; Pan, Li, 2012), возникают логичные идеи интеграции действия лазера и использования его как метрологического средства, т.е. «тераностики» на новых физических принципах – в нашем случае «фито-тераностики» корня. Если учитывать, что как неорганические частицы, сорбируемые корнем, так и отлично флуоресцирующие пигменты корня могут быть фосфорами и репортерами об его фитохимическом и фитофизиологическом статусе (Fellows et al., 2003; Thakur & Gathania, 2017), можно использовать это как аргумент в пользу возможности использования лазерных методов без меток/флуоресцентных зондов. Вместе с тем, принципы корреляционно-спектрального анализа в реальном времени как раз являются «беззондовыми», «безметочными». Более того, они работают в цифровой версии и без когерентного источника – что говорит об их совместимости с оптическим мониторингом состояния корней при использовании аэропонных технологий выгонки без когерентных источников.

2. Постановка задачи

Наша задача, таким образом, состоит в создании нового метода, использующего как физический базис, принципы лазерной оптики (и многомерной / многоканальной лазерной аналитики) в исследовании корней, удовлетворяющего комплексным критериям:

1. Неразрушающего контроля (в идеале – без разрушающего воздействия лазера, но с предоставляемыми им возможностями на уровне одиночно исследуемых корней);
2. Возможности сепарированного анализа отдельных каналов регистрации (то есть – спектрональной, мультиспектральной и гиперспектральной техник, с разложением по спектральным/колориметрическим каналам той или иной ширины спектрального окна);
3. Возможности корреляционно-спектрального анализа *in situ*, в реальном времени;
4. Независимости качества анализа от размера структур, т.е. возможность работы как с микроскопическими, так и с мезоскопическими данными.

3. Материалы и методы (аналоговая версия)

Первые попытки аппаратной реализации лазерной установки были аналоговыми. Изначально, для тестирования принципа нами использовалась установка на базе НеНе-лазера, построенная по классической схеме Вайнштейна (Vainshtein, 1973) (Рисунки 1а, б). Данный оптико-дифрактометрический стенд обеспечивал «оптическую эффективность» в диапазоне размеров структур, ограниченном дифракцией лазерного пучка на тех или иных биологических, в частности – корневых, структурах, что определялось соотношением длины волны пучка, апертуры и размеров данных структур. Из-за этого и как достаточно крупные корни, так и тканевые элементы ризодермы, как правило, не удавалось разрешить эффективно. В силу этого, было решено искать альтернативные решения.

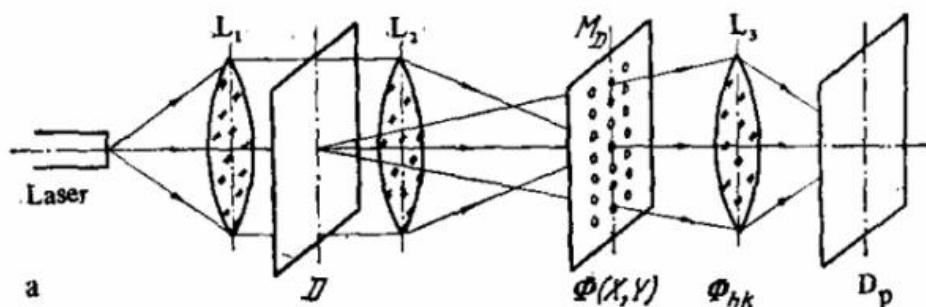


Рис. 1а. Схема оптического дифрактометра (L_1 – L_3 – линзы оптической системы, D – объект, MD – плоскость дифракции и маска, пропускающая только Φ_{hk} , D_p – плоскость (фильтрованного) изображения)



Рис. 1б. Инструментальная реализация тестовой установки (использованной ранее в статье (Скрынник и др., 2018)

В силу этого был осуществлен переход к использованию автоматизируемой версии лазерного дифрактометра ИФ-124, предназначенного для исследования и регистрации спектра пространственных частот микротранспарантов или анализа гранулометрической и дисперсной структуры рассеивающих лазерное излучение объектов, содержащих упорядоченные и не упорядоченные структуры. Прибор в изначальной конфигурации может использоваться также как инструмент анализа размеров индивидуальных частиц и структур, дифракции Фраунгофера, контроля эффективности пространственной фильтрации изображений (источник описания, включая графическую схему, здесь и далее (Семченко, Хахомов, 2007). В схеме данного дифрактометра лазерный луч проходит через объектив телескопической системы, светофильтр и фотозатвор, за которым по ходу тракта

размещены зеркала, и попадает на второй объектив 8. Лазерный луч, расширенный телескопической системой, попадает на исследуемый объект или сетку, помещенную на предметный столик. Рассеянные сеткой лучи проходят через линзу, в фокальной плоскости которой формируется дифракционная картина. Так объектив, при помощи зеркал, создает изображение сетки на матовом экране проекции.

Компонентная схема прибора приведена на [Рисунке 2а](#). Оптическая схема прибора приведена на [Рисунке 2б](#).

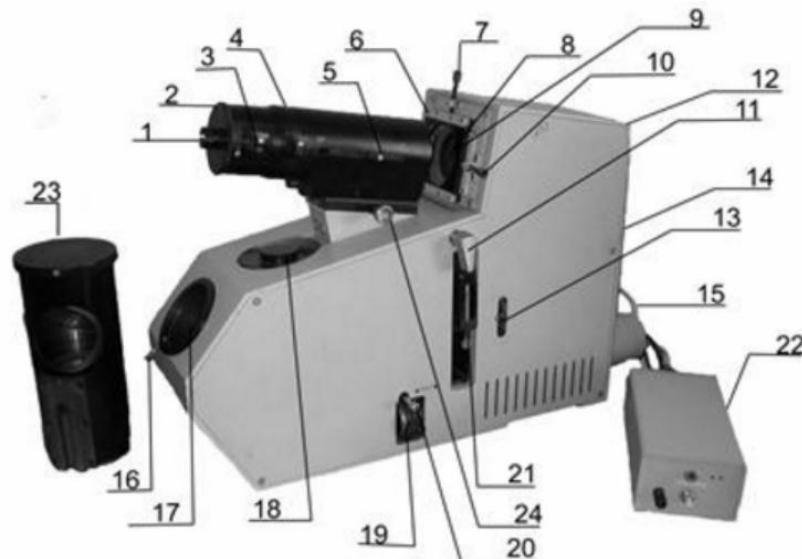


Рис. 2а. Компонентная схема лазерного дифрактометра ИФ-124 ([Семченко, Хахомов, 2007](#)):

1. окулярная область;
2. дифракционный объектив;
3. калибровочная сетка;
4. линза, в задней фокальной плоскости которой формируется дифракционное изображение, представляющие собой Фурье–спектр.
5. винт фиксации увеличения дифракционного объектива;
6. фильтрующая линза;
7. микровинт позиционирования и фиксации;
8. столик масок для размещения щели;
9. входное окно с позиционером;
10. микровинт позиционирования и фиксации;
11. ручка управления областью размещения объекта;
12. задняя крышка;
13. диафрагма, ограничивающая размер анализируемого участка (ROI);
14. светоизолирующий корпус прибора (кожух);
15. гелий-неоновый лазер;
16. винт фиксации матового экрана;
17. отверстие фиксации матового экрана;
18. крышка холостого тракта;
19. поглощающие светофильтры;
20. рукоятка регуляции блока поглощающих фильтров;
21. рамка с исследуемым объектом;
22. блок питания лазера;
23. репродукционный объектив;
24. винт-фиксатор.

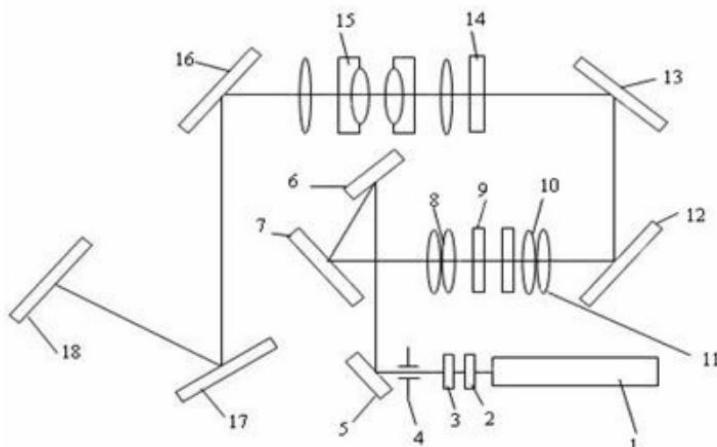


Рис. 2б. Оптическая схема лазерного дифрактометра ИФ-124:

1. гелий-неоновый лазер;
2. объектив телескопической системы;
3. светофильтр;
4. фотозатвор;
5. зеркало;
6. зеркало;
7. зеркало;
8. объектив;
9. предметный столик;
10. линза, в фокальной плоскости которой формируется дифракционная картина,
11. вторая линза;
12. зеркало;
13. зеркало;
14. фокальная плоскость;
15. объектив;
16. зеркало;
17. зеркало;
- 18.матовый экран, на котором создаётся изображение.

4. Методы (цифровая версия): полностью цифровая реализация 2D FFT, не использующая когерентную генерацию и оптический дифрактометр.

Сама идея использования Фурье-преобразования для анализа корней была, в определенной степени, новой – не задействованной в предшествующих работах, равно как и являющийся её прототипом лазерно-дифрактометрический подход. Нами использовалась реализация корреляционно-спектрального анализа под QAVIS, реализованная на библиотеке FFTW коллективом Лаборатории анализа океанологической информации (разработчики – Гончарова А.А., Фищенко В.К.) ОИТ Тихоокеанского океанологического института им. В.И.Ильичева ДВО РАН. Оперативность обработки видеоданных обеспечивалась использованием одной из наиболее «быстрых» библиотек дискретного преобразования Фурье – FFTW и оптимизацией программного кода QAVIS авторами данной программы (это ПО работает с видеопамятью, что позволяет обрабатывать все кадры видеопотока одновременно с его просмотром на экране ЭВМ) ([Дубина и др., 2011; Гончарова и др., 2012; Dolgikh et al., 2019; Fischenko et al., 2021, 2022; Градов и др., 2018, 2019](#)). Процедура корреляционно-спектрального анализа осуществляется в QAVIS с использованием двух GUI-инструментов – «спектрального анализа» (2D FFT – двумерный Фурье-спектр), основанного на периодограммной оценке спектральной плотности мощности, и «корреляционного анализа», основанного на вычислении взаимной корреляционной функции.

Фрагменты работ по настройке и модернизации дифрактометра проиллюстрированы на [Рисунках 3](#). Удалось в ходе тестирования схем произвести картирование фотограмм корневой системы, отображающие редокс-активность корней («хемоавтограммы»). Можно было при продолжении работ совершенствовать подход, подбирая оптические компоненты

для оптимизации разрешения для живых корней. Однако поломка на оптическом тракте и выход из строя лазера привели к поиску лазерно-независимого метода, в рамках которого проблемы с разрешением преодолеваются цифровым путем при помощи эмуляции лазерной дифракции двумерным преобразованием Фурье.

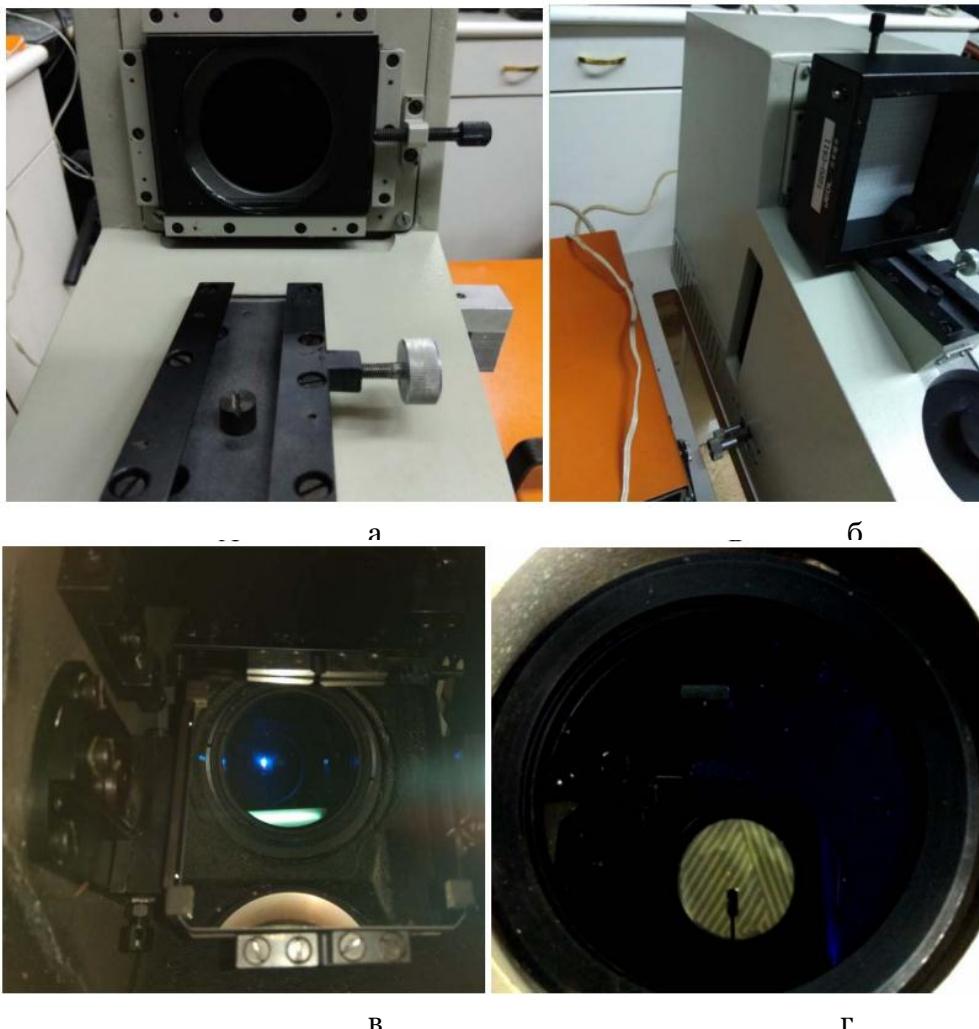


Рис. 3. Элементы процесса восстановления, настройки, тестировании и модернизации оптического тракта рефрактометра ИФ-124

5. Базовые примеры использования оптико-дифрактометрического 2D FFT подхода.

Рассмотрим результаты описанного подхода. При эмуляции дифракции на одиночных продольных элементах растительной ткани с высокой оптической плотностью регистрируется четкий мономаксимум без модуляции интенсивности (при любом уровне рассеяния на окружающих частицах), как это видно на Рисунках 4а, б.

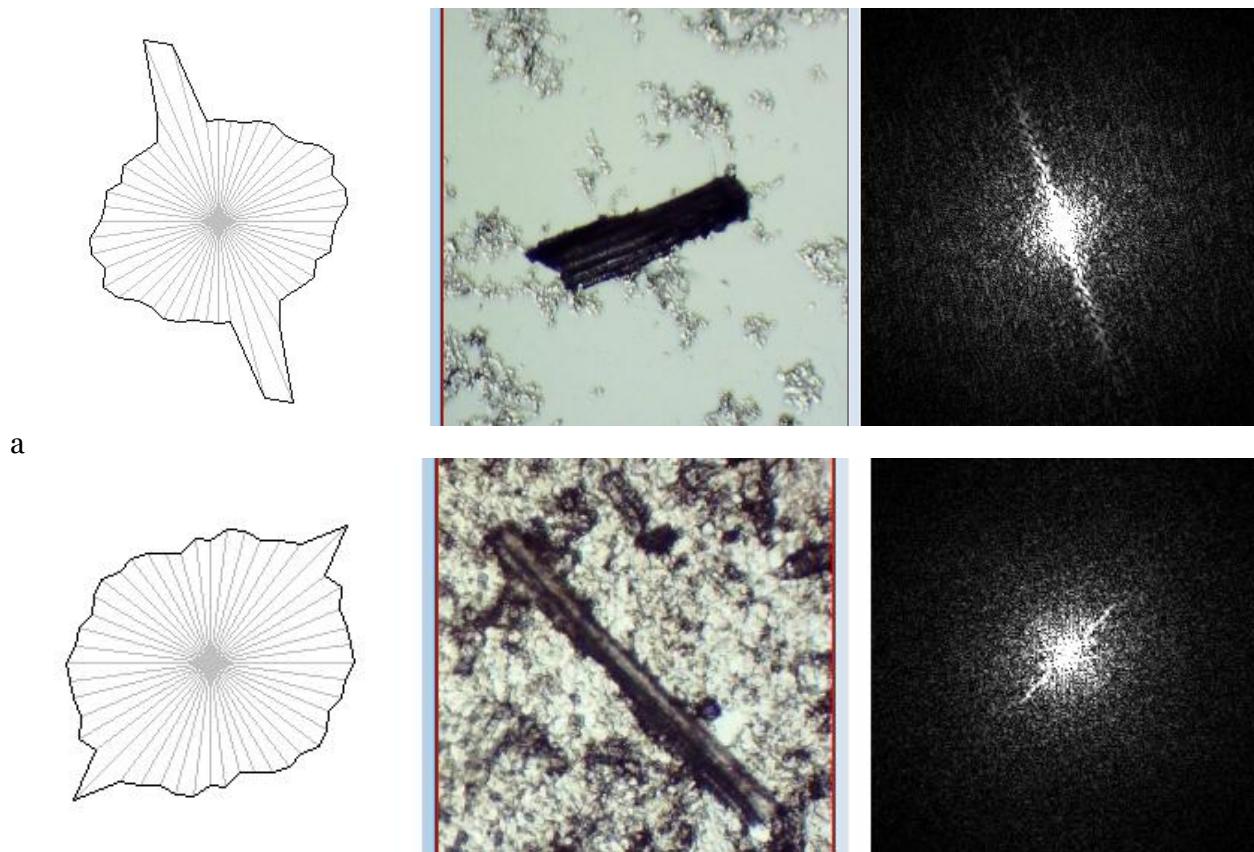


Рис. 4. Корни хрена (измерение в капле, 100×). Эмуляция дифракции на одиночных продольных элементах растительной ткани с высокой оптической плотностью

При увеличении тех же микрообъектов без разрешенной микроструктуры, оптически плотных на низких увеличениях, в несколько раз (например, см. [Рисунок 5](#); в данном случае - в 4 раза, от 100× до 400×) оптическим путем (не цифровое увеличение, а смена объектива), нередко удается разрешить клеточную структуру и увидеть тонкие элементы модуляции двумерного БПФ (2D FFT), обусловленные ею.



Рис. 5. Корни хрена (измерение в капле, 400×). Положительный результат попытки разрешить клеточную структуру и увидеть тонкие элементы модуляции двумерного БПФ (2D FFT), обусловленные ею, путем увеличения переходом на более высокоразрешающий объектив в револьверной турели микроскопа

При разрешении клеточной структуры образца, работающей как дифракционная решетка, формируется модуляция исходного пика рассеяния, как это показано на [Рисунке 6](#).



Рис. 6. При разрешении клеточной структуры образца, работающей как дифракционная решетка, формируется модуляция исходного пика рассеяния

Чем меньше слоев клеток визуализируется или чем меньше поперечных перегородок, тем меньше визуализируется кросс-модуляция, связанная, как правило, с "несинфазными" (т.е. несинхронными по расположению клеток) слоями. Чем больше статистика слоев, тем они более монотонно выступают на интегральной пространственной характеристике и спектре БПФ. Такой тип 2D ориентации свойственен для регистрации рассеяния на компоненте тканей с параллельными рядами клеток ([Рисунок 7](#)).

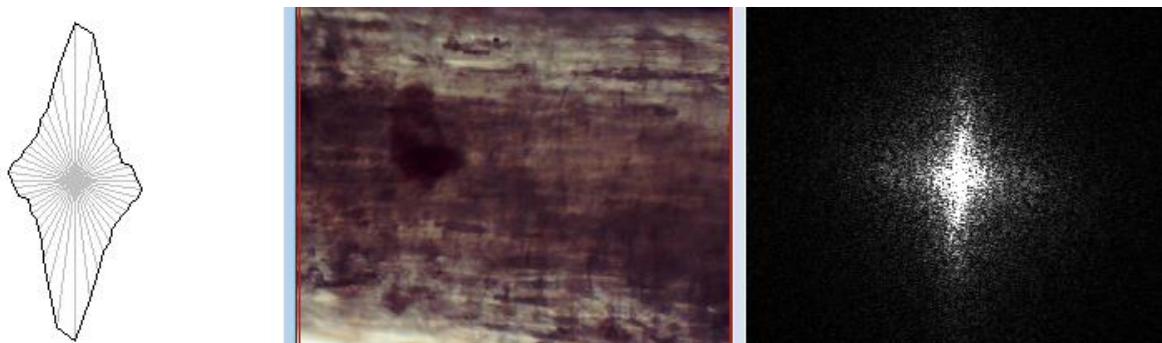


Рис. 7. Эмуляция рассеяния на растительной ткани корня

При попадании в кадр рассеянных элементов, возникших вследствие технологической обработки образца (вплоть до детрита / дебриса) регистрируется только рассеянное гало с крайне слабо выраженным элементами, соответствующими детектируемым элементам с остаточной клеточной / тканевой организацией. Это показано на [Рисунке 8](#).



Рис. 8. Эмуляция рассеяния на детрите - тонких разлагающихся компонентах биомассы

Для элементов с остаточной клеточной организацией (от целых фрагментов тканей вплоть до детрита/дебриса) степень выраженности локальных максимумов модуляции 2D БПФ будет уменьшаться по мере приближения к детриту/дебрису. При этом выраженность 2D гало будет возрастать по мере приближения к детриту/дебрису. Это показано на Рисунках 9а, б.

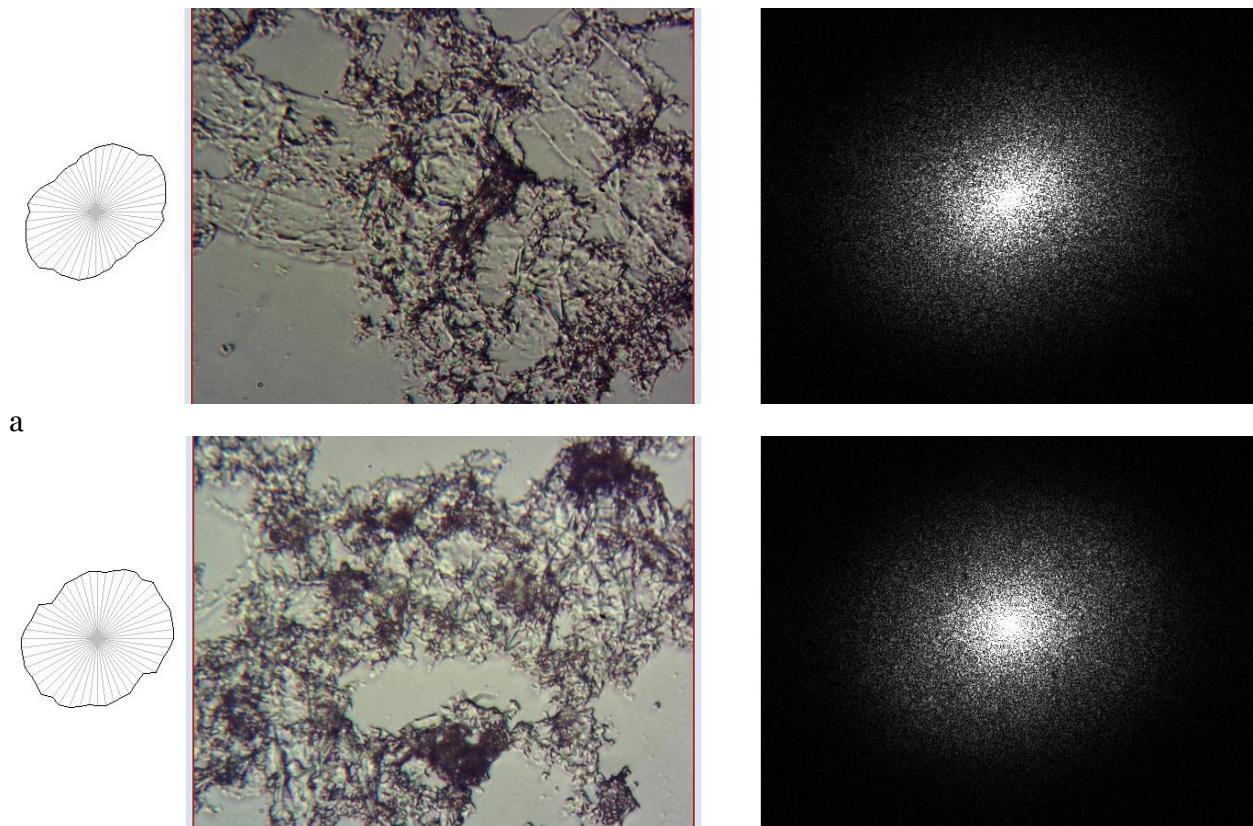


Рис. 9. Выраженность 2D гало возрастает по мере приближения к детриту / дебрису

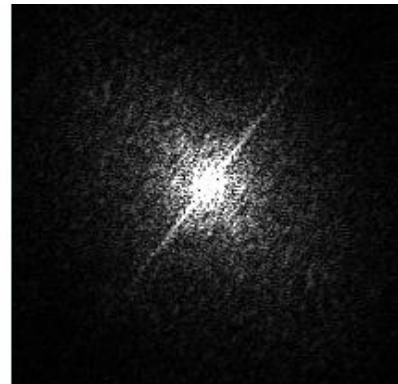
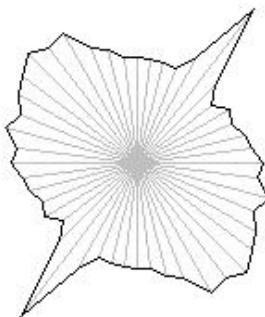
При изменении ориентации осветителя на штативе относительно волокон или тканевого дебриса "эллиптичность" огибающей интегральной пространственной характеристики может меняться.

Выраженность основного пика дифракции, в зависимости от положения источника света, также может существенно варьироваться от слабой (заглушаемой гало) и до экстремально сильной (Рисунки 10а, б).

Этот эффект подобен эффекту астигматизма в сканирующей электронной микроскопии, когда, варьируя "на глаз" астигматизм, можно либо подчеркнуть отдельные структуры/текстуры соответствующей ему ориентации, либо заглушить (элиминировать) их сигнал по заданной ориентации.



а

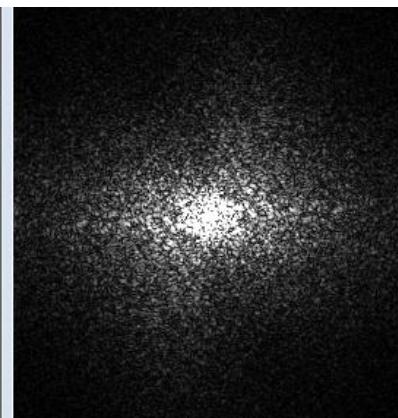
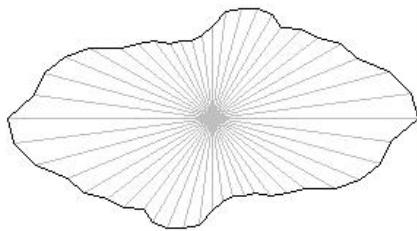


б

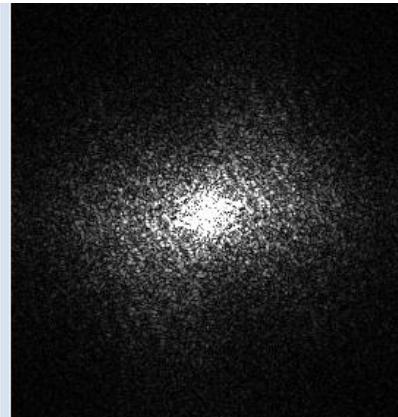
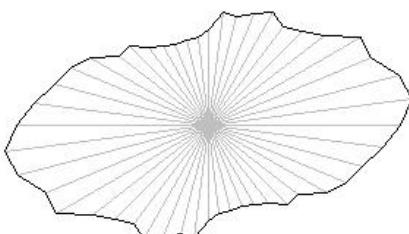
Рис. 10. Изменение выраженности основного пика дифракции, в зависимости от положения источника света.

