



Russian Journal of Biological Research

Issued from 2014

E-ISSN 2413-7413

2025. 12(1). Issued one times a year

EDITORIAL BOARD

Bityukov Nikolai – Sochi State University, Russian Federation, Sochi, Russian Federation (Editor in Chief)

Davitashvili Magda – Telavi State University, Telavi, Georgia (Deputy Editor-in-Chief)

Khasanova Alfiya – Naberezhnye Chelny State Pedagogical University, Naberezhnye Chelny, Russian Federation

Marius Brazaitis – Lithuanian Sports University, Institute of Sports Science and Innovations, Kaunas, Lithuania

Volodin Vladimir – Komi Science Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation

Journal is indexed by: **Cross Ref** (USA), **MIAR** (Spain), **Open Academic Journals Index** (USA).

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: 13906, Polarstone Ct.,
Houston, TX, 77044

Release date 25.12.25
Format 21 × 29,7/4.

Website: <https://rjbr.cherkasgu.press>
E-mail: office@cherkasgu.press

Headset Georgia.

Founder and Editor: Cherkas Global University
Order № B-17.

© Russian Journal of Biological Research, 2025

Russian Journal of Biological Research

2025

Is.

1

C O N T E N T S

Articles

NGS-Based Nutrigenomic Biomarkers for Personalized Nutrition: A Review of the Current State of Research D. Yakubu, I.A.A Ibrahim, H.S. Sulaiman	3
Impact of Cassava Mill Wastewater on Soil Nutrient Dynamics and Microbial Communities I.A.A Ibrahim, H.S. Sulaiman, A. Bell	17
Peter Frantsevich Lesgaft (1837–1909): Some Biographical Aspects of the Scientific and Pedagogical Activity of the Russian Physiologist and Teacher A.M. Mamadaliev	22
Methodological Notes on the Possibility of Electron Microscopic Study of Fossil Elasmobranch Teeth in Ultra-Low-Budget Laboratories P.L. Alexandrov, M.K. Filippov, Th.K. Orekhov	34

Copyright © 2025 by Cherkas Global University



Published in the USA
 Russian Journal of Biological Research
 Issued from 2014
 E-ISSN: 2413-7413
 2025. 12(1): 3-16

DOI: 10.13187/ejbr.2025.1.3

<https://rjbr.cherkasgu.press>

Articles

NGS-Based Nutrigenomic Biomarkers for Personalized Nutrition: A Review of the Current State of Research

Danjuma Yakubu ^{a,*}, Iliyasu A. A Ibrahim ^a, Hafizah S. Sulaiman ^b

^a Department of Human Nutrition and Dietetics, Federal University of Health Sciences Azare, Nigeria

^b Department of Internal Medicine, Abubakar Tafawa Balewa University Teaching Hospital Bauchi, Nigeria

Abstract

The integration of next-generation sequencing (NGS) technology into the area of personalized nutrition provides a breakthrough approach to studying the intricate relationships between food, genetics, and health consequences. By allowing the discovery of nutrigenomic biomarkers, NGS has allowed the customization of dietary recommendations to fit with an individual's genetic predispositions and metabolic capacity. This innovation promises to enhance the control of dietary responses, optimize nutrient metabolism, and decrease the risk factors linked with nutrition-related chronic illnesses such as obesity, type 2 diabetes, and cardiovascular problems. This review offers a complete examination of the present status of NGS-based biomarker research in personalized nutrition. It investigates the methodology applied in sequencing technology, the finding of gene-diet relationships, and the applicability of such biomarkers in clinical and public health contexts. Particular focus is given to the significance of NGS in identifying genetic variations regulating macronutrient and micronutrient metabolism, gut microbiome composition, and epigenetic changes. Despite the great advances in applying NGS to nutrition research, many hurdles exist. These include the difficulty of data interpretation, the requirement for thorough clinical validation of discovered biomarkers, and the ethical concerns connected to genetic data privacy and fairness in access to customized nutrition services. Furthermore, the integration of multi-omics data, such as transcriptomics, proteomics, and metabolomics, into NGS investigations is critical for a comprehensive understanding of nutrigenomic interactions but remains neglected. Advancing the area of NGS-based customized nutrition will need multidisciplinary cooperation among geneticists, nutritionists, bioinformaticians, and physicians. Additionally, the development of novel approaches, such as machine learning algorithms for data analysis and rigorous clinical trials for biomarker validation, will be vital. As these issues are solved, NGS offers the promise to change nutrition research and enhance public health outcomes by providing extremely accurate and tailored dietary treatments.

Keywords: next-generation sequencing (NGS), personalized nutrition, nutrigenomic biomarkers, gene-diet interactions, macronutrient metabolism, gut microbiota, multi-omics, clinical validation.

* Corresponding author

E-mail addresses: yakubu.danjuma@fuhhsa.edu.ng (D. Yakubu)

1. Introduction

Personalized nutrition, an emerging field at the intersection of genetics and nutritional science, aims to optimize dietary recommendations by tailoring them to individual characteristics such as genetic makeup, metabolic responses, and gut microbiome composition (Shahzad et al., 2024). Traditional dietary guidelines have largely followed a one-size-fits-all approach, which may not adequately address the complex and individualized relationships between diet and health (Kolodziejczyk et al., 2019). With advancements in understanding genetic diversity in nutrient metabolism and dietary responses, personalized nutrition offers the potential for precision dietary interventions that could improve health outcomes and reduce the risk of chronic diseases (Wang et al., 2024). The development of next-generation sequencing (NGS) technology has been a game-changer in this field, enabling large-scale, high-resolution analysis of the human genome. Unlike traditional sequencing methods, NGS allows for the rapid and cost-effective identification of genetic variants, including single nucleotide polymorphisms (SNPs), copy number variations, and other genetic markers that influence dietary responses and disease risk (Singar et al., 2024). These advancements have paved the way for the development of nutrigenomic biomarkers, which are essential tools for studying gene-diet interactions and their implications for health and disease.

Research using NGS has generated significant insights into how genetic variations affect nutrient absorption, metabolism, and utilization. For example, polymorphisms in genes such as *FTO* and *MC4R* have been linked to obesity and energy metabolism (Resende et al., 2021), while variations in *MTHFR* affect folate metabolism and homocysteine levels, influencing cardiovascular health (Gospodarczyk et al., 2022). Additionally, NGS has facilitated research on the gut microbiome, a key component of personalized nutrition, by identifying microbial genes involved in dietary fiber metabolism, short-chain fatty acid production, and metabolic disorders (Abeltino et al., 2024).

This review explores the current applications of NGS in personalized nutrition, focusing on the discovery and validation of nutrigenomic biomarkers. It provides an overview of key findings in the field, highlights the methodologies used, and discusses the challenges and opportunities in translating NGS findings into clinical practice. Specifically, the review examines the role of NGS in identifying genetic drivers of dietary responses, such as lactose intolerance, gluten sensitivity, and omega-3 fatty acid metabolism. It also explores the integration of multi-omics approaches, including transcriptomics, proteomics, and metabolomics, with NGS to gain a comprehensive understanding of the molecular mechanisms underlying personalized nutrition.

2. Discussion and results

Key Nutrigenomic Biomarkers Identified Using NGS

a. Single Nucleotide Polymorphisms (SNPs)

Single nucleotide polymorphisms (SNPs) are among the most extensively studied genetic variants in nutrigenomics. Using NGS, researchers have identified SNPs in various genes that significantly influence dietary responses, metabolism, and disease risk. These findings have advanced our understanding of the molecular basis of personalized nutrition.

One notable example is the *FTO* gene, where SNPs such as rs9939609 have been associated with increased susceptibility to obesity (Abd Ali et al., 2021). This variant affects energy balance by altering appetite control and energy expenditure (MacLean et al., 2017). Similarly, SNPs in the *MC4R* gene, which also plays a critical role in energy balance, have been linked to obesity and related metabolic disorders (Adamska-Patruno et al., 2021).

The *PPARG* gene, encoding peroxisome proliferator-activated receptor gamma, has also garnered significant attention in nutrigenomics. Variants such as Pro12Ala are associated with improved insulin sensitivity and a reduced risk of type 2 diabetes in response to specific dietary interventions, such as increased intake of polyunsaturated fatty acids (Abaj et al., 2021). These findings underscore the importance of incorporating genetic information into dietary planning for metabolic health.

In the context of lipid metabolism, SNPs in genes such as *APOA5* and *CETP* play crucial roles. Variants in *APOA5* influence triglyceride levels and modulate individual responses to dietary fats. For example, the -1131T>C polymorphism in *APOA5* has been linked to hypertriglyceridemia and variable responses to omega-3 fatty acid supplementation (Wierzbicki et al., 2022). Similarly,

SNPs in *CETP*, such as rs5882, affect HDL cholesterol levels and cardiovascular risk, highlighting the gene's role in tailoring dietary fat recommendations (Asl et al., 2024).

Folate metabolism is another area where SNPs have significant implications. Variants in the *MTHFR* gene, particularly C677T and A1298C polymorphisms, reduce the enzyme's activity, leading to elevated homocysteine levels. This has been associated with an increased risk of cardiovascular diseases, neural tube defects, and other health issues. Personalized interventions, such as folate supplementation, can mitigate these risks, demonstrating the practical benefits of SNP research in dietary management (Di Renzo et al., 2019).

b. Gene Expression Profiles

Gene expression profiling, enabled by RNA sequencing (RNA-seq), has provided critical insights into the dynamic interactions between diet and gene activity. By examining how dietary interventions alter gene expression, researchers can identify biomarkers that predict individual responses to specific nutrients and guide personalized dietary plans. One prominent example is the expression of the *INSR* gene, which encodes the insulin receptor. RNA-seq studies have shown that dietary modifications, such as caloric restriction and low-glycemic diets, influence *INSR* expression in individuals with type 2 diabetes. These findings suggest that monitoring *INSR* expression levels could help tailor dietary recommendations to improve insulin sensitivity and glucose homeostasis (Liu et al., 2024).

The *LEP* gene, which encodes leptin – a hormone critical for appetite regulation and energy balance—is another key player in personalized nutrition (Odriozola et al., 2024). RNA-seq studies have demonstrated that high-fat diets downregulate *LEP* expression in individuals prone to obesity, while dietary interventions rich in fiber and polyphenols restore *LEP* expression. This highlights the potential for gene expression profiles to inform dietary strategies aimed at weight management and metabolic health.

Additionally, research on genes involved in inflammatory pathways, such as *TNF-α* and *IL-6*, has shown how diet influences systemic inflammation (Saghafi-Asl et al., 2021). RNA-seq findings reveal that anti-inflammatory diets, characterized by high omega-3 fatty acid and antioxidant content, downregulate the expression of these genes, reducing inflammation and associated chronic disease risks. These findings emphasize the importance of incorporating gene expression data into dietary planning for inflammatory conditions.

Emerging research has also focused on nutrient-specific gene expression patterns. For example, the expression of genes involved in vitamin D metabolism, such as *CYP24A1* and *VDR*, is influenced by dietary vitamin D intake (Iriani et al., 2024). RNA-seq studies have shown that individuals with reduced vitamin D receptor activity benefit more from increased dietary or supplemental vitamin D, highlighting the need for personalized approaches to nutritional supplementation (Aoun et al., 2024).

c. Epigenetic Modifications

Epigenetics, which refers to heritable changes in gene expression that do not involve alterations in the DNA sequence, has emerged as a critical area of study in personalized nutrition. NGS technologies have enabled high-resolution mapping of epigenetic modifications, such as DNA methylation and histone modifications, which are influenced by dietary factors and have significant implications for health.

One of the most studied epigenetic markers in nutrigenomics is DNA methylation. For example, the methylation status of the *PPARγ* gene has been shown to influence metabolic responses to dietary fat intake (Porcuna et al., 2021). Increased methylation of *PPARγ* is associated with reduced gene expression and altered lipid metabolism, which can be mitigated by personalized dietary interventions, such as the inclusion of monounsaturated fats (Rai, 2024).

Similarly, the *CLOCK* gene, which plays a key role in circadian rhythm regulation, has been found to undergo diet-induced epigenetic changes (Engin, 2024). DNA methylation of the *CLOCK* promoter region is associated with disruptions in circadian rhythms and metabolic health. Studies suggest that diets rich in polyphenols, such as those found in berries and green tea, can reverse these methylation patterns, restoring normal circadian function (Chen et al., 2024).

Histone modifications, another epigenetic mechanism, also play a role in personalized nutrition. Acetylation and methylation of histones can alter chromatin structure, thereby influencing gene expression. For instance, histone acetylation in inflammatory genes such as *NF-κB* has been shown to be regulated by dietary components like resveratrol and curcumin, which

act as natural histone deacetylase inhibitors (Kang, Kim, 2023). These findings highlight the potential of dietary interventions to target epigenetic regulators for managing inflammation and chronic diseases.

Emerging research also points to the role of microRNAs (miRNAs) in diet-gene interactions. MiRNAs are small non-coding RNAs that regulate gene expression post-transcriptionally. NGS-based studies have identified diet-responsive miRNAs, such as miR-33, which is involved in cholesterol metabolism (Zhang et al., 2023). Modulating the levels of such miRNAs through dietary interventions holds promise for personalized approaches to lipid management (Kura et al., 2019). By integrating epigenetic data with genetic and transcriptomic information, NGS technologies provide a comprehensive understanding of how dietary factors influence gene regulation and disease risk. These insights pave the way for the development of precision nutrition plans that account for an individual's epigenetic profile, ultimately promoting better health outcomes.

Applications of NGS-Based Biomarkers in Personalized Nutrition

Next-generation sequencing (NGS) has significantly advanced the discovery and application of biomarkers in personalized nutrition, providing a powerful tool for tailoring dietary interventions to individual genetic, transcriptomic, and epigenomic profiles. These advancements have important implications for managing various health conditions, including obesity, diabetes, cardiovascular diseases, and metabolic syndromes, by offering insights that enable precision nutrition strategies.

a. Tailored Diets for Obesity Management

Obesity is a multifactorial condition influenced by genetics, environmental factors, and lifestyle choices. Traditionally, dietary interventions for obesity have been generalized, often overlooking individual genetic differences that affect dietary responses. However, the use of NGS-based biomarkers allows for more precise and personalized dietary advice, incorporating genetic predispositions that may influence an individual's ability to manage weight effectively (Górczyńska-Kosiorz et al., 2024).

A key genetic factor in obesity is the presence of specific single nucleotide polymorphisms (SNPs) in genes such as *FTO* (fat mass and obesity-associated gene). Studies have shown that individuals with certain *FTO* SNP variants are genetically predisposed to increased appetite, reduced satiety, and inefficient fat metabolism (Abd Ali et al., 2021). These genetic variations can significantly impact an individual's responsiveness to different dietary interventions. NGS enables the identification of these SNPs, allowing healthcare providers to design dietary recommendations that are more likely to be effective based on an individual's genetic profile.

The impact of *FTO* SNPs on dietary responses is particularly evident when considering the macronutrient composition of diets. Research indicates that individuals with *FTO* variants associated with insulin resistance may benefit more from low-carbohydrate diets, which can reduce insulin spikes and improve metabolic health (Xue et al., 2024). Conversely, individuals with *FTO* SNPs linked to impaired lipid oxidation may experience greater benefits from low-fat diets that minimize fat storage (Gkouskou et al., 2024). By integrating NGS-derived genetic profiles into dietary planning, dietitians can provide more effective weight management strategies, leading to improved long-term health outcomes.

NGS also plays a crucial role in studying the gut microbiome, which has been shown to influence obesity (Vallianou et al., 2023). The gut microbiota can be analyzed through metagenomic sequencing or 16S rRNA sequencing, identifying unique microbial patterns that affect metabolic processes. For example, individuals with reduced microbial diversity may benefit from fiber-rich diets that promote the growth of beneficial gut bacteria, thereby improving overall gut health and metabolic function (Ranganathan, Anteyi, 2022). Additionally, probiotic or prebiotic supplements may be recommended to restore microbial balance and reduce metabolic inflammation, further supporting weight management efforts (Van Hul, Cani, 2023).

Furthermore, NGS technologies enable the study of epigenetic modifications, such as DNA methylation and histone acetylation, that influence gene expression in response to environmental factors, including diet. These epigenetic changes can impact obesity-related genes, and targeted dietary interventions can help mitigate these effects (Mehta et al., 2024). For instance, a diet rich in methyl donors like folate and choline can counteract adverse epigenetic changes associated with obesity, improving gene expression patterns related to metabolism and fat storage.

Finally, personalized nutrition based on NGS extends beyond genetics and diet to include lifestyle factors such as physical activity and sleep (Fischer, 2024). These factors, which interact with genetic predispositions, are essential components of a holistic approach to obesity management. By integrating NGS-based biomarkers into personalized nutrition strategies, healthcare providers can develop comprehensive plans that consider not only genetic and epigenetic factors but also individual lifestyle preferences and behaviors, ultimately supporting more sustainable and effective weight management strategies.

b. Cardiovascular Disease Risk Mitigation

Cardiovascular diseases (CVDs), including heart disease and stroke, are leading causes of morbidity and mortality worldwide (Iso, 2021). Genetics play a significant role in the predisposition to CVD, influencing factors such as lipid metabolism, blood pressure regulation, and inflammatory processes. The advent of NGS technology has opened new avenues for tailoring dietary recommendations aimed at reducing CVD risk, particularly through the identification of genetic variants that influence an individual's response to specific nutrients (Strianese et al., 2020).