6. Стабильность/воспроизводимость результатов измерений растительных структур от интенсивности освещения

При понижении интенсивности освещения "геометрия"/"морфология" интегральной пространственной характеристики (или огибающей изофот двумерного Фурье-спектра) сохраняется в основных абрисах. Это показано на [Рисунках 11а, б](#) (диффузная фаза) и [Рисунках 12а, б](#) (четко выраженная дифракция).



а

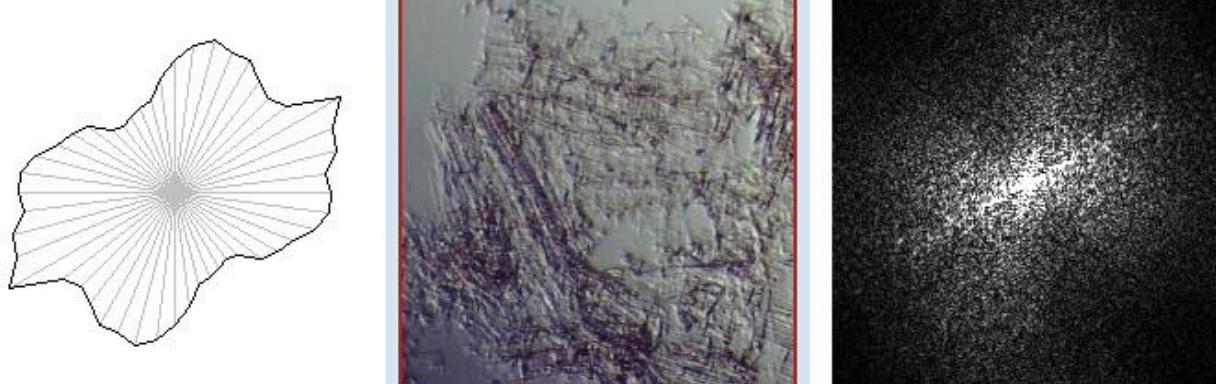


б

Рис. 11. Иллюстрация сохранения общих абрисов геометрии Фурье-спектра и расчетных характеристик, выполненных на его основе (начало)



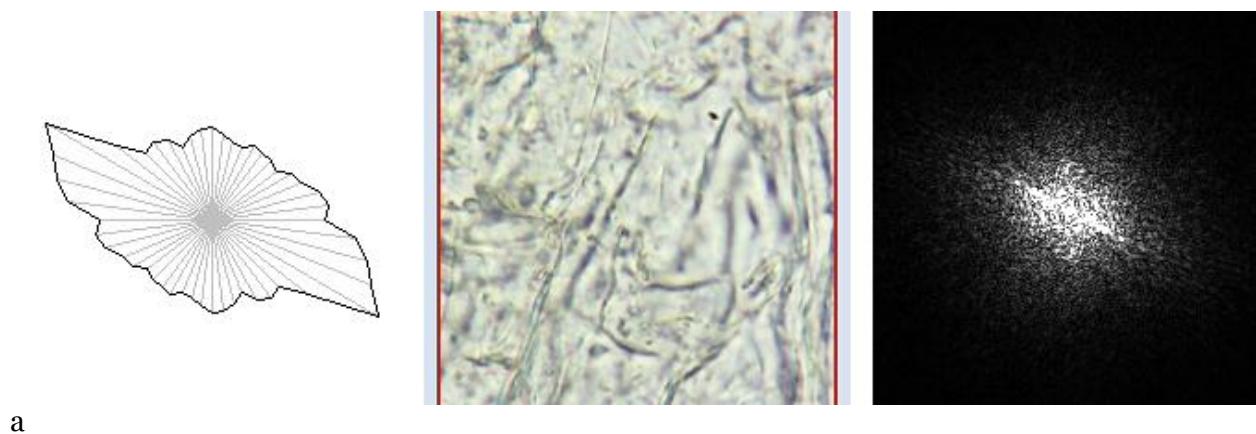
а



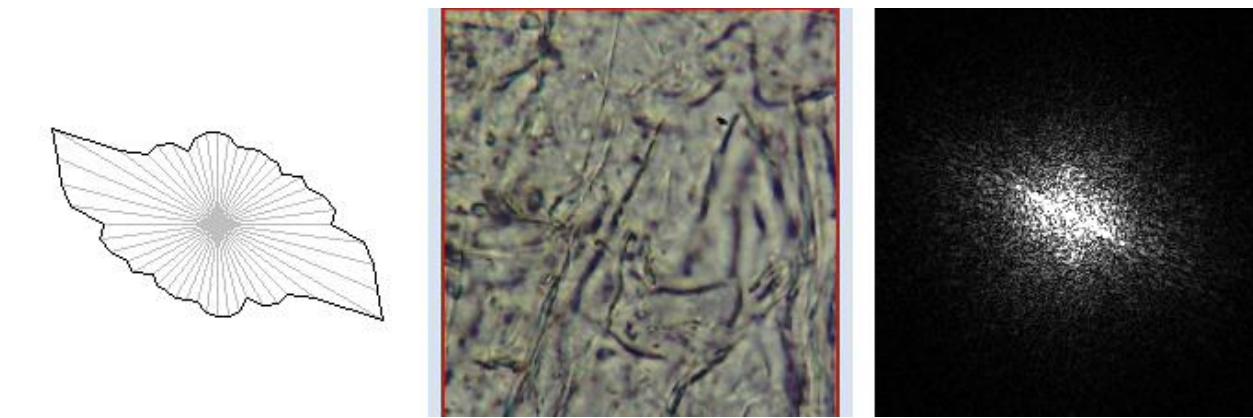
б

Рис. 12. Иллюстрация сохранения общих абрисов геометрии Фурье-спектра и расчетных характеристик, выполненных на его основе (продолжение)

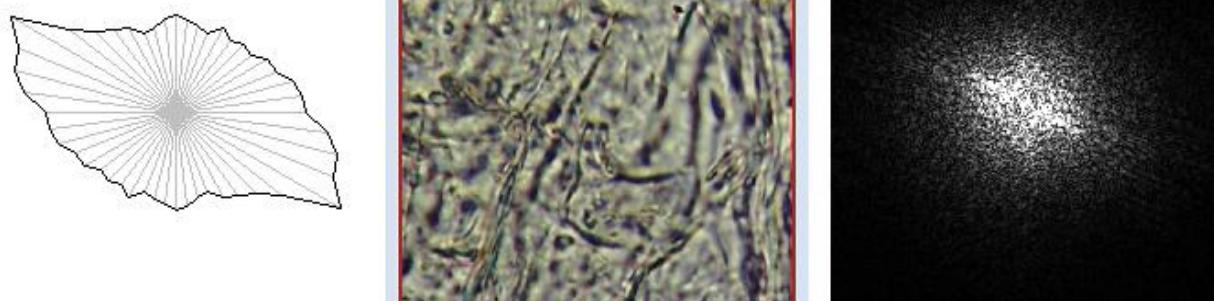
Однако крутизна интегральной пространственной характеристики (в зависимости от угла дифракции) будет меняться, как это показано на [Рисунках 13а-в](#). Это свойственно как для результатов регистрации с использованием освещения по Келлеру, так и для результатов регистрации с опак-иллюминатором/ультрапак-иллюминатором.



а



б

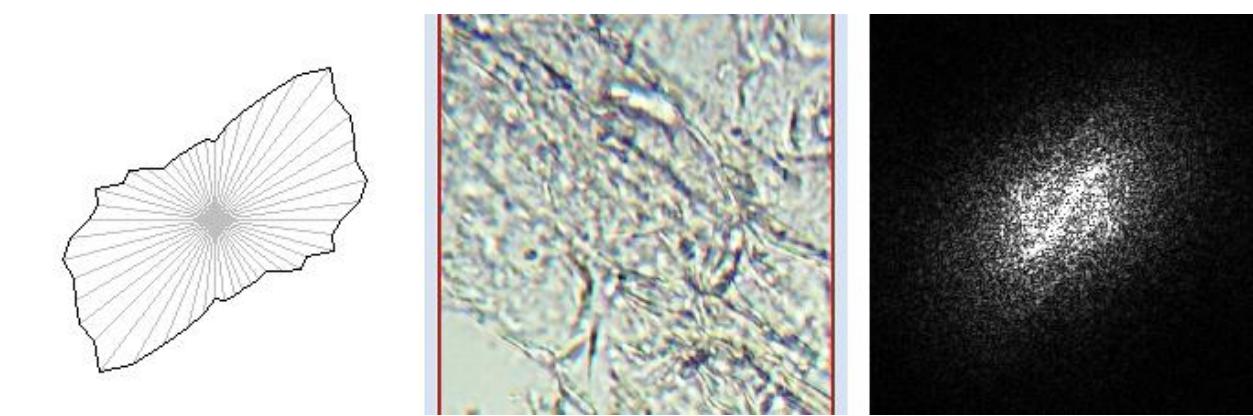


в

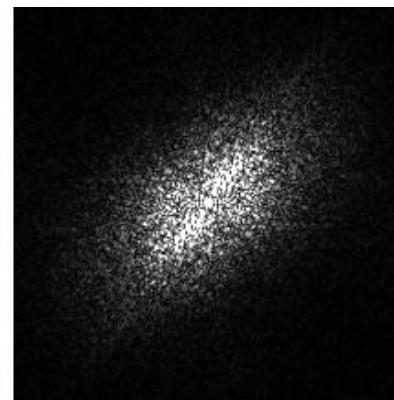
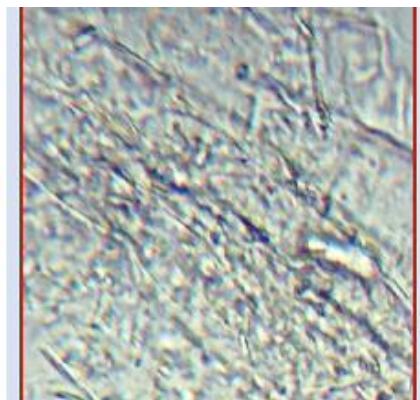
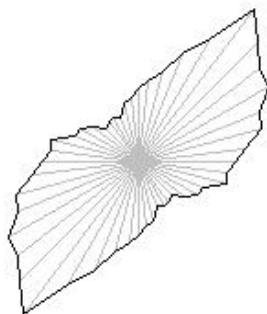
Рис. 13. Иллюстрация сохранения общих абрисов геометрии Фурье-спектра и расчетных характеристик, выполненных на его основе (окончание). Иллюстрируется влияние режима иллюминации на локальную крутизну интегральной пространственной характеристики

7. Влияние наличия пекулярных микроструктур на тканевых текстурах на результаты измерений при трансляции вдоль волокон и неприемлемость анализа сингулярных микроструктур, в силу артефактов

При трансляции вдоль одного волокна (осуществляемой физически, как правило работой с предметным столом) отдельные пекулярные структуры не будут воспроизводиться вдоль волокна от фрейма к фрейму (от ROI к ROI). Поэтому двумерный Фурье-спектр (2D FFT) и интегральная пространственная характеристика будут варьироваться в серии фреймов / кадров, как это показано на Рисунках 14а, б.



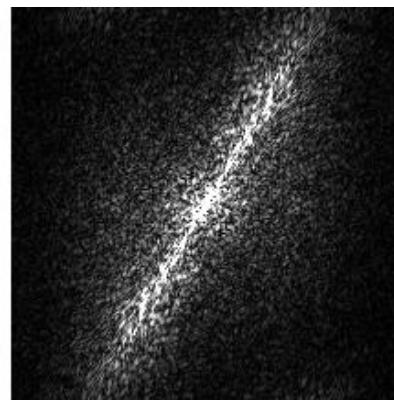
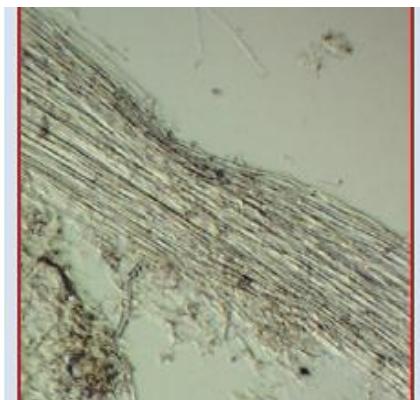
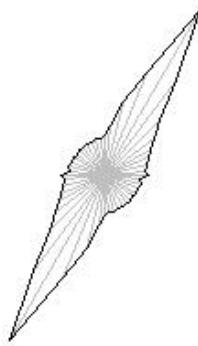
а



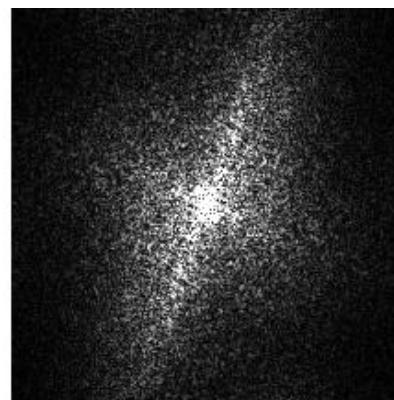
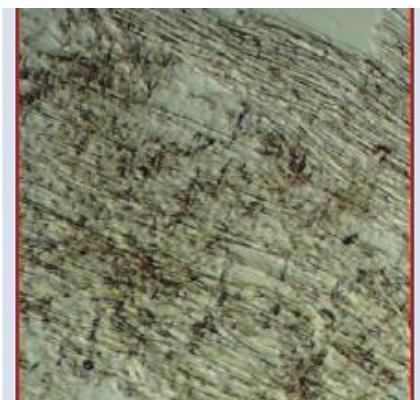
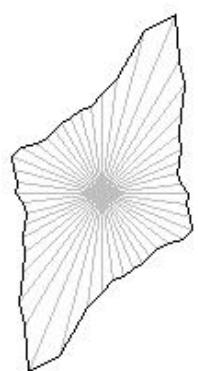
б

Рис. 14. Варьирование двумерного БПФ-спектра и его расчетной диаграммы при наличии палочковидной структуры

Для поперечно сжатых и продольно натянутых коллинеарных (параллельных в модельных приближениях) элементов механических тканей узость центрального пика будет больше, чем для более рыхлых элементов. Это показано на [Рисунках 15а, б](#).



а



б

Рис. 15. Сравнение дифрактометрических характеристик для сжатой и рыхлой ткани

При регистрации необходимо избегать "сингулярности" детектируемых микрообъектов в области анализа (в ROI). В противном случае при автонормировании интенсивности по области отображения спектра будут возникать ложноположительные артефакты "высокой организации", что показано на [Рисунках 16а-в](#).

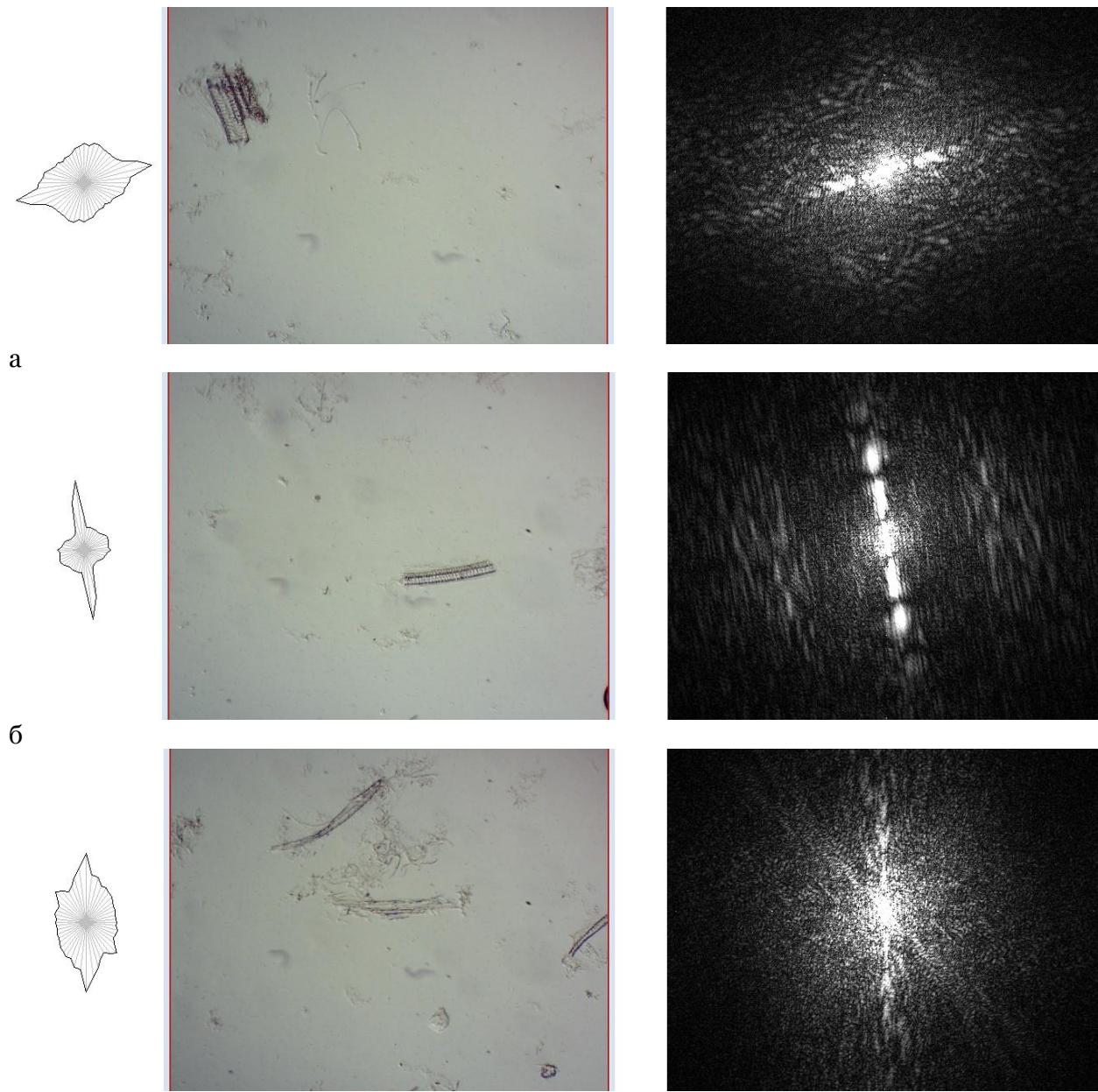


Рис. 16. Возможные артефакты сингулярных микрообъектов

8. Различные режимы дифракции в анализе биоматериала: дифракция на решетке, дифракция на щели, дифракция на кольцевых элементах

При преобладании продольных растительных волокон будет отрабатываться "дифракция на решетке" (Рисунок 17а), при наличии топологических неоднородностей (колец, ситовидных трубок, поперечных элементов флоэмы и т.д.) будет отрабатывать режим дифракционной оптики, близкий к дифракции на кольцевых элементах (Рисунок 17б), при появлении сложных многорядных текстур (не волокна и не одиночные срезы ткани, а элементы среза, содержащие в себе 2 и более рядов четко выраженных клеток) на спектре будут проявляться как продольные, так и поперечные элементы (Рисунок 17в).

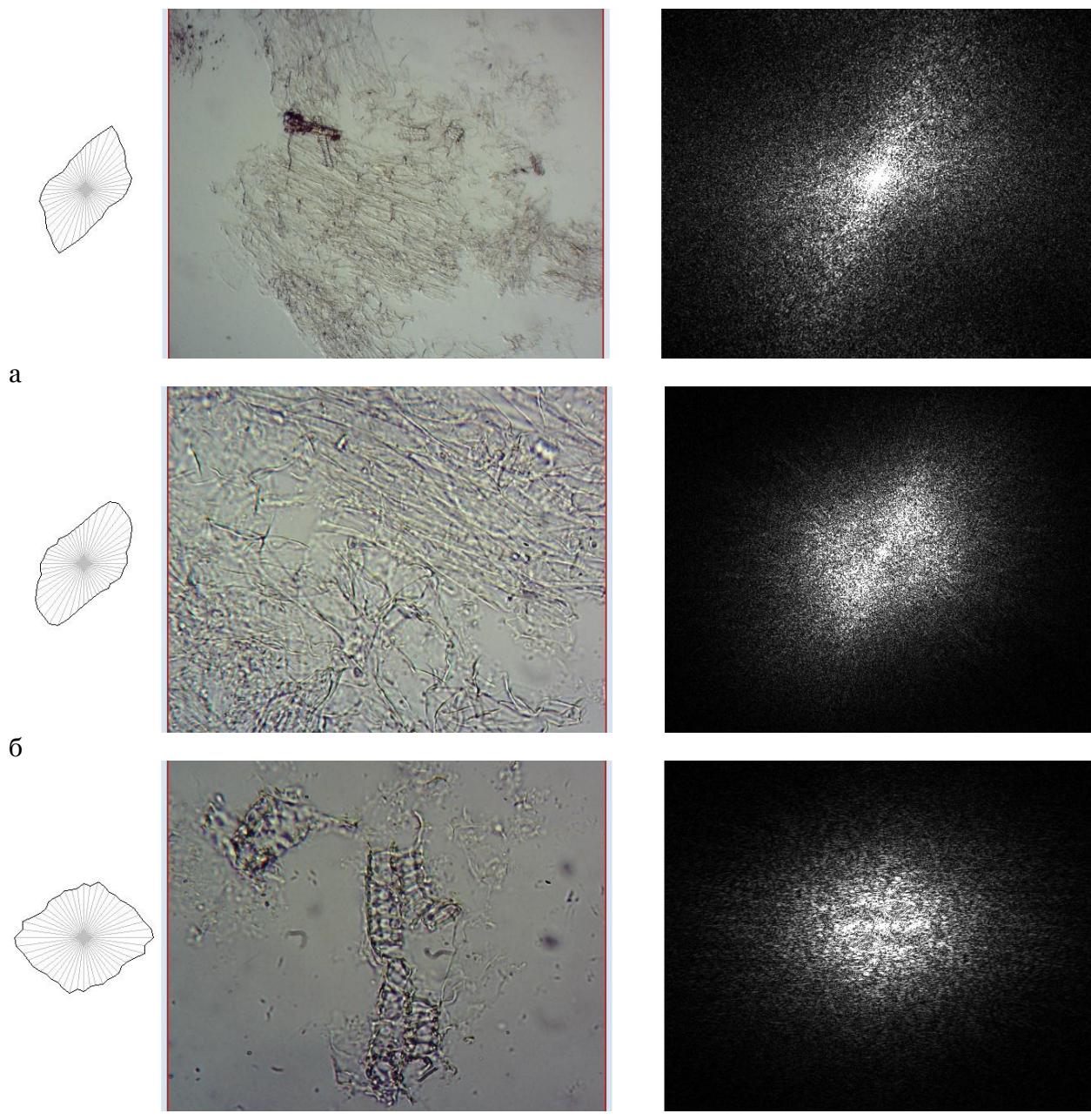


Рис. 17. Формы дифракции при наличии продольных растительных волокон ("дифракция на решетке": а) при наличии скрытых топологических неоднородностей (с "дифракцией на кольцевых элементах"); б) при появлении сложных многорядных текстур с различными по угловой ориентации элементами (в)

Самый идеальный пример рассеяния на круговых/кольцевых структурах может быть продемонстрирован на неизбежно встречающихся в препаратах пузырьках ([Рисунки 18а, б](#)). Точность отработки данной картины может являться калибровочным сигналом для установки настроек освещения на микроскопах, так как при неоптимальном сдвиге источника "кольца"/"концентрические окружности" меркнут.

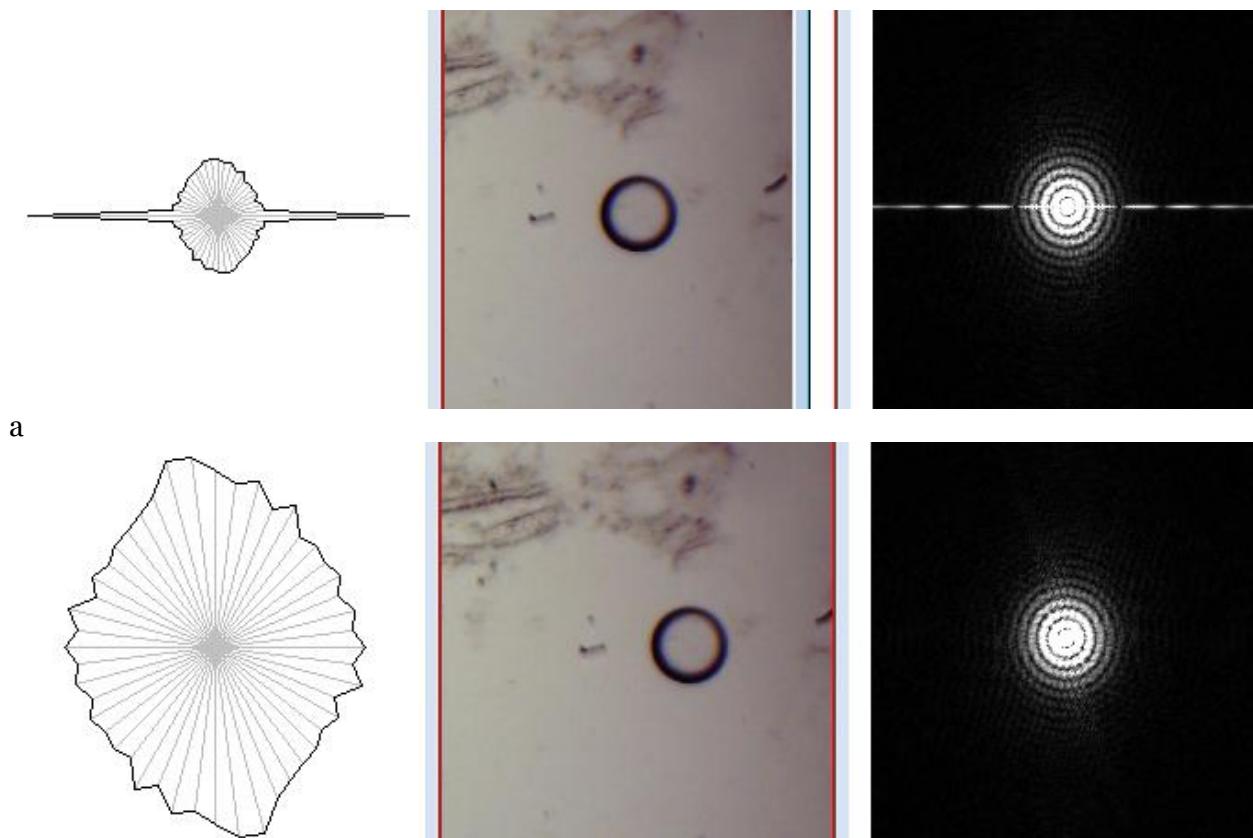


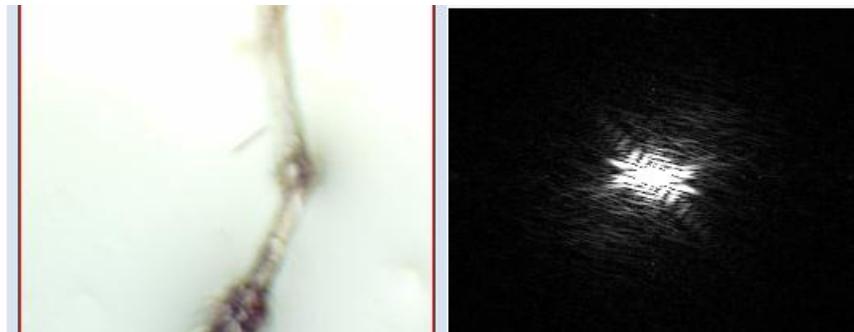
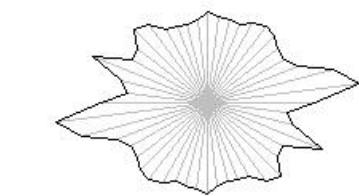
Рис. 18. Пример дифракции на круглых и кольцевых структурах: пузырьки воздуха, часто попадающиеся в метаболически активных препаратах, в которых продолжается фотосинтез с газовыделением.

9. "Фокускопические" тесты: как меняется форма дифрактометрических характеристик при варьировании высоты предметного стола?

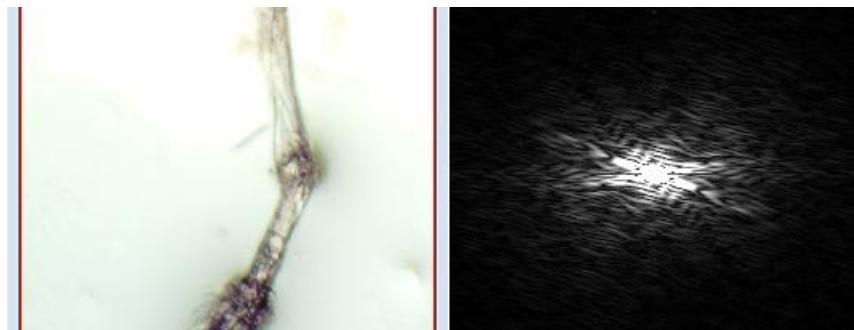
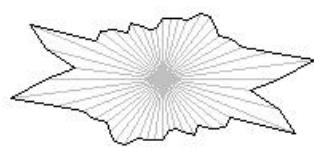
Как выглядит зависимость двумерного Фурье-спектра и интегральной пространственной характеристики от фокусировки на растительном образце? Это можно проиллюстрировать на примере серии снимков, снятых при различной фокусировке или высоте предметного стола, как это показано на Рисунках 19а-ж.



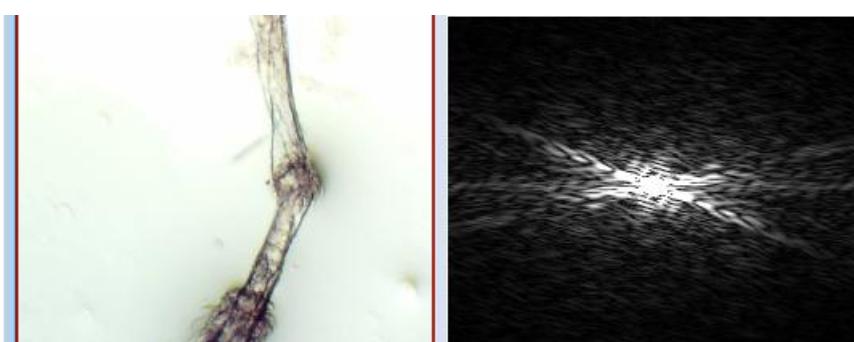
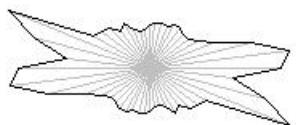
а



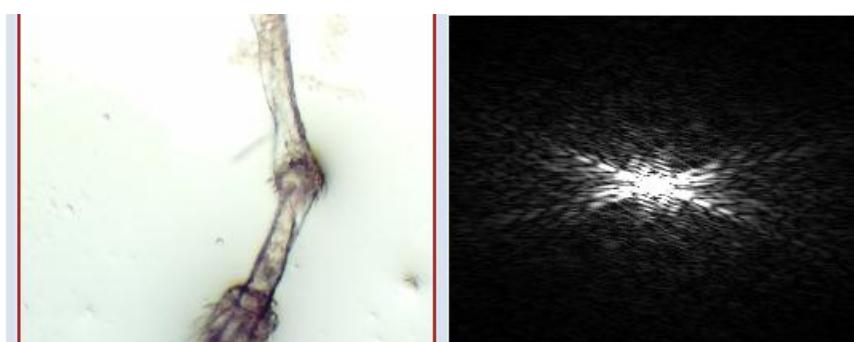
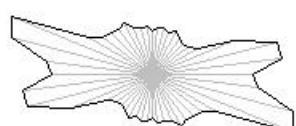
б



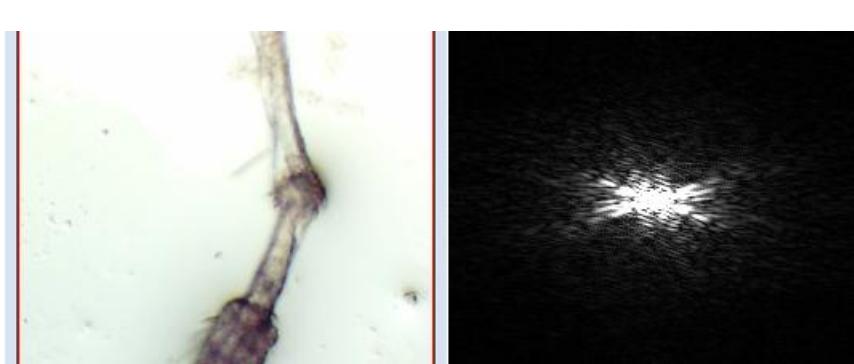
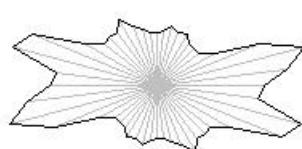
в



г



д



е

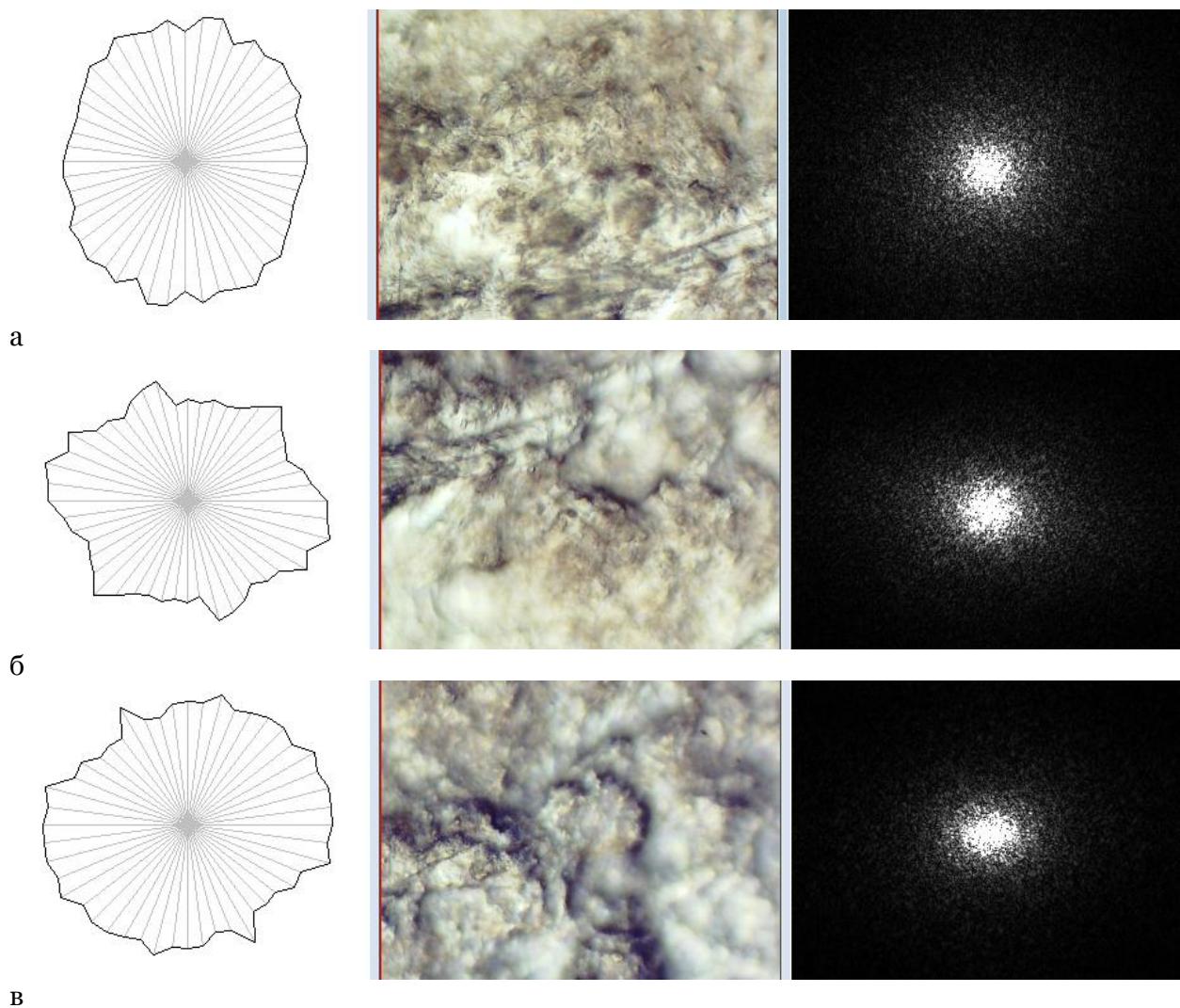


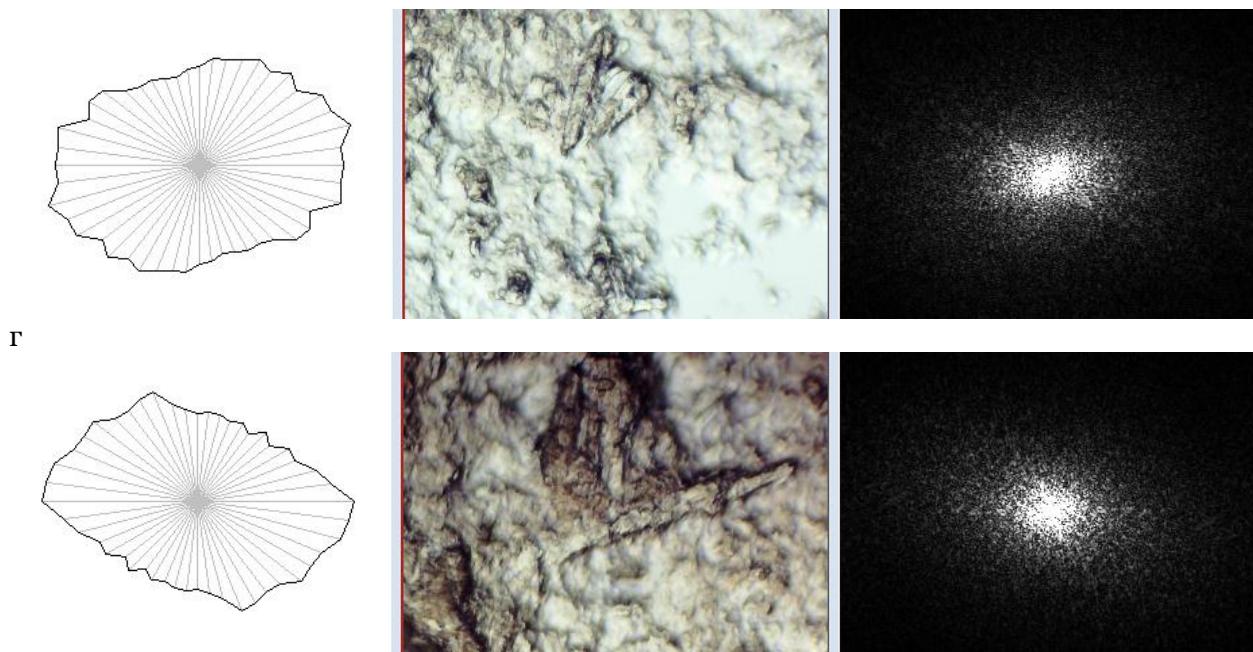
ж

Рис. 19. Изменения двумерного Фурье-спектра и интегральной пространственной характеристики растительного образца при варьировании фокусировки столом

10. Анализ растительных «композитных» структур, содержащих аморфную часть.

Особо сложным является выделение структурных элементов организации растительного материала в композитах на основе биогенных частично упорядоченных сред/коллоидов/геоколлоидов, а также эксудатов растений (в частности гуттационного происхождения) и симбиотических ассоциатов (типа клубеньковых бактерий на корнях). В этих случаях, как правило, организованный элемент соседствует с аморфной стохастически рассеивающей и не дающей выраженных пиков средой, маскирующей наличие организованных элементов. Это показано на примерах на серии изображений, приведенных на [Рисунках 20а-д](#).

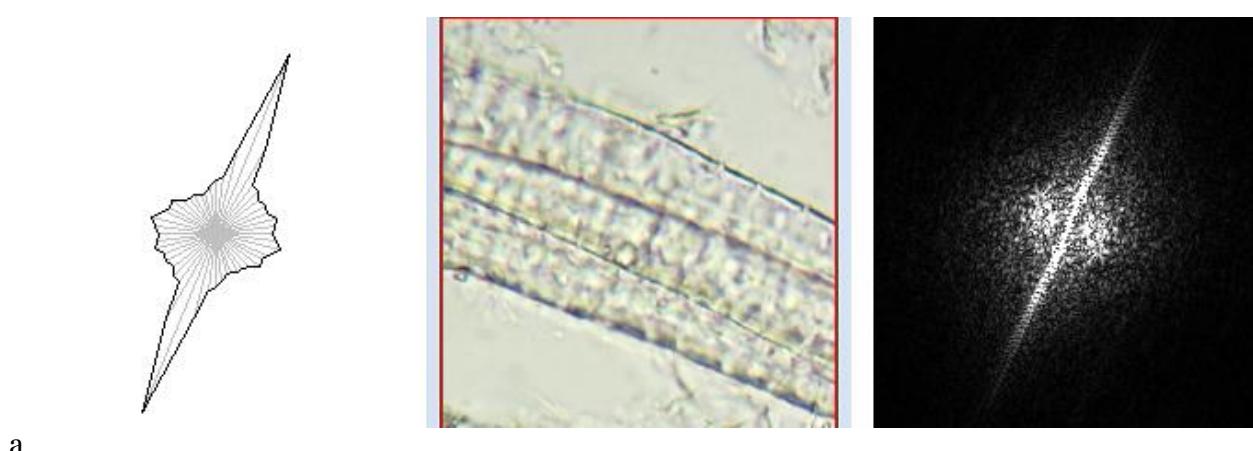


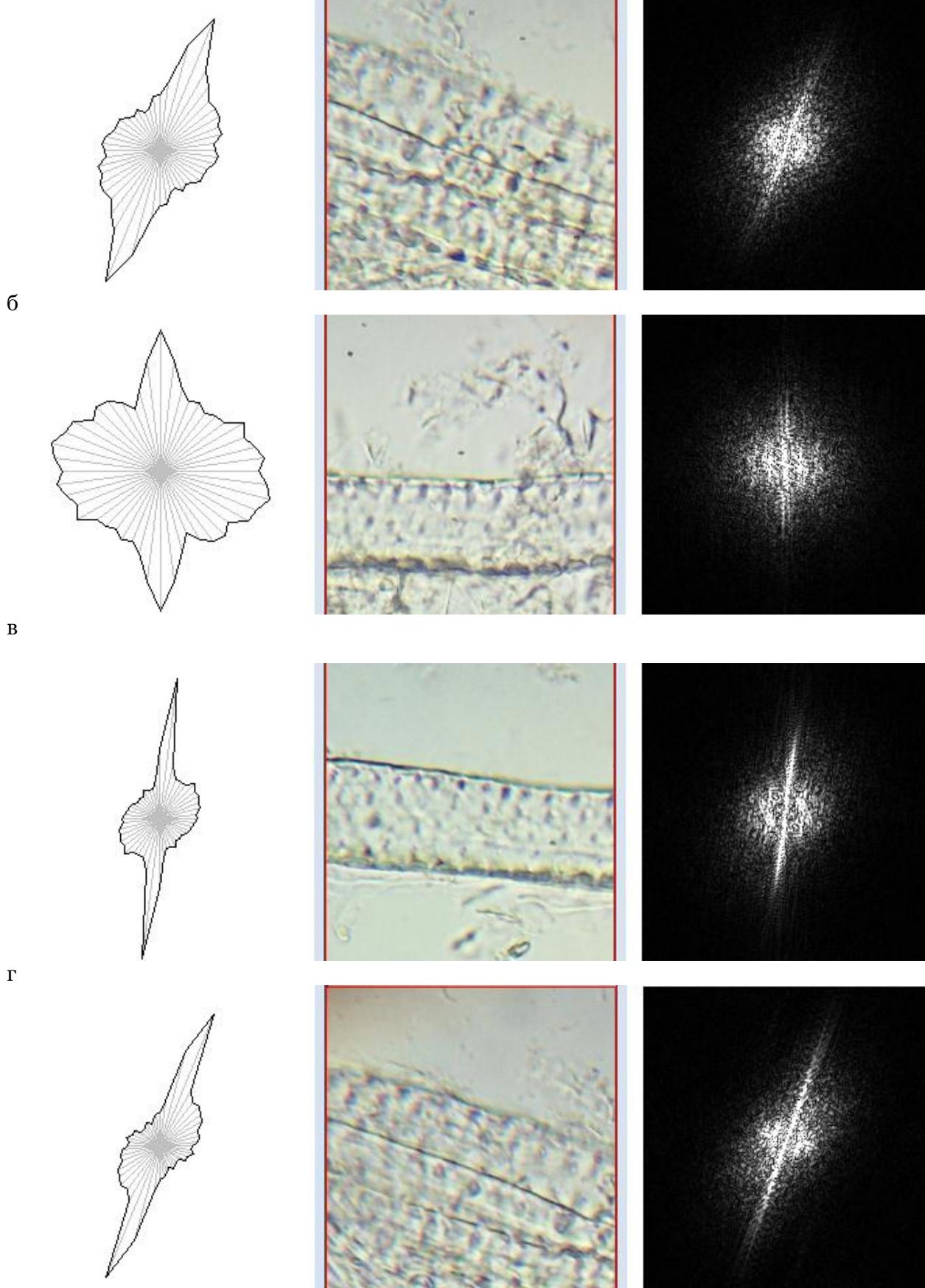


Г
Д
Рис. 20. Дифрактометрия образцов с морфологически аморфной компонентой. Подобные ситуации возникают при обогащенности образца биогенной гидрогелевой компонентой

11. Воспроизводимость результатов измерений и их независимость от угла положения объекта

Принципиальным является то, что для всех однотипных структурных элементов растения можно накопить статистику воспроизводимости двумерных Фурье-образов и расчетных интегральных пространственных характеристик в классе. Так, например, для элементов корня, содержащих и продольные волокна, и клетки, аппроксимируемые сферическими (в случае паренхимной формы) или эллиптическими (в случае прозенхимной формы) типами аппроксимант, можно найти десятки примеров подобных паттернов 2D FFT и огибающих интегральных пространственных характеристик, не зависящих от ориентации элементов в пространстве. На них всегда будет наблюдаваться одиничный пик (разной ширины) и "гало" дифракции, в основе имеющее характерную кольцевую симметрию. Пример этого дан на Рисунках 21а-д.





д

Рис. 21. Инвариантная к углу наклона воспроизводимость оптико-дифрактометрических характеристик растительных тканей

Степень фокусировки несущественно влияет на данные паттерны, как это показано на Рисунках 22а, б.

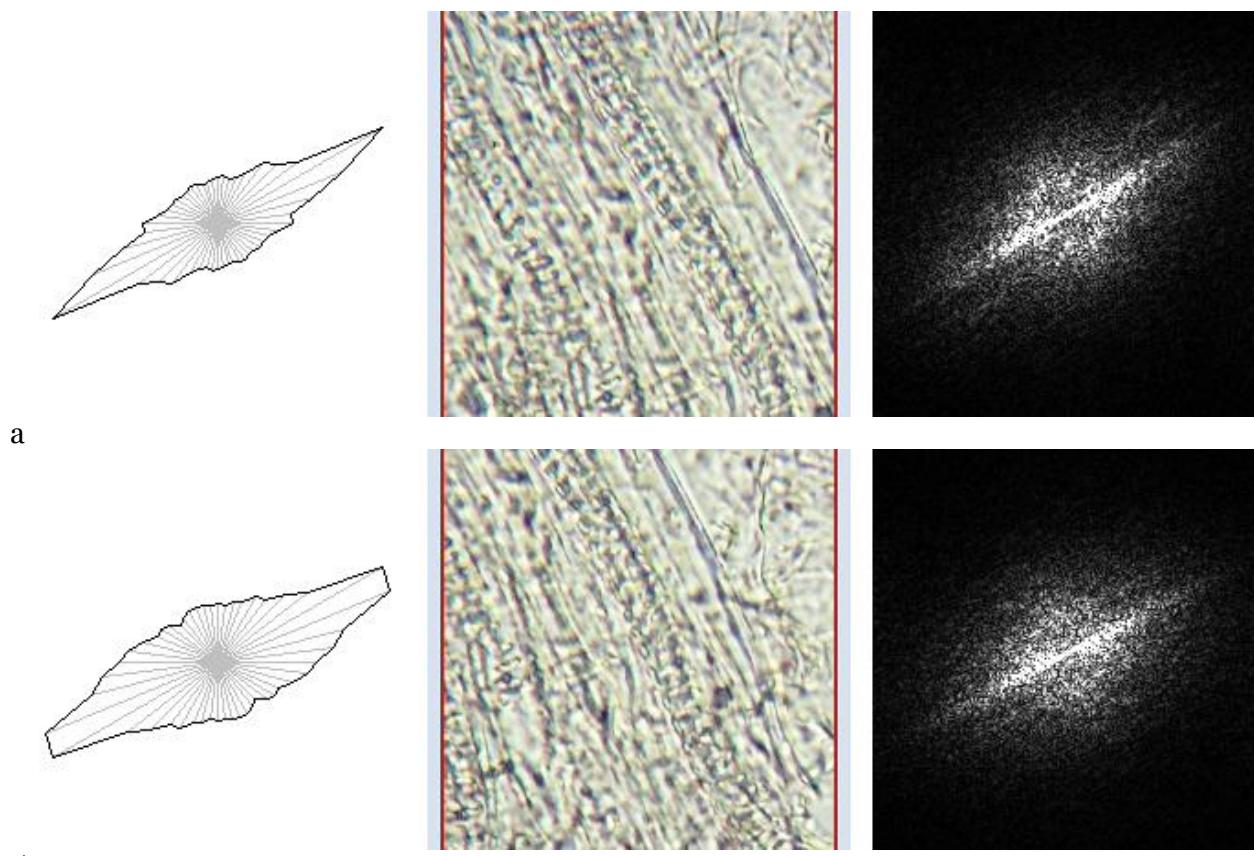
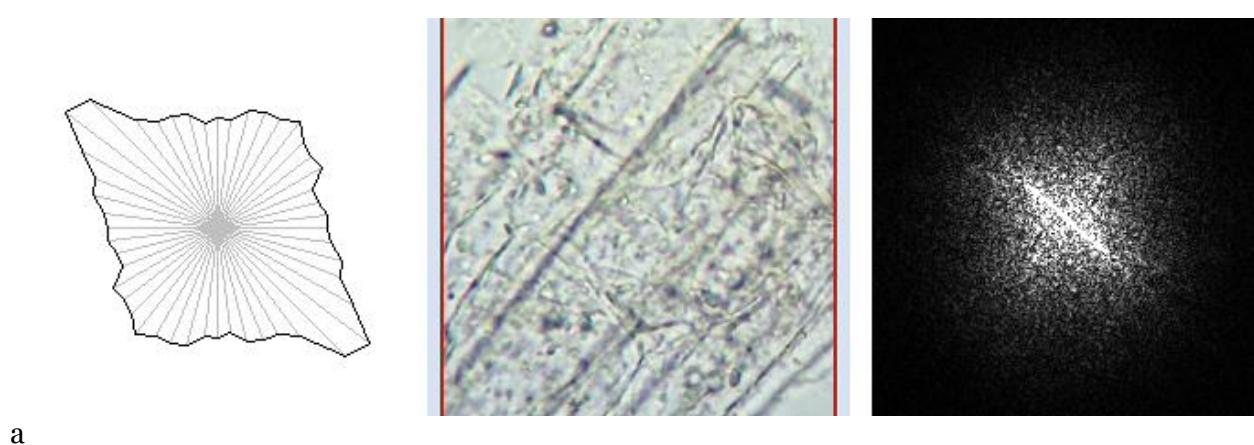
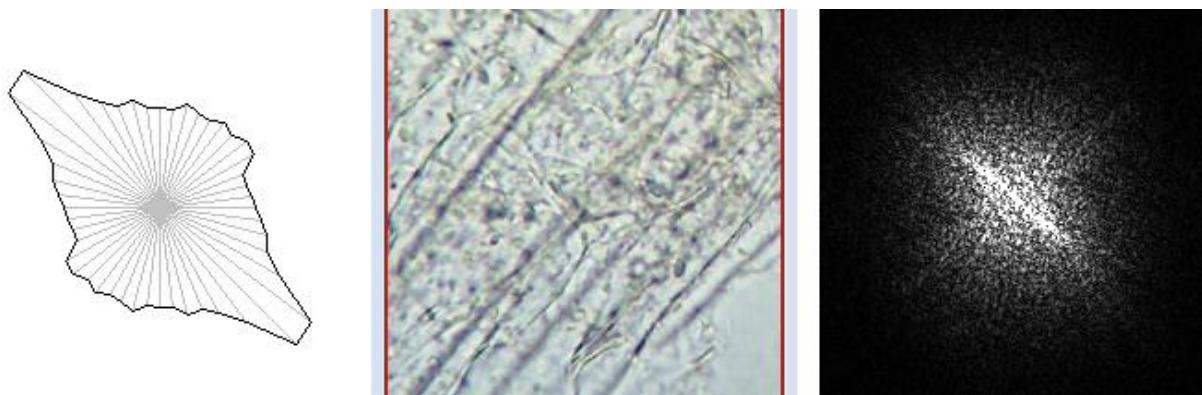


Рис. 22. Инвариантность двумерных Фурье-спектров (не считая границы отсечки) к частичному изменению фокусировки (предметным столом)

12. Рассеяние на растительных тканях в режиме дифракционной решетки и влияние поперечных перегородок/клеточных стенок на результат измерений

В структурах, где волоконный компонент остался в большей сохранности, чем округлые клети, превалировать будет рассеяние как на дифракционной решетке. Это показано на Рисунках 23а, б, где, несмотря на гало и наличие небольших почти перпендикулярных компонент, преобладает дифракция на продольных растительных волокнах.



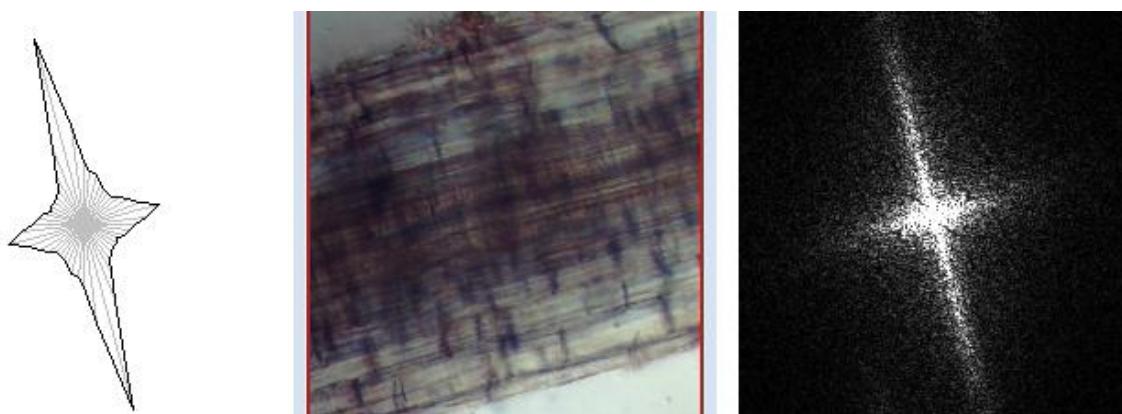


б

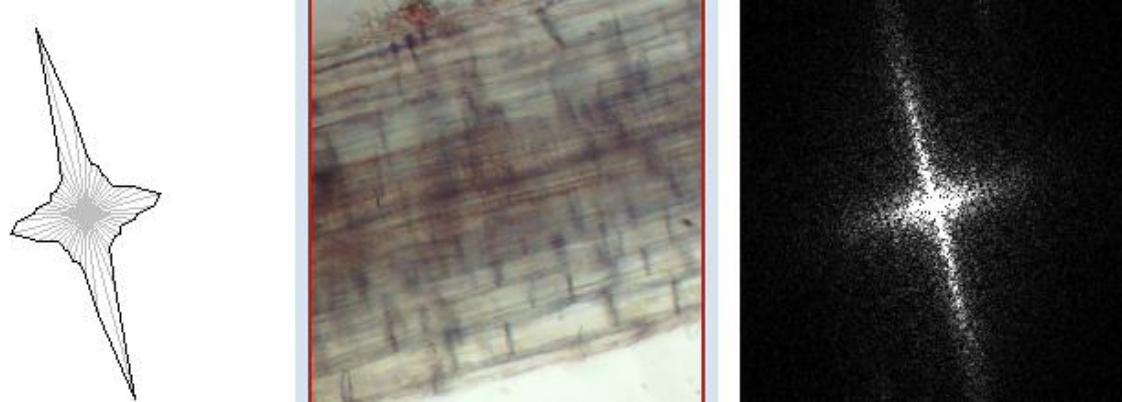
Рис. 23. Пример структуры с преобладанием дифракции на продольных волокнах

Если клетки или иные структурные элементы/модули текстуры имеют несферическую и неэллиптическую форму, но ориентация их отличается от ориентации главного волокна, то это будет проявляться на двумерных Фурье-спектрах, интегральных пространственных характеристиках как пики, не соответствующие главному пику, отвечающему волоконным компонентам главной (превалирующей) ориентации. Это иллюстрируется на серии изображений на [Рисунках 24а-ж](#). Для показываемого случая, когда в ткани присутствуют поперечные перегородки или стенки клеток, то будут видны боковые пики, соответствующие этим стенкам клеток.