One of the most extensively studied areas in cardiovascular genetics is the impact of SNPs in genes related to lipid metabolism, such as *APOA5* and *LIPC*. *APOA5* encodes apolipoprotein A-V, which plays a critical role in regulating triglyceride levels in the blood (Alves et al., 2024). Variants in the *APOA5* gene have been shown to significantly affect an individual's lipid profile, particularly their triglyceride levels, which are a known risk factor for cardiovascular disease (Su et al., 2018). For individuals with certain *APOA5* alleles associated with elevated triglycerides, dietary interventions that include omega-3 fatty acids, commonly found in fatty fish, flaxseeds, and walnuts, may help lower triglyceride levels and reduce cardiovascular risk.

Similarly, the *LIPC* gene, which encodes hepatic lipase, is involved in the hydrolysis of lipids, regulating both high-density lipoprotein (HDL) cholesterol levels and triglyceride metabolism (Dijk et al., 2022). Variants in *LIPC* have been linked to altered lipid profiles, and individuals with specific *LIPC* SNPs may benefit from omega-3 supplementation to reduce triglyceride levels and increase HDL cholesterol, which has protective effects against CVD (Kardassis et al., 2022). Omega-3 fatty acids, particularly EPA and DHA, are known to have anti-inflammatory and lipid-lowering properties, making them a critical nutrient in the prevention of hyperlipidemia and cardiovascular diseases, especially for individuals with genetic predispositions to dyslipidemia (Omachi et al., 2024).

The ability to identify individuals at high genetic risk for CVD through NGS-based biomarker analysis offers a precision approach to cardiovascular risk reduction (Papadopoulou et al., 2023). Rather than providing generic dietary recommendations, healthcare professionals can offer personalized guidance based on an individual's genetic profile, focusing on specific foods that are most likely to benefit their lipid metabolism and overall cardiovascular health. In the case of *APOA5* and *LIPC* variants, omega-3 supplementation becomes a targeted intervention that could reduce the need for more invasive treatments, such as pharmacological lipid-lowering therapies, thereby offering a more holistic, preventive approach to managing cardiovascular risk (Wazir et al., 2023).

In addition to omega-3 supplementation, NGS can also identify other genetic markers that influence responsiveness to dietary interventions, such as those related to inflammation and oxidative stress. For example, individuals with specific variants in genes such as *MTHFR* (methylenetetrahydrofolate reductase) may benefit from increased intake of folate or other B vitamins, as these nutrients play a role in homocysteine metabolism, which is linked to cardiovascular health (He, Li, 2023). Ultimately, the integration of NGS-based biomarkers into the dietary management of cardiovascular disease offers a tailored approach that takes into account an individual's genetic predispositions, lifestyle, and specific nutritional needs. This approach allows for more effective interventions, improved preventive measures, and better overall cardiovascular health outcomes.

c. Nutritional Management of Diabetes

Diabetes, particularly Type 2 diabetes (T2D), is a chronic metabolic disorder characterized by impaired insulin sensitivity and glucose metabolism (Lima et al., 2022). The dietary management of diabetes is crucial for maintaining blood sugar levels, managing weight, and reducing the risk of complications. In recent years, the role of genetic markers in guiding nutritional interventions has gained increasing attention, enabling more targeted, personalized approaches to managing the disease.

Next-generation sequencing (NGS) technologies have facilitated the identification of genetic variants associated with glucose metabolism, providing critical insights into the personalized management of diabetes. One such important genetic variant is in the *TCF7L2* gene, which encodes a transcription factor involved in insulin production and glucose homeostasis. Variants in *TCF7L2* have been shown to increase the risk of developing T2D and influence an individual's response to dietary interventions (Verma et al., 2022). For individuals with *TCF7L2* variants, higher intake of dietary fiber, particularly from whole grains, legumes, and vegetables, may be beneficial in improving insulin sensitivity and glycemic control. This is because fiber-rich foods slow glucose absorption, reduce postprandial blood sugar spikes, and promote gut health, all of which are critical factors in managing diabetes.

Other genes involved in glucose regulation also play a significant role in determining an individual's response to various dietary patterns. For example, *PPARG* (peroxisome proliferator-activated receptor gamma) and *KCNJ11* (a gene encoding the potassium channel subunit) have been associated with insulin sensitivity and secretion (Yahaya, Salisu, 2020). For individuals with specific polymorphisms in these genes, low-glycemic index (GI) diets, which focus on foods that cause slower rises in blood glucose, may be more effective in managing blood sugar levels. These diets emphasize foods such as non-starchy vegetables, legumes, and whole grains, which have a moderate impact on blood glucose levels compared to high-GI foods like white bread and sugary snacks.

Additionally, NGS-based approaches allow for the identification of gene-diet interactions that extend beyond macronutrient composition to include micronutrients and bioactive compounds. For instance, individuals with genetic variants affecting vitamin D metabolism may benefit from vitamin D supplementation as part of their diabetes management plan, as vitamin D has been shown to play a role in insulin sensitivity and glucose metabolism (Contreras-Bolivar et al., 2021). Similarly, genetic variations influencing the metabolism of polyphenols in fruits and vegetables could guide recommendations for dietary strategies high in antioxidants to reduce inflammation and improve glycemic control.

Challenges and Future Directions

The integration of next-generation sequencing (NGS) with personalized nutrition holds immense promise for improving healthcare and disease prevention. However, its widespread implementation is not without significant challenges. These challenges include data interpretation, clinical validation, and ethical considerations, all of which need to be addressed to fully realize the benefits of NGS-based personalized nutrition.

a. Data Interpretation

One of the most significant challenges associated with NGS is the interpretation of the vast amounts of data it generates. NGS techniques can produce gigabytes or even terabytes of data in a single sequencing run, encompassing genetic, transcriptomic, and epigenomic information (Satam et al., 2023). While this wealth of data provides a comprehensive picture of an individual's biological makeup, it also presents major challenges in deriving meaningful, actionable insights.

A key issue is distinguishing clinically relevant genetic variants from benign ones. In a typical NGS experiment, hundreds of variants are identified, but not all of them are related to the individual's health (Spielmann, Kircher, 2022). Many of the identified genetic variants may be benign or have minimal impact on the individual's disease risk or treatment response. The process of determining which variants are significant – those that influence health outcomes and should guide clinical decisions – requires advanced bioinformatics tools and algorithms. Moreover, the interpretation of these variants is often context-dependent, influenced by the individual's lifestyle, environment, and other factors.

While bioinformatics tools have made significant progress, there is still a need for more sophisticated and standardized approaches to accurately select and interpret genetic findings. Variants of unknown significance (VUS) remain a common problem, as their role in disease onset or treatment response is not fully understood. The complexity of multi-gene interactions and gene-environment interactions further complicates the ability to predict health outcomes based solely on genetic data (Hequet, 2024).

Additionally, the clinical significance of specific biomarkers may not be universally agreed upon, as there is often variability in how these biomarkers are interpreted across different research studies and clinical settings (Kraus, 2018). As such, a clear and consistent approach to data

interpretation is essential to ensure that NGS results are accurately translated into personalized diet and health recommendations.

b. Clinical Validation

Although numerous biomarkers have been identified using NGS technologies that show promise for personalized nutrition, only a few of them have undergone rigorous clinical validation. Clinical validation refers to the process of evaluating whether a specific biomarker or genetic variant truly leads to predictable, reproducible health outcomes when used in clinical practice (Paver, Morey, 2024). This step is necessary to determine whether a biomarker is truly useful in guiding dietary recommendations or whether it is merely a correlation without practical value.

For example, while certain genetic variants, such as those in the *FTO* gene associated with obesity or *TCF7L2* for diabetes, have been shown to influence health outcomes in large cohort studies, there is still limited evidence on how these variants perform in real-world clinical settings, particularly when used to guide personalized nutrition (Gkouskou et al., 2024). Many studies linking genetic variants to diet-related health outcomes are observational in nature and may suffer from confounding factors, such as environmental influences and lifestyle habits, which make it difficult to attribute observed effects solely to genetic predisposition. Additionally, clinical trials that rigorously test the effectiveness of nutritional interventions based on genetic profiles are often limited in scope and number (Salminen et al., 2021). While there is growing interest in clinical studies aimed at validating genetic markers for nutrition, the process of conducting large-scale, longitudinal trials is time-consuming and costly. As a result, many biomarkers that have shown promise in preclinical research have not yet been tested in the context of personalized dietary interventions (Cuparencu et al., 2024). Without this clinical validation, it is impossible to confirm the reliability and utility of NGS-based dietary recommendations.

c. Ethical Considerations

As with any emerging technology, the use of NGS in personalized nutrition raises several ethical considerations that need to be carefully addressed to ensure fair and responsible use. One of the most fundamental ethical concerns is genetic privacy. Genetic data is inherently sensitive, and improper handling or unauthorized access can lead to privacy breaches and potential misuse (Seaver et al., 2022). In the context of personalized nutrition, genetic information could be used for purposes beyond healthcare, such as insurance discrimination or employment decisions, raising concerns about the potential for genetic profiling and stigmatization. To mitigate these concerns, robust data protection regulations, such as those outlined in the General Data Protection Regulation (GDPR) in the European Union or the Genetic Information Nondiscrimination Act (GINA) in the United States, are essential to ensure that genetic information remains confidential and is not misused. However, even with such safeguards in place, there are uncertainties about the consent process, particularly regarding the long-term use of genetic data. Individuals may not fully understand the implications of sharing their genetic information, and the ability to revoke consent may be limited once genetic data has been collected.

Another ethical challenge is the issue of equitable access to personalized nutrition services. As NGS-based personalized nutrition becomes more widely available, there is a risk that it could exacerbate existing health disparities. The costs associated with NGS technology and genetic testing, as well as the specialized healthcare expertise required to interpret and implement personalized dietary recommendations, may limit access to affluent individuals or those living in developed countries (Strianese et al., 2020). This creates the potential for a two-tier healthcare system, where only a select few benefit from personalized nutrition, while others remain excluded. Ensuring that personalized nutrition is accessible to all individuals, regardless of socioeconomic status, would require significant investment in public health infrastructure, subsidies for genetic testing, and efforts to reduce the cost of sequencing technology.

Furthermore, there are broader societal implications involving the use of genetic information in public health initiatives. For example, public health campaigns promoting personalized nutrition based on genetic testing may inadvertently promote genetic determinism, where individuals are led to believe that their genetic makeup is the sole determinant of their health, overshadowing the importance of environmental and lifestyle factors such as diet, exercise, and social determinants of health (Gong et al., 2024). This could have unintended consequences for how individuals perceive and manage their health, either leading to a reduction in personal responsibility or undermining efforts to address larger systemic health issues.

Future Directions

The future of personalized nutrition, driven by next-generation sequencing (NGS), is poised to become more sophisticated, diverse, and impactful. As the understanding of the complex interactions between genes, diet, environment, and health deepens, integrating NGS data with other omics technologies, such as proteomics and metabolomics, promises a viable path for enhancing personalized nutrition recommendations.

a. Integration of NGS with Other Omics Technologies

While NGS has enabled the deep analysis of genetic predispositions and biomarkers related to nutrition, it is only one piece of a larger, integrated biological system. Proteomics (the large-scale study of proteins) and metabolomics (the analysis of metabolites) are two other omics technologies that provide complementary insights into an individual's health status, nutritional needs, and disease risk. When combined with genetic data from NGS, these technologies can help build more comprehensive and accurate models for personalized nutrition.

Proteomics allows for the identification and quantification of proteins, which are the direct effectors of many biological processes. The patterns of protein expression in an individual's body can be influenced by genetic predispositions, as well as environmental factors such as diet, physical activity, and stress. By integrating proteomic data with NGS, researchers can identify proteins that mediate the effects of genetic variants related to nutrition and disease. For example, proteins involved in metabolic pathways, inflammation, or nutrient absorption could help refine dietary interventions for specific individuals based on both their genetic profile and the actual expression of these proteins ([Singh et al., 2023](#)).

Metabolomics, on the other hand, provides insights into the metabolites present in an individual's biological samples, such as blood, urine, or saliva. These metabolites reflect the body's response to both endogenous and exogenous factors, including dietary intake. When combined with NGS, metabolomics can provide real-time, functional information on how an individual's genes are regulating their metabolism in the context of diet. For example, certain genetic variants may predispose individuals to more efficient fat metabolism, while others may require specific dietary adjustments to optimize their metabolic pathways ([Qasim et al., 2018](#)). Metabolomics can highlight these differences by analyzing how metabolites such as lipids, amino acids, and carbohydrates change in response to different dietary patterns.

Together, genetics, proteomics, and metabolomics can provide a more holistic understanding of how an individual's body processes and responds to nutrients. This integrated approach – often referred to as "multi-omics" or "systems biology" – can uncover complex gene-environment interactions that influence health outcomes ([Noble et al., 2022](#)). By analyzing this data in concert, nutritionists and healthcare providers can develop highly personalized and dynamic nutrition plans that go beyond genetic information alone, providing insights into how dietary interventions affect an individual's health at a molecular level.

b. Large-Scale Longitudinal Studies

In order to move from the theoretical promise of personalized nutrition to its real-world implementation, large-scale longitudinal studies are necessary. While small-scale studies have successfully demonstrated the potential of NGS-based biomarkers in personalized nutrition, the field requires larger and more diverse cohorts to validate these findings and establish the long-term impact of personalized dietary interventions. Longitudinal studies are particularly important because they can track health outcomes over time, providing valuable evidence on the durability and effectiveness of personalized dietary plans ([Coman et al., 2024](#)).

Such studies would need to recruit diverse populations to account for genetic variability, lifestyle factors, and environmental influences that could affect an individual's nutritional needs. For example, different ethnic groups may respond to the same diet in varying ways due to genetic differences, such as those regulating nutrient metabolism. By including individuals from diverse backgrounds, researchers can ensure that the biomarkers identified are applicable to a wide range of populations, making personalized nutrition more inclusive and globally relevant. Additionally, large-scale studies that track long-term health outcomes such as disease incidence, weight management, metabolic health, and cardiovascular function are essential to assessing the impact of personalized nutrition on public health ([Coman et al., 2024](#)). These studies can help determine whether genetic-based dietary modifications lead to sustained improvements in health or whether the benefits diminish over time. They can also provide insights into the cost-effectiveness of

personalized nutrition, enabling policymakers and healthcare providers to evaluate whether the widespread implementation of these interventions is feasible.

c. Artificial Intelligence and Machine Learning in Personalized Nutrition

Incorporating artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) into personalized nutrition is another promising avenue for the future. AI and ML algorithms can analyze vast amounts of multi-omics data, including genomic, proteomic, metabolomic, and lifestyle data, to identify complex patterns and predict the effectiveness of various dietary interventions ([Mohr et al., 2024](#)).

The integration of Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning (ML) with personalized nutrition represents a transformative approach to health and wellness. Leveraging advanced computational techniques, AI and ML can analyze complex datasets to provide tailored dietary recommendations, optimize health outcomes, and address individual nutritional needs. This field is rapidly evolving, with significant potential to revolutionize our understanding and application of personalized nutrition.

AI and ML are adept at analyzing and interpreting large, multi-dimensional datasets, including genetic, proteomic, metabolomic, and lifestyle information. These tools can identify complex patterns and relationships that are often undetectable by human researchers. For example, AI algorithms can analyze genetic variants to predict how an individual will respond to different foods or dietary changes. This capability is particularly significant in nutrigenomics, which studies the interaction between nutrition and genetics to optimize health outcomes ([Topol, 2019](#)).

AI-driven systems can integrate genetic data with metabolomic profiles to identify biomarkers that influence nutrient metabolism. This approach enables the development of personalized dietary plans that align with an individual's unique biological makeup, potentially reducing the risk of chronic diseases such as obesity, diabetes, and cardiovascular disorders ([Zeevi et al., 2015](#)).

One of the most promising applications of AI in personalized nutrition is the use of predictive models to prescribe diets tailored to an individual's health status and goals. These models can integrate multiple data sources, including genetic predispositions, gut microbiome composition, and real-time health monitoring data from wearable devices. By analyzing these inputs, AI systems can predict the effectiveness of specific dietary interventions and recommend optimal nutritional strategies ([Ordovas et al., 2018](#)). For example, ML algorithms can be trained to predict glycemic responses to different foods, enabling the creation of personalized meal plans for individuals with diabetes. Such models have been demonstrated in studies like the Personalized Nutrition Project, where AI was used to predict postprandial glucose responses based on individual gut microbiota and lifestyle factors ([Berry et al., 2020](#)).

A key advantage of AI and ML in personalized nutrition is their ability to adapt and improve over time. As new data from clinical trials, research studies, and individual health monitoring becomes available, AI systems can update their algorithms to provide more accurate and relevant recommendations. This dynamic adaptability ensures that personalized dietary plans remain aligned with the latest scientific findings and individual health changes ([Price et al., 2017](#)).