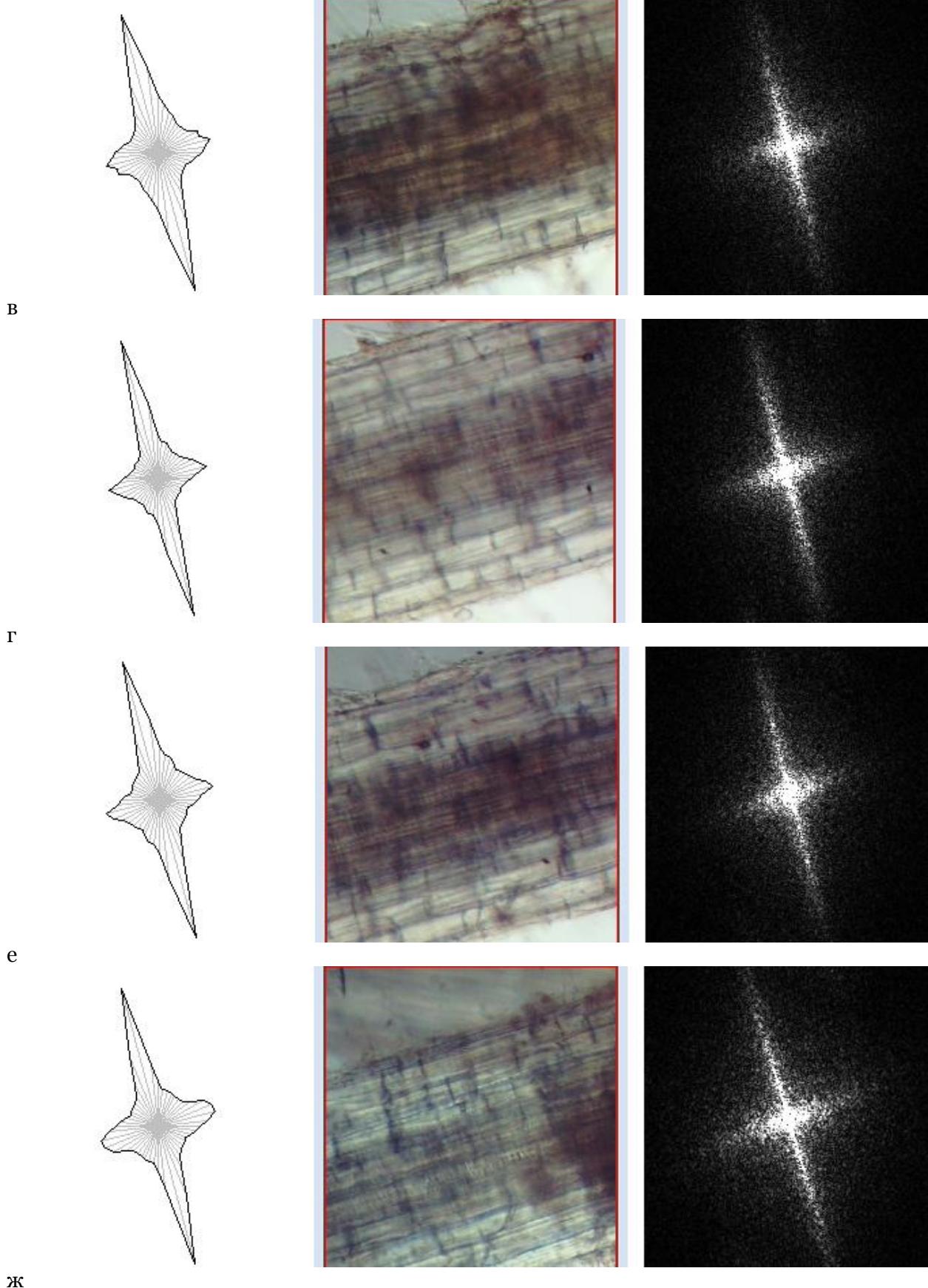
Так как они ортогональны/перпендикулярны волокну, с существенной вероятностью, эти пики будут ортогональны/перпендикулярны пикам, отвечающим расположению основного волокна. Интенсивность пиков будет зависеть от того, насколько много (в пространственном аргументе) занимают поперечные клеточные стенки относительно регулярного базового волокна. Так, на рис. видно, что сигнал от поперечных клеточных стенок занимает менее $1/3$ от сигнала целого волокна.



а



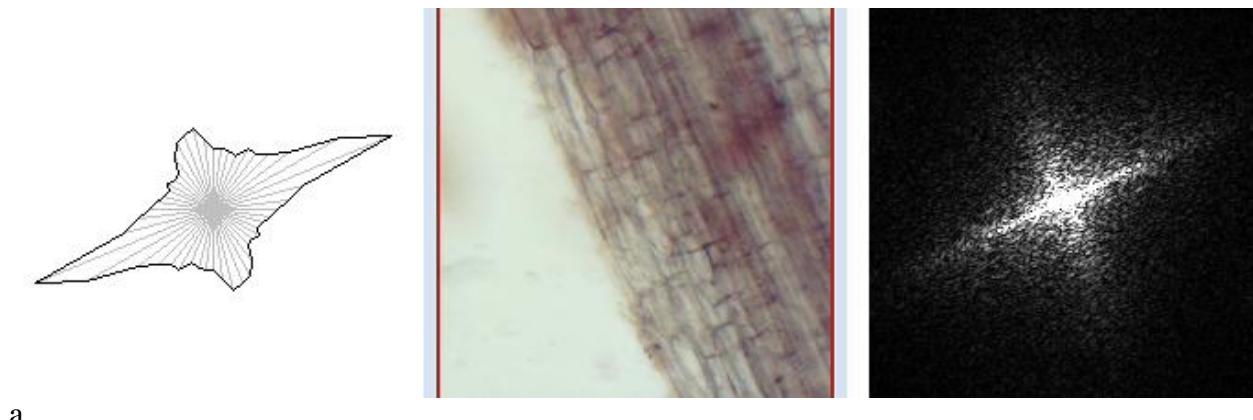
б



ж

Рис. 24. Пример структуры с дифракцией и на продольных волокнах, и на поперечных клеточных стенках

Можно провести контрольный эксперимент, повернув волокно на 90 градусов. Тогда его главный пик также повернется на 90 градусов, но сигнал от поперечных стенок клеток (он также повернулся на 90 градусов) останется на спектре не превышающим 1/3 от мощности центрального волокна. Один из многочисленных реализованных нами примеров данного тестирования приведен на [Рисунках 25а,б](#).



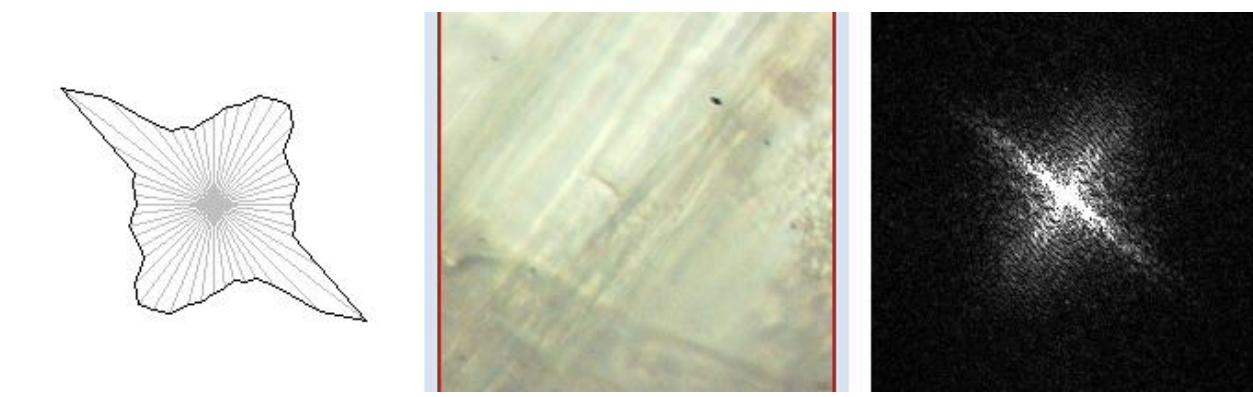
а



б

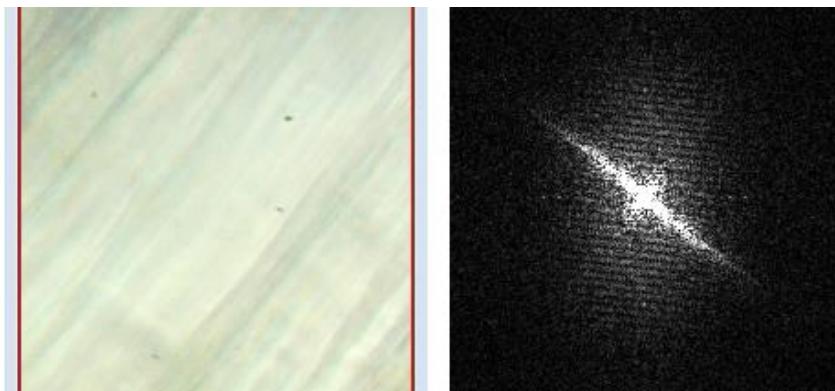
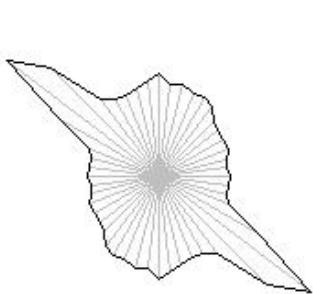
Рис. 25. Сохранение соотношения уровней сигнала по перпендикулярным составляющим при повороте образца

Иногда мы можем не видеть глазом тонкие элементы пространственной ориентации, но из этого нельзя делать вывод, что их не существует (как делали ранние фитоанатомы XIX в. – периода до Шлейдена и Шванна). Их наличие/отсутствие можно детектировать прямым физическим путем (через использование оптической дифрактометрии на установках, один пример которых дан во введении) либо эмулирующим математическим цифровым путём – с помощью двумерного БПФ изображений, захватываемых с экрана в реальном времени в ходе микроскопии. Пример такого детектирования на серии ROI приведен на [Рисунках 26а-е](#).

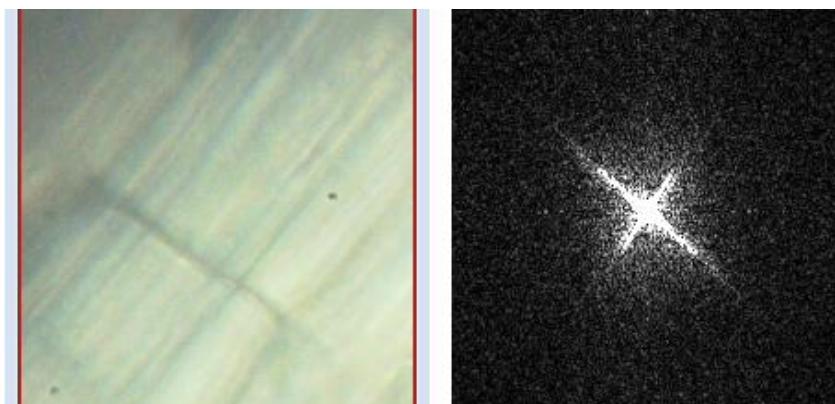
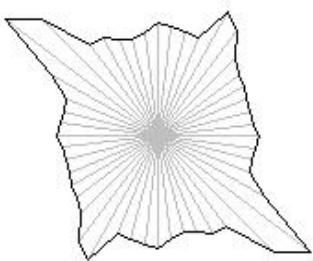


а

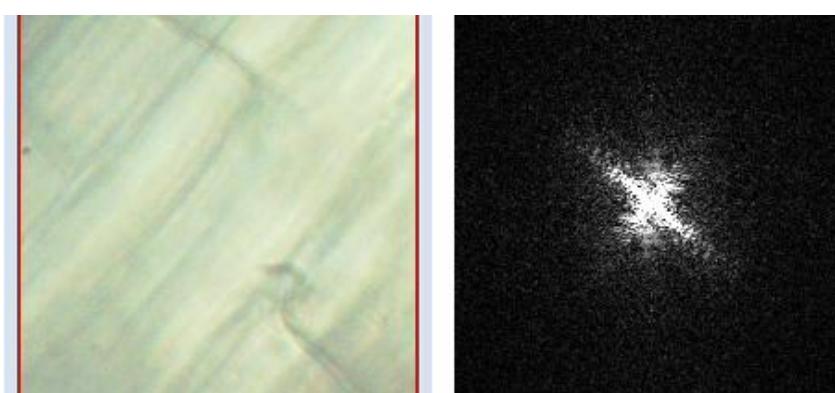
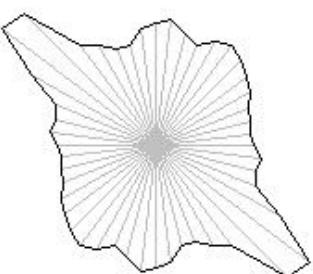
б



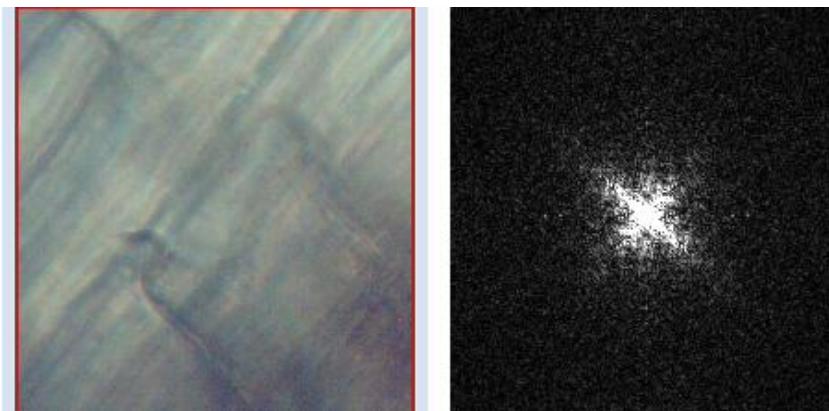
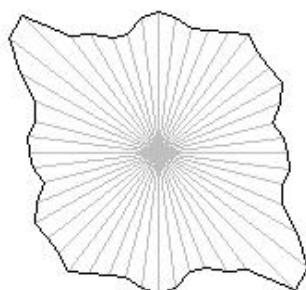
в



г



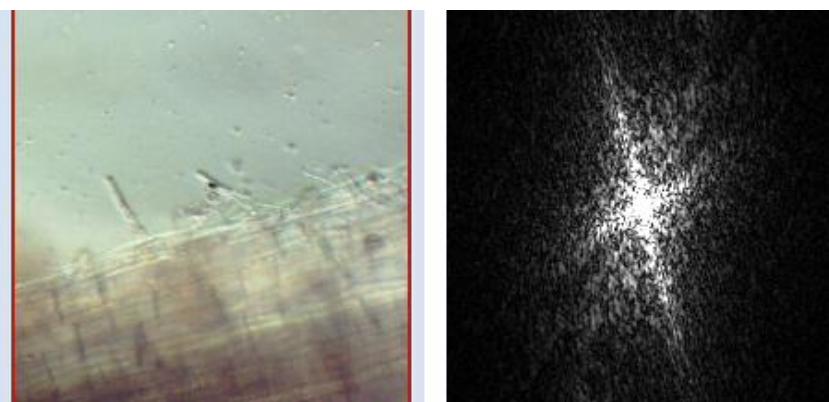
д



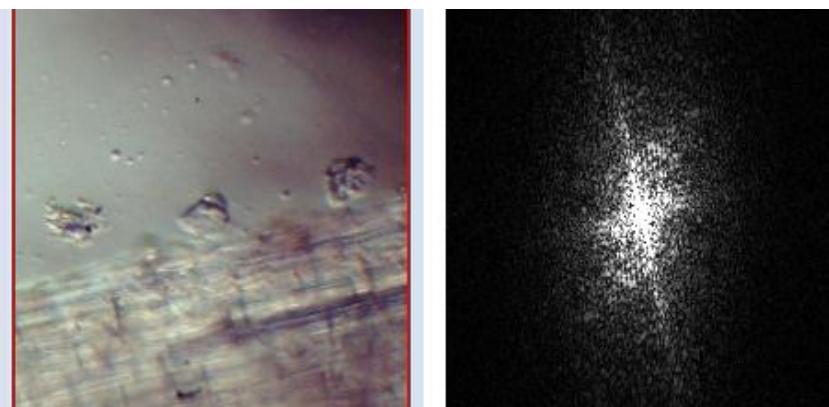
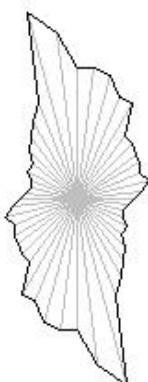
е

Рис. 26. Детектирование редких, скрытых и замаскированных поперечных элементов при использовании корреляционно-спектрального анализа как цифровой эмуляции оптической дифрактометрии

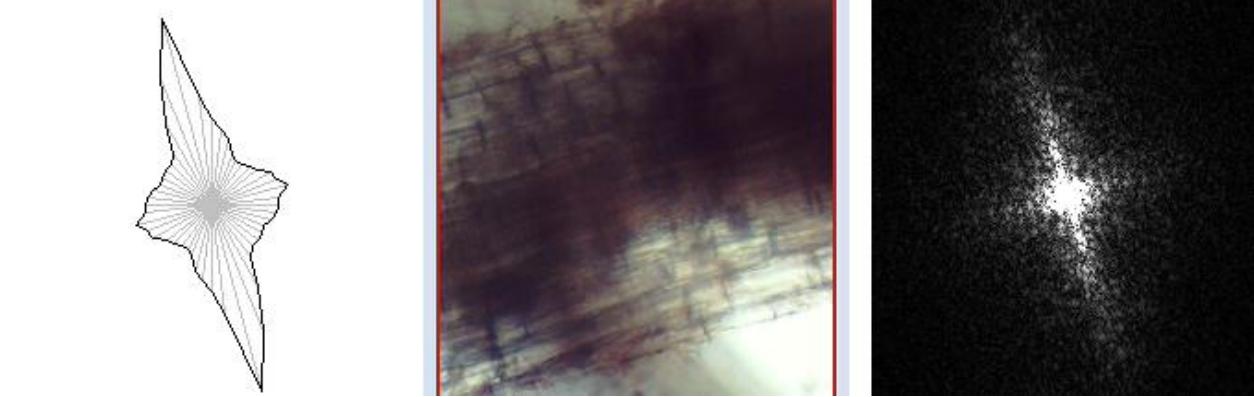
Помехоустойчивость данного алгоритмического подхода в фитоанатомии можно доказать, анализируя наличие поперечных и сдвинутых по углу компонент на зашумленных, маскированных детритом и затемненных изображениях, как это сделано на Рисунках 27а-в. Можно видеть, что распознавание их в большинстве случаев происходит достоверно.



а



б



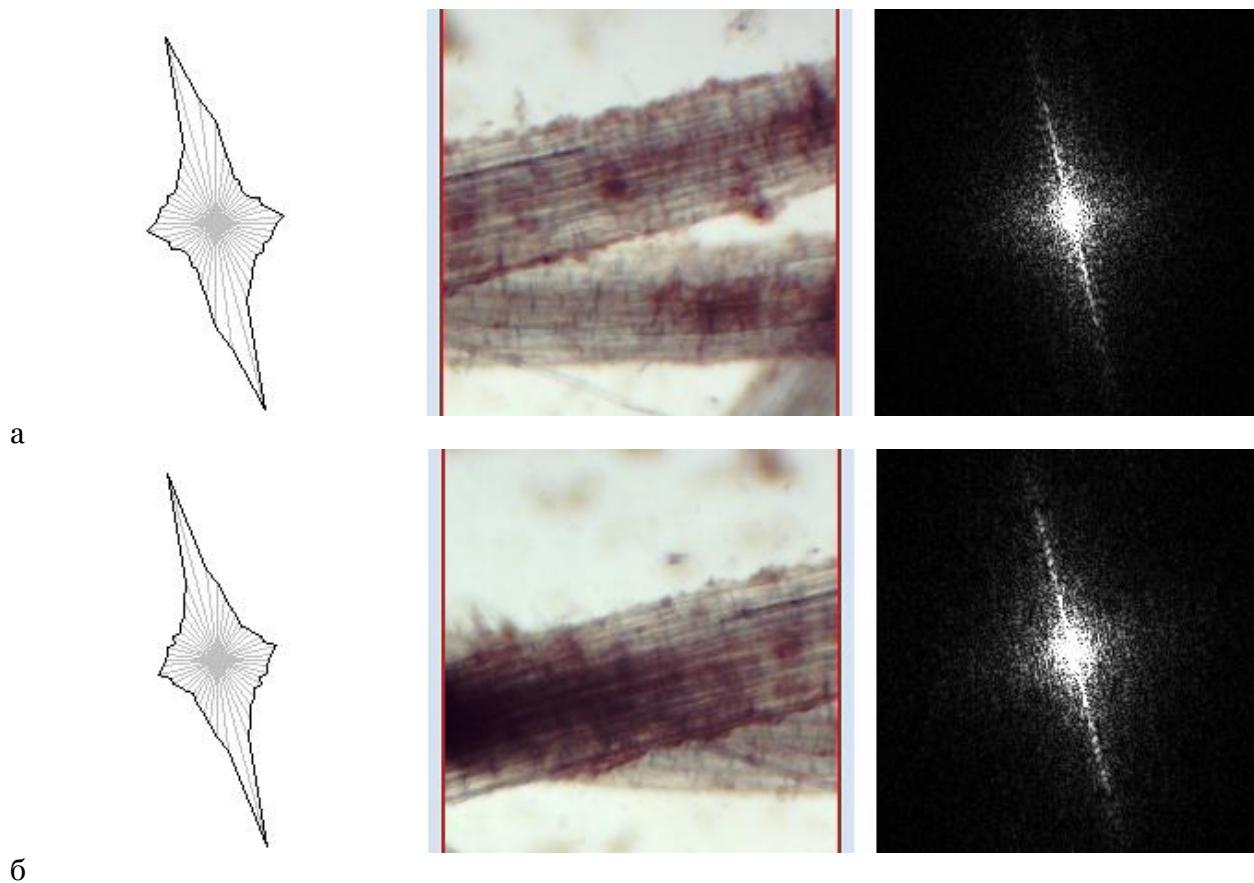
в

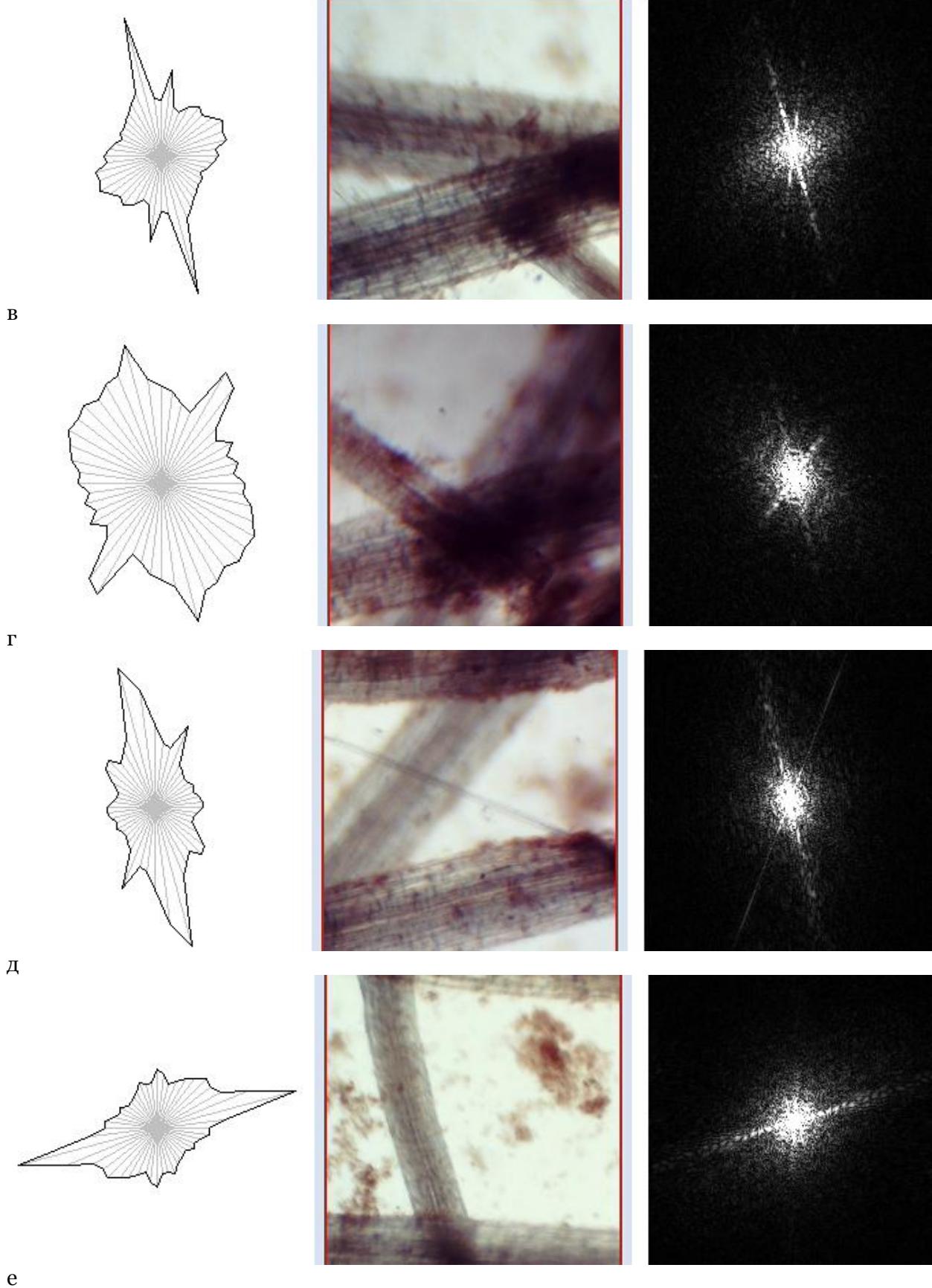
Рис. 27. Анализ наличия поперечных и сдвинутых по углу расположения компонент на зашумленных, маскированных детритом и затемненных изображениях

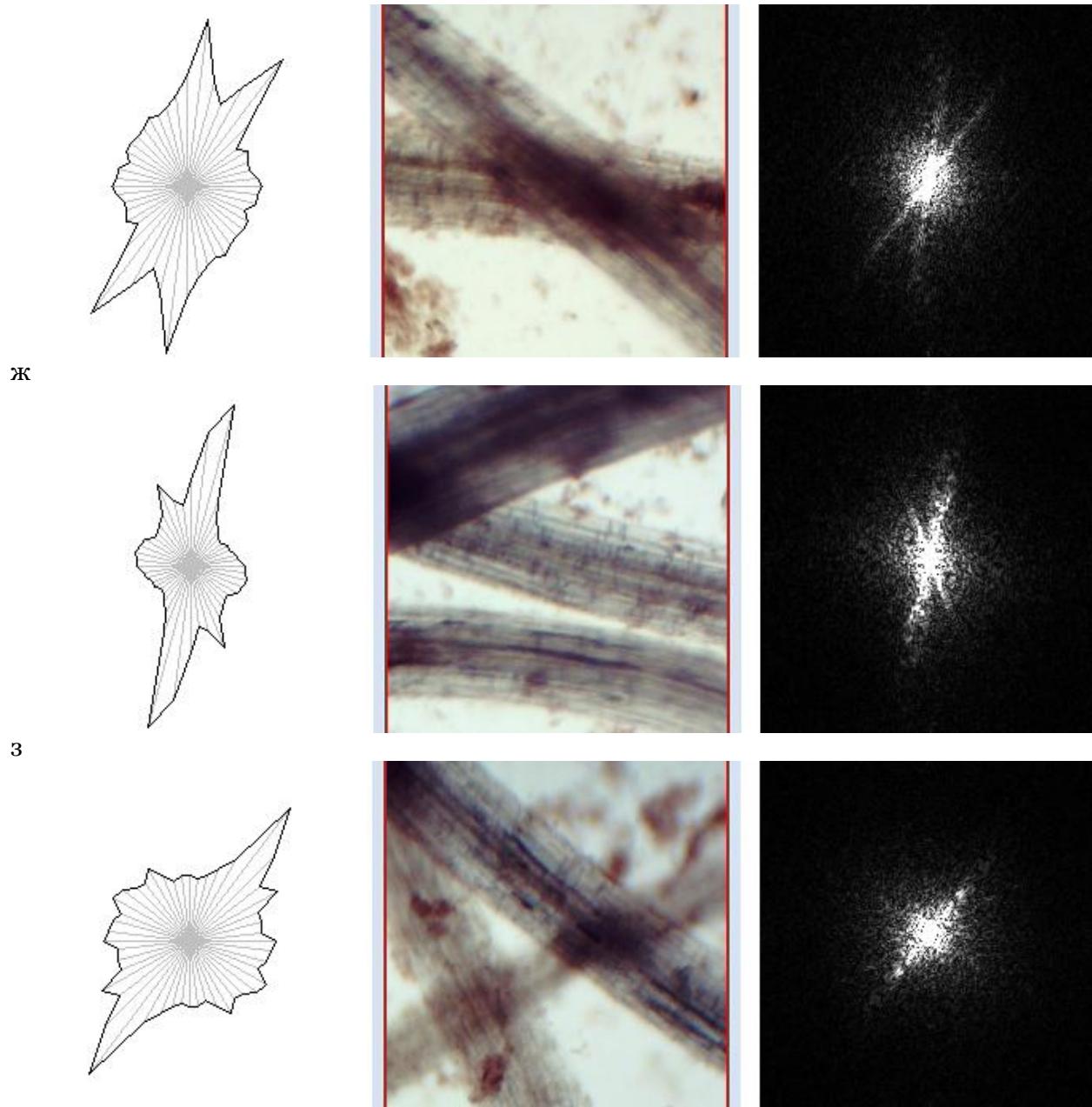
13. Опасности измерений множества сохранных волокон на (сверх)малых увеличениях.