For instance, AI-powered systems can incorporate real-time data from wearable devices, such as continuous glucose monitors or fitness trackers, to adjust dietary recommendations based on an individual's current physiological state. This continuous feedback loop enhances the accuracy and effectiveness of personalized dietary interventions ([Dunn et al., 2018](#)).

AI can also play a significant role in interpreting gene-environment interactions, which are crucial to understanding how diet affects health. By analyzing large datasets, AI can identify clinically meaningful biomarkers and understand the complex interplay between genetic factors and environmental influences, such as diet and lifestyle. This knowledge can inform the development of personalized dietary interventions that address specific health risks ([Corella, Ordovas, 2014](#)).

For example, AI has been used to identify genetic variants associated with nutrient deficiencies or intolerances, such as lactose intolerance or vitamin D metabolism disorders. These findings enable the design of personalized dietary plans that mitigate these risks and promote optimal health ([Ferguson et al., 2016](#)).

3. Conclusion

The integration of next-generation sequencing (NGS) with personalized nutrition represents a transformative approach to healthcare, offering the potential to tailor dietary interventions to

individual genetic, transcriptomic, and epigenomic profiles. By leveraging NGS technologies, researchers and healthcare providers can identify key biomarkers that influence dietary responses, metabolism, and disease risk, enabling precision nutrition strategies that improve health outcomes and reduce the burden of chronic diseases.

However, the widespread implementation of NGS-based personalized nutrition faces significant challenges, including data interpretation, clinical validation, and ethical considerations. Addressing these challenges will require continued advancements in bioinformatics, large-scale longitudinal studies, and robust ethical frameworks to ensure equitable access and responsible use of genetic information.

Looking ahead, the integration of NGS with other omics technologies, such as proteomics and metabolomics, promises to provide a more comprehensive understanding of the complex interactions between diet, genes, and health. Additionally, the application of artificial intelligence and machine learning offers exciting opportunities to enhance the precision and adaptability of personalized nutrition recommendations.

As the field of personalized nutrition continues to evolve, it holds the potential to revolutionize healthcare by moving beyond a one-size-fits-all approach to diet and embracing a more individualized, data-driven model of nutrition that empowers individuals to achieve optimal health and well-being.

References

- Shahzad et al., 2024 – Shahzad, T., Zahra, A.F., Naeem, A., Khan, S.H., Sohail, S. (2024). Putting it together: Diet, genetics, microbiome, and health. In *Nutrition Controversies and Advances in Autoimmune Disease*. IGI Global. Pp. 112-130.
- Kolodziejczyk et al., 2019 – Kolodziejczyk, A.A., Zheng, D., Elinav, E. (2019). Diet-microbiota interactions and personalized nutrition. *Nature Reviews Microbiology*. 17(12): 742-753.
- Wang et al., 2024 – Wang, Z., Wang, L., Hou, Y., Zhang, X., Wang, H., Zhang, S. et al. (2024). Precision calories: A promising strategy for personalized health interventions in the precision nutrition framework. *Trends in Food Science & Technology*. 104727.
- Singar et al., 2024 – Singar, S., Nagpal, R., Arjmandi, B.H., Akhavan, N.S. (2024). Personalized nutrition: Tailoring dietary recommendations through genetic insights. *Nutrients*. 16(16): 2673.
- Resende et al., 2021 – Resende, C.M.M., da Silva, H.A.M., Campello, C.P., Ferraz, L.A.A., de Lima, E.L.S., Beserra, M.A. et al. (2021). Polymorphisms on rs9939609 FTO and rs17782313 MC4R genes in children and adolescent obesity: A systematic review. *Nutrition*. 91: 111474.
- Gospodarczyk et al., 2022 – Gospodarczyk, A., Marczewski, K., Gospodarczyk, N., Widuch, M., Tkocz, M., Zalejska-Fiolka, J. (2022). Homocysteine and cardiovascular disease – A current review. *Wiadomości Lekarskie*. 75: 2862-2866.
- Abeltino et al., 2024 – Abeltino, A., Hatem, D., Serantoni, C., Riente, A., De Giulio, M. M., De Spirito, M. et al. (2024). Unraveling the gut microbiota: Implications for precision nutrition and personalized medicine. *Nutrients*. 16(22): 3806.
- MacLean et al., 2017 – MacLean, P.S., Blundell, J.E., Mennella, J.A., Batterham, R.L. (2017). Biological control of appetite: A daunting complexity. *Obesity*. 25: S8-S16.
- Abd Ali et al., 2021 – Abd Ali, A.H., Shkurat, T.P., Abbas, A.H. (2021). Association analysis of FTO gene polymorphisms rs9939609 and obesity risk among the adults: A systematic review and meta-analysis. *Meta Gene*. 27: 100832.
- Adamska-Patrano et al., 2021 – Adamska-Patrano, E., Bauer, W., Bielska, D., Fiedorczuk, J., Moroz, M., Krasowska, U. et al. (2021). An association between diet and MC4R genetic polymorphism, in relation to obesity and metabolic parameters – A cross sectional population-based study. *International Journal of Molecular Sciences*. 22(21): 12044.
- Abaj et al., 2021 – Abaj, F., Sotoudeh, G., Karimi, E., Rafiee, M., Koohdani, F. (2021). Interaction between the dietary indices and PPAR- γ Pro12Ala gene variants on cardiovascular risk factors in patients with type 2 diabetes mellitus. *International Journal of Clinical Practice*. 75(8): e14307.
- Wierzbicki et al., 2022 – Wierzbicki, A. S., Kim, E. J., Esan, O., Ramachandran, R. (2022). Hypertriglyceridaemia: An update. *Journal of Clinical Pathology*. 75(12): 798-806.

- Asl et al., 2024 – Asl, S.K., Rahimzadegan, M., Asl, A.K. (2024). Pharmacogenomics-based systematic review of coronary artery disease based on personalized medicine procedure. *Heliyon*.
- Di Renzo et al., 2019 – Di Renzo, L., Gualtieri, P., Romano, L., Marrone, G., Noce, A., Pujia, A., et al. (2019). Role of personalized nutrition in chronic-degenerative diseases. *Nutrients*. 11(8): 1707.
- Liu et al., 2024 – Liu, C., Zeng, H., Cui, W., Ouyang, J., Zhou, F., Wen, S. et al. (2024). Theaflavins mitigate diabetic symptoms in GK rats by modulating the INSR/PI3K-Akt/GSK-3 pathway and intestinal microbiota. *International Journal of Biological Macromolecules*. 277: 134331.
- Odriozola et al., 2024 – Odriozola, A., González, A., Álvarez-Herms, J., Corbi, F. (2024). Host genetics and nutrition. *Advances in Genetics*. 111: 199-235.
- Saghafi-Asl et al., 2021 – Saghafi-Asl, M., Mirmajidi, S., Asghari Jafarabadi, M., Vahid, F., Shivappa, N., Hébert, J. R. et al. (2021). The association of dietary patterns with dietary inflammatory index, systemic inflammation, and insulin resistance, in apparently healthy individuals with obesity. *Scientific Reports*. 11(1): 7515.
- Jones et al., 2023 – Jones, C.L., Shafer, A.B., Frost, P.C. (2023). Characterizing nutritional phenotypes using experimental nutrigenomics: Is there nutrient-specificity to different types of dietary stress? *Molecular Ecology*. 32(5): 1073-1086.
- Iriani et al., 2024 – Iriani, A., Rachman, A., Fatina, M. K., Gemilang, R. K., Trisnandi, A. (2024). Gene expression profiling of vitamin D metabolism enzymes in leukemia and lymphoma patients: Molecular aspect interplay of VDR, CYP2R1, and CYP24A1. *Molecular Biology Reports*. 51(1): 1-9.
- Aoun et al., 2024 – Aoun, A., Ghousseub, C., Sariheddine, M., Aoun, M., El Helou, K. (2024). Effectiveness of nutritional supplements (vitamins, minerals, omega-3, and probiotics) in preventing and treating COVID-19 and viral respiratory infections. *Human Nutrition & Metabolism*. 200287.
- Porcuna et al., 2021 – Porcuna, J., Mínguez-Martínez, J., Ricote, M. (2021). The PPARα and PPARγ epigenetic landscape in cancer and immune and metabolic disorders. *International Journal of Molecular Sciences*. 22(19): 10573.
- Rai, 2024 – Rai, V. (2024). High-fat diet, epigenetics, and atherosclerosis: A narrative review. *Nutrients*. 17(1): 127.
- Engin, 2024 – Engin, A. (2024). Misalignment of circadian rhythms in diet-induced obesity. *Obesity and Lipotoxicity*. Pp. 27-71.
- Chen et al., 2024 – Chen, P., Wang, Y., Chen, F., Zhou, B. (2024). Epigenetics in obesity: Mechanisms and advances in therapies based on natural products. *Pharmacology Research & Perspectives*. 12(1): e1171.
- Kang, Kim, 2023 – Kang, H., Kim, B. (2023). Bioactive compounds as inhibitors of inflammation, oxidative stress and metabolic dysfunctions via regulation of cellular redox balance and histone acetylation state. *Foods*. 12(5): 925.
- Zhang et al., 2023 – Zhang, Z., Moon, R., Thorne, J.L., Moore, J.B. (2023). NAFLD and vitamin D: Evidence for intersection of microRNA-regulated pathways. *Nutrition Research Reviews*. 36(1): 120-139.
- Kura et al., 2019 – Kura, B., Parikh, M., Slezak, J., Pierce, G.N. (2019). The influence of diet on microRNAs that impact cardiovascular disease. *Molecules*. 24(8): 1509.
- Magro et al., 2024 – Magro, D., Venezia, M., Balistreri, C.R. (2024). The omics technologies and liquid biopsies: Advantages, limitations, applications. *Medical Omics*. 100039.
- Górczyńska-Kosiorz et al., 2024 – Górczyńska-Kosiorz, S., Kosiorz, M., Dzięgielewska-Gęsiak, S. (2024). Exploring the interplay of genetics and nutrition in the rising epidemic of obesity and metabolic diseases. *Nutrients*. 16(20): 3562.
- Xue et al., 2024 – Xue, L., Chen, X., Sun, J., Fan, M., Qian, H., Li, Y., et al. (2024). Maternal dietary carbohydrate and pregnancy outcomes: Quality over quantity. *Nutrients*. 16(14): 2269.
- Gkouskou et al., 2024 – Gkouskou, K.K., Grammatikopoulou, M.G., Lazou, E., Vasilogiannakopoulou, T., Sanoudou, D., Eliopoulos, A.G. (2024). A genomics perspective of personalized prevention and management of obesity. *Human Genomics*. 18(1): 4.

- Vallianou et al., 2023 – Vallianou, N.G., Kounatidis, D., Tsilingiris, D., Panagopoulos, F., Christodoulatos, G.S., Evangelopoulos, A. et al. (2023). The role of next-generation probiotics in obesity and obesity-associated disorders: Current knowledge and future perspectives. *International Journal of Molecular Sciences*. 24(7): 6755.
- Ranganathan, Anteyi, 2022 – Ranganathan, N., Anteyi, E. (2022). The role of dietary fiber and gut microbiome modulation in progression of chronic kidney disease. *Toxins*. 14(3): 183.
- Van Hul, Cani, 2023 – Van Hul, M., Cani, P.D. (2023). The gut microbiota in obesity and weight management: Microbes as friends or foe? *Nature Reviews Endocrinology*. 19(5): 258-271.
- Mehta et al., 2024 – Mehta, N.H., Huey, S.L., Kuriyan, R., Rosas, J.P.P., Finkelstein, J.L., Kashyap, S. et al. (2024). Potential mechanisms of precision nutrition-based interventions for managing obesity. *Advances in Nutrition*. 100186.
- Fischer, 2024 – Fischer, F. (2024). The interplay of nutrition, genetics, and lifestyle in the prevention and management of chronic diseases: Insights from modern research. *Public Health Spectrum*. 1(1).
- Strianese et al., 2020 – Strianese, O., Rizzo, F., Ciccarelli, M., Galasso, G., D'Agostino, Y., Salvati, A. et al. (2020). Precision and personalized medicine: How genomic approach improves the management of cardiovascular and neurodegenerative disease. *Genes*. 11(7): 747.
- Alves et al., 2024 – Alves, M., Laranjeira, F., Correia-da-Silva, G. (2024). Understanding hypertriglyceridemia: Integrating genetic insights. *Genes*. 15(2): 190.
- Su et al., 2018 – Su, X., Kong, Y., Peng, D.Q. (2018). New insights into apolipoprotein A5 in controlling lipoprotein metabolism in obesity and the metabolic syndrome patients. *Lipids in Health and Disease*. 17: 1-10.
- Dijk et al., 2022 – Dijk, W., Di Filippo, M., Kooijman, S., Van Eenige, R., Rimbart, A., Caillaud, A. et al. (2022). Identification of a gain-of-function LIPC variant as a novel cause of familial combined hypocholesterolemia. *Circulation*. 146(10): 724-739.
- Figueiredo et al., 2024 – Figueiredo, I., Farinha, C., Barreto, P., Coimbra, R., Pereira, P., Marques, J.P. et al. (2024). Nutritional genomics: Implications for age-related macular degeneration. *Nutrients*. 16(23): 4124.
- Omachi et al., 2024 – Omachi, D.O., Aryee, A.N., Onuh, J.O. (2024). Functional lipids and cardiovascular disease reduction: A concise review. *Nutrients*. 16(15): 2453.
- Papadopolou et al., 2023 – Papadopolou, E., Bouzarelou, D., Tsaousis, G., Papathanasiou, A., Vogiatzi, G., Vlachopoulos, C. et al. (2023). Application of next generation sequencing in cardiology: Current and future precision medicine implications. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*. 10: 1202381.
- Wazir et al., 2023 – Wazir, M., Olanrewaju, O. A., Yahya, M., Kumari, J., Kumar, N., Singh, J., et al. (2023). Lipid disorders and cardiovascular risk: A comprehensive analysis of current perspectives. *Cureus*. 15(12).
- He, Li, 2023 – He, Q., Li, J. (2023). The evolution of folate supplementation—from one size for all to personalized, precision, poly-paths. *Journal of Translational Internal Medicine*. 11(2): 128-137.
- Lima et al., 2022 – Lima, J.E., Moreira, N.C., Sakamoto-Hojo, E.T. (2022). Mechanisms underlying the pathophysiology of type 2 diabetes: From risk factors to oxidative stress, metabolic dysfunction, and hyperglycemia. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*. 874: 503437.
- Verma et al., 2022 – Verma, M., Loh, N.Y., Sabaratnam, R., Vasan, S. K., van Dam, A.D., Todorčević, M. et al. (2022). TCF7L2 plays a complex role in human adipose progenitor biology, which might contribute to genetic susceptibility to type 2 diabetes. *Metabolism*. 133: 155240.
- Yahaya, Salisu, 2020 – Yahaya, T.O., Salisu, T.F. (2020). A review of type 2 diabetes mellitus predisposing genes. *Current Diabetes Reviews*. 16(1): 52-61.
- Contreras-Bolívar et al., 2021 – Contreras-Bolívar, V., García-Fontana, B., García-Fontana, C., Muñoz-Torres, M. (2021). Mechanisms involved in the relationship between vitamin D and insulin resistance: Impact on clinical practice. *Nutrients*. 13(10): 3491.
- Iso, 2021 – Iso, H. (2021). Cardiovascular disease, a major global burden: Epidemiology of stroke and ischemic heart disease in Japan. *Global Health & Medicine*. 3(6): 358-364.

[Matusheski et al., 2021](#) – Matusheski, N.V., Caffrey, A., Christensen, L., Mezgec, S., Surendran, S., Hjorth, M.F. et al. (2021). Diets, nutrients, genes and the microbiome: Recent advances in personalised nutrition. *British Journal of Nutrition*. 126(10): 1489-1497.

[Guardiola, Ribalta, 2017](#) – Guardiola, M., Ribalta, J. (2017). Update on APOA5 genetics: Toward a better understanding of its physiological impact. *Current Atherosclerosis Reports*. 19: 1-9.

[Dijk et al., 2022](#) – Dijk, W., Di Filippo, M., Kooijman, S., Van Eenige, R., Rimbert, A., Caillaud, A. et al. (2022). Identification of a gain-of-function LIPC variant as a novel cause of familial combined hypocholesterolemia. *Circulation*. 146(10): 724-739.

[Kardassis et al., 2022](#) – Kardassis, D., Thymiakou, E., Chroni, A. (2022). Genetics and regulation of HDL metabolism. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Molecular and Cell Biology of Lipids*. 1867(1): 159060.

[Jiang et al., 2022](#) – Jiang, X., Yang, Z., Wang, S., Deng, S. (2022). “Big Data” approaches for prevention of the metabolic syndrome. *Frontiers in Genetics*. 13: 810152.

[McNulty et al., 2020](#) – McNulty, H., Strain, J. J., Hughes, C. F., Pentieva, K., Ward, M. (2020). Evidence of a role for one-carbon metabolism in blood pressure: Can B vitamin intervention address the genetic risk of hypertension owing to a common folate polymorphism? *Current Developments in Nutrition*. 4(1): nzz102.

[Satam et al., 2023](#) – Satam, H., Joshi, K., Mangrolia, U., Waghoo, S., Zaidi, G., Rawool, S. et al. (2023). Next-generation sequencing technology: Current trends and advancements. *Biology*. 12(7): 997.

[Spielmann, Kircher, 2022](#) – Spielmann, M., Kircher, M. (2022). Computational and experimental methods for classifying variants of unknown clinical significance. *Molecular Case Studies*. 8(3): a006196.

[Hequet, 2024](#) – Hequet, C. (2024). Biologically-informed interpretable deep learning techniques for BMI prediction and gene interaction detection [Doctoral dissertation]. The University of St Andrews.

[Kraus, 2018](#) – Kraus, V.B. (2018). Biomarkers as drug development tools: Discovery, validation, qualification and use. *Nature Reviews Rheumatology*. 14(6): 354-362.

[Paver, Morey, 2024](#) – Paver, E.C., Morey, A.L. (2024). Biomarkers and biomarker validation: A pathologist's guide to getting it right. *Pathology*. 56(2): 147-157.

[Gkouskou et al., 2024](#) – Gkouskou, K.K., Grammatikopoulou, M.G., Lazou, E., Vasilogiannakopoulou, T., Sanoudou, D., Eliopoulos, A.G. (2024). A genomics perspective of personalized prevention and management of obesity. *Human Genomics*. 18(1): 4.

[Salminen et al., 2021](#) – Salminen, S., Collado, M.C., Endo, A., Hill, C., Lebeer, S., Quigley, E.M. et al. (2021). The International Scientific Association of Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of postbiotics. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*. 18(9): 649-667.

[Cuparencu et al., 2024](#) – Cuparencu, C., Bulmuş-Tüccar, T., Stanstrup, J., La Barbera, G., Roager, H.M., Dragsted, L.O. (2024). Towards nutrition with precision: Unlocking biomarkers as dietary assessment tools. *Nature Metabolism*. 6(8): 1438-1453.

[Seaver et al., 2022](#) – Seaver, L.H., Khushf, G., King, N.M., Matalon, D.R., Sanghavi, K., Vatta, M. et al. (2022). Points to consider to avoid unfair discrimination and the misuse of genetic information: A statement of the American College of Medical Genetics and Genomics (ACMG). *Genetics in Medicine*. 24(3): 512-520.

[Strianese et al., 2020](#) – Strianese, O., Rizzo, F., Ciccarelli, M., Galasso, G., D'Agostino, Y., Salvati, A. et al. (2020). Precision and personalized medicine: How genomic approach improves the management of cardiovascular and neurodegenerative disease. *Genes*. 11(7): 747.

[Gong et al., 2024](#) – Gong, S., Ma, S., Li, Q., Zhao, X. (2024). Relationship between e-health service use and psychological distress: The mediating role of health lifestyle behaviors and the moderating role of belief in genetic determinism.

[Singh et al., 2023](#) – Singh, S., Sarma, D.K., Verma, V., Nagpal, R., Kumar, M. (2023). Unveiling the future of metabolic medicine: Omics technologies driving personalized solutions for precision treatment of metabolic disorders. *Biochemical and Biophysical Research Communications*.

[Qasim et al., 2018](#) – Qasim, A., Turcotte, M., de Souza, R. J., Samaan, M. C., Champredon, D., Dushoff, J., et al. (2018). On the origin of obesity: Identifying the biological, environmental and cultural drivers of genetic risk among human populations. *Obesity Reviews*. 19(2): 121-149.

[Noble et al., 2022](#) – Noble, A.J., Purcell, R.V., Adams, A.T., Lam, Y.K., Ring, P.M., Anderson, J.R., et al. (2022). A final frontier in environment-genome interactions? Integrated, multi-omic approaches to predictions of non-communicable disease risk. *Frontiers in Genetics*. 13: 831866.

[Coman et al., 2024](#) – Coman, L.I., Ianculescu, M., Paraschiv, E.A., Alexandru, A., Bădărașu, I.A. (2024). Smart solutions for diet-related disease management: Connected care, remote health monitoring systems, and integrated insights for advanced evaluation. *Applied Sciences*. 14(6): 2351.

[Mohr et al., 2024](#) – Mohr, A.E., Ortega-Santos, C.P., Whisner, C.M., Klein-Seetharaman, J., Jasbi, P. (2024). Navigating challenges and opportunities in multi-omics integration for personalized healthcare. *Biomedicine*. 12(7): 1496.

[Topol, 2019](#) – Topol, E.J. (2019). High-performance medicine: The convergence of human and artificial intelligence. *Nature Medicine*. 25(1): 44-56.

[Zeevi et al., 2015](#) – Zeevi, D., Korem, T., Zmora, N. et al. (2015). Personalized nutrition by prediction of glycemic responses. *Cell*. 163(5): 1079-1094.

[Ordovas et al., 2018](#) – Ordovas, J.M., Ferguson, L.R., Tai, E.S., Mathers, J.C. (2018). Personalised nutrition and health. *BMJ*. 361: k2173.

[Berry et al., 2020](#) – Berry, S.E., Valdes, A.M., Drew, D.A., et al. (2020). Human postprandial responses to food and potential for precision nutrition. *Nature Medicine*. 26(6): 964-973.

[Price et al., 2017](#) – Price, N. D., Magis, A. T., Earls, J. C. et al. (2017). A wellness study of 108 individuals using personal, dense, dynamic data clouds. *Nature Biotechnology*. 35(8): 747-756.

[Dunn et al., 2018](#) – Dunn, J., Runge, R., Snyder, M. (2018). Wearables and the medical revolution. *Personalized Medicine*. 15(5): 429-448.

[Corella, Ordovas, 2014](#) – Corella, D., Ordovas, J.M. (2014). Nutrigenomics in cardiovascular medicine. *Circulation: Cardiovascular Genetics*. 7(3): 409-423.

[Ferguson et al., 2016](#) – Ferguson, L.R., De Caterina, R., Görman, U. et al. (2016). Guide and position of the International Society of Nutrigenetics/Nutrigenomics on personalised nutrition: Part 1 – Fields of precision nutrition. *Journal of Nutrigenetics and Nutrigenomics*. 9(1): 12-27.

Copyright © 2025 by Cherkas Global University



Published in the USA
 Russian Journal of Biological Research
 Issued from 2014
 E-ISSN: 2413-7413
 2025. 12(1): 17-21

DOI: 10.13187/ejbr.2025.1.17
<https://rjbr.cherkasgu.press>



Impact of Cassava Mill Wastewater on Soil Nutrient Dynamics and Microbial Communities

Iliyasu A. A Ibrahim ^{a,*}, Hafizah S. Sulaiman ^b, Aliyu Bello ^a

^a Department of Human Nutrition and Dietetics, Federal University of Health Sciences Azare, Bauchi State, Nigeria

^b Department of Internal Medicine, Abubakar Tafawa Balewa Teaching Hospital, Bauchi, Nigeria

Abstract

Cassava mill wastewater poses significant environmental risks due to its potential impact on soil nutrient dynamics and microbial communities. This study investigates the effects of cassava mill wastewater on soil nutrient levels, microbial populations, and potential toxicity and the impact of pollution on soil physicochemical and microbiological characteristics. Contaminated soil exhibited elevated levels of nitrogen, phosphorus, potassium, iron, manganese, copper, lead, and mercury, along with a lower pH (5) and higher organic matter content (2.75 %) compared to uncontaminated soil (pH 7, organic matter 1.36 %). Microbial diversity and abundance were reduced in contaminated soil, with a shift in community composition towards more tolerant species. Bacterial counts were highest in polluted soil ($7.8 \pm 0.19 \times 10^5$ cfu/g), while fungal counts were generally lower, with the highest counts in control soil ($4.2 \pm 0.57 \times 10^5$ cfu/g). Overall, pollution significantly altered both the chemical and biological properties of the soil. These changes can have far-reaching implications for microbial activity, plant growth, and ecosystem health.

Keywords: cassava mill wastewater, soil nutrient dynamics, microbial communities, heavy metal pollution, environmental impact.

1. Introduction

The cassava industry plays a vital role in the economies of many tropical countries, providing a source of income and employment for millions of people (Chibueze Izah et al., 2018). However, the processing of cassava tubers generates substantial volumes of wastewater, which poses significant environmental risks if not properly managed (Chibueze Izah et al., 2018; Abah et al., 2024). Cassava mill wastewater contains high levels of nutrients, including potassium, iron, manganese, and copper, as well as heavy metals like lead and mercury (Hussein, Akinwande, 2025; EZEOGO et al., 2021). The improper disposal of this wastewater can lead to soil pollution, altered nutrient dynamics, and disruptions to microbial communities, ultimately affecting ecosystem health and fertility (Obianuju et al., 2023; Chapter, State, 2024).

The impact of cassava mill wastewater on soil nutrient dynamics and microbial communities is a pressing concern (Ogunyemi et al., 2017; Adu et al., 2018). The introduction of excess nutrients and heavy metals into the soil can have far-reaching consequences, including changes to soil pH, reduced microbial diversity, and altered community composition (Immanuel et al., 2024; Haghighizadeh et al., 2024). These changes can affect the overall health and fertility of the soil,

* Corresponding author

E-mail addresses: iliyasuibrahim@gmail.com (I.A.A Ibrahim)

leading to decreased crop yields, increased environmental pollution, and potential risks to human health (Afuye, Mogaji, 2015; Chávez-mejía et al., 2019; Adewumi et al., 2016; Kolawole, 2014; Emmanuel et al., 2025). This study investigated the impact of cassava mill wastewater on soil nutrient dynamics and microbial communities, with a focus on understanding the potential environmental risks and identifying sustainable management practices to mitigate these effects.

2. Methods

The study sample was obtained from two distinct locations in Bauchi and Katagum Local Government Areas, located in the North-Eastern region of Northern Nigeria. The research was carried out at the Department of Human Nutrition and Dietetics, Federal University of Health Sciences, Azare, Bauchi State.

Sample Collection

Soil samples were collected from areas contaminated with cassava mill wastewater and uncontaminated areas. Physicochemical properties of the wastewater and soil, including pH, nutrient levels, and heavy metal content, were analyzed.

Microbiological analysis was also conducted to assess microbial diversity, abundance, and community composition. Standard methods were used for pH measurement, nutrient analysis, heavy metal analysis, and microbiological analysis.

Statistical Analysis

The analysis of relationships was conducted using simple ratios and percentages. Statistically significant differences between independent groups were evaluated using ANOVA.

3. Results

The analysis of soil samples revealed significant impacts of cassava mill wastewater on soil physicochemical properties and microbiological characteristics.

Physicochemical Properties

1. Nutrient Dynamics: Cassava mill wastewater significantly altered soil nutrient levels, resulting in increased concentrations of: Potassium, Iron, Manganese and Copper compared to uncontaminated soil.

2. Heavy Metal Content: Contaminated soil exhibited higher concentrations of heavy metals, including: Lead and Mercury compared to uncontaminated soil.

3. pH Levels: The pH levels were lower in contaminated soil compared to uncontaminated soil, indicating increased acidity.

Table 1. Physicochemical Properties of Contaminated and Uncontaminated Soil

Nutrient/Parameter	Contaminated soil	Uncontaminated soil
Nitrogen (N)	12.55 mg/kg	2.52 mg/kg
Phosphorus (P)	25.05 mg/kg	12.52 mg/kg
Potassium (K)	125.15 mg/kg	50.03 mg/kg
Iron (Fe)	75.50 mg/kg	25.25 mg/kg
Manganese (Mn)	25.18 mg/kg	12.52 mg/kg
Copper (Cu)	13.45 mg/kg	5.03 mg/kg
Lead (Pb)	25.06 mg/kg	< 1.0 mg/kg
Mercury (Hg)	2.50 mg/kg	< 0.1 mg/kg
pH	5	7
Organic Matter	2.75 %	1.36 %

Microbiological Characteristics

1. Microbial Diversity: Contaminated soil showed reduced microbial diversity, with a Shannon Index range of 1.5-2.5 compared to 3.0-4.0 in uncontaminated soil.

2. Microbial Abundance: The abundance of microorganisms was lower in contaminated soil (10^6 - 10^7 CFU/g) compared to uncontaminated soil (10^8 - 10^9 CFU/g).

3. Community Composition: The community composition of microorganisms in contaminated soil was altered, with a shift towards more tolerant species.

Table 2: Bacterial and fungal counts at the impacted soil, un-impacted soil and cassava effluent (A Impacted soil, B - Un-impacted soil and C - Cassava effluent)

Soil Type	Bacteria (cfu/g)	Fungi (cfu/g)
Control	$7.0 \pm 0.11 \times 10^5$	$4.2 \pm 0.57 \times 10^5$
Effluent	$5.1 \pm 0.28 \times 10^5$	$4.4 \pm 0.41 \times 10^5$
Polluted	$7.8 \pm 0.19 \times 10^5$	$3.9 \pm 0.42 \times 10^5$

The bar chart illustrates the heterotrophic bacterial and fungal counts in three different soil conditions: control, effluent, and polluted.

Bacterial Counts: The polluted soil exhibited the highest bacterial counts, reaching 7.8×10^5 cfu/g. This suggests that the pollution may have created an environment that favors bacterial growth, possibly due to the availability of certain nutrients or altered soil conditions. The control soil had a slightly lower bacterial count (7.0×10^5 cfu/g), while the effluent-affected soil showed the lowest bacterial count (5.1×10^5 cfu/g).

Fungal Counts: Fungal counts were generally lower than bacterial counts across all soil samples. The control soil had the highest fungal count (4.2×10^5 cfu/g), followed by the effluent-affected soil (4.4×10^5 cfu/g), and the polluted soil had the lowest (3.9×10^5 cfu/g).

Overall Trends: Bacterial counts were higher than fungal counts in all three soil types. This indicates that bacteria are the dominant microbial group in these soil samples. The polluted soil had the highest bacterial count, suggesting a potential impact of pollution on the bacterial community.

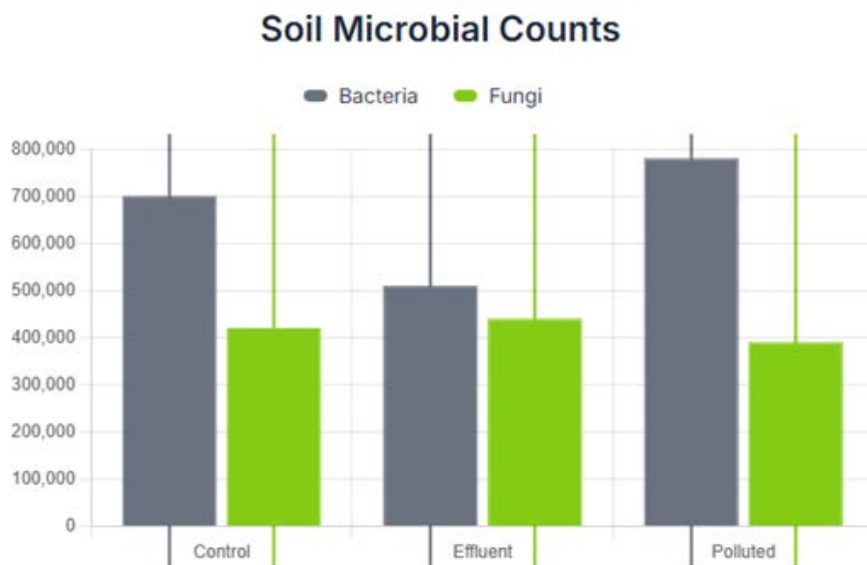


Fig. 1. Microbial counts in different soil samples:

These changes in soil physicochemical properties and microbiological characteristics have significant implications for ecosystem health and plant growth.

Key Findings

1. Increased nutrient levels: Cassava mill wastewater increased levels of potassium, iron, manganese, and copper in contaminated soil.

2. Heavy metal pollution: Contaminated soil had higher concentrations of lead and mercury, posing risks to ecosystem health.

3. Soil acidification: Contaminated soil had lower pH levels, indicating increased acidity.

4. Reduced microbial diversity: Contaminated soil had lower microbial diversity and abundance compared to uncontaminated soil.

5. Altered microbial community composition: Contaminated soil had a shift in microbial community composition towards more tolerant species.

These key findings highlight the potential environmental risks associated with cassava mill wastewater and the need for sustainable management practices to mitigate these impacts.

4. Discussion

The analysis of soil samples contaminated with cassava mill wastewater showed significant changes in soil nutrient dynamics and microbiological properties, consistent with previous studies (Abah et al., 2025). The increased levels of essential nutrients like potassium, iron, manganese, and copper in contaminated soil may impact microbial activity and plant growth, as reported by Afuye and Mogaji (2015) and Adewumi et al. (2016). However, the concurrent rise in heavy metal concentrations, including lead and mercury, poses substantial risks to ecosystem health, similar to findings by Emmanuel et al. (2025). The reduced pH levels in contaminated soil may affect microbial communities and nutrient availability, as observed by Chapter and State (2024). Furthermore, the decreased microbial diversity and abundance in contaminated soil suggest that cassava mill wastewater can disrupt soil ecosystem balance.