Казалось бы, следует рекомендовать данные исследования, начиная с крупных сохранных волокон, хорошо видимых и на малых увеличениях. Однако есть два проблемных момента:

- распознать целостность микроволокон на малых увеличениях не всегда возможно
- на малых увеличениях в поле зрения всегда попадают несколько волокон, которые в ряде случаев (особо при попадании в один фокус) существенно смещают дифрактограмму, как это показано на примерах на [Рисунках 28а-и](#).







и
Рис. 28. На малых увеличениях в поле зрения всегда попадают несколько волокон, которые часто существенно смещают дифрактограмму и вычисляемые характеристики

14. Сигналы при наличии изломов и боковых ответвлений, а также корневых волосков.

Более того, многие из этих структурных элементов ветвятся или являются отходящими от корня, как корневые волоски. Поэтому возникают дополнительные максимумы, которые могут быть как угодно ориентированы относительно основного ([Рисунки 29а-в](#)), что зависит от геометрии и тропизмов конкретных органов в анатомии растения.

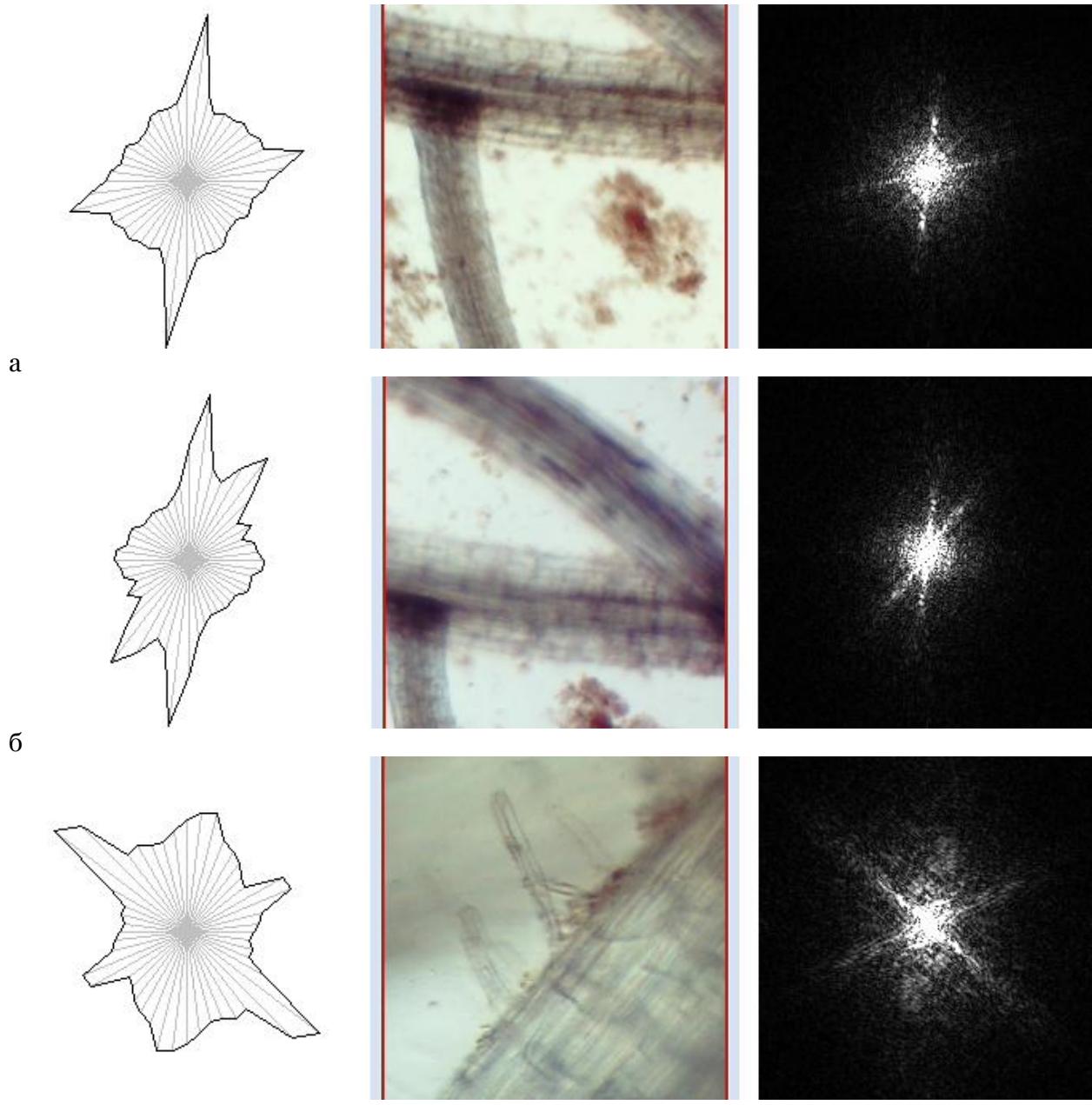


Рис. 29. При наличии ответвлений или корневых волосков возникают дополнительные максимумы, которые могут быть произвольно ориентированы относительно основного

Также весьма искаженные картины, как и множественные максимумы, Фурье-спектров и интегральных пространственных характеристик могут быть следствием артефактов типа изгиба или излома биоматериала при приготовлении препарата или при технологическом процессе, результат которого квалиметрируется данным путем. Это показано на Рисунках 30а, б.

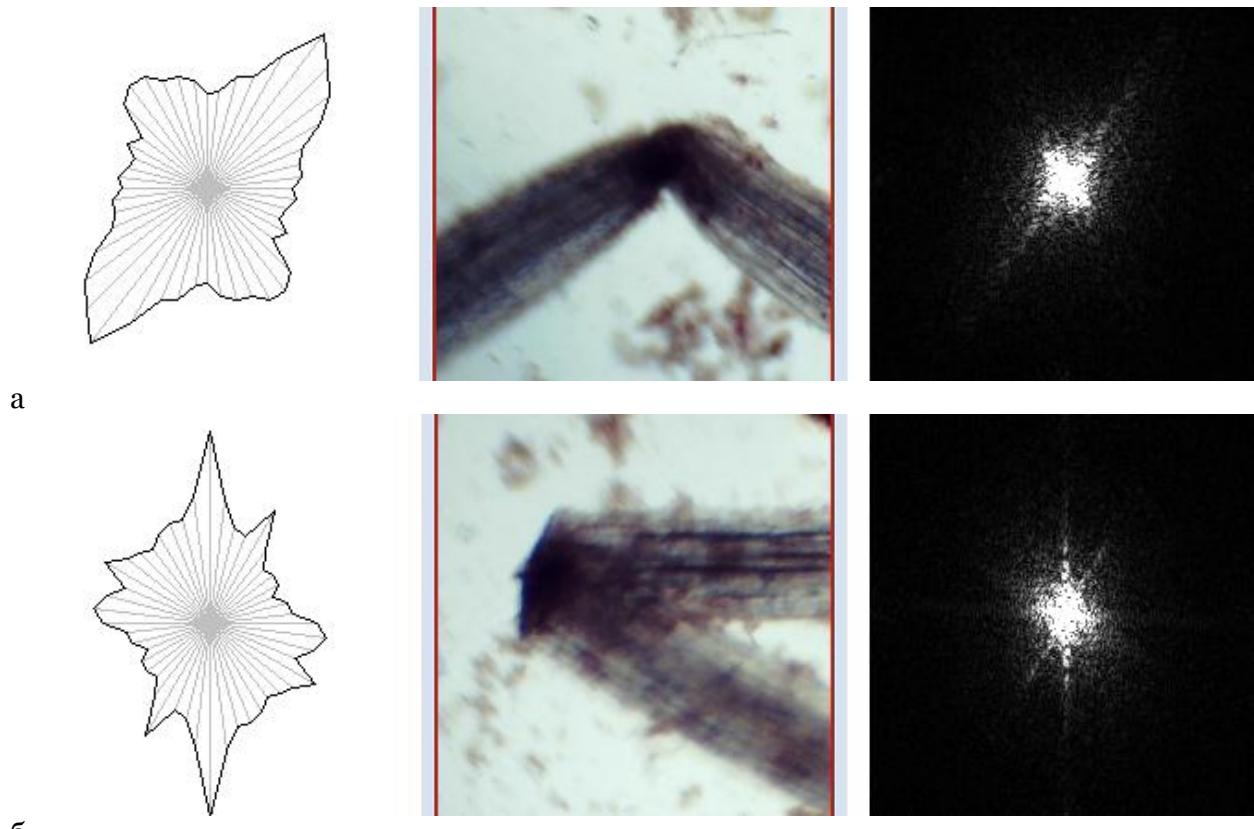


Рис. 30. Влияние технического изгиба или излома на дифракционные характеристики

15. Пекулярные элементы и артефакты: как дифференциаль но проявляются и как их отделить друг от друга

Часто при работе с естественным биоматериалом находятся нефрагментированные части растения или закономерным образом фрагментированные элементы, соответствующие их фитофизиологической роли в исходном живом растении. Например, встречаются целые и невредимые корневые волоски или гипокотили ([Рисунки 31а, б](#)), целые мацераты с ситовидными трубками и т.д.



а



б

Рис. 31. Гипокотиль и его дифракционная сигнатура (а – для правильного позиционирования; б – с уширением при неправильном позиционировании и попадании в кадр нежелательных элементов, образующих гало)

Рассмотрение такой "фрагментарной анатомии", которая может появляться в проточном микрофлюидном/оптофлюидном цитометрическом анализе с использованием 2D БПФ в реальном времени, а также в простом анализе фрагментированных микропрепаратов (как это сделано в настоящей статье) и детектироваться/идентифицироваться по паттернам 2D БПФ, должно являться предметом отдельной работы, ограничиваемой в данной статье (по причинам её биологической специфицированности) лишь одним "каталожным" разделом, представляющим, скорее, атлас микрофотографических изображений и соответствующих им двумерных спектров и расчетных характеристик, чем полноценное описание анатомии данных компонент. При этом для упрощения понимания биологами приводятся краткие и запоминающиеся "дидактические" названия соответствующих спектров, а не физические / математические обоснования их получения с результатами моделирования (проведенного О.В. Градовым из ФИЦ ХФ РАН), так как в задачи данной статьи входит не техническое / алгоритмическое описание, а популяризация метода для агроботаников.

15-а. Метамерные компактные структуры, дающие спектр в форме "бабочки"*.

Метамерные компактные структуры с различной "фазированностью" слоев клеток дают спектр в форме симметричной "бабочки" ([Рисунки 32а-д](#)). Если размер структуры вырастает, а метамерия, асинфазность слоев и абрасная эллиптичность в строении сохраняется, то те же спектры мы видим и на крупных фрагментах корней, при условии отсутствующей или маскированной продольной волокнистой структуры (весьма существенно отличающей их от вышеприведенных примеров).



а

* Подобные двумерные спектры мы получали при анализе изображений ряда докембрийских форм и более поздних ископаемых ракообразных и отпечатков личинок членистоногих.

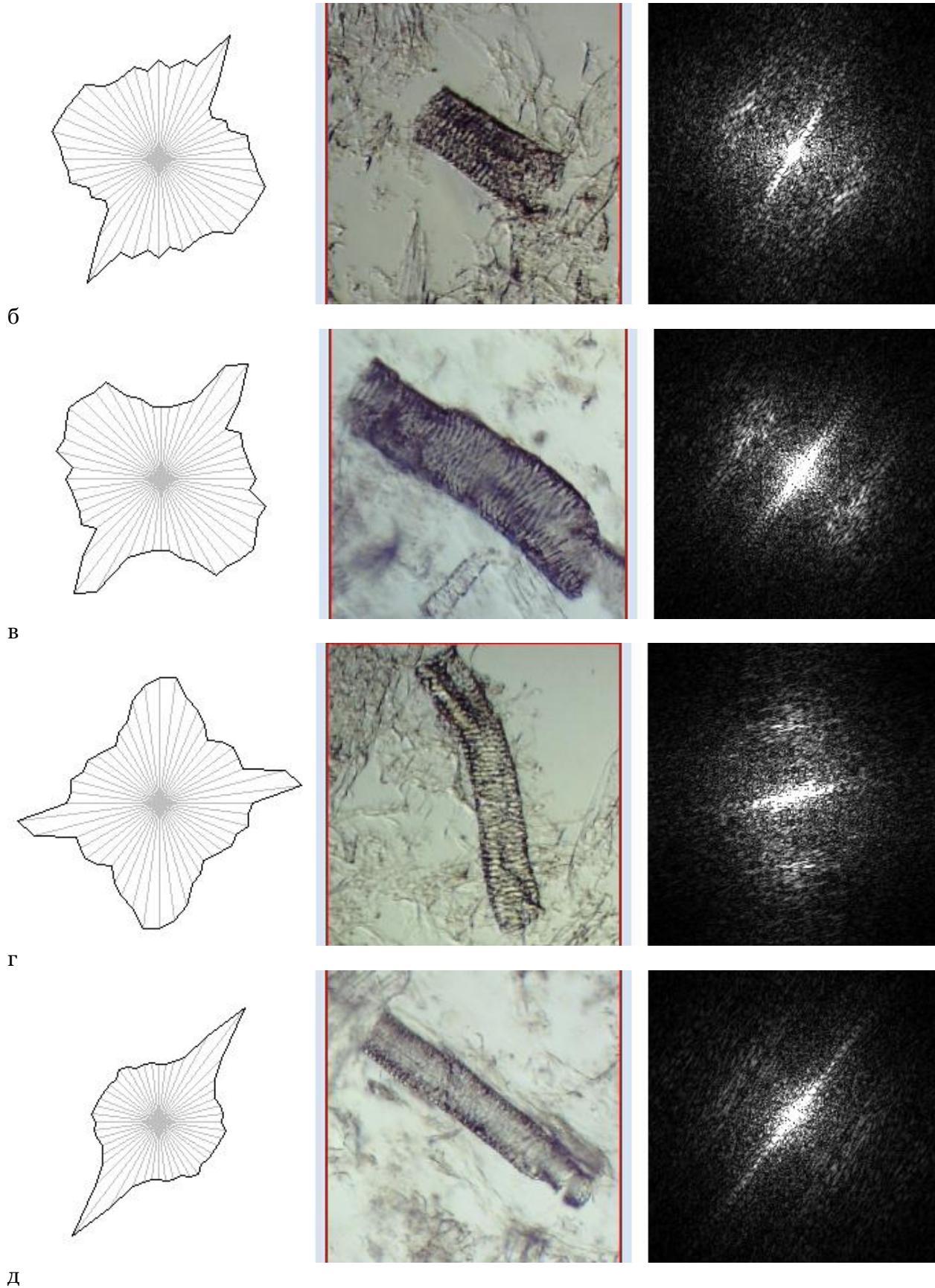


Рис. 32. Образование спектра в форме "бабочки" и его эволюция при изменении фазности и росте текстурной монолитности фрагментов биоматериала

Остатки подобного поведения спектра с симметричными компонентами можно отметить и у некоторых разрушенных в ходе препарирования фрагментов, но там они выражены на остаточном уровне и, как правило, не привлекают внимание оператора или нейросети (т.е. действуют ниже порога отсечки, threshold-a), что является причиной ложноотрицательных артефактов ([Рисунки 33а, б](#)).

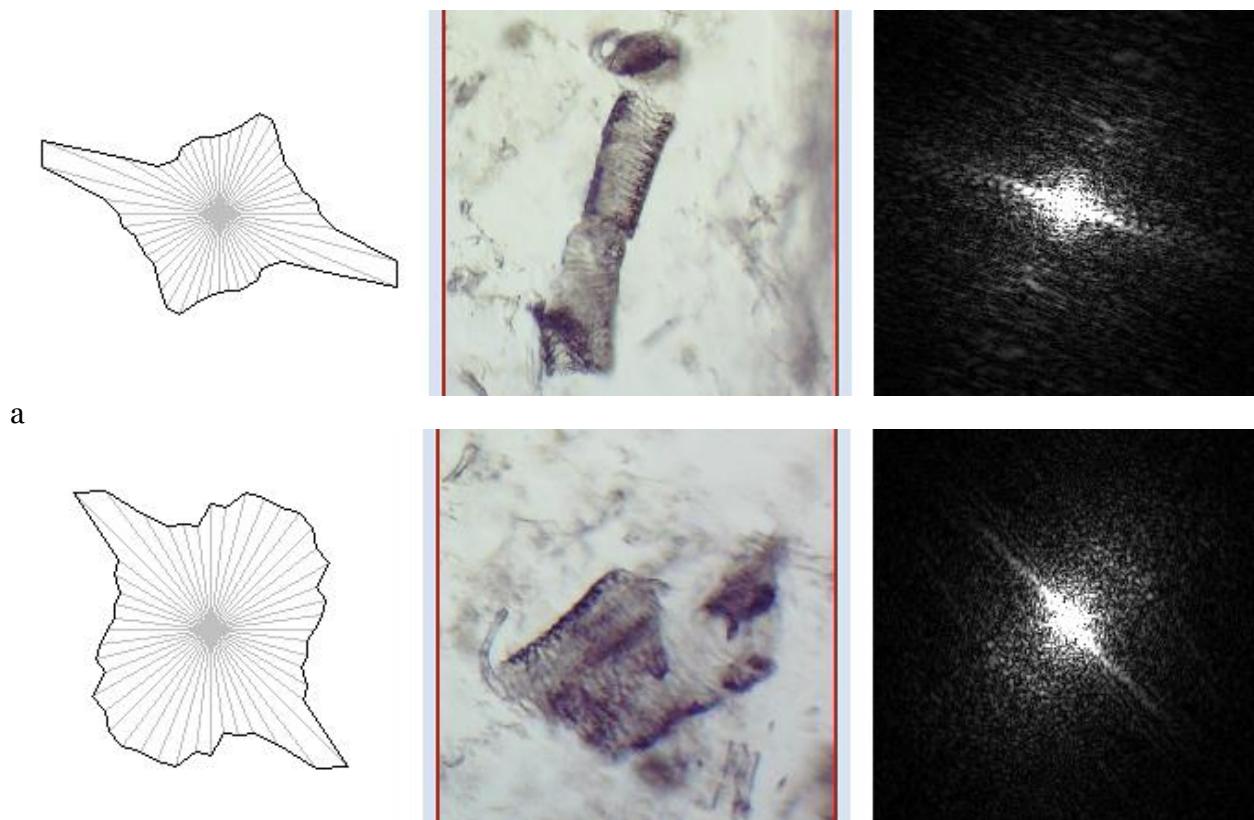
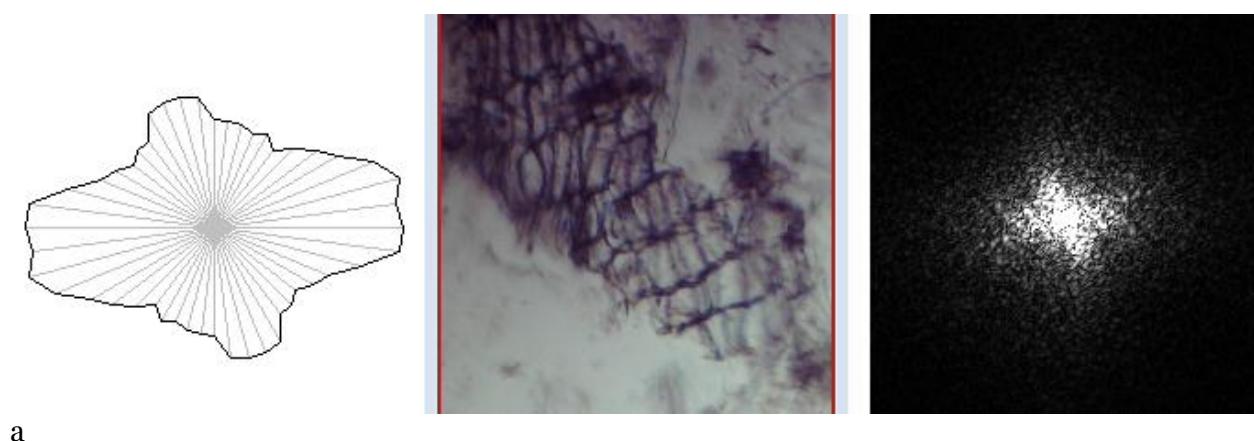


Рис. 33. Остаточные элементы спектра типа "бабочки" у разрушенных элементов

15-б. Спектры сжатых "ретикулярных" (клетчатых) текстур

Спектры сжатых "ретикулярных" текстур являются следствием компрессии на стадии фрагментации биоматериала, а в ряде методов пробоподготовки могут возникать в ходе центрифугирования. При малой степени компрессии на них хорошо отслеживаются и продольные, и поперечные компоненты (хотя нередко и слабоинтенсивные), как показано на [Рисунках 34а-д](#). Нередко сигнал от сопутствующих компонент в окружении перебивает сигналы от подобных компонент и их "недооценивают" в автоматическом анализе, что опять же ведет к ложноотрицательным заключениям о фракционном составе пробы и свойствах образца (как показано на последнем примере в этой серии).