5. Conclusion

The findings of this study indicate that cassava mill wastewater poses significant environmental risks due to its potential impact on soil nutrient dynamics, microbial communities, and ecosystem health. The increased levels of heavy metals and altered pH levels in contaminated soil can have far-reaching implications for plant growth, microbial activity, and ecosystem balance.

6. Recommendations

To mitigate the environmental impacts of cassava mill wastewater, the following strategies are recommended:

1. Implement effective wastewater treatment systems: Reduce the environmental impact of cassava mill effluents by implementing treatment systems that can remove pollutants and excess nutrients.

2. Monitor soil nutrient levels and heavy metal content: Regularly monitor soil nutrient levels and heavy metal content to identify potential issues and take corrective action.

3. Adopt sustainable agricultural practices: Implement sustainable agricultural practices, such as crop rotation and organic amendments, to maintain soil health and reduce environmental risks.

4. Develop and implement policies and regulations: Develop and implement policies and regulations to ensure sustainable cassava processing practices and minimize the environmental impacts of cassava mill wastewater.

Future Research Directions

1. Investigate the long-term effects of cassava mill wastewater on soil nutrient dynamics and microbial communities.

2. Develop and evaluate effective wastewater treatment systems for cassava processing industries.

3. Assess the impact of cassava mill wastewater on plant growth and ecosystem health.

4. Develop sustainable agricultural practices to mitigate the environmental impacts of cassava mill wastewater.

References

Abah et al., 2024 – Abah, E.O., Ovie, O.E., Ijimbili, B.S., Eze, S.C. (2024). Environmental Impact of Cassava Processing Waste on Soil Quality in Benue South, Nigeria. *European Journal of Ecology, Biology and Agriculture*. 1(5): 16-18. DOI: [https://doi.org/10.59324/ejeba.2024.1\(5\).02](https://doi.org/10.59324/ejeba.2024.1(5).02)

Adewumi et al., 2016 – Adewumi, J.R., Babatola, J.O., Olayanju, O.K. (2016). The Impact of Cassava Wastewater from Starch Processing Industry on Surrounding Soil: A Case Study of Matna Foods Industry, Ogbese. *FUOYE Journal of Engineering and Technology*. 1(1): 31-36. DOI: <https://doi.org/10.46792/fuoyejet.v1i1.12>

- Adu et al., 2018 – Adu, A.A., John, B.I., Ojekale, A.B., Aderinola, O.J. (2018). Assessment of Heavy Metals in Manihot Esculenta (Cassava) in Selected Farms in Lagos State, Nigeria. *Journal of Research and Review in Science*. 5(1): 66-71. DOI: [https://doi.org/10.36108/jrrslasu/8102/50\(0180\)](https://doi.org/10.36108/jrrslasu/8102/50(0180))
- Afuye, Mogaji, 2015 – Afuye, G.G., Mogaji, K.O. (2015). Effect of cassava effluents on domestic consumption of 'shallow well' water in Owo Local Government Area, Ondo State, Nigeria. *Physical Sciences Research International*. 3(3): 37-43.
- Chapter, State, 2024 – Chapter, K., State, E. (2024). Effects of Cassava Processing Effluents on the Soil Microbial Population Dynamics in Selected Communities in Abakaliki, Ebonyi State, Nigeria. *ChemSearch Journal*. 15(1): 27-38.
- Chávez-Mejía et al., 2019 – Chávez-Mejía, A.C., Magaña-López, R., Durán-Álvarez, J.C., Jiménez-Cisneros, B.E. (2019). *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology (IJEAB)*. November, 111–118. DOI: <https://doi.org/10.22161/ijeab>
- Chibueze Izah et al., 2018 – Chibueze Izah, S., Bassey, S.E., Ohimain, E.I. (2018). Impacts of Cassava Mill Effluents in Nigeria. *Journal of Plant and Animal Ecology*. 1(1): 14-42. DOI: <https://doi.org/10.14302/issn.2637-6075.jpae-17-1890>
- Emmanuel et al., 2025 – Emmanuel, C., Nwankwo, I., Sunday, E., Francis, O., Umeoguaju, U., Ejeromedoghene, O., Adedipe, D. T., Prince, T., Ezeorba, C. (2025). Addressing emerging contaminants in agriculture affecting plant – soil interaction : a review on bio-based and nano-enhanced strategies for soil health and global food security (GFS). *Discover Toxicology*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44339-025-00018-w>
- Ezeogo et al., 2021 – Ezeogo, J.I., Nwakoby, N.E., Orji, M.U., Ejimofor, C.F. (2021). Effects of Cassava Mill Effluent on the Physicochemical Growth of Maize Plants. *Asian Journal of Plant and Soil Sciences*. 6(1): 111-122. DOI: <https://doi.org/10.56557/ajopss/2021/v6i139>
- Haghighizadeh et al., 2024 – Haghighizadeh, A., Rajabi, O., Nezarat, A., Hajyani, Z., Haghmohammadi, M., Hedayatikhah, S., Asl, S.D., Aghababai Beni, A. (2024). Comprehensive analysis of heavy metal soil contamination in mining Environments: Impacts, monitoring Techniques, and remediation strategies. *Arabian Journal of Chemistry*. 17(6): 105777. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2024.105777>
- Hussein, Akinwande, 2025 – Hussein, S.A.O.J.B., Akinwande, M.O.O.B.A. (2025). Assessment of the physicochemical characteristics of by-products of cassava processing and their effects on biodiversity. *Environmental Monitoring and Assessment*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-025-13951-5>
- Immanuel et al., 2024 – Immanuel, S., Jaganathan, D., Prakash, P., Sivakumar, P.S. (2024). Cassava for Food Security, Poverty Reduction and Climate Resilience: A Review. *Indian Journal of Ecology*, January. DOI: <https://doi.org/10.55362/ije/2024/4191>
- Kolawole, 2014 – Kolawole, P. (2014). Cassava Processing and the Environmental Effect. January, a004. DOI: <https://doi.org/10.3390/wsf-4-a004>
- Obianuju et al., 2023 – Obianuju, N., Nnedinma, A., Erochukwu, O., Uzoma, O., Chidimma, O., Ozioma, N.A. (2023). Physicochemical Composition of Cassava Mill Effluents in Five Processing Plants in Anambra State, Nigeria. *World Wide Journal of Multidiscipl Inary Research and Development WWJMRD*. 9(05): 31-34.
- Ogunyemi et al., 2017 – Ogunyemi, A.K., Samuel, T., Amund, O.O., Ilori, M.O. (2017). Toxicity evaluation of waste effluent from cassava-processing factory in Lagos state, Nigeria using the Allium cepa assay. *Ife Journal of Science*. 19(2): 369. DOI: <https://doi.org/10.4314/ijs.v19i2.17>

Copyright © 2025 by Cherkas Global University



Published in the USA
 Russian Journal of Biological Research
 Issued from 2014
 E-ISSN: 2413-7413
 2025. 12(1): 22-33

DOI: 10.13187/ejbr.2025.1.22
<https://rjbr.cherkasgu.press>



Peter Frantsevich Lesgaft (1837–1909): Some Biographical Aspects of the Scientific and Pedagogical Activity of the Russian Physiologist and Teacher

Anvar M. Mamadaliev^{a, *}

^a East European Historical Society, Russian Federation

Abstract

The manuscript is devoted to a brief description of the scientific achievements of Peter Frantsevich Lesgaft (1837–1909) in the field of medicine and physical education. The material was historical sources and biographical studies of the personality, as well as some of his works. The methodological complex of the research consists of methods of historiographical analysis, the historical-system method, methods of classification and synthesis.

Peter Frantsevich Lesgaft became an iconic figure in the scientific approach to physical education and sports. Remaining true to his principles throughout his life, including political ones, he left a wide scientific legacy that has been relevant for almost a century and a half; some of his works are still being republished.

He was one of the first to study the work of human joints and justified the need for physical exercise for their successful functioning. He was actively engaged in teaching himself, including creating high-quality medical educational institutions, and made a significant contribution to pedagogical science, primarily to the theory of family and physical education.

Keywords: Peter Frantsevich Lesgaft (1837–1909), biology, physiology, human anatomy, functional anatomy, physical education, family pedagogy, family education.

1. Введение

Петр Францевич Лесгафт в истории педагогической медицины является знаковой фигурой, который прославился, прежде всего, тем, что открыл научную систему физического воспитания, а также теоретическую функциональную анатомию в палеонтологии. Круг научных интересов Лесгафта весьма широк: его заслуги в биологии, медицине и педагогике являются общепризнанными.

В данной биографической работе на основе анализа его трудов мы попробуем осветить основные научные медико-биологические идеи Лесгафта, а также некоторые вехи его личной и научной жизни.

2. Материалы и методы

Материалами для данного исследования стали исторические источники, избранные труды (см., в частности, [Лесгафт, 1911](#); [Лесгафт, 1905](#); [Лесгафт, 1892](#) и мн. др.) и биографические исследования о личности Петра Францевича Лесгафта.

* Corresponding author

E-mail addresses: anvarm@mail.ru (A. Mamadaliev)

В качестве методической основы применялись такие методы как:

- Историографический метод: применялся для исследования работ о личности Лесгафта и его научных достижениях, а также некоторых наиболее известных трудов его авторства.
- Историко-системный метод: подразумевает изучение личности и научных достижений Лесгафта в объективном историческом контексте;
- Метод классификации: применен для группирования по разделам трудов, касающихся личности Петра Францевича и его научных работ.
- Метод синтеза: применен для формирования результатов и выводов.

3. Обсуждение

Учитывая масштаб и разносторонность личности П.Ф. Лесгафта, о его личности и достижениях пишут исследователи физкультуры и спорта, педагогики, истории, медицины. Поэтому целесообразным считаем классифицировать данные труды на три раздела:

- Исследования педагогических достижений Лесгафта;
- Исследования достижений Лесгафта в области физиологии, медицины, физической культуры и спорта;
- Биографический труды о личности Лесгафта.

1. Исследования педагогических достижений Лесгафта. Как известно, Петр Францевич много внимания в своих трудах уделял семейному воспитанию. Поэтому считаем уместным разделить данную и самую многочисленную группу работ на две категории: научные исследования педагогических воззрений Лесгафта в области а) физического и б) семейного воспитания, а также его исследования в сфере в) общедидактических и инновационных педагогических идей.

а) К первой категории трудов относятся работы Е.В. Бондаренко ([Бондаренко, 2011](#)), В.Н. Ирхина, И.В. Ирхиной, Г.В. Макотровой ([Ирхин и др., 2025](#)), А.А. Кадыкова ([Кадыков, 2013](#)), А.В. Пашутиной ([Пашутина, 2025](#)), С.И. Петрова, В.В. Пыж ([Петров, Пыж, 2021](#)), Д.В. Чекмаревой ([Чекмарева, 2012](#)), Ю.Н. Сахарова ([Сахаров, 2009](#)) и др.

б) проблемой изучения семейного воспитания в идеях П.Ф. Лесгафта занимались В.Г. Барабаш ([Барабаш, 2024](#)), В.Л. Кабанов, М.В. Тимофеева ([Кабанов, Тимофеева, 2020](#)), А.М. Картамышев ([Картамышев, 2016](#)), С.Н. Касаткина ([Касаткина, 2018](#)), А.А. Потапова ([Потапова, 2024с](#)), С.Ю. Федорова ([Федорова, 2013](#)) и др.

в) Общедидактические идеи и педагогические инновации в работах Лесгафта анализировались в трудах М.Б. Булановой ([Буланова, 2023](#)), Т.С. Буториной, Т.Е. Копейкиной ([Буторина, Копейкина, 2007](#)), Е.Ш. Бух ([Бух, 2005](#)), В.В. Горячева ([Горячев, 2012](#)), Е. Князева ([Князев, 2014](#)), М.А. Куркиной ([Куркина, 2008](#)), П.В. Погорелова ([Погорелов, 2025](#)), А.А. Потаповой ([Потапова, 2022](#); [Потапова, 2024b](#); [Потапова, 2024d](#)), О.И. Пановой ([Панова, 2007](#)) и др.

2. Исследования достижений Лесгафта в области физиологии, медицины, физической культуры и спорта. Данная категория представлена работами таких авторов как И.И. Мурашова ([Мурашова, 2025](#)), Г.А. Новоселова ([Новоселова, 2010](#)), А.А. Потапова ([Потапова, 2023](#)), Н.С. Скок ([Скок, 2023](#)), Р.М. Хайруллин ([Хайруллин, 2024](#)), В.В. Харченко, В.А. Иванов, Я.И. Фетисова ([Харченко и др., 2019](#)) и др.

3. Биографический труды о личности Лесгафта, среди которых отметим исследования М.В. Богуславского ([Богуславский, 2022](#)), А.П. Брилиной, Ю.М. Арканова ([Брилина, Арканов, 2023](#)), И.А. Меркушева, В.Г. Абашина ([Меркушев, Абашин, 2023](#); [Меркушев, Абашин, 2024](#)), С.Н. Мягковой ([Мягкова, 2010](#)), П.В. Погорелова ([Погорелов, 2025](#)), А.А. Потаповой ([Потапова, 2024а](#)), Ю.С. Симонкиной, В.М. Иохвидова ([Симонкина, Иохвидов, 2011](#)), А.В. Уткин ([Уткин, 2017](#)) и др.

Также, нами использовались и некоторые комплексные работы, в частности, труды И.Д. Стрельникова ([Стрельников, 1966](#)) и др.

Разумеется, указанный историографический перечень является далеко не полным, однако в него включены работы практически всех научных сфер, отражающих широту личности Петра Францевича Лесгафта.

4. Результаты

Петр Францевич родился в Санкт-Петербурге в еврейской семье из мещанского сословия, которые перешли в православие и переехали в Россию с немецких территорий, поэтому Лесгафта иногда ошибочно считают немцем (см., напр., [Кадыков, 2013: 90](#)). Отца звали Отто Петер, поэтому отчество «Францевич» у будущего ученого вызывает вопрос, на который у исторической науки нет однозначного ответа до сегодняшнего дня ([Уткин, 2017: 18](#)).

Образование Лесгафт получил в столице в немецких образовательных организациях, которые когда-то учредили для германских переселенцев сподвижники Петра I и Анны Иоанновны.

В отличие от младшего брата, Петр решил связать свою жизнь с медицинской наукой, поэтому в 1856 году поступает в специальное учреждение для подготовки высококлассных медиков – Санкт-Петербургскую медико-хирургическую академию, в которой увлекся анатомическим направлением.

Параллельно с медицинской практикой, Петр Лесгафт активно занимался и медицинской наукой: 1865 году он получает степень доктора медицины (диссертация была посвящена анатомии мышечных волокон у человека и животных), а в 1868 г. устраивается прозектором* в медико-хирургическую академию.

В 1869 году П.Ф. Лесгафт переезжает в Казань и занимает должность экстраординарного профессора физиологической (нормальной) анатомии в Казанском университете, одновременно открыв курсы по подготовке акушеров при вузе. Однако вскоре, к разочарованию студентов и некоторых коллег, он был уволен с формулировкой «без права заниматься педагогической деятельностью»: поводом стала «статья о нарушениях педагогической этики рядом профессоров университета, которую молодой преподаватель опубликовал в «Санкт-Петербургских ведомостях» ([Кадыков, 2013: 91](#)). Некоторые коллеги в знак протеста также подали прошения на увольнение, среди которых были и прославленные светила медицинской науки, в частности, один из основоположников отечественной биохимии А.Я. Данилевский, один из основоположников гигиенистики А.И. Якобий, патолог и терапевт П.И. Левитский, химик В.В. Марковников, гистолог и меценат А.Е. Голубев и др.

В эти годы наиболее ярко проявились черты личности будущего основателя системы физического воспитания и теоретической функциональной анатомии ([Стрельников, 1966: 7-13](#)), а именно выдающаяся работоспособность, организаторские навыки, умение мыслить новаторски, творчески и нестандартно, скрупулезность, честность, педагогический талант и ораторское мастерство, а также излишняя прямолинейность и склонность к критицизму, неуживчивость и упрямство. Помимо этого, государство считало его неблагонадежным с точки зрения лояльности режиму (причем достаточно демократичному «александровскому») и весьма чувствительным к революционным идеям, в силу чего им заинтересовались сотрудники Охранного отделения. К сожалению, из вышеуказанной проблемной ситуации Лесгафт не сделает соответствующих выводов и вплоть до самой смерти будет попадать под пристальное внимание органов госбезопасности с неблагоприятными для себя последствиями. Зато, указанное обстоятельство сделало его героем советской историографии как носителя и пропагандиста революционных идей, которая всячески популяризировала и личность, и труды Петра Францевича. Также, его именем назовут советский Государственный институт физического образования, выросший из созданных Лесгафтом Временных курсов для приготовления руководителей физического воспитания при Санкт-Петербургской биологической лаборатории; ныне вуз называется Национальным государственным университетом физической культуры, спорта и здоровья имени П.Ф. Лесгафта и является одним из наиболее престижных в Российской Федерации в деле подготовки специалистов в теоретической сфере физкультуры и спорта.