а

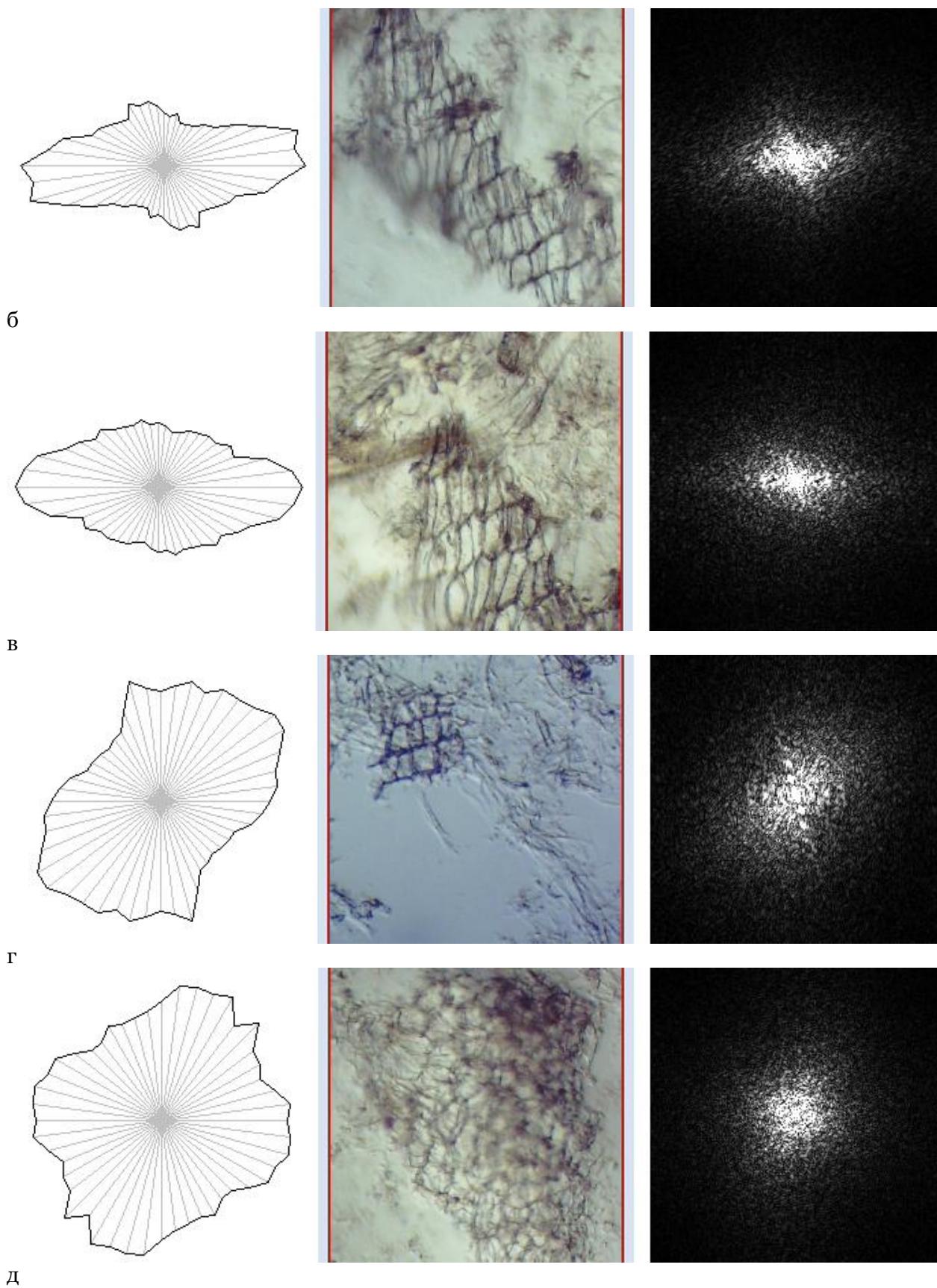


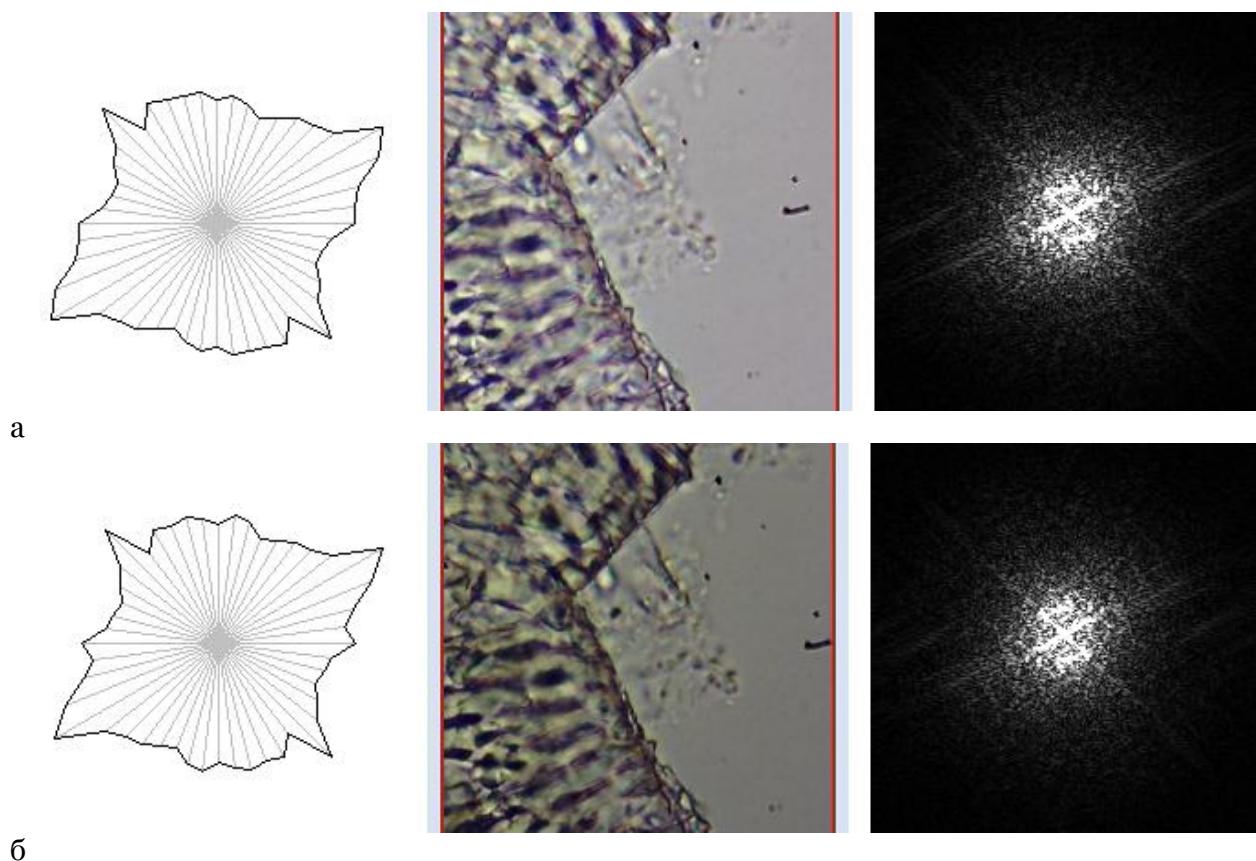
Рис. 34. Спектры сжатых "ретикулярных" (клеточных) текстур

При компрессии одни клетки сжимаются больше, чем другие/одни слои "мнутся" более, чем другие. Поэтому в итоге уже на небольших лоскутах ткани (порядка десятка

клеток) в реальности наблюдается переход от порядка к хаосу, полная фазовая асинхронность (из-за анизотропии сжатия) и устранение когерентной ориентации клеток, свойственной слоям в вышерассмотренных примерах. Пример этого приведен на [Рисунке 34-д](#). На таких 2D спектрах едва можно выделить ориентацию, в случае, если не рассматривать максимумы на интегральной частотной характеристике.

15-в. Слои с изломами, связанными с препарированием образца и нарушением симметрии.

Жесткие механические нарушения структуры микропрепарата, которые нельзя перепутать с собственными морфогенетическими особенностями растения, заключаются в изломах, в которых "неестественным образом" теряется собственный ход клеток растения, приводя к возникновению весьма специфических ("пекулярных", как сказали бы в астрономической спектроскопии) спектров. Например, одним из таких эффектов, возникающих в процессах излома, является спектр в форме "перечеркнутой" литеры Z" (символ в шестнадцатиричном Юникоде Z – 01B5 или z – 01B6), возникающий в суперпозиции неортогональных угловых отношений излома и ложного воспроизведения эффекта "спектра бабочки" (см. выше), что связано с собственной метамерной текстурой образцов. Пример этого приведен на [Рисунках 35а-г](#). Таким образом, на границах таких структур формируется спектр, адекватный углу излома.



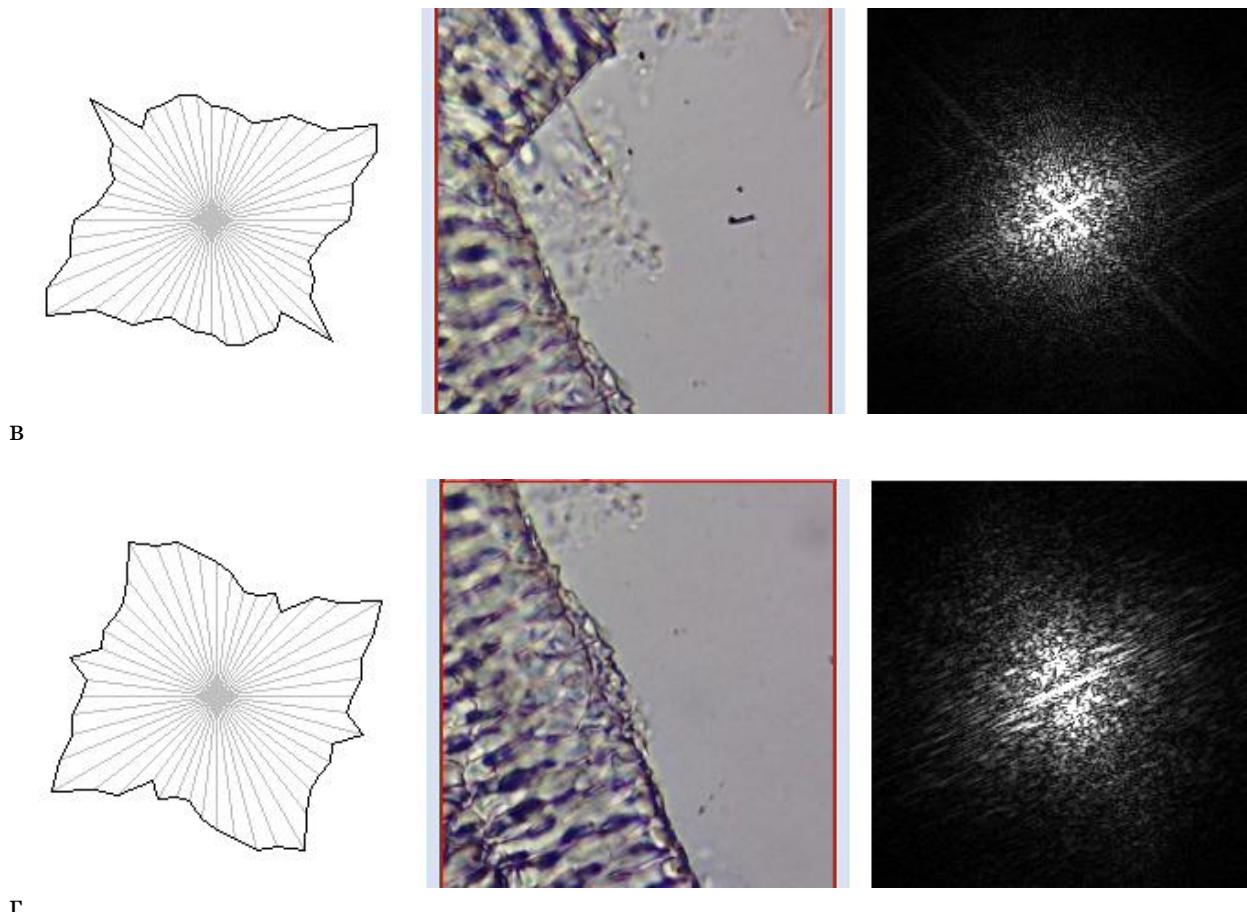


Рис. 35. Спектр в форме прямой или отраженной "перечеркнутой литеры Z" (символ в шестнадцатиричном Юникоде Z – 01B5 или z – 01B6)

Он возникает из обычного спектра "бабочки". Отметим, что для таких случаев нами часто применялся также вторичный способ детектирования - нейросетевая муарография, смысл которой состоит в регистрации муарограмм наложенных тканей и вычислении различных мотивов ориентации/структурной организации с целью недопущения кросс-артефактов – продуктов перекрытия разных клеточных слоев, детектируемых и сепарируемых данным методом.

15-г: Области отрыва

Ещё одним примером пекулярных структур, детектируемых как возможный артефакт (так как потенциально нормированных и соответственных вышеописанному случаю, в котором циркулярные и кольцевые компоненты клеточной/тканевой организации существуют на одном кадре), является зона отрыва или излома ткани с распавшимися при оном клетками, искривленной (по линии изгиба / деформации при отрыве) областью отрыва и мягкими (в силу собственных механико-реологических свойств растительного материала) обводами с конформными слоями одинаково поведшего себя волокнистого материала. Можно видеть, что такие структуры показывают наличие в спектре кольцевых и радиальных компонент, в то время как по микрофотографии заключить о существовании выраженных сферических / окружных элементов (типа протопластов или клеток паренхимы) невозможно ([Рисунки 36а,б](#)). В силу этого целесообразно сопоставлять представления оператора-морфолога и результат программы.

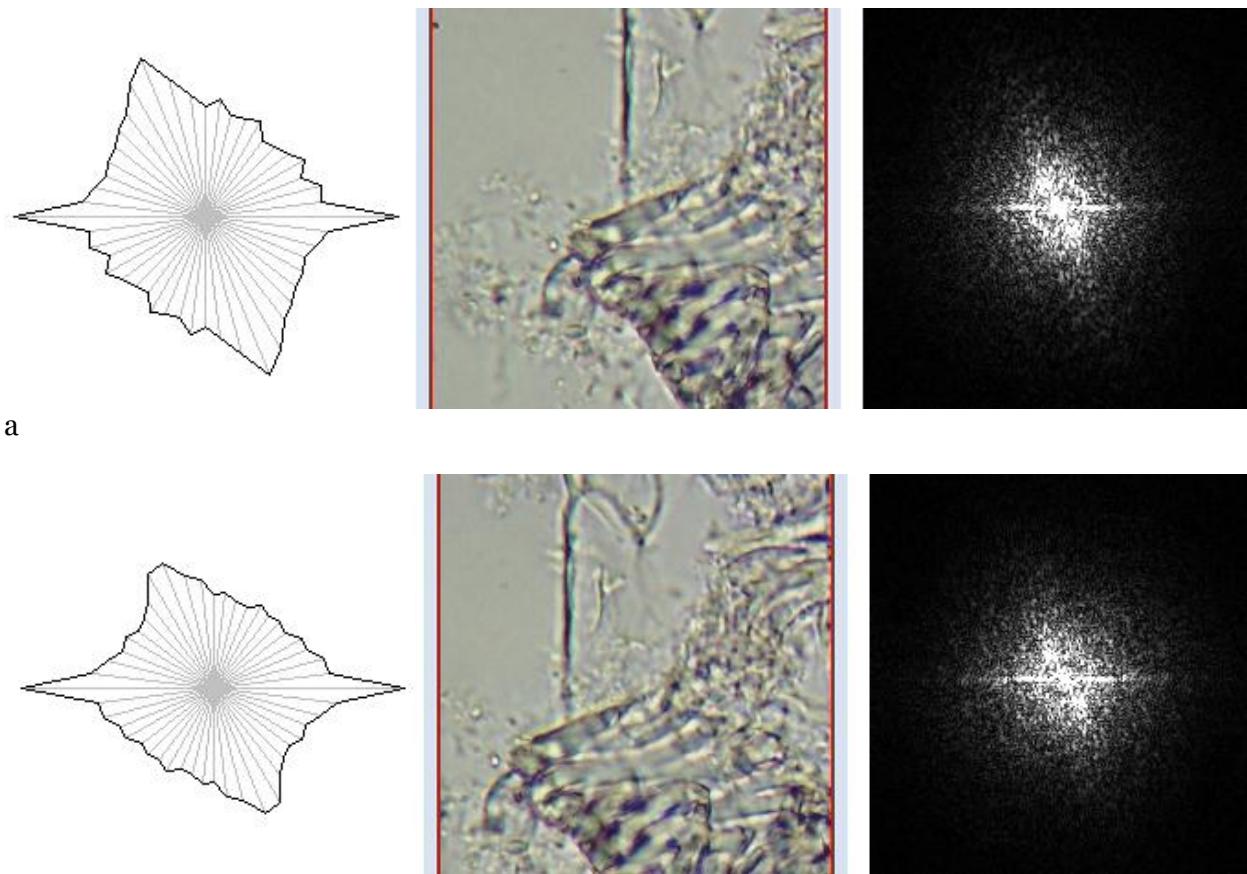


Рис. 36. Артефактивный спектр зоны отрыва, не соответствующий текстуре нативной ткани

15-д. Артефакты ложной регулярности неразрешенных сингулярных структур

Ещё одним случаем, следующим из выше рассмотренного "критерия несингулярности" в анализе структур является проблема ложноположительных результатов для субструктур с размерами порядка единиц пикселей. Рассмотрим отдельный пример для "доказательства от абсурдного" (см. серию на [Рисунках 37а-в](#)). В поле зрения находится один элемент корневого волоска с сравнительно невысокой оптической плотностью и один более оптически плотный и неразрешенный на клеточном уровне элемент. Объекты снимаются в сравнительно однородном светлом поле и не содержат выраженных элементов метамерии. Однако на спектре срабатывает эффект, известный у спектроскопистов под жаргонным названием "духи решетки". В силу этого, в Фурье-спектре очевидным образом проявляются регулярные элементы, проявляющие ряд пекулярных свойств по симметрии и ориентации (чего не может быть). При сдвиге кадра, как это показано на последнем коллаже серии, регулярность теряется, а спектр эмулирует отклик, свойственный сигнатурам кардинально отличным по свойствам структур. То есть следует учесть, что устойчивость сигнала при сдвиге образца в поле зрения является, как минимум, валидационным/верификационным критерием, а как максимум, требованием, которое должен обеспечить любой экспериментатор в процессе анализа биоматериала.

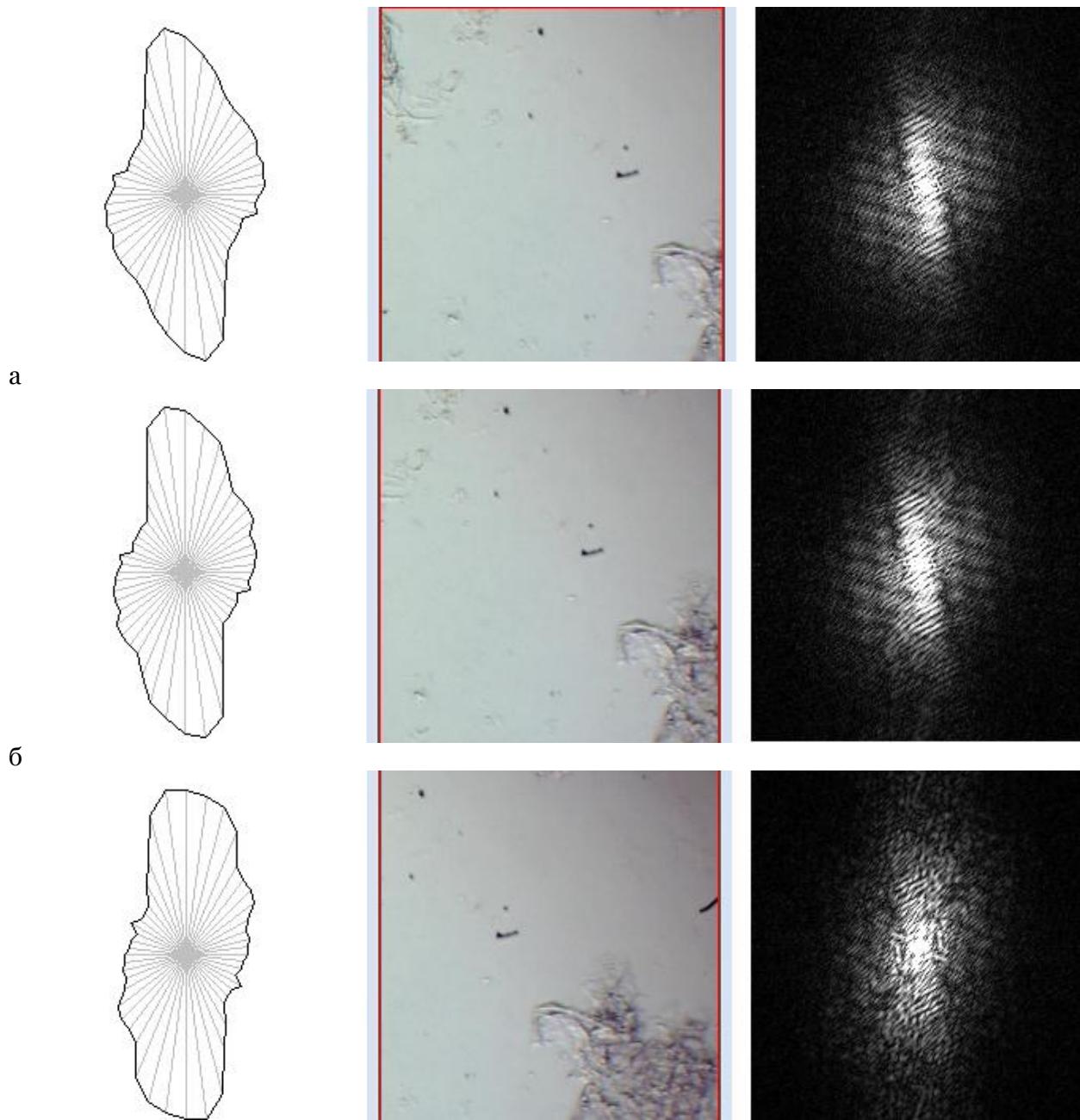
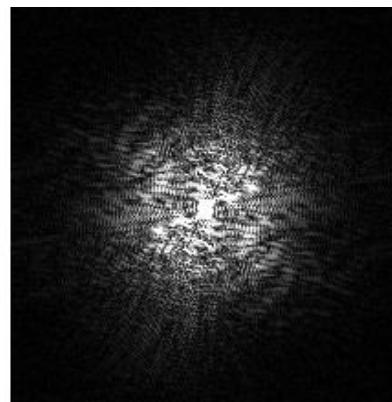
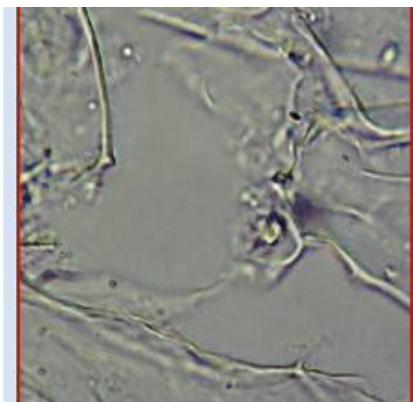
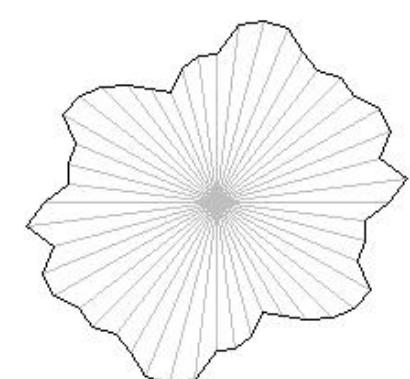


Рис. 37. Артефакты ложной регулярности неразрешенных сингулярных структур (муар)

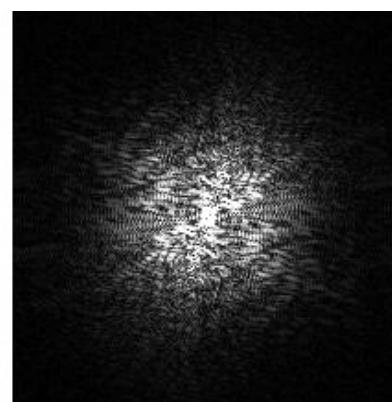
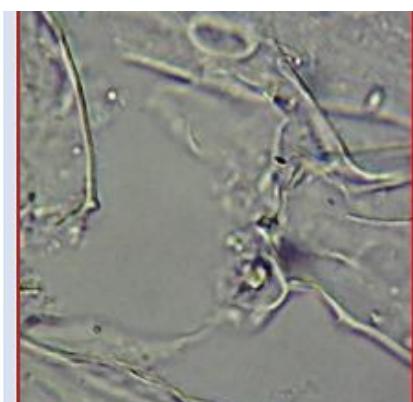
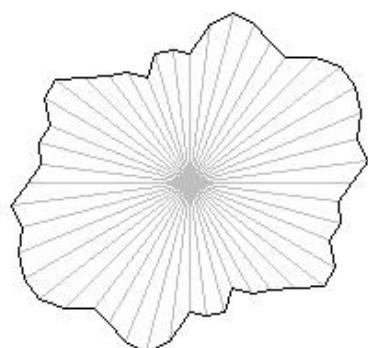
15-е. "Спектры василькового типа"

В данном случае речь идёт, естественно, не о ботаническом происхождении образца и не о его колориметрических характеристиках, а о том, что при наличии множественных осевых направлений структур, свойственных разложенному (как правило, биохимически) образцу (в особенности, с использованием гидролитических процессов), спектр приобретает много смешанных осей симметрии с разной интенсивностью, свидетельствующих о рассеянии на этих микроструктурах. В связи с этим спектр становится похож на "цветок василька" (а само название "васильковый спектр" предложено нам белорусскими коллегами, когда методика машинного зрения и корреляционно-спектрального анализа тестировалась на белорусских агропродуктах и ботанических образцах коллегами из ОДХБП ФИЦ ХФ РАН в ходе длительных командировок).

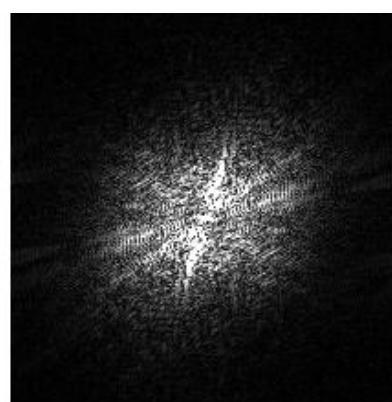
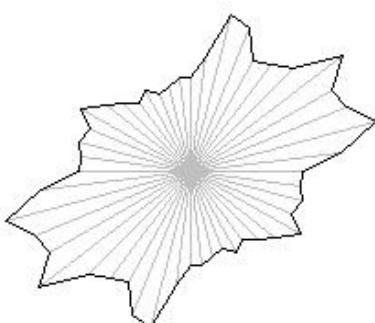
Нужно сказать, что при достаточно небольших сдвигах "рамки считывания"/ROI/предметного стола данная "васильковость" пропадает, сменяясь обычными многоугловыми спектрами, как это показано на [Рисунках 38а-д](#).



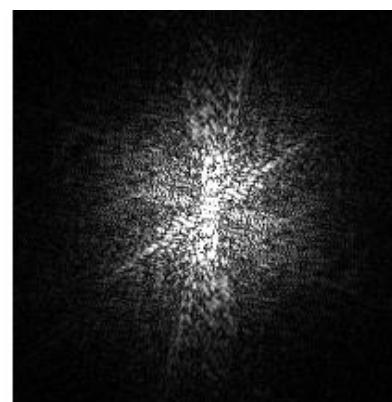
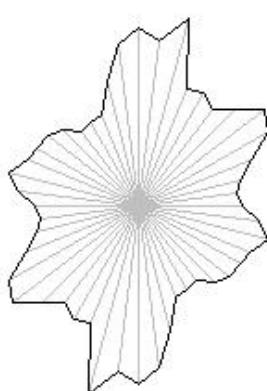
a



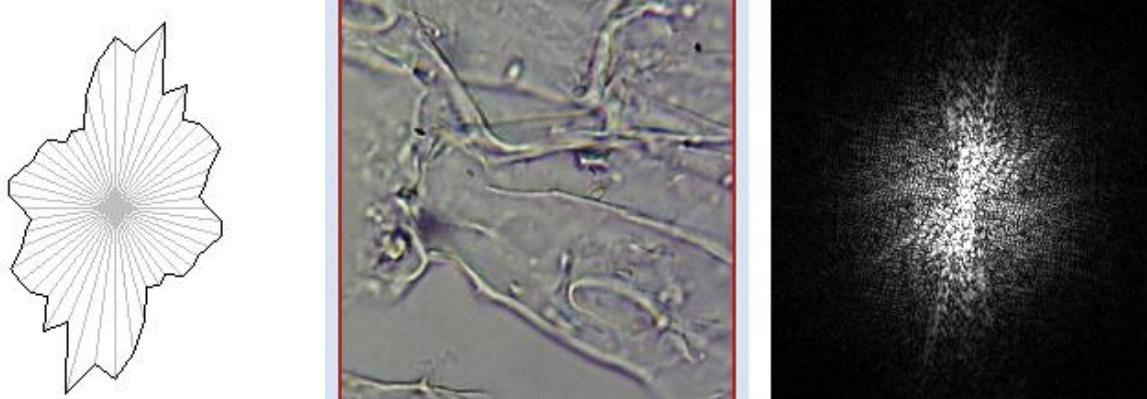
б



в



г



д

Рис. 38. Спектры " василькового типа" и их редукция

4. Заключение

Из приведенного комплекса результатов и упрощенных теоретических соображений об интерпретации полученных данных можно видеть/заключить, что:

- Предложенный подход воспроизводимо детектирует и идентифицирует различные структуры корня (вплоть до гипокотиляй и корневых волосков) и сопутствующего биоматериала.
- Существуют спектральные сигнатуры как биогенных структур, так и их искажений в ходе пробоподготовки или в технологических процессах.
- Возможно оценивание воспроизводимости на корневом биоматериале средствами, имитирующими резольвометрическую аппаратуру и оптические дифрактометры.
- Существует ряд пекулярных форм двумерных спектров и их ключевых артефактов, которые следует принимать во внимание при работе в рамках данного подхода.
- Апробированный подход может быть рекомендован к целевому использованию как агроботаникам, так и специалистам в области квалиметрии агропродукции. Также в ряде случаев он может быть использован в задачах карантина растений.

5. Благодарности

Авторы благодарят О.В. Градова (Институт Химической Физики РАН, Отдел динамики химических и биологических процессов; ИНЭПХФ РАН, Группа биофизического приборостроения Лаборатории биологического воздействия наноструктур) за предоставление полного текста аналитического обзора и отчета по анализу корней с использованием методов корреляционно-спектрального анализа, выполненного совместно с первым автором данной статьи для агробиологической лаборатории, базирующейся в ИБХФ РАН. Авторы выражают благодарность её заведующему Ю. Мартиросяну, являющемуся также заведующим лабораторией в институте сельскохозяйственной биотехнологии, за инспиративный вклад в работу с корнями хрена и предоставление корней хрена, выращенных методами аэропоники. Также мы выражаем сожаление тому факту, что он не решился войти в соавторы данной статьи, не сочтя себя компетентным в области лазерной биофизики и методов биооптики. Выражается особая благодарность коллегам из ТОИ ДВО РАН, разработавшим гениальные программы с возможностью двумерного FFT-анализа в реальном времени (QAVIS).

Литература

[Гончарова и др., 2012](#) – Гончарова А.А., Фищенко В.К., Дубина В.А. Применение программы экспресс-анализа изображений и видео QAVIS в задачах спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. 9(3): 293-298

[Градов и др., 2019](#) – Градов О.В., Александров П.Л., Градова М.А. Исследование образцов релевантных для пустынных местонахождений минералов методами программного корреляционно-спектрального анализа регистрограмм сканирующей электронной микроскопии: от 2D-Фурье-спектров до он-лайн-анализа статистики

интегральных пространственных характеристик // Программные системы и вычислительные методы. 2019. 4: 125-171. DOI: 10.7256/2454-0714.2019.4.31379

Градов и др., 2018 – Градов О.В., Насиров Ф.А., Гончарова А.А., Фищенко В.К., Яблоков А.Г. Технологии безлинзовой голографической трихоскопии и трихометрии на чипе: микроинтерференционные, 2D-Фурье-спектральные (интегральные частотные и пространственные) и коррелографические техники в клинической трихологии // Морфология. 2018. 12(2): 7-21. DOI: <http://dx.doi.org/10.26641/1997-9665.2018.2.7-21>

Дубина и др., 2011 – Дубина В.А., Фищенко В.К., Константинов О.Г., Митник Л.М. Интеграция спутниковых данных и наземных видеонаблюдений в системах мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. 8(3): 214-220.

Семченко, Хахомов, 2007 – Семченко И.В., Хахомов С.А. Лабораторный практикум по оптике. Министерство образования Республики Беларусь, Гомельский государственный университет им.Ф.Скорины. Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2007. 223 с.

Скрынник и др., 2018 – Скрынник А.А., Оганесян В.А., Яблоков А.Г., Градов О.В. Система для полуавтоматической классификации тканей с использованием оптического дифрактометра для анализа биополимерных структур // Морфология. 2018. 12(3): 164-171. DOI: <http://dx.doi.org/10.26641/1997-9665.2018.3.164-171>

An et al., 2010 – An Q.L., Yang X.J., Feng L., Mao B.Z., Kuang, B.J., Li J. D. Using orthogonal sectioning with a laser scanning confocal microscopic system to determine endophytic colonization of plant roots by GFP-tagged bacteria // J Chin Electr Microsc Soc. 2010. 29: 354-360.

Askraba et al., 2016 – Askraba S., Paap A., Alameh K., Rowe J., Miller C. Laser-stabilized real-time plant discrimination sensor for precision agriculture // IEEE Sensors Journal. 2016. 16(17): 6680-6686. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2582908>

Bawiec et al., 2019 – Bawiec A., Garbowski T., Paweśka K., Pulikowski K. Analysis of the algae growth dynamics in the hydroponic system with LEDs nighttime lighting using the laser granulometry method // Water, Air, & Soil Pollution. 2019. 230(1): 17. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-018-4075-8>

Choudhary et al., 2015 – Choudhary A., Radhika M., Chatterjee A., Banerjee U.C., Singh I.P. Qualitative and Quantitative Analysis of Potentilla fulgens Roots by NMR, Matrix-assisted Laser Desorption/Ionisation with Time-of-Flight MS, Electrospray Ionisation MS/MS and HPLC/UV. Phytochemical Analysis. 2015. 26(2): 161-170. DOI: <https://doi.org/10.1002/pca.2547>

Dinoev, 2006 – Dinoev S. Laser: a controlled assistant in agriculture // Problems Eng. Cybernetics Robotics. 2006. 56: 86-91.

Dolgikh et al., 2019 – Dolgikh G.I., Fishchenko V.K., Goncharova, A.A. Potential for recording of waves and sea level fluctuations in the world ocean coastal areas by internet video analysis // Doklady Earth Sciences. 2019. 488: 1264-1267. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1028334X19100209>

Dong et al., 2015 – Dong B., Yang X., Zhu S., Bassham D.C., Fang N. Stochastic optical reconstruction microscopy imaging of microtubule arrays in intact Arabidopsis thaliana seedling roots // Scientific reports. 2015. 5(1): 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep15694>

Dubrovsky et al., 2006 – Dubrovsky J.G., Guttenberger M., Saralegui A., Napsucialy-Mendivil S., Voigt B., Baluška F., Menzel, D. Neutral red as a probe for confocal laser scanning microscopy studies of plant roots // Annals of Botany. 2006. 97(6): 1127-1138. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcl045>

Eeckhaoudt et al., 1992 – Eeckhaoudt S., Vandepitte D., Van Praag H., Van Grieken R., Jacob W. Laser microprobe mass analysis (LAMMA) of aluminum and lead in fine roots and their ectomycorrhizal mantles of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) // Tree Physiology. 1992. 10(2), 209-215. DOI: <https://doi.org/10.1093/treephys/10.2.209>

Erler et al., 2020 – Erler A., Riebe D., Beitz T., Löhmansröben H.G., Gebbers R. Soil nutrient detection for precision agriculture using handheld laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) and multivariate regression methods (PLSR, Lasso and GPR) // Sensors. 2020. 20(2): 418. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20020418>

Espinoza et al., 2018 – Espinoza C.Z., Rathnayake A.P., Chakraborty M., Sankaran S., Jacoby P., Khot, L.R. Applicability of time-of-flightbased ground and multispectral aerial imaging for grapevine canopy vigour monitoring under direct root-zone deficit irrigation // International Journal of Remote Sensing. 39(23): 8818-8836. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1500047>

[Fellows et al, 2003](#) – Fellows R.J., Wang, Z., Ainsworth, C.C. Europium uptake and partitioning in oat (*Avena sativa*) roots as studied by laser-induced fluorescence spectroscopy and confocal microscopy profiling technique // *Environmental science & technology*. 2003. 37(22): 5247-5253. DOI: <https://doi.org/10.1021/es0343609>

[Fischenko et al, 2021](#) – Fischenko, V.K., Goncharova, A.A., Dolgikh, G.I., Zimin, P.S., Subote, A.E., Klescheva, N.A., Golik, A.V. Express image and video analysis technology QAVIS: application in system for video monitoring of Peter the Great Bay (Sea of Japan/East Sea) // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. 9(10): 1073. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse9101073>

[Fischenko et al, 2022](#) – Fischenko V., Mitnik L., Dolgikh G., Goncharova A., Zimin P., Klescheva N., Golik A. QAVIS technology: Measuring wave processes in coastal zones based on the analysis of internet video broadcast // In: *IGARSS 2022-2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2022. (pp. 6801-6804). IEEE. DOI: <https://doi.org/10.1109/IGARSS46834.2022.9883487>

[Ghosh et al, 2016](#) – Ghosh A., Ta S., Ghosh M., Karmakar S., Banik A., Dangar T.K., Mukhopadhyay S.K., Das D. Dual mode ratiometric recognition of zinc acetate: nanomolar detection with in vitro tracking of endophytic bacteria in rice root tissue // *Dalton Transactions*. 2016. 45(2): 599-606. DOI: <https://doi.org/10.1039/C5DT03431K>

[Hansen et al, 1997](#) – Hansen M., Kragelund L., Nybroe O., Sørensen J. Early colonization of barley roots by *Pseudomonas fluorescens* studied by immunofluorescence technique and confocal laser scanning microscopy // *FEMS microbiology ecology*. 1997. 23(4): 353-360. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.1997.tb00416.x>

[Hassan et al., 2013](#) – Hassan H.E., Rahman A.A.A., El-Sherbini E.A., El-Fattah Z.A., Tawab A.R.A. Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS)-an assessment of treated industrial wastewater using water hyacinth roots // *Journal of Applied Sciences Research*. 2013. 9(2): 1074-1082. DOI: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20133206045>

[Heeren et al., 2020](#) – Heeren B., Paulus S., Goldbach H., Kuhlmann H., Mahlein A.K., Rumpf M., Wirth B. Statistical shape analysis of tap roots: a methodological case study on laser scanned sugar beets // *BMC bioinformatics*. 2020. 21(1): 1-17. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12859-020-03654-8>

[Hernandez, 2010](#) – Hernandez A.C., Dominguez P.A., Cruz, O.A., Ivanov, R., Carballo, C.A., Zepeda B.R. (2010). Laser in agriculture // *Int. Agrophys.* 2010. 24(4): 407-422.

[Hogekamp et al., 2011](#) – Hogekamp C., Arndt D., Pereira P.A., Becker J.D., Hohnjec N., Küster H. Laser microdissection unravels cell-typespecific transcription in arbuscular mycorrhizal roots, including CAAT-box transcription factor gene expression correlating with fungal contact and spread // *Plant Physiology*. 2011. 157(4): 2023-2043. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.111.186635>

[Honghong, Zhengu, 1998](#) – Honghong C., Zhengu C. The Possibility Comparison Experiment of Laser Bioeffects in Agriculture and Mathematical Statistics // *Acta Laser Biology Sinica*. 1998. 7(4): 269-273.

[Hulse, Braselton, 2019](#) – Hulse J.D., Braselton J. Three-Dimensional rendering of an unidentified Plasmodiophorid Slime Mold in *Cucurbita maxima* roots using laser scanning confocal microscopy // *Acta Scientific Agriculture*. 2019. 3: 205-210.

[Jaiswal et al., 2018](#) – Jaiswal Y., Liang Z., Ho A., Chen H., Williams L., Zhao Z. Tissue-based metabolite profiling and qualitative comparison of two species of *Achyranthes* roots by use of UHPLC-QTOF MS and laser micro-dissection // *Journal of pharmaceutical analysis*. 2018. 8(1): 10-19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpha.2017.06.006>

[Klink et al., 2005](#) – Klink V. P., Alkharouf N., MacDonald M., Matthews B. Laser capture microdissection (LCM) and expression analyses of *Glycine max* (soybean) syncytium containing root regions formed by the plant pathogen *Heterodera glycines* (soybean cyst nematode) // *Plant molecular biology*. 2005. 59(6): 965-979. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11103-005-2416-7>

[Klink et al., 2007](#) – Klink V.P., Overall C.C., Alkharouf N.W., MacDonald M.H., Matthews B.F. Laser capture microdissection (LCM) and comparative microarray expression analysis of syncytial cells isolated from incompatible and compatible soybean (*Glycine max*) roots infected by the soybean cyst nematode (*Heterodera glycines*) // *Planta*. 2007. 226(6): 1389-1409. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00425-007-0578-z>

[Klink et al., 2009](#) – Klink V.P., Hosseini P., Matsye P., Alkharouf N.W., Matthews B.F. A gene expression analysis of syncytia laser microdissected from the roots of the *Glycine max*

(soybean) genotype PI 548402 (Peking) undergoing a resistant reaction after infection by Heterodera glycines (soybean cyst nematode) // *Plant molecular biology*. 2009. 71(6): 525-567. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11103-009-9539-1>

Koper et al., 1996 – Koper R., Wójcik S., Kornas-Czuczwarczak B., Bojarska U. Effect of the laser exposure of seeds on the yield and chemical composition of sugar beet roots // *International agrophysics*. 1996. 10(2): 103-108. DOI: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19970704164>

Krzyzanowska et al., 2012 – Krzyzanowska D., Obuchowski M., Bikowski M., Rychłowski M., Jafra S. Colonization of potato rhizosphere by GFPtagged *Bacillus subtilis* MB73/2, *Pseudomonas* sp. P482 and *Ochrobactrum* sp. A44 shown on large sections of roots using enrichment sample preparation and confocal laser scanning microscopy // *Sensors*. 2012. 12(12): 17608-17619. DOI: <https://doi.org/10.3390/s121217608>

Kuya, Sato, 2011 – Kuya, N., Sato, S. The relationship between profiles of plagiogravitropism and morphometry of columella cells during the development of lateral roots of *Vigna angularis* // *Advances in space research*. 2011. 47(3): 553-562. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.09.009>

Levy et al., 1983 – Levy A., Milo J., Ashri A., Palevitch D. Heterosis and correlation analysis of the vegetative components and ajmalicine content in the roots of the medicinal plant-*Catharanthus roseus* (L.) G. Don // *Euphytica*. 1983. 32(2): 557-564. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00021468>

Li et al., 2012 – Li S., Sun Y., Han R. Influence of He-Ne Laser Irradiation and UItraviolet-B Radiation on Nitrogen Metabolism Enzymes in Wheat Seedling Roots [J] // *Journal of Shihezi University* (Natural Science). 2012. [Machine Translation Card].

Liu et al., 2018 – Liu F., Shen T., Kong W., Peng J., Zhang C., Song K., Wang W., Zhang C., He Y. Quantitative analysis of cadmium in tobacco roots using laser-induced breakdown spectroscopy with variable index and chemometrics // *Frontiers in plant science*. 2018. 9: 1316. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01316>

Martinière et al., 2018 – Martinière A., Gibrat R., Sentenac H., Dumont X., Gaillard I., Paris N. Uncovering pH at both sides of the root plasma membrane interface using noninvasive imaging // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2018. 115(25): 6488-6493. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1721769115>

Meng et al., 2013 – Meng Y., Di B., Zhang G., Feng X. G., Xu C.L., Tian J. The correlation analysis of soluble sugar and starch contents with electrical impedance in *Betula platyphylla* Suk. Roots under waterlogging and flooding stresses // *Acta Biophysica Sinica*. 2013. 29(6): 450-460.

Meyer, Fricker, 2000 – Meyer A.J., Fricker M.D. Direct measurement of glutathione in epidermal cells of intact *Arabidopsis* roots by twophoton laser scanning microscopy // *Journal of microscopy*. 2000. 198(3): 174-181. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2818.2000.00697.x>

Moradi et al., 2010 – Moradi A.B., Swoboda S., Robinson B., Prohaska T., Kaestner A., Oswald S.E., Wenzel W.W., Schulz R. Mapping of nickel in root cross-sections of the hyperaccumulator plant *Berkheya coddii* using laser ablation ICP-MS // *Environmental and Experimental Botany*. 2010. 69(1), 24-31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.02.001>

Mounier et al. 2020 – Mounier T., Navarro-Sanz S., Bureau C., Antoine L., Varoquaux F., Durandet F., Périn C. A fast, efficient and hightthroughput procedure involving laser microdissection and RT droplet digital PCR for tissue-specific expression profiling of rice roots // *BMC molecular and cell biology*. 2020. 21(1): 1-17. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12860-020-00312-y>

Pan, Li, 2012 – Pan T., Li C. A Study on the Biological Effects of Laser-induced Mutation on Fibrous Roots of Yellow Skin Onion // *Agricultural Biotechnology*. 2012. 1(4): 15. DOI: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20133301033>

Peng et al., 2016 – Peng J., Liu F., Zhou F., Song K., Zhang C., Ye L., He Y. Challenging applications for multi-element analysis by laser-induced breakdown spectroscopy in agriculture: A review // *Trends in Analytical Chemistry*. 2016. 85: 260-272. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2016.08.015>

Popp et al., 2020 – Popp C., Wamhoff D., Winkelmann T., Maiss, E., Grunewaldt-Stöcker G. Molecular identification of Nectriaceae in infections of apple replant disease affected roots collected by Harris Uni-Core punching or laser microdissection // *Journal of Plant Diseases and Protection*. 2020. 127: 571-582. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41348-020-00333-x>

- Pradhan, Mezaal, 2018** – Pradhan, B., Mezaal, M.R. Data mining-aided automatic landslide detection using airborne laser scanning data in densely forested tropical areas // *Korean Journal of Remote Sensing*. 2018. 34(1): 45-74. DOI: <https://doi.org/10.7780/kjrs.2018.34.1.4>
- Qianli et al., 2001** – Qianli A., Xuejian Y., Yuemei D., Lijie F., Baijian K., Jiudi L. Using confocal laser scanning microscope to visualize the infection of rice roots by GFP-labelled Klebsiella oxytoca SA2, an endophytic diazotroph // *Acta Botanica Sinica*. 2001. 43(6): 558-564.
- Rahman et al., 2020** – Rahman G., Sohag H., Chowdhury R., Wahid K.A., Dinh A., Arcand M., Vail, S. (2020). SoilCam: A fully automated minirhizotron using multispectral imaging for root activity monitoring // *Sensors*. 2020. 20(3): 787. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20030787>
- Richter-Brockmann et al., 2020** – Richter-Brockmann S., Garbert K., von Bremen-Kühne M., Wehe C. A., Reifschneider O., Sperling M., Wallrad L., Schmitz-Thom I., Kudla, J., Karst U. Elemental bioimaging of Na distribution in roots of *Arabidopsis thaliana* using laser ablation-ICP-MS under cold plasma conditions // *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. 2020. 35(9): 2057-2063. DOI: <https://doi.org/10.1039/DoJA00151A>
- Roberts et al., 2010** – Roberts T.J., McKenna S.J., Du C.J., Wuyts N., Valentine T.A., Bengough A.G. Estimating the motion of plant root cells from in vivo confocal laser scanning microscopy images // *Machine Vision and Applications*. 2010. 21(6): 921-939. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00138-009-0207-x>
- Roux et al., 2014** – Roux B., Rodde N., Jardinaud M.F., Timmers T., Sauviac L., Cottret L., Carrère S., Sallet E., Courcelle E., Moreau S., Gamas P. An integrated analysis of plant and bacterial gene expression in symbiotic root nodules using laser-capture microdissection coupled to RNA sequencing // *The Plant Journal*. 2014. 77(6): 817-837. DOI: <https://doi.org/10.1111/tpj.12442>
- Scherer et al., 1992** – Scherer G.F., vom Dorp B., Schöllmann C., Volkmann D. Proton-transport activity, sidedness, and morphometry of tonoplast and plasma-membrane vesicles purified by free-flow electrophoresis from roots of *Lepidium sativum* L. and hypocotyls of *Cucurbita pepo* L. // *Planta*. 1992. 186(4): 483-494. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00198027>
- Schuller et al., 2014** – Schuller A., Kehr J., Ludwig-Müller J. Laser microdissection coupled to transcriptional profiling of *Arabidopsis* roots inoculated by *Plasmodesmophora brassicae* indicates a role for brassinosteroids in clubroot formation // *Plant and Cell Physiology*. 2014. 55(2): 392-411. DOI: <https://doi.org/10.1093/pcp/pct174>
- Sekulska-Nalewajko et al., 2014** – Sekulska-Nalewajko J., Gocławski J., Wielanek M., Gajewska E., Tamborski S. A method for thiarubrine canals extraction in optical coherence tomography images of *Schkuhria pinnata* roots // *Image Processing & Communications*. 19(2-3): 151-160. DOI: <https://doi.org/10.1515/ ipc-2015-0019>
- Shelden et al., 2020** – Shelden M.C., Gilbert S.E., Tyerman S.D. A laser ablation technique maps differences in elemental composition in roots of two barley cultivars subjected to salinity stress // *The Plant Journal*. 2020. 101(6): 1462-1473. DOI: <https://doi.org/10.1111/tpj.14599>
- Shiono, Taira, 2020** – Shiono K., Taira S. Imaging of multiple plant hormones in roots of rice (*Oryza sativa*) using nanoparticle-assisted laser desorption/Ionization mass spectrometry // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2020. 68(24): 6770-6775. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c00749>
- Shiono et al., 2017** – Shiono K., Hashizaki R., Nakanishi T., Sakai T., Yamamoto T., Ogata K., Harada K.I., Ohtani H., Katano H., Taira S. Multi-imaging of cytokinin and abscisic acid on the roots of rice (*Oryza sativa*) using matrix-assisted laser desorption/ionization mass spectrometry // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2017. 65(35): 7624-7628. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02255>
- Stopka et al., 2017** – Stopka S.A., Agtuca B.J., Koppenaal D.W., Paša-Tolić L., Stacey G., Vertes A., Anderton C.R. Laser-ablation electrospray ionization mass spectrometry with ion mobility separation reveals metabolites in the symbiotic interactions of soybean roots and rhizobia // *The Plant Journal*. 2017. 91(2): 340-354. DOI: <https://doi.org/10.1111/tpj.13569>
- Su et al., 2008** – Su T.F., Jia X.F., Zhao G.Z., Han P., Wang Y.J., Li Y., Zhou B., Song C.P., Chang J.F., Gong C.R. Characterization of original and expanded leaf-roots of tobacco by terahertz spectroscopy and X-ray microanalysis // *Materials Letters*. 2008. 62(17-18): 2779-2782. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.01.043>

- [Suhua et al., 2012](#) – *Suhua S.Y.C.H.L., Rong L.X.H.* Effect of He-Ne laser and UV-B radiation enhancement on apoptosis in the roots of wheat seedling // *Chinese Journal of Lasers.* 2012. 39(7): 0704001-6. DOI: <http://dx.doi.org/10.3788/CJL201239.0704001>
- [Sun et al., 1998](#) – *Sun W., Liu S., Liu Z., Song F., Fang, S.* A study of aconitum alkaloids from aconite roots in *Aconitum carmichaeli* Debx using matrix-assisted laser desorption/ionization mass spectrometry // *Rapid Communications in Mass Spectrometry.* 1998. 12(13): 821-824. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0231\(19980715\)12:13%3C821::AID-RCM242%3E3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0231(19980715)12:13%3C821::AID-RCM242%3E3.0.CO;2-Z)
- [Thakur, Gathania, 2017](#) – *Thakur, S., Gathania, A.K.* Structural and optical studies on the crushed roots of *Saccharum munja* grass: a new low cost red phosphor source for optical applications // *Indian Journal of Physics.* 2017. 91(6): 623-627. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12648-017-0967-5>
- [Tirlapur, König, 1999](#) – *Tirlapur, U.K., König, K.* Near-infrared femtosecond laser pulses as a novel non-invasive means for dye-permeation and 3D imaging of localised dye-coupling in the *Arabidopsis* root meristem // *The Plant Journal.* 1999. 20(3): 363-370. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-313X.1999.00603.x>
- [Ueno et al., 2016](#) – *Ueno R., Pham N.T.Q., Inoue N., Kurauchi N., Kato F.* Relationship between tomato vegetative growth and violet laser-induced fluorescence from water in hydroponic culture // *Bulletin Shinshu University Alpine Field Center.* 2016. (14): 1-5. DOI: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20163196847>
- [Vainštejn, 1973](#) – *Vainštejn B.K.* Three-dimensional electron microscopy of biological macromolecules // *Soviet Physics Uspekhi.* 1973. 16(2): 185-206. DOI: <https://doi.org/10.1070/PU1973v01n02ABEH005164>
- [van den Berg et al., 1998](#) – *van den Berg C., Hage W., Weisbeek P., Scheres B.* Laser ablation in *Arabidopsis* roots: a tool to study cell-to-cell communication // *NATO ASIS.* 1998. 104: 237-250. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-72117-5_21
- [Veysi et al., 2020](#) – *Veysi S., Naseri A.A., Hamzeh S.* Relationship Between Field Measurement of Soil Moisture in the Effective Depth of Sugarcane Root Zone and Extracted Indices from Spectral Reflectance of Optical/Thermal Bands of Multispectral Satellite Images // *Journal of the Indian Society of Remote Sensing.* 2020. 48(7), 1035-1044. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01135-2>
- [Vierheilig et al., 2001](#) – *Vierheilig H., Knoblauch M., Juergensen K., van Bel A.J., Grundler F.M., Piché Y.* Imaging arbuscular mycorrhizal structures in living roots of *Nicotiana tabacum* by light, epifluorescence, and confocal laser scanning microscopy // *Canadian Journal of Botany.* 2001. 79(2): 231-237. DOI: <https://doi.org/10.1139/b00-156>
- [Vierheilig et al., 1999](#) – *Vierheilig H., Böckenhoff A., Knoblauch M., Juge C., Van Bel A. J., Grundler F., Piche Y., Wyss U.* In vivo observations of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* in roots by confocal laser scanning microscopy // *Mycological Research.* 1999. 103(3): 311-314. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0953756298007576>
- [Wagner, 2010](#) – *Wagner B.* 3D modeling of tree roots: combining 3D laser scans & 2D tree-ring data (Doctoral dissertation, ETH Zurich), 2010.
- [Wang et al., 2018](#) – *Wang J., Shi M., Zheng P., Xue S., Peng R.* Quantitative Analysis of Ca, Mg, and K in the roots of *Angelica pubescens* f. *biserrata* by Laser-induced breakdown spectroscopy combined with artificial neural networks // *Journal of Applied Spectroscopy.* 2018. 85(1): 190-196. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10812-018-0631-7>
- [Wójcik, 1994](#) – *Wójcik S.* Effects of seed irradiation with laser on the yield and chemical composition of sugar beet roots // *International agrophysics.* 1994. 8(3): 539-542. DOI: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19942402020>
- [Yang et al., 2016](#) – *Yang C., Odvody G.N., Thomasson J.A., Isakeit T., Nichols R.L.* Change detection of cotton root rot infection over 10-year intervals using airborne multispectral imagery // *Computers and Electronics in Agriculture.* 2016. 123: 154-162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.02.026>
- [Youssef et al., 2019](#) – *Youssef M.S., Mira M.M., Millar J.L., Becker M.G., Belmonte M.F., Hill R.D., Stasolla, C.* Spatial identification of transcripts and biological processes in laser micro-dissected sub-regions of waterlogged corn roots with altered expression of phytoglobin // *Plant Physiology and Biochemistry.* 2019. 139: 350-365. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.03.036>

Yu et al., 2001 – Yu Q., Kuo J., Tang C. Using confocal laser scanning microscopy to measure apoplastic pH change in roots of *Lupinus angustifolius* L. in response to high pH // *Annals of Botany*. 2001. 87(1): 47-52. DOI: <https://doi.org/10.1006/anbo.2000.1297>

Zargar et al., 2015 – Zargar S.M., Fujiwara, M., Inaba S., Kobayashi M., Kurata R., Ogata Y., Fukao, Y. Correlation analysis of proteins responsive to Zn, Mn, or Fe deficiency in *Arabidopsis* roots based on iTRAQ analysis // *Plant cell reports*. 2015. 34(1): 157-166. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00299-014-1696-2>

Zheng et al., 2014 – Zheng Q., Zhao Y., Wang J., Liu T., Zhang B., Gong M., Li J., Liu H., Han B., Zhang Y., Song X., Li Y., Xiao X. Spectrum-effect relationships between UPLC fingerprints and bioactivities of crude secondary roots of *Aconitum carmichaelii* Debeaux (Fuzi) and its three processed products on mitochondrial growth coupled with canonical correlation analysis // *Journal of ethnopharmacology*. 2014. 153(3): 615-623. DOI: DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jep.2014.03.011>