Лесгафт возвращается в Санкт-Петербург, где протекцию ему оказал бывший его преподаватель в академии В.Л. Грубер; Петр Францевич негласно преподает на кафедре анатомии, а также и у себя на квартире, о чем докладывали сотрудники «охранки», установившие за Лесгафтом скрытное наблюдение.

* Прозектор – сотрудник медицинских образовательных учреждений и больниц, в чьи обязанности входит подготовка вскрытия для демонстрации.

В 1874 году «опала» была снята и Лесгафт, при содействии того же Грубера, становится во главе анатомического кружка при Военно-медицинской академии и преподает гимнастику, публикуя в этом же году и свою первую научную статью по оздоровительной гимнастической теории и практике.

Актуальность и новизна публикаций Лесгафта быстро принесли ему всероссийскую известность; в 1877 году при Второй военной столичной гимназии он открывает двухгодичные курсы по анатомии и физиологии, преподавая также гимнастику и фехтование (Уткин, 2017: 21).

К полноценной преподавательской деятельности Лесгафт вернулся только в 1884 году, став привет-доцентом по анатомии в Императорском Санкт-Петербургском университете.

В 1893 году Лесгафт, на пожертвованные ему деньги, создает в столице биологическую лабораторию, при которой впоследствии организовал «Высшие научные курсы подготовки воспитательниц и руководительниц физического образования» и которые, как было указано выше, в итоге стали одним из наиболее авторитетных российских вузов физкультуры и спорта.

После подписания Лесгафтом так называемого «протеста 99-ти» (99 прогрессивных деятелей высказались против подавления студенческой антиправительственной демонстрации на Казанской площади), он вновь попал в списки «неблагонадежных» у органов госбезопасности и был выслан из столицы. С началом Первой русской революции 1905–1907 годов были закрыты и Высшие курсы Лесгафта. Вместе с тем, Петр Францевич продолжал научную работу. После разрешения на выезд за пределы страны, путешествовал за границей. Умер в 1909 году недалеко от Каира в Египте; останки перевезены и захоронены в Санкт-Петербурге, где Лесгафт провел большую часть своей жизни.

Перейдем к рассмотрению научного наследия Петра Францевича Лесгафта. Целесообразным представляется классифицировать его работы следующим образом:

1. Исследования по анатомии и физиологии;
2. Труды по антропологии;
3. Педагогические исследования.

1. Исследования по анатомии и физиологии (помимо диссертационных исследований) представлены как рядом узкоспециализированных публикаций, так и антологических работ.

К первой категории отнесем статьи о работе мышц глаза («О круговой мышце глаза»; Лесгафт, 1968a), мышц мочеполовой системы («О некоторых мышцах и фасциях, окружающих мочеиспускательный канал»; Лесгафт, 1968b), анатомии носоглотки, где был дан подробный анализ патологий, связанных с кистой Торнвальда (сумка Люшке) и способов лечения («О нишей или собственно-глочной сумке»; Лесгафт, 1968c), анатомии опорно-двигательного аппарата («О причинах, влияющих на форму костей»; Лесгафт, 1968d) и др.

Из комплексных (антологических) работ по анатомии отметим 400-страничную монографию «Основы теоретической анатомии» (Лесгафт, 1905), которая до революции 1917 года издавалась дважды – в 1896 и 1905 годах; монографию «Анатомия человека» (Лесгафт, 1892), изданной на русском языке в Лейпциге в 1892 году и в 1895 году переведенную на немецкий язык отдельным изданием; статью «Аномалии человека и относительная частота их» (Лесгафт, 1968e) и др.

2. Труды по антропологии включают работы комплексные работы о ее задачах и методологии (в частности, статья «Задачи антропологии и метод ее изучения»; Лесгафт, 1990a), а также комплексные работы по возрастной физиологии и психологии (в частности, фундаментальный труд «Первые годы жизни ребенка», опубликованный в пяти номерах журнала «Известия Санкт-Петербургской биологической лаборатории» (Лесгафт, 1990b), статья «Период возмужалости», опубликованная в том же журнале, статья «Материалы для изучения школьного возраста» и др.).

3. Педагогическое научное наследие Лесгафта является наиболее обширным и включает несколько десятков публикаций (как фундаментального характера, так и отдельных статей в научных журналах). В эту же категорию считаем уместным определить и труды по физической культуре и спорту и, соответственно, физическому воспитанию, так как указанные труды так или иначе имели научно-педагогический контекст.

Пожалуй, наиболее известным педагогическим трудом Лесгафта является монография «Семейное воспитание ребенка», состоящая из 3-х частей и выдержавшая более десяти

изданий – как в дореволюционный и советский период российской истории, так и на современном этапе (см., в частности, [Лесгафт, 1911](#); [Лесгафт, 1991](#)). Труд освещает особенности воспитания малолетнего ребенка в условиях семьи, базовые и второстепенные задачи родителей как воспитателей, значимость матери как главного воспитателя на этапе раннего детства и отца на более поздних этапах, роли родителей обоих полов в жизни ребенка в различных возрастных периодах, а также практические советы, методики и методы воспитания.

Другим фундаментальным трудом является «Руководство к физическому образованию детей школьного возраста» ([Лесгафт, 1912](#)), только в дореволюционный период выдержавшее три издания (в 1901, 1904 и 1912 годах).

Из статей в периодических изданиях отметим работы «Об отношении анатомии к физическому воспитанию» ([Лесгафт, 1990е](#)), «Задачи физического развития в школе» ([Лесгафт, 1936](#)), «Об играх и физическом воспитании в школе» ([Лесгафт, 1953а](#)), «Основы естественной гимнастики» ([Лесгафт, 1953б](#)) и мн. др.

После себя П.Ф. Лесгафт оставил широкое научное наследие, которое являлось актуальным на протяжении практически полутора веков; некоторые его труды переиздаются и сегодня.

5. Заключение

Петр Францевич Лесгафт стал знаковой фигурой в научном подходе к физической культуре и спорту. Оставаясь на протяжении всей жизни верным своим принципам, включая и политические, он оставил широкое научное наследие, которое являлось актуальным на протяжении практически полутора веков, некоторые из его работ переиздаются и поныне.

Одним из первых он изучил работу суставов человека и обосновал необходимость физических упражнений для их успешного функционирования. Активно сам занимался педагогической деятельностью, в том числе и создавая высококачественные медицинские учебные заведения, и внес значительный вклад в педагогическую науку, прежде всего, в теорию семейного и физического воспитания.

Литература

[Барабаш, 2024](#) – *Барабаш В.Г.* П.Ф. Лесгафт о важности семейного воспитания в развитии личности ребенка / *Педагогическое образование: традиции, инновации, поиски, перспективы. Материалы XIV Международной научно-практической конференции.* Шадринск, 2024. С. 30-35.

[Богуславский, 2022](#) – *Богуславский М.В.* П.Ф. Лесгафт – основоположник физического воспитания и семейной педагогики // *Вестник образования России.* 2022. № 17. С. 71-80.

[Бондаренко, 2011](#) – *Бондаренко Е.В.* Лесгафт Петр Францевич – основоположник высшего образования по физическому воспитанию в России // *Прикладная психология и психоанализ.* 2011. № 2. С. 13.

[Брилина, Арканов, 2023](#) – *Брилина А.П., Арканов Ю.М.* П.Ф. Лесгафт (1837-1909) о физическом воспитании // *Студенческий вестник.* 2023. № 37-1 (276). С. 39-40.

[Буланова, 2023](#) – *Буланова М.Б.* П.Ф. Лесгафт о новых подходах к воспитанию и образованию человека // *Наследие.* 2023. № 2 (23). С. 64-76.

[Буторина, Копейкина, 2007](#) – *Буторина Т.С., Копейкина Т.Е.* Проблема личности педагога в наследии П.Ф. Лесгафта / *Менталитет, мировоззрение, credo в педагогике ненасилия. Материалы XXVIII Всероссийской научно-практической конференции.* Под ред. А.Г. Козловой, В.Г. Маралова, М.С. Гавриловой. 2007. С. 234-235.

[Бух, 2005](#) – *Бух Е.Ш.* Человековедение по Лесгафту: о нравственном воспитании детей, о закономерностях формирования личности. М., 2005.

[Горячев, 2012](#) – *Горячев В.В.* Проблема телесности в концепции П.Ф. Лесгафта / *Рудиковские чтения. Материалы VIII Международной научно-практической конференции психологов физической культуры и спорта «Рудиковские чтения».* РГУФКСМиТ. 2012. С. 293-296.

[Ирхин и др., 2025](#) – Ирхин В.Н., Ирхина И.В., Макотрова Г.В. Развитие педагогических взглядов П.Ф. Лесгафта на проблему воспитания здорового человека // *Вопросы журналистики, педагогики, языкознания*. 2025. Т. 44. № 1. С. 99-109.

[Кабанов, Тимофеева, 2020](#) – Кабанов В.Л., Тимофеева М.В. П.Ф. Лесгафт о семейном воспитании // *Педагогика*. 2020. Т. 84. № 11. С. 109-117.

[Кадыков, 2013](#) – Кадыков А.А. Деятельность П.Ф. Лесгафта и его вклад в разработку отечественной системы физического воспитания // *Мир современной науки*. 2013. № 5 (20). С. 89-95.

[Картамышев, 2016](#) – Картамышев А.М. Использование идей П.Ф. Лесгафта о воспитании ребенка в практике современной семьи // *Психология и педагогика: методика и проблемы практического применения*. 2016. № 51. С. 65-76.

[Касаткина, 2018](#) – Касаткина С.Н. Антропологический подход к семейному воспитанию в творчестве П.Ф. Лесгафта / *Научные труды Калужского государственного университета имени К.Э. Циолковского. Материалы докладов психолого-педагогических секций региональной университетской научно-практической конференции. Сер. «Психолого-педагогические науки»*. 2018. С. 77-80.

[Князев, 2014](#) – Князев Е. Петр Лесгафт и «филиальная ветвь» наук // *Дошкольное воспитание*. 2014. № 3. С. 113.

[Куркина, 2008](#) – Куркина М.А. Гуманистические идеи П.Ф. Лесгафта в современной теории физического образования // *Научное обозрение*. 2008. № 1. С. 191-192.

[Лесгафт, 1892](#) – Лесгафт П.Ф. Анатомия человека. Лейпциг, 1892.

[Лесгафт, 1905](#) – Лесгафт П.Ф. Основы теоретической анатомии. Часть 1-2. СПб., 1905.

[Лесгафт, 1911](#) – Лесгафт П.Ф. Семейное воспитание ребенка. Части 1-3. СПб., 1911.

[Лесгафт, 1912](#) – Лесгафт П.Ф. Руководство к физическому образованию детей школьного возраста. Изд-е 3-е. СПб., 1912.

[Лесгафт, 1936](#) – Лесгафт П.Ф. Задачи физического развития в школе / *Хрестоматия по истории педагогики*. Под общ. ред. С.А. Каменева. Т. IV. М.: Госпедиздат, 1936.

[Лесгафт, 1953a](#) – Лесгафт П.Ф. Об играх и физическом воспитании в школе / *Собрание педагогических сочинений*. Т. 4. М.: Физкультура и спорт, 1953.

[Лесгафт, 1953b](#) – Лесгафт П.Ф. Основы естественной гимнастики / *Собрание педагогических сочинений*. Т. 4. М.: Физкультура и спорт, 1953.

[Лесгафт, 1968a](#) – Лесгафт П.Ф. О круговой мышце глаза / *Избранные труды по анатомии*. М., 1968.

[Лесгафт, 1968b](#) – Лесгафт П.Ф. О некоторых мышцах и фасциях, окружающих мочеиспускательный канал / *Избранные труды по анатомии*. М., 1968.

[Лесгафт, 1968c](#) – Лесгафт П.Ф. О нишей или собственно-глочной сумке / *Избранные труды по анатомии*. М., 1968.

[Лесгафт, 1968d](#) – Лесгафт П.Ф. О причинах, влияющих на форму костей / *Избранные труды по анатомии*. М., 1968.

[Лесгафт, 1968e](#) – Лесгафт П.Ф. Аномалии человека и относительная частота их / *Избранные труды по анатомии*. М., 1968.

[Лесгафт, 1990a](#) – Лесгафт П.Ф. Задачи антропологии и метод ее изучения / *Избранные педагогические сочинения*. Сост. И.Н. Решетень. М., 1990.

[Лесгафт, 1990b](#) – Лесгафт П.Ф. Первые годы жизни ребенка // *Известия Санкт-Петербургской биологической лаборатории*. Т. II, вып. 2, 3. СПб., 1886 / *Избранные педагогические сочинения*. Сост. И.Н. Решетень. М., 1990.

[Лесгафт, 1990c](#) – Лесгафт П.Ф. Период возмужалости // *Известия Санкт-Петербургской биологической лаборатории*. Т. III, вып. 3, 4; т. V, вып. 1, 2; т. VII, вып. 1. СПб., 1887-1889 // *Избранные педагогические сочинения* / Сост. И.Н. Решетень. М., 1990.

[Лесгафт, 1990d](#) – Лесгафт П.Ф. Материалы для изучения школьного возраста / *Избранные педагогические сочинения* / Сост. И.Н. Решетень. М., 1990.

[Лесгафт, 1990e](#) – Лесгафт П.Ф. Об отношении анатомии к физическому воспитанию / *Избранные педагогические сочинения* / Сост. И.Н. Решетень. М., 1990.

[Лесгафт, 1991](#) – Лесгафт П.Ф. Семейное воспитание ребенка и его значение. СПб., 1991.

Меркушев, Абашин, 2023 – Меркушев И.А., Абашин В.Г. П.Ф. Лесгафт – основоположник развития функциональной анатомии // *Клиническая медицина*. 2023. Т. 101. № 11. С. 590-596.

Меркушев, Абашин, 2024 – Меркушев И.А., Абашин В.Г. Врач, педагог и наставник – Петр Францевич Лесгафт // *Клиническая медицина*. 2024. Т. 102. № 2. С. 188-192.

Мурашова, 2025 – Мурашова И.И. Современные подходы к физическому развитию по методике Лесгафта / *Социально-гуманитарные научные дискуссии в России и за рубежом. Сборник научных статей*. М., 2025. С. 115-118.

Мягкова, 2010 – Мягкова С.Н. Памяти П.Ф. Лесгафта (1837–1909) // *Физическая культура: воспитание, образование, тренировка*. 2010. № 1. С. 76-78.

Новоселова, 2010 – Новоселова Г.А. Реализация идей П.Ф. Лесгафта в проектировании здоровьесберегающего пространства современной школы // *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. 2010. № 9. С. 295-298.

Панова, 2007 – Панова О.И. Педагогическая антропология П.Ф. Лесгафта и современные идеи педагогического взаимодействия. Диссертация на соиск. уч. ст. канд. пед. наук. Екатеринбург: УГПУ, 2007.

Пашутина, 2025 – Пашутина А.В. Влияние педагогических идей П.Ф. Лесгафта на развитие современной системы физического воспитания в России / *История, теория и практика развития педагогических идей в свете современных тенденций образования. Статьи и материалы III Всероссийской студенческой научно-практической конференции с международным участием, посвященной 85-летию ГОУ ВО МО «Государственный социально-гуманитарный университет»*. Коломна, 2025. С. 192-194.

Петров, Пыж, 2021 – Петров С.И., Пыж В.В. Реализация научно-педагогического наследия П.Ф. Лесгафта в подготовке специалистов в области физической культуры и спорта / *Теоретические и методологические аспекты подготовки специалистов для сферы физической культуры, спорта и туризма. сборник материалов I-й Международной научно-практической конференции*. Под общ. ред. В.В. Горбачевой, Е.Г. Борисенко, 2021. С. 73-80.

Погорелов, 2025 – Погорелов П.В. Условия становления системы научно-педагогических взглядов П.Ф. Лесгафта в педагогике второй половины XIX – начала XX вв. / *Научный диалог: теория и практика. сборник научных статей по итогам работы Международного научного форума*. М., 2025. С. 64-70.

Погорелов, 2025 – Погорелов П.В. Формирование личностных и профессиональных качеств П.Ф. Лесгафта / *Высшая школа: научные исследования. Материалы Межвузовского международного конгресса*. М., 2025. С. 22-29.

Потапова, 2022 – Потапова А.А. Концепция развития личности в педагогическом наследии П.Ф. Лесгафта // *Вестник Таганрогского института управления и экономики*. 2022. № 2 (36). С. 85-86.

Потапова, 2023 – Потапова А.А. Классификация типов детей в антропологии П.Ф. Лесгафта // *Аспирант*. 2023. № 1 (77). С. 28-31.

Потапова, 2024a – Потапова А.А. Формирование научного мировоззрения П.Ф. Лесгафта // *Вестник Таганрогского института управления и экономики*. 2024. № 1 (41). С. 79-82.

Потапова, 2024b – Потапова А.А. Антропология как основа педагогики в наследии П.Ф. Лесгафта / *Проблемы детства в фокусе междисциплинарных исследований. Материалы IV-го Международного форума Таганрогского института имени А.П. Чехова (филиала) ФГБОУ ВО «Ростовский государственный экономический университет (РИНХ)»*. Ростов-на-Дону, 2024. С. 177-182.

Потапова, 2024c – Потапова А.А. Реализация психологических идей П.Ф. Лесгафта в семейном воспитании // *Современное профессиональное образование*. 2024. № 1. С. 40-44.

Потапова, 2024d – Потапова А.А. Психолого-педагогические принципы гармоничного развития личности ребенка в трудах П.Ф. Лесгафта // *Развитие образования*. 2024. Т. 7. № 2. С. 85-91.

Сахаров, 2009 – Сахаров Ю.Н. Предпосылки развития философско-педагогических взглядов П.Ф. Лесгафта в решении современных задач физического воспитания / *Сохранение и развитие культурного и образовательного потенциала Ивановской области*.

Материалы межвузовской научной конференции (V областной фестиваль «Молодая наука – развитию Ивановской области»). Отв. ред. Е.А. Шмелева. 2009. С. 230-232.

[Симонкина, Иохвидов, 2011](#) – Симонкина Ю.С., Иохвидов В.М. Петр Францевич Лесгафт – основоположник физического образования // Актуальные задачи педагогики. Материалы Международной научной конференции. 2011. С. 55-57.

[Скок, 2023](#) – Скок Н.С. Девиантное поведение в контексте теоретического наследия П.Ф. Лесгафта: возможности переосмысления // Вестник Института экономики и социальных технологий. 2023. № 1. С. 53-61.

[Стрельников, 1966](#) – Стрельников И.Д. Из истории палеонтологии в России / Организм и среда в геологическом прошлом. М.: Наука, 1966.

[Уткин, 2017](#) – Уткин А.В. «Не знаю, что такое скука»: к 180-летию П. Ф. Лесгафта // Историко-педагогический журнал. 2017. № 3. С. 18-24.

[Федорова, 2013](#) – Федорова С.Ю. Духовные ценности физического образования детей в наследии П.Ф. Лесгафта / Духовные ценности в воспитании и образовании детей и молодежи. Материалы Городской научно-практической конференции. Сост.-ред.: А.В. Антонова, О.В. Цаплина. 2013. С. 52-55.

[Хайруллин, 2024](#) – Хайруллин Р.М. Судьба «теоретической анатомии» Лесгафта как история функционального метода в отечественной анатомии / Труды по истории медицины. М., 2024. С. 388-403.

[Харченко и др., 2019](#) – Харченко В.В., Иванов В.А., Фетисова Я.И. Вклад Петра Францевича Лесгафта в историю развития анатомии // Интегративные тенденции в медицине и образовании. 2019. Т. 3. С. 112-116.

[Чекмарева, 2012](#) – Чекмарева Д.В. П.Ф. Лесгафт и В.В. Гориневский: вклад в науку и практику физического образования / Аспирантские чтения – 2012. Материалы докладов Всероссийской конференции с международным участием «Молодые ученые – медицине». Самарский государственный медицинский университет. 2012. С. 143-146.

References

[Barabash, 2024](#) – Barabash, V.G. (2024). P.F. Lesgaft o vazhnosti semeinogo vospitaniya v razvitii lichnosti rebenka [P.F. Lesgaft on the importance of family education in the development of a child's personality]. *Pedagogicheskoe obrazovanie: traditsii, innovatsii, poiski, perspektivy. Materialy XIV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Shadrinsk. Pp. 30-35. [in Russian]

[Boguslavskii, 2022](#) – Boguslavskii, M.V. (2022). P.F. Lesgaft – osnovopolozhnik fizicheskogo vospitaniya i semeinoi pedagogiki [P.F. Lesgaft – the founder of physical education and family pedagogy]. *Vestnik obrazovaniya Rossii*. 17: 71-80. [in Russian]

[Bondarenko, 2011](#) – Bondarenko, E.V. (2011). Lesgaft Petr Frantsevich – osnovopolozhnik vysshego obrazovaniya po fizicheskomu vospitaniyu v Rossii [Lesgaft Petr Frantsevich – the founder of higher education in physical education in Russia]. *Prikladnaya psikhologiya i psikhoanaliz*. 2: 13. [in Russian]

[Brilina, Arkanov, 2023](#) – Brilina, A.P., Arkanov, Yu.M. (2023). P.F. Lesgaft (1837–1909) o fizicheskom vospitanii [P.F. Lesgaft (1837–1909) on physical education]. *Studencheskii vestnik*. 37-1(276): 39-40. [in Russian]

[Bukh, 2005](#) – Bukh, E.Sh. (2005). Chelovekovedenie po Lesgaftu: o npravstvennom vospitanii detei, o zakonomernostyakh formirovaniya lichnosti [Lesgaft's study of humanity: on the moral education of children, on the patterns of personality formation]. М. [in Russian]

[Bulanova, 2023](#) – Bulanova, M.B. (2023). P.F. Lesgaft o novykh podkhodakh k vospitaniyu i obrazovaniyu cheloveka [P.F. Lesgaft on new approaches to human upbringing and education]. *Nasledie*. 2(23): 64-76. [in Russian]

[Butorina, Kopeikina, 2007](#) – Butorina, T.S., Kopeikina, T.E. (2007). Problema lichnosti pedagoga v nasledii P.F. Lesgafta [The problem of the teacher's personality in the legacy of P.F. Lesgaft]. *Mentalitet, mirovozzrenie, credo v pedagogike nenasiliya. Materialy XXVIII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Pod red. A.G. Kozlovoy, V.G. Maralova, M.S. Gavrilovoi. Pp. 234-235. [in Russian]

[Chekmareva, 2012](#) – Chekmareva, D.V. (2012). P.F. Lesgaft i V.V. Gorinevskii: vklad v nauku i praktiku fizicheskogo obrazovaniya [P.F. Lesgaft and V.V. Gorinevsky: Contribution to the Science

and Practice of Physics Education]. *Aspirantskie chteniya – 2012. Materialy dokladov Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Molodye uchenye – meditsine».* Samarskii gosudarstvennyi meditsinskii universitet. Pp. 143-146. [in Russian]

[Fedorova, 2013](#) – Fedorova, S.Yu. (2013). Dukhovnye tsennosti fizicheskogo obrazovaniya detei v nasledii P.F. Lesgafta [Spiritual values of children's physical education in the legacy of P.F. Lesgaft]. *Dukhovnye tsennosti v vospitanii i obrazovanii detei i molodezhi. Materialy Gorodskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii.* Sost.-red.: A.V. Antonova, O.V. Tsaplina. Pp. 52-55. [in Russian]

[Goryachev, 2012](#) – Goryachev, V.V. (2012). Problema telesnosti v kontseptsii P.F. Lesgafta [The problem of corporeality in P.F. Lesgaft's concepts]. *Rudikovskie chteniya. Materialy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii psikhologov fizicheskoi kul'tury i sporta «Rudikovskie chteniya».* RGUFKSMiT. Pp. 293-296. [in Russian]

[Irkhin i dr., 2025](#) – Irkhin, V.N., Irkhina, I.V., Makotrova, G.V. (2025). Razvitie pedagogicheskikh vzglyadov P.F. Lesgafta na problemu vospitaniya zdorovogo cheloveka [The development of P.F. Lesgaft's pedagogical views on the problem of raising a healthy person]. *Voprosy zhurnalistiki, pedagogiki, yazykoznaniya.* 44(1): 99-109. [in Russian]

[Kabanov, Timofeeva, 2020](#) – Kabanov, V.L., Timofeeva, M.V. (2020). P.F. Lesgaft o semeinom vospitanii [P.F. Lesgaft on family education]. *Pedagogika.* 84(11): 109-117. [in Russian]

[Kadykov, 2013](#) – Kadykov, A.A. (2013). Deyatel'nost' P.F. Lesgafta i ego vklad v razrabotku otechestvennoi sistemy fizicheskogo vospitaniya [P.F. Lesgaft's Activities and His Contribution to the Development of the Domestic System of Physical Education]. *Mir sovremennoi nauki.* 5(20): 89-95. [in Russian]

[Kartamyshev, 2016](#) – Kartamyshev, A.M. (2016). Ispol'zovanie idei P.F. Lesgafta o vospitanii rebenka v praktike sovremennoi sem'i [Using P.F. Lesgaft's ideas Lesgaft on child rearing in the practice of the modern family]. *Psikhologiya i pedagogika: metodika i problemy prakticheskogo primeneniya.* 51: 65-76. [in Russian]

[Kasatkina, 2018](#) – Kasatkina, S.N. (2018). Antropologicheskii podkhod k semeinomu vospitaniiyu v tvorchestve P.F. Lesgafta [Anthropological approach to family education in the works of P.F. Lesgaft]. *Nauchnye trudy Kaluzhskogo gosudarstvennogo universiteta imeni K.E. Tsiolkovskogo. Materialy dokladov psikhologo-pedagogicheskikh sektiis regional'noi universitetskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Ser. «Psikhologo-pedagogicheskie nauki».* Pp. 77-80. [in Russian]

[Khairullin, 2024](#) – Khairullin, R.M. (2024). Sud'ba «teoreticheskoi anatomii» Lesgafta kak istoriya funktsional'nogo metoda v otechestvennoi anatomii [The fate of Lesgaft's "theoretical anatomy" as the history of the functional method in Russian anatomy]. *Trudy po istorii meditsiny.* M. Pp. 388-403. [in Russian]

[Kharchenko i dr., 2019](#) – Kharchenko, V.V., Ivanov, V.A., Fetisova, Ya.I. (2019). Vklad Petra Frantsevicha Lesgafta v istoriyu razvitiya anatomii [The contribution of Petr Frantsevich Lesgaft to the history of anatomy]. *Integrativnye tendentsii v meditsine i obrazovanii.* 3: 112-116. [in Russian]

[Knyazev, 2014](#) – Knyazev, E. (2014). Petr Lesgaft i «filial'naya vetv'» nauk [Petr Lesgaft and the "branch" of sciences]. *Doshkol'noe vospitanie.* 3: 113. [in Russian]

[Kurkina, 2008](#) – Kurkina, M.A. (2008). Gumanisticheskie idei P.F. Lesgafta v sovremennoi teorii fizicheskogo obrazovaniya [Humanitarian ideas of P.F. Lesgaft in the modern theory of physics education]. *Nauchnoe obozrenie.* 1: 191-192. [in Russian]

[Lesgaft, 1892](#) – Lesgaft, P.F. (1892). Anatomiya cheloveka [Human anatomy]. Leiptsig. [in Russian]

[Lesgaft, 1905](#) – Lesgaft, P.F. (1905). Osnovy teoreticheskoi anatomii. Chast' 1-2 [Fundamentals of theoretical anatomy. Parts 1-2]. SPb. [in Russian]

[Lesgaft, 1911](#) – Lesgaft, P.F. (1911). Semeinoe vospitanie rebenka. Chasti 1-3 [Family education of the child. Parts 1-3]. SPb. [in Russian]

[Lesgaft, 1912](#) – Lesgaft, P.F. (1912). Rukovodstvo k fizicheskomu obrazovaniiyu detei shkol'nogo vozrasta [A guide to the physical education of school-age children]. Izd-e 3-e. SPb. [in Russian]

[Lesgaft, 1936](#) – Lesgaft, P.F. (1936). Zadachi fizicheskogo razvitiya v shkole [Tasks of physical development in school]. Khrestomatiya po istorii pedagogiki. Pod obshch. red. S.A. Kameneva. T. IV. M.: Gospedizdat. [in Russian]

[Lesgaft, 1953a](#) – *Lesgaft, P.F.* (1953). Ob igrakh i fizicheskom vospitanii v shkole [On games and physical education in school]. *Sobranie pedagogicheskikh sochinenii*. T. 4. M.: Fizkul'tura i sport. [in Russian]

[Lesgaft, 1953b](#) – *Lesgaft, P.F.* (1953). Osnovy estestvennoi gimnastiki [Fundamentals of natural gymnastics]. *Sobranie pedagogicheskikh sochinenii*. T. 4. M.: Fizkul'tura i sport. [in Russian]

[Lesgaft, 1968a](#) – *Lesgaft, P.F.* (1968). O krugovoi myshtse glaza [On the orbicularis oculi muscle]. *Izbrannye trudy po anatomii*. M. [in Russian]

[Lesgaft, 1968b](#) – *Lesgaft, P.F.* (1968). O nekotorykh myshtsakh i fastsiyakh, okruzhayushchikh mocheispuksatel'nyi kanal [On some muscles and fascia surrounding the urethra]. *Izbrannye trudy po anatomii*. M. [in Russian]

[Lesgaft, 1968c](#) – *Lesgaft, P.F.* (1968). O nishei ili sobstvenno-glotochnoi sumke [On the niche or proper pharyngeal pouch]. *Izbrannye trudy po anatomii*. M. [in Russian]

[Lesgaft, 1968d](#) – *Lesgaft, P.F.* (1968). O prichinakh, vliyayushchikh na formu kostei [On the causes influencing the shape of bones]. *Izbrannye trudy po anatomii*. M. [in Russian]

[Lesgaft, 1968e](#) – *Lesgaft P.F.* (1968). Anomalii cheloveka i otnositel'naya chastota ikh [Human anomalies and their relative frequency]. *Izbrannye trudy po anatomii*. M. [in Russian]

[Lesgaft, 1990a](#) – *Lesgaft, P.F.* (1990). Zadachi antropologii i metod ee izucheniya [Tasks of anthropology and the method of its study]. *Izbrannye pedagogicheskie sochineniya*. Sost. I.N. Resheten'. M. [in Russian]

[Lesgaft, 1990b](#) – *Lesgaft, P.F.* (1990). Pervye gody zhizni rebenka [The first years of a child's life]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi biologicheskoi laboratorii*. T. II, vyp. 2, 3. SPb., 1886. *Izbrannye pedagogicheskie sochineniya*. Sost. I.N. Resheten'. M. [in Russian]

[Lesgaft, 1990c](#) – *Lesgaft, P.F.* (1990). Period vozmuzhalosti [The period of maturity]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi biologicheskoi laboratorii*. T. III, vyp. 3, 4; t. V, vyp. 1, 2; t. VII, vyp. 1. SPb., 1887-1889. *Izbrannye pedagogicheskie sochineniya*. Sost. I.N. Resheten'. M. [in Russian]

[Lesgaft, 1990d](#) – *Lesgaft, P.F.* (1990). Materialy dlya izucheniya shkol'nogo vozrasta [Materials for studying school age]. *Izbrannye pedagogicheskie sochineniya*. Sost. I.N. Resheten'. M. [in Russian]

[Lesgaft, 1990e](#) – *Lesgaft, P.F.* (1990). Ob otnoshenii anatomii k fizicheskomu vospitaniyu [On the relationship of anatomy to physical education]. *Izbrannye pedagogicheskie sochineniya*. Sost. I.N. Resheten'. M. [in Russian]

[Lesgaft, 1991](#) – *Lesgaft, P.F.* (1991). Semeinoe vospitanie rebenka i ego znachenie [Family education of the child and its importance.]. SPb. [in Russian]

[Merkushev, Abashin, 2023](#) – *Merkushev, I.A., Abashin, V.G.* (2023). P.F. Lesgaft – osnovopolozhnik razvitiya funktsional'noi anatomii [P.F. Lesgaft – the founder of the development of functional anatomy]. *Klinicheskaya meditsina*. 101(11): 590-596. [in Russian]

[Merkushev, Abashin, 2024](#) – *Merkushev, I.A., Abashin, V.G.* (2024). Vrach, pedagog i nastavnik – Petr Frantsevich Lesgaft [Doctor, teacher and mentor – Petr Frantsevich Lesgaft]. *Klinicheskaya meditsina*. 102(2): 188-192. [in Russian]

[Murashova, 2025](#) – *Murashova, I.I.* (2025). Sovremennye podkhody k fizicheskomu razvitiyu po metodike Lesgafta [Modern approaches to physical development according to the Lesgaft method]. *Sotsial'no-gumanitarnye nauchnye diskussii v Rossii i za rubezhom. Sbornik nauchnykh statei*. M. Pp. 115-118. [in Russian]

[Myagkova, 2010](#) – *Myagkova, S.N.* (2010). Pamyati P.F. Lesgafta (1837–1909) [In memory of P.F. Lesgaft (1837–1909)]. *Fizicheskaya kul'tura: vospitanie, obrazovanie, trenirovka*. 1: 76-78. [in Russian]

[Novoselova, 2010](#) – *Novoselova, G.A.* (2010). Realizatsiya idei P.F. Lesgafta v proektirovanii zdorov'esberegayushchego prostranstva sovremennoi shkoly [Implementation of P.F. Lesgaft's ideas in designing a health-saving space for a modern school]. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk*. 9: 295-298. [in Russian]

[Panova, 2007](#) – *Panova, O.I.* (2007). Pedagogicheskaya antropologiya P.F. Lesgafta i sovremennye idei pedagogicheskogo vzaimodeistviya [Pedagogical anthropology of P.F. Lesgaft and modern ideas of pedagogical interaction]. *Dissertatsiya na soisk. uch. st. kand. ped. nauk*. Ekaterinburg: UGPU. [in Russian]