References

- An et al., 2010** – An, Q.L., Yang, X.J., Feng, L., Mao, B.Z., Kuang, B.J., Li, J.D. (2010). Using orthogonal sectioning with a laser scanning confocal microscopic system to determine endophytic colonization of plant roots by GFP-tagged bacteria. *J Chin Electr Microsc Soc*. 29: 354-360.
- Askraba et al., 2016** – Askraba, S., Paap, A., Alameh, K., Rowe, J., Miller, C. (2016). Laser-stabilized real-time plant discrimination sensor for precision agriculture. *IEEE Sensors Journal*. 2016. 16(17): 6680-6686. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2582908>
- Bawiec et al., 2019** – Bawiec, A., Garbowski, T., Pawęska, K., Pulikowski, K. (2019). Analysis of the algae growth dynamics in the hydroponic system with LEDs nighttime lighting using the laser granulometry method. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2019. 230(1): 17. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-018-4075-8>
- Choudhary et al., 2015** – Choudhary, A., Radhika, M., Chatterjee, A., Banerjee, U.C., Singh, I.P. (2015). Qualitative and Quantitative Analysis of *Potentilla fulgens* Roots by NMR, Matrix-assisted Laser Desorption/Ionisation with Time-of-Flight MS, Electrospray Ionisation MS/MS and HPLC/UV. *Phytochemical Analysis*. 26(2): 161-170. DOI: <https://doi.org/10.1002/pca.2547>
- Dinoev, 2006** – Dinoev, S. (2006). Laser: a controlled assistant in agriculture. *Problems Eng. Cybernetics Robotics*. 56: 86-91.
- Dolgikh et al., 2019** – Dolgikh, G. I., Fishchenko, V. K., & Goncharova, A. A. (2019). Potential for recording of waves and sea level fluctuations in the world ocean coastal areas by internet video analysis. *Doklady Earth Sciences*. 488: 1264-1267. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1028334X19100209>
- Dong et al., 2015** – Dong, B., Yang, X., Zhu, S., Bassham, D. C., Fang, N. (2015). Stochastic optical reconstruction microscopy imaging of microtubule arrays in intact *Arabidopsis thaliana* seedling roots. *Scientific reports*. 5(1): 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep15694>
- Dubina et al., 2011** – Dubina, V.A., Fishchenko, V.K., Konstantinov, O.G., Mitnik, L.M. (2011). Integration of satellite data and ground based video data in the monitoring systems. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space* (Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa). 8(3): 214-222. [in Russian]
- Dubrovsky et al., 2006** – Dubrovsky, J.G., Guttenberger, M., Saralegui, A., Napsucialy-Mendivil, S., Voigt, B., Baluška, F., Menzel, D. (2006). Neutral red as a probe for confocal laser scanning microscopy studies of plant roots. *Annals of Botany*. 97(6): 1127-1138. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcl045>
- Eeckhaoudt et al., 1992** – Eeckhaoudt, S., Vandepitte, D., Van Praag, H., Van Grieken, R., Jacob, W. (1992). Laser microprobe mass analysis (LAMMA) of aluminum and lead in fine roots and their ectomycorrhizal mantles of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Tree Physiology*, 10(2): 209-215. DOI: <https://doi.org/10.1093/treephys/10.2.209>
- Erler et al., 2020** – Erler, A., Riebe, D., Beitz, T., Löhmansröben, H. G., Gebbers, R. (2020). Soil nutrient detection for precision agriculture using handheld laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) and multivariate regression methods (PLSR, Lasso and GPR). *Sensors*. 20(2): 418. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20020418>
- Espinoza et al., 2018** – Espinoza, C.Z., Rathnayake, A.P., Chakraborty, M., Sankaran, S., Jacoby, P., Khot, L.R. (2018). Applicability of time-of-flightbased ground and multispectral aerial imaging for grapevine canopy vigour monitoring under direct root-zone deficit irrigation. International

Journal of Remote Sensing. 39(23): 8818-8836. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1500047>

Fellows et al., 2003 – Fellows, R.J., Wang, Z., Ainsworth, C.C. (2003). Europium uptake and partitioning in oat (*Avena sativa*) roots as studied by laser-induced fluorescence spectroscopy and confocal microscopy profiling technique. *Environmental science & technology.* 37(22): 5247-5253. DOI: <https://doi.org/10.1021/es0343609>

Fischchenko et al., 2021 – Fischchenko, V.K., Goncharova, A.A., Dolgikh, G.I., Zimin, P.S., Subote, A.E., Klescheva, N.A., Golik, A.V. (2021). Express image and video analysis technology QAVIS: application in system for video monitoring of Peter the Great Bay (Sea of Japan/East Sea). *Journal of Marine Science and Engineering.* 9(10): 1073. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse9101073>

Fischchenko et al., 2022 – Fischchenko, V., Mitnik, L., Dolgikh, G., Goncharova, A., Zimin, P., Klescheva, N., Golik, A. (2022). QAVIS technology: Measuring wave processes in coastal zones based on the analysis of internet video broadcast. In: *IGARSS 2022-2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 6801-6804). IEEE. DOI: <https://doi.org/10.1109/IGARSS46834.2022.9883487>

Ghosh et al. 2016 – Ghosh, A., Ta, S., Ghosh, M., Karmakar, S., Banik, A., Dangar, T.K., Mukhopadhyay, S.K., Das, D. (2016). Dual mode ratiometric recognition of zinc acetate: nanomolar detection with in vitro tracking of endophytic bacteria in rice root tissue. *Dalton Transactions.* 45(2): 599-606. DOI: <https://doi.org/10.1039/C5DT03431K>

Goncharova et al., 2012 – Goncharova, A.A., Fischchenko, V.K., Dubina, V.A. (2012). [Use the express-analysis program QAVIS for the satellite monitoring] (Применение программы jekspress-analiza izobrazhenij i video qavis v zadachah sputnikovogo monitoringa). *Current problems in Remote Sensing of the Earth from Space* (Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса). 9(3): 293-298. [in Russian]

Gradov et al., 2018 – Gradov, O.V., Nasirov, P.A., Goncharova, A.A., Fischchenko, V.K., Jablokov, A.G. (2018). [On-chip lens-less holographic trichoscopy/trichometry technologies: microinterferometric, Fourier spectral and correlographic techniques for clinical trichology] (Технологии bezlinzovoj golograficheskoy trihoskopii i trihometrii na chipe - mikrointerferencionnye, 2d-fur'e-spektral'nye (integral'nye chastotnye i prostranstvennye) i korrelograficheskie tehniki v klinicheskoy trihologii). *Morphologia.* 12(2): 7-21. DOI: <http://dx.doi.org/10.26641/1997-9665.2018.2.7-21> [in Russian]

Gradov et al., 2019 – Gradov, O.V., Aleksandrov, P.L., Gradova, M.A. (2019). [Study of mineral samples relevant for desert locations using software correlation spectral analysis of scanning electron microscopy registers: from 2D Fourier spectra to online analysis of statistics of integral spatial characteristics] (Исследование образцов relevantnyh dlja pustynnyh mestonahozhdenij mineralov metodami programmного корреляционно-спектрального анализа регистров сканирующей электронной микроскопии: от 2D-Fur'e-spektrov do on-lajn-анализа статистики integral'nyh prostranstvennyh harakteristik). *Software systems and computational methods* (Программные системы i vychislitel'nye metody). 4: 125-171. DOI: <http://dx.doi.org/10.7256/2454-0714.2019.4.31379> [in Russian]

Hansen et al., 1997 – Hansen, M., Kragelund, L., Nybroe, O., Sørensen, J. (1997). Early colonization of barley roots by *Pseudomonas fluorescens* studied by immunofluorescence technique and confocal laser scanning microscopy. *FEMS microbiology ecology.* 23(4): 353-360. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.1997.tb00416.x>

Hassan et al., 2013 – Hassan, H.E., Rahman, A.A.A., El-Sherbini, E.A., El-Fattah, Z.A., Tawab, A.R.A. (2013). Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS)-an assessment of treated industrial wastewater using water hyacinth roots. *Journal of Applied Sciences Research.* 9(2): 1074-1082. DOI: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20133206045>

Heeren et al., 2020 – Heeren, B., Paulus, S., Goldbach, H., Kuhlmann, H., Mahlein, A.K., Rumpf, M., Wirth, B. (2020). Statistical shape analysis of tap roots: a methodological case study on laser scanned sugar beets. *BMC bioinformatics.* 21(1): 1-17. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12859-020-03654-8>

Hernandez, 2010 – Hernandez, A.C., Dominguez, P.A., Cruz, O.A., Ivanov, R., Carballo, C. A., Zepeda, B.R. (2010). Laser in agriculture. *Int. Agrophys.* 24(4): 407-422.

Hogekamp et al., 2011 – Hogekamp, C., Arndt, D., Pereira, P. A., Becker, J. D., Hohnjec, N., Küster, H. (2011). Laser microdissection unravels cell-type specific transcription in arbuscular

mycorrhizal roots, including CAAT-box transcription factor gene expression correlating with fungal contact and spread. *Plant Physiology*. 157(4): 2023-2043. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.111.186635>

Honghong, Zhengu, 1998 – Honghong, C., Zhengu, C. (1998). The Possibility Comparison Experiment of Laser Bioeffects in Agriculture and Mathematical Statistics. *Acta Laser Biology Sinica*. 7(4): 269-273.

Hulse, Braselton, 2019 – Hulse, J.D., Braselton, J. (2019). Three-Dimensional rendering of an unidentified Plasmodiophorid Slime Mold in *Cucurbita maxima* roots using laser scanning confocal microscopy. *Acta Scientific Agriculture*. 3: 205-210.

Jaiswal et al., 2018 – Jaiswal, Y., Liang, Z., Ho, A., Chen, H., Williams, L., Zhao, Z. (2018). Tissue-based metabolite profiling and qualitative comparison of two species of Achyranthes roots by use of UHPLC-QTOF MS and laser micro-dissection. *Journal of pharmaceutical analysis*. 8(1): 10-19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpha.2017.06.006>

Klink et al., 2005 – Klink, V.P., Alkharouf, N., MacDonald, M., Matthews, B. (2005). Laser capture microdissection (LCM) and expression analyses of *Glycine max* (soybean) syncytium containing root regions formed by the plant pathogen *Heterodera glycines* (soybean cyst nematode). *Plant molecular biology*. 59(6): 965-979. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11103-005-2416-7>

Klink et al., 2007 – Klink, V.P., Overall, C.C., Alkharouf, N.W., MacDonald, M.H., Matthews, B.F. (2007). Laser capture microdissection (LCM) and comparative microarray expression analysis of syncytial cells isolated from incompatible and compatible soybean (*Glycine max*) roots infected by the soybean cyst nematode (*Heterodera glycines*). *Planta*. 226(6): 1389-1409. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00425-007-0578-z>

Klink et al., 2009 – Klink, V.P., Hosseini, P., Matsye, P., Alkharouf, N.W., Matthews, B.F. (2009). A gene expression analysis of syncytia laser microdissected from the roots of the *Glycine max* (soybean) genotype PI 548402 (Peking) undergoing a resistant reaction after infection by *Heterodera glycines* (soybean cyst nematode). *Plant molecular biology*. 71(6): 525-567. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11103-009-9539-1>

Koper et al., 1996 – Koper, R., Wójcik, S., Kornas-Czuczwar, B., Bojarska, U. (1996). Effect of the laser exposure of seeds on the yield and chemical composition of sugar beet roots. *International agronomy*. 10(2): 103-108. DOI: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19970704164>

Krzyzanowska et al., 2012 – Krzyzanowska, D., Obuchowski, M., Bikowski, M., Rychłowski, M., Jafra, S. (2012). Colonization of potato rhizosphere by GFPtagged *Bacillus subtilis* MB73/2, *Pseudomonas* sp. P482 and *Ochrobactrum* sp. A44 shown on large sections of roots using enrichment sample preparation and confocal laser scanning microscopy. *Sensors*. 12(12): 17608-17619. DOI: <https://doi.org/10.3390/s121217608>

Kuya, Sato, 2011 – Kuya, N., Sato, S. (2011). The relationship between profiles of plagiogravitropism and morphometry of columella cells during the development of lateral roots of *Vigna angularis*. *Advances in space research*. 47(3): 553-562. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.09.009>

Levy et al., 1983 – Levy, A., Milo, J., Ashri, A., Palevitch, D. (1983). Heterosis and correlation analysis of the vegetative components and ajmalicine content in the roots of the medicinal plant- *Catharanthus roseus* (L.) G. Don. *Euphytica*. 32(2): 557-564. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00021468>

Li et al., 2012 – Li, S., Sun, Y., Han, R. (2012). Influence of He-Ne Laser Irradiation and UV-traviolet-B Radiation on Nitrogen Metabolism Enzymes in Wheat Seedling Roots [J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, [Machine Translation Card].

Liu et al., 2018 – Liu, F., Shen, T., Kong, W., Peng, J., Zhang, C., Song, K., Wang, W., Zhang, C., He, Y. (2018). Quantitative analysis of cadmium in tobacco roots using laser-induced breakdown spectroscopy with variable index and chemometrics. *Frontiers in plant science*. 9: 1316. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01316>

Martinière et al., 2018 – Martinière, A., Gibrat, R., Sentenac, H., Dumont, X., Gaillard, I., Paris, N. (2018). Uncovering pH at both sides of the root plasma membrane interface using noninvasive imaging. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 115(25): 6488-6493. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1721769115>

Meng et al., 2013 – Meng, Y., Di, B., Zhang, G., Feng, X. G., Xu, C. L., Tian, J. (2013). The correlation analysis of soluble sugar and starch contents with electrical impedance in *Betula*

platyphylla Suk. Roots under waterlogging and flooding stresses. *Acta Biophysica Sinica.* 29(6): 450-460.

Meyer, Fricker, 2000 – Meyer, A.J., Fricker, M.D. (2000). Direct measurement of glutathione in epidermal cells of intact *Arabidopsis* roots by twophoton laser scanning microscopy. *Journal of microscopy.* 198(3): 174-181. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2818.2000.00697.x>

Moradi et al., 2010 – Moradi, A.B., Swoboda, S., Robinson, B., Prohaska, T., Kaestner, A., Oswald, S. E., Wenzel, W.W., Schulin, R. (2010). Mapping of nickel in root cross-sections of the hyperaccumulator plant *Berkheya coddii* using laser ablation ICP-MS. *Environmental and Experimental Botany.* 69(1): 24-31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.02.001>

Mounier et al. 2020 – Mounier, T., Navarro-Sanz, S., Bureau, C., Antoine, L., Varoquaux, F., Durandet, F., Pépin, C. (2020). A fast, efficient and highthroughput procedure involving laser microdissection and RT droplet digital PCR for tissue-specific expression profiling of rice roots. *BMC molecular and cell biology.* 21(1): 1-17. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12860-020-00312-y>

Pan, Li, 2012 – Pan, T., Li, C. (2012). A Study on the Biological Effects of Laser-induced Mutation on Fibrous Roots of Yellow Skin Onion. *Agricultural Biotechnology.* 1(4): 15. DOI: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20133301033>

Peng et al., 2016 – Peng, J., Liu, F., Zhou, F., Song, K., Zhang, C., Ye, L., He, Y. (2016). Challenging applications for multi-element analysis by laser-induced breakdown spectroscopy in agriculture: A review. *Trends in Analytical Chemistry.* 85: 260-272. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2016.08.015>

Popp et al., 2020 – Popp, C., Wamhoff, D., Winkelmann, T., Maiss, E., Grunewaldt-Stöcker, G. (2020). Molecular identification of Nectriaceae in infections of apple replant disease affected roots collected by Harris Uni-Core punching or laser microdissection. *Journal of Plant Diseases and Protection.* 127: 571-582. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41348-020-00333-x>

Pradhan, Mezaal, 2018 – Pradhan, B., Mezaal, M.R. (2018). Data mining-aided automatic landslide detection using airborne laser scanning data in densely forested tropical areas. *Korean Journal of Remote Sensing.* 34(1): 45-74. DOI: <https://doi.org/10.7780/kjrs.2018.34.1.4>

Qianli et al., 2001 – Qianli, A., Xuejian, Y., Yuemei, D., Lijie, F., Baijian, K., Jiudi, L. (2001). Using confocal laser scanning microscope to visualize the infection of rice roots by GFP-labelled *Klebsiella oxytoca* SA2, an endophytic diazotroph. *Acta Botanica Sinica.* 43(6): 558-564.

Rahman et al., 2020 – Rahman, G., Sohag, H., Chowdhury, R., Wahid, K. A., Dinh, A., Arcand, M., Vail, S. (2020). SoilCam: A fully automated minirhizotron using multispectral imaging for root activity monitoring. *Sensors.* 20(3): 787. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20030787>

Richter-Brockmann et al., 2020 – Richter-Brockmann, S., Garbert, K., von Bremen-Kühne, M., Wehe, C.A., Reifschneider, O., Sperling, M., Wallrad, L., Schmitz-Thom, I., Kudla, J., Karst, U. (2020). Elemental bioimaging of Na distribution in roots of *Arabidopsis thaliana* using laser ablation-ICP-MS under cold plasma conditions. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry,* 35(9), 2057-2063. DOI: <https://doi.org/10.1039/DoJA00151A>

Roberts et al., 2010 – Roberts, T.J., McKenna, S.J., Du, C.J., Wuyts, N., Valentine, T.A., Bengough, A.G. (2010). Estimating the motion of plant root cells from in vivo confocal laser scanning microscopy images. *Machine Vision and Applications.* 21(6): 921-939. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00138-009-0207-x>

Roux et al., 2014 – Roux, B., Rodde, N., Jardinaud, M. F., Timmers, T., Sauviac, L., Cottret, L., Carrère, S., Sallet, E., Courcelle, E., Moreau, S., Gamas, P. (2014). An integrated analysis of plant and bacterial gene expression in symbiotic root nodules using laser-capture microdissection coupled to RNA sequencing. *The Plant Journal.* 77(6): 817-837. DOI: <https://doi.org/10.1111/tpj.12442>

Scherer et al., 1992 – Scherer, G.F., vom Dorp, B., Schöllmann, C., Volkmann, D. (1992). Proton-transport activity, sidedness, and morphometry of tonoplast and plasma-membrane vesicles purified by free-flow electrophoresis from roots of *Lepidium sativum* L. and hypocotyls of *Cucurbita pepo* L. *Planta.* 186(4): 483-494. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00198027>

Schuller et al., 2014 – Schuller, A., Kehr, J., Ludwig-Müller, J. (2014). Laser microdissection coupled to transcriptional profiling of *Arabidopsis* roots inoculated by *Plasmoidiophora brassicae* indicates a role for brassinosteroids in clubroot formation. *Plant and Cell Physiology.* 55(2): 392-411. DOI: <https://doi.org/10.1093/pcp/pct174>

[Sekulska-Nalewajko et al., 2014](#) – *Sekulska-Nalewajko, J., Gocławski, J., Wielanek, M., Gajewska, E., Tamborski, S.* (2014). A method for thiarubrine canals extraction in optical coherence tomography images of Schkuhria pinnata roots. *Image Processing & Communications*, 19(2-3): 151-160. DOI: <https://doi.org/10.1515/ ipc-2015-0019>

[Semchenko, Khakhomov, 2007](#) – *Semchenko, I.V., Khakhomov, S.A.* Laboratornyi praktikum po optike [Laboratory workshop on optics]. Ministry of Education of the Republic of Belarus, Gomel State University named after F. Skorina. Gomel: GGU im. F. Skorina, 223 p. [in Russian]

[Shelden et al., 2020](#) – *Shelden, M.C., Gilbert, S.E., Tyerman, S.D.* (2020). A laser ablation technique maps differences in elemental composition in roots of two barley cultivars subjected to salinity stress. *The Plant Journal*. 101(6): 1462-1473. DOI: <https://doi.org/10.1111/tpj.14599>

[Shiono, Taira, 2020](#) – *Shiono, K., Taira, S.* (2020). Imaging of multiple plant hormones in roots of rice (*Oryza sativa*) using nanoparticle-assisted laser desorption/Ionization mass spectrometry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 68(24): 6770-6775. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c00749>

[Shiono et al., 2017](#) – *Shiono, K., Hashizaki, R., Nakanishi, T., Sakai, T., Yamamoto, T., Ogata, K., Harada, K.I., Ohtani, H., Katano, H., Taira, S.* (2017). Multi-imaging of cytokinin and abscisic acid on the roots of rice (*Oryza sativa*) using matrix-assisted laser desorption/ionization mass spectrometry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 65(35): 7624-7628. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02255>

[Skrynnik et al., 2018](#) – *Skrynnik, A.A., Oganessian, V.A., Jablokov, A.G., Grakov, O.V.* (2018). Sistema dlja poluavtomaticheskoy klassifikacij tkanej s ispol'zovaniem opticheskogo difraktometra dlja analiza biopolimernyh struktur [System for semiautomatic tissue classification based on optical diffractometer for biopolymer structure analysis]. *Morphologia*. 12(3): 164-171. DOI: <http://dx.doi.org/10.26641/1997-9665.2018.3.164-171> [in Russian]

[Stopka et al., 2017](#) – *Stopka, S.A., Agtuca, B.J., Koppenaal, D.W., Paša-Tolić, L., Stacey, G., Vertes, A., Anderton, C.R.* (2017). Laser-ablation electrospray ionization mass spectrometry with ion mobility separation reveals metabolites in the symbiotic interactions of soybean roots and rhizobia. *The Plant Journal*. 91(2): 340-354. DOI: <https://doi.org/10.1111/tpj.13569>

[Su et al., 2008](#) – *Su, T.F., Jia, X.F., Zhao, G.Z., Han, P., Wang, Y.J., Li, Y., Zhou, B., Song, C.P., Chang, J.F., Gong, C.R.* (2008). Characterization of original and expanded leaf-roots of tobacco by terahertz spectroscopy and X-ray microanalysis. *Materials Letters*. 62(17-18): 2779-2782. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.01.043>

[Suhua et al., 2012](#) – *Suhua, S.Y. C.H.L., Rong, L.X.H.* (2012). Effect of He-Ne laser and UV-B radiation enhancement on apoptosis in the roots of wheat seedling. *Chinese Journal of Lasers*. 39(7): 0704001-6. DOI: <http://dx.doi.org/10.3788/CJL201239.0704001>

[Sun et al., 1998](#) – *Sun, W., Liu, S., Liu, Z., Song, F., Fang, S.* (1998). A study of aconitum alkaloids from aconite roots in *Aconitum carmichaeli* Debx using matrix-assisted laser desorption/ionization mass spectrometry. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*. 12(13): 821-824. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0231\(19980715\)12:13%3C821::AID-RCM242%3E3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0231(19980715)12:13%3C821::AID-RCM242%3E3.0.CO;2-Z)

[Thakur, Gathania, 2017](#) – *Thakur, S., Gathania, A.K.* (2017). Structural and optical studies on the crushed roots of *Saccharum munja* grass: a new low cost red phosphor source for optical applications. *Indian Journal of Physics*. 91(6): 623-627. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12648-017-0967-5>

[Tirlapur, König, 1999](#) – *Tirlapur, U.K., König, K.* (1999). Near-infrared femtosecond laser pulses as a novel non-invasive means for dye-permeation and 3D imaging of localised dye-coupling in the *Arabidopsis* root meristem. *The Plant Journal*. 20(3): 363-370. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-313X.1999.00603.x>

[Ueno et al., 2016](#) – *Ueno, R., Pham, N. T. Q., Inoue, N., Kurauchi, N., Kato, F.* (2016). Relationship between tomato vegetative growth and violet laser-induced fluorescence from water in hydroponic culture. *Bulletin Shinshu University Alpine Field Center*. (14): 1-5. DOI: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20163196847>

[Vainshtein, 1973](#) – *Vainštejn, B.K.* (1973). Three-dimensional electron microscopy of biological macromolecules. *Soviet Physics Uspekhi*. 16(2): 185-206. DOI: <https://doi.org/10.1070/PU1973v01n02ABEH005164>

- [van den Berg et al., 1998](#) – van den Berg, C., Hage, W., Weisbeek, P., & Scheres, B. (1998). Laser ablation in Arabidopsis roots: a tool to study cell-to-cell communication. In: *Cellular Integration of Signalling Pathways in Plant Development* (pp. 237-250). Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-72117-5_21
- [Veysi et al., 2020](#) – Veysi, S., Naseri, A.A., Hamzeh, S. (2020). Relationship Between Field Measurement of Soil Moisture in the Effective Depth of Sugarcane Root Zone and Extracted Indices from Spectral Reflectance of Optical/Thermal Bands of Multispectral Satellite Images. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing.* 48(7): 1035-1044. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01135-2>
- [Vierheiling et al., 2001](#) – Vierheiling, H., Knoblauch, M., Juergensen, K., van Bel, A.J., Grundler, F.M., Piché, Y. (2001). Imaging arbuscular mycorrhizal structures in living roots of Nicotiana tabacum by light, epifluorescence, and confocal laser scanning microscopy. *Canadian Journal of Botany.* 79(2): 231-237. DOI: <https://doi.org/10.1139/b00-156>
- [Vierheiling et al., 1999](#) – Vierheiling, H., Böckenhoff, A., Knoblauch, M., Juge, C., Van Bel, A. J., Grundler, F., Piche, Y., Wyss, U. (1999). In vivo observations of the arbuscular mycorrhizal fungus Glomus mosseae in roots by confocal laser scanning microscopy. *Mycological Research.* 1999. 103(3): 311-314. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0953756298007576>
- [Wagner, 2010](#) – Wagner, B. (2010). 3D modeling of tree roots: combining 3D laser scans & 2D tree-ring data (Doctoral dissertation, ETH Zurich).
- [Wang et al., 2018](#) – Wang, J., Shi, M., Zheng, P., Xue, S., Peng, R. (2018). Quantitative Analysis of Ca, Mg, and K in the roots of Angelica pubescens f. biserrata by Laser-induced breakdown spectroscopy combined with artificial neural networks. *Journal of Applied Spectroscopy.* 85(1): 190-196. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10812-018-0631-7>
- [Wójcik, 1994](#) – Wójcik, S. (1994). Effects of seed irradiation with laser on the yield and chemical composition of sugar beet roots. *International agronomy.* 8(3): 539-542. DOI: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19942402020>
- [Yang et al., 2016](#) – Yang, C., Odvody, G.N., Thomasson, J.A., Isakeit, T., Nichols, R.L. (2016). Change detection of cotton root rot infection over 10-year intervals using airborne multispectral imagery. *Computers and Electronics in Agriculture.* 123: 154-162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.02.026>
- [Youssef et al., 2019](#) – Youssef, M.S., Mira, M.M., Millar, J.L., Becker, M.G., Belmonte, M.F., Hill, R.D., Stasolla, C. (2019). Spatial identification of transcripts and biological processes in laser micro-dissected sub-regions of waterlogged corn roots with altered expression of phytoglobin. *Plant Physiology and Biochemistry.* 139: 350-365. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.03.036>
- [Yu et al., 2001](#) – Yu, Q., Kuo, J., Tang, C. (2001). Using confocal laser scanning microscopy to measure apoplastic pH change in roots of Lupinus angustifolius L. in response to high pH. *Annals of Botany.* 87(1): 47-52. DOI: <https://doi.org/10.1006/anbo.2000.1297>
- [Zargar et al., 2015](#) – Zargar, S.M., Fujiwara, M., Inaba, S., Kobayashi, M., Kurata, R., Ogata, Y., Fukao, Y. (2015). Correlation analysis of proteins responsive to Zn, Mn, or Fe deficiency in Arabidopsis roots based on iTRAQ analysis. *Plant cell reports.* 34(1): 157-166. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00299-014-1696-2>
- [Zheng et al., 2014](#) – Zheng, Q., Zhao, Y., Wang, J., Liu, T., Zhang, B., Gong, M., Li, J., Liu, H., Han, B., Zhang, Y., Song, X., Li, Y., Xiao, X. (2014). Spectrum-effect relationships between UPLC fingerprints and bioactivities of crude secondary roots of Aconitum carmichaelii Debeaux (Fuzi) and its three processed products on mitochondrial growth coupled with canonical correlation analysis. *Journal of ethnopharmacology.* 153(3): 615-623. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jep.2014.03.011>

Использование цифровой системы корреляционно-спектрального анализа в реальном времени для выделения морфометрических классов тканей корней растений как альтернатива лазерной дифрактометрии (2D FFT)

Федор Константинович Орехов ^{a,*}, Наталья Анатольевна Рубцова ^a

^a ФИЦ ХФ РАН, ОДХБП, Российская Федерация

Аннотация. В данной статье мы предлагаем использовать системы корреляционно-спектрального анализа в реальном времени (ДВО РАН) для выделения морфометрических классов корней растений и рассматриваем это решение как полноценную альтернативу устаревшей аналоговой лазерной/оптической дифрактометрии и лазерной Фурье-техники с вычислением показателей Лендариса и построением проекционных трансформант. Предлагаемая техника может быть реализована с использованием ПК, ноутбука или планшета со старыми операционными системами. Простота и дешевизна делает эту технику доступной для пользователей из агроотрасли, не являющихся специалистами в области оптики или лазерной физики. В настоящей статье мы попытались на понятном языке, не обращаясь к формулам, объяснить ботаникам и агрономам, чем, по сути, является рассматриваемый метод, какие преимущества он несет ботаникам - практикам и какую информацию можно извлечь с его использованием (не исключая описание артефактов и ошибок, которые могут привести к разочарованию в методе, в основе которого лежит ошибка, а не некорректность предлагаемого метода). Во второй части статьи приводится атлас-кatalog Фурье-спектров и микрофотографических изображений соответствующих ботанических форм и структур.

Ключевые слова: корни растений, 2D БПФ, лазерный дифрактометр, агроквалиметрия.

* Корреспондирующий автор

Адреса электронной почты: theorehov@gmail.com (Ф.К. Орехов)