Pashutina, 2025 – Pashutina, A.V. (2025). Vliyanie pedagogicheskikh idei P.F. Lesgafta na razvitie sovremennoi sistemy fizicheskogo vospitaniya v Rossii [The influence of pedagogical ideas of P.F. Lesgaft's impact on the development of a modern physical education system in Russia]. *Istoriya, teoriya i praktika razvitiya pedagogicheskikh idei v svete sovremennykh tendentsii obrazovaniya. Stat'i i materialy III Vserossiiskoi studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoi 85-letnemu yubileyu GOU VO MO «Gosudarstvennyi sotsial'no-gumanitarnyi universitet»*. Kolomna. Pp. 192-194. [in Russian]

Petrov, Pyzh, 2021 – Petrov, S.I., Pyzh, V.V. (2021). Realizatsiya nauchno-pedagogicheskogo naslediya P.F. Lesgafta v podgotovke spetsialistov v oblasti fizicheskoi kul'tury i sporta [Implementation of P.F. Lesgaft's scientific and pedagogical heritage in the training of specialists in physical culture and sports]. *Teoreticheskie i metodologicheskie aspekty podgotovki spetsialistov dlya sfery fizicheskoi kul'tury, sporta i turizma. sbornik materialov I-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Pod obshch. red. V.V. Gorbachevoi, E.G. Borisenko. Pp. 73-80. [in Russian]

Pogorelov, 2025 – Pogorelov, P.V. (2025). Formirovanie lichnostnykh i professional'nykh kachestv P.F. Lesgafta [Formation of P.F. Lesgaft's personal and professional qualities]. *Vyssшая shkola: nauchnye issledovaniya. Materialy Mezhvuzovskogo mezhdunarodnogo kongressa*. M. Pp. 22-29. [in Russian]

Pogorelov, 2025 – Pogorelov, P.V. (2025). Usloviya stanovleniya sistemy nauchno-pedagogicheskikh vzglyadov P.F. Lesgafta v pedagogike vtoroi poloviny XIX – nachala XX vv. [Conditions for the formation of P.F. Lesgaft's system of scientific and pedagogical views in pedagogy in the second half of the 19th – early 20th centuries]. *Nauchnyi dialog: teoriya i praktika. sbornik nauchnykh statei po itogam raboty Mezhdunarodnogo nauchnogo foruma*. M. Pp. 64-70. [in Russian]

Potapova, 2022 – Potapova, A.A. (2022). Kontseptsiya razvitiya lichnosti v pedagogicheskom nasledii P.F. Lesgafta [The concept of personal development in the pedagogical heritage of P.F. Lesgaft]. *Vestnik Taganrogskego instituta upravleniya i ekonomiki*. 2(36): 85-86. [in Russian]

Potapova, 2023 – Potapova, A.A. (2023). Klassifikatsiya tipov detei v antropologii P.F. Lesgafta [Classification of child types in P.F. Lesgaft's anthropology]. *Aspirant*. 1(77): 28-31. [in Russian]

Potapova, 2024a – Potapova, A.A. (2024). Formirovanie nauchnogo mirovozzreniya P.F. Lesgafta [Formation of P.F. Lesgaft's scientific worldview]. *Vestnik Taganrogskego instituta upravleniya i ekonomiki*. 1(41): 79-82. [in Russian]

Potapova, 2024b – Potapova, A.A. (2024). Antropologiya kak osnova pedagogiki v nasledii P.F. Lesgafta [Anthropology as the basis of pedagogy in the legacy of P.F. Lesgaft]. *Problemy detstva v fokuse mezhdistiplinarnykh issledovaniy. Materialy IV-go Mezhdunarodnogo foruma Taganrogskego instituta imeni A.P. Chekhova (filiala) FGBOU VO «Rostovskii gosudarstvennyi ekonomicheskii universitet (RINKh)»*. Rostov-na-Donu. Pp. 177-182. [in Russian]

Potapova, 2024c – Potapova, A.A. (2024). Realizatsiya psikhologicheskikh idei P.F. Lesgafta v semeinom vospitanii [Implementation of P.F. Lesgaft's psychological ideas in family education]. *Sovremennoe professional'noe obrazovanie*. 1: 40-44. [in Russian]

Potapova, 2024d – Potapova, A.A. (2024). Psikhologo-pedagogicheskie printsipy garmonichnogo razvitiya lichnosti rebenka v trudakh P.F. Lesgafta [Psychological and pedagogical principles of the harmonious development of the child's personality in the works of P.F. Lesgaft]. *Razvitie obrazovaniya*. 7(2): 85-91. [in Russian]

Sakharov, 2009 – Sakharov, Yu.N. (2009). Predposylki razvitiya filosofsko-pedagogicheskikh vzglyadov P.F. Lesgafta v reshenii sovremennykh zadach fizicheskogo vospitaniya [Prerequisites for the development of P.F. Lesgaft's philosophical and pedagogical views in solving modern problems of physical education]. *Sokhranenie i razvitie kul'turnogo i obrazovatel'nogo potentsiala Ivanovskoi oblasti. Materialy mezhvuzovskoi nauchnoi konferentsii (V oblastnoi festival' «Molodaya nauka – razvitiyu Ivanovskoi oblasti»)»*. Otv. red. E.A. Shmeleva. Pp. 230-232. [in Russian]

Simonkina, Iokhvidov, 2011 – Simonkina, Yu.S., Iokhvidov, V.M. (2011). Petr Frantsevich Lesgaft – osnovopolozhnik fizicheskogo obrazovaniya [Petr Frantsevich Lesgaft – the founder of

physics education]. *Aktual'nye zadachi pedagogiki. Materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii*. Pp. 55-57. [in Russian]

Skok, 2023 – Skok, N.S. (2023). Deviantnoe povedenie v kontekste teoreticheskogo naslediya P.F. Lesgafta: vozmozhnosti pereosmysleniya [Deviant behavior in the context of P. F. Lesgaft's theoretical heritage: possibilities of rethinking]. *Vestnik Instituta ekonomiki i sotsial'nykh tekhnologii*. 1: 53-61. [in Russian]

Strel'nikov, 1966 – Strel'nikov, I.D. (1966). Iz istorii paleontologii v Rossii [From the history of paleontology in Russia]. *Organizm i sreda v geologicheskom proshlom*. M.: Nauka. [in Russian]

Utkin, 2017 – Utkin, A.V. (2017). «Ne znayu, chto takoe skuka»: k 180-letiyu P. F. Lesgafta ["I don't know what boredom is": on the 180th anniversary of P.F. Lesgaft]. *Istoriko-pedagogicheskii zhurnal*. 3: 18-24. [in Russian]

Петр Францевич Лесгафт (1837–1909): некоторые биографические аспекты научной и педагогической деятельности российского физиолога и педагога

Анвар Мирзахматович Мамадалиев ^{a, *}

^a Восточно-европейское историческое общество, Российская Федерация

Аннотация. Рукопись посвящена краткому описанию научных достижений Петра Францевича Лесгафта (1837–1909) в области медицины и физического воспитания. Материалом послужили исторические источники и биографические исследования личности, а также некоторые его труды. Методический комплекс исследования составляют методы историографического анализа, историко-системный метод, методы классификации и синтеза.

Петр Францевич Лесгафт стал знаковой фигурой в научном подходе к физической культуре и спорту. Оставаясь на протяжении всей жизни верным своим принципам, включая и политические, он оставил широкое научное наследие, которое являлось актуальным на протяжении практически полутора веков; некоторые из его трудов переиздаются и поныне.

Одним из первых изучил работу суставов человека и обосновал необходимость физических упражнений для их успешного функционирования. Активно сам занимался педагогической деятельностью, в том числе и, создавая высококачественные медицинские учебные заведения, и внес значительный вклад в педагогическую науку, прежде всего, в теорию семейного и физического воспитания.

Ключевые слова: Петр Францевич Лесгафт (1837–1909), биология, физиология, анатомия человека, функциональная анатомия, физическое воспитание, семейная педагогика, семейное воспитание.

* Корреспондирующий автор

Адреса электронной почты: anvarm@mail.ru (А.М. Мамадалиев)

Copyright © 2025 by Cherkas Global University



Published in the USA
 Russian Journal of Biological Research
 Issued from 2014
 E-ISSN: 2413-7413
 2025. 12(1): 34-59

DOI: 10.13187/ejbr.2025.1.34

<https://rjbr.cherkasgu.press>


Methodological Notes on the Possibility of Electron Microscopic Study of Fossil Elasmobranch Teeth in Ultra-Low-Budget Laboratories

Pavel L. Alexandrov ^{a, b, *}, Mikhail K. Filippov ^c, Theodor K. Orekhov ^c

^a Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, RAS, Moscow, Russian Federation

^b Shemyakin-Ovchinnikov Institute of Bioorganic Chemistry, RAS, Moscow, Russian Federation

^c Semenov Institute of Chemical Physics, RAS (ICP RAS), Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper examines the scientific and applied significance of fossil elasmobranch teeth as a key source of evidence for systematics, phylogenetics, and evolutionary morphology. The review section shows that elasmobranch teeth (modified placoid scales associated with cartilaginous jaws) are highly species-specific and are therefore widely used for taxonomic identification, including through diagnostic keys and standardized protocols for collection and description. It is emphasized that, alongside dermal denticles (which lie outside the scope of ichthyodontology), teeth provide morphometric indicators relevant not only to elasmobranch systematics but also to broader questions in evolutionary biology and vertebrate comparative anatomy. In the context of phylogenetic reconstructions, the special role of “paleodontological” evidence is noted: from the classic works of the mid-20th century to modern digital studies, dental characters remain among the most informative “direct witnesses” of evolutionary transformations in sharks and their relatives. A current trend toward formalized processing of morphological data is discussed separately: to analyze patterns of morphogenesis and tooth variability in fossil and extant forms, multivariate statistical approaches are used – primarily PCA to reduce dimensionality and noise in complex character datasets, as well as discriminant analysis for taxonomic separation and for testing classification hypotheses. A major limitation of such reconstructions is identified as taphonomic damage and surface degradation of teeth, which reduce the accuracy of recognizing diagnostic characters and therefore require explicit consideration of taphonomy and stratigraphic context when interpreting morphology. The experimental section demonstrates that, for these purposes, it is possible to automate and re-digitize relatively old 1980s scanning electron microscopes with modest metrological performance and to obtain images comparable to those produced by modern compact electron microscopes at magnifications (useful magnification) from several thousand up to 5,000×, with an upper digitizable limit (due to mechanical instability and image blur) of up to 10,000×. A series of illustrative SEM micrographs of elasmobranch tooth microstructure is presented, with increasing magnification from 35× to 10,000×. For the lowest-magnification “electron macrophotography,” the possibilities of colorization/digital pseudo-color (pseudo-color mode) are shown, yielding coloration comparable to the specimen’s appearance under visual inspection and macrophotography. This approach is currently implemented using artificial intelligence/machine learning tools.

* Corresponding author

E-mail addresses: geochemicalphysics@gmail.com (P.L. Alexandrov)

Keywords: fossilization, taphonomy, elasmobranchs, diagenesis, mineralization, enameloid, SEM, EPMA, WDS, EDS, backscattered electron detector (BSE)

1. Введение

1.1. Систематическое и филогенетическое (эволюционное) значение морфологических признаков зубов ископаемых эласмобранхий.

Общеизвестно, что морфология зубов эласмобранхий – видоизмененных плакоидных чешуй, расположенных на хрящевых челюстях – имеет предельно большое значение в их таксономии и видовой идентификации; существуют идентификационные ключи для определения видов эласмобранхий на основе морфологических характеристик их зубов (Guinot et al., 2018; Pollerspöck, Straube, 2018; Pollerspöck, Straube, 2020). Наряду с дентикулами (которые, несмотря на название, не имеют ничего общего с ихтиоодонтологией, а представляют собой зубообразные чешуйки, покрывающие кожу акул (Atkinson, Collin, 2012; Sibert et al., 2017)), они являются видоспецифичными источниками морфометрических индикаторов и элементами таксономических ключей, имеющими собственные протоколы сбора, коллекционирования, подготовки и описания образцов (Mollen, 2019). Можно говорить об общебиологической эволюционной ценности зубов эласмобранхий в филогенетике не только эласмобранхий, но и в целом позвоночных, в том числе рептилий и млекопитающих (Ciampaglio et al., 2005; Berio, Debais-Thibaud, 2021).

С точки зрения филогенетического/эволюционного анализа (включая эволюционную биологию развития, прогнозирующую возможные формы морфогенеза), вклад палеоодонтологии в филогенетическую реконструкцию, в особенности филогенетическую реконструкцию эласмобранхий сложно переоценить. Задавая вопрос «Что есть эласмобранхий?», с точки зрения эволюционной палеонтологии, согласно работе (Maisey, 2012), мы неизбежно отвечаем на него с фокусом на прямых свидетелях эволюционных преобразований – зубах эласмобранхий (of fossil elasmobranchs have focused on teeth). Начиная с 1930-х гг. зубы эласмобранхий особо широко используются в анализе их эволюционных отношений (Moy-Thomas, 1938, 1939; Schaeffer, Williams, 1977; Janvier, Pradel, 2015). В настоящее время эти работы полностью ведутся в цифровом формате. Выявление гомологий и аналогий в филогении эласмобранхий по поверхности их зубов является классической тематикой (Gillis, Donoghue, 2007), опосредованной применением методов математической морфологии и морфологических ключей в кладистике.

Паттернинг зубов у ранних акул хорошо прослеживается в ходе эволюции их зубов (Maisey et al., 2014). Сейчас в данных целях, а также в целях таксономической идентификации с учётом филогении зубов акул/ископаемых акул по их зубам активно используется метод главных компонент (principal component analysis, PCA), который преобразует коррелированные переменные в новый набор некоррелированных переменных, называемых главными компонентами, что позволяет упростить сложные наборы данных, сохраняя при этом наиболее важную информацию (дисперсию) и уменьшая шум, что делает данные более интерпретируемыми; вместе с ним используется дискриминантный анализ (Marramà, Kriwet, 2017).

Препятствием к точному определению филогении являются тафономические разрушения поверхности зубов эласмобранхий (Boyne, 1970). Однако существуют подходы, учитывающие тафонию и биостратиграфию в данных исследованиях. Рассмотрим эти проблемы подробнее.

1.2. Биогеохимическое, биостратиграфическое, палеоэкологическое и палеобиогеографическое значение зубов ископаемых эласмобранхий

Исследование зубов ископаемых эласмобранхий имеет биостратиграфическое, палеоэкологическое и палеобиогеографическое значение, завязанное на их филогению (Maisey, 1984; Lewy, Cappetta, 1989; Marsili, 2008). Биоминерализация зубов эласмобранхий и микротафonomia их гистологических паттернов выражено реагирует на климатические, долгосрочные метеорологические, биогеохимические и общеэкологические изменения (Jambura et al., 2018; Feichtinger et al., 2021). Своеобразным связующим («прокси») между параметрами зубов эласмобранхий и условиями среды, в которой они обитали, может считаться изотопия их состава (Vennemann et al., 2001), причём не только по органогенам

(Holmes et al., 2005), но и, прежде всего, по кальцию, участвующему в процессах биоминерализации (Akhtar et al., 2020; Akhtar, 2021; Assemet et al., 2024) (хотя, строго говоря, исследования зубов эласмобранхий начались в 19 веке, когда ни изотопии как науки, ни масс-спектрографов типа первых, разработанных Астоном, не существовало (Cope, 1884; Tomes, 1898)). Изотопия биоминерализации (в том числе зубов эласмобранхий) может считаться полностью определяемой метаболическими сетями и гистоспецифичной (Hussey et al., 2012; Díaz-Delgado et al., 2025). Возможности позиционно-чувствительного масс-спектрометрического имэджинга и исследования зубов эласмобранхий дают возможность установить к каким формам биоминерализации можно привязать те или иные пути биологического фракционирования изотопов и каким тканям соответствуют эти пути.

В 1980-е гг. единственными доступными высокоуровневыми методами исследования гомологии различных структур в эволюции эласмобранхий с позиционной чувствительностью были иммунохимические методы (Samuel et al., 1987). Инструменты масс-спектрометрического картирования типа LAMMA не давали нужного разрешения для изотопного гистологического анализа на должном уровне – на уровне клеточной дифференцировки (Miyake et al., 1999).

Гистогенез с последующей биоминерализацией при формировании зубов эласмобранхий отслеживается с позиционной чувствительностью по элементному составу методами рентгеновской (волнодисперсионной или энергодисперсионной) спектроскопии и современными методами масс-спектрометрического имэджинга (Schnetz et al., 2016). Оба типа методов являются безметочными и не вносящими изменений в состав образца до анализа.

1.3. Процессы биоминерализации и фоссилизации зубов эласмобранхий, включая механизмы замещения и вторичные тафономические эффекты

Очевидно, что любые методы анализа, используемые для исследований твердого тела, хороши для анализа продуктов биоминерализации и последующей адекватной фоссилизации зубов, не исключая исследование механизмов замещения и рекристаллизации, если таковые имели место. Наверное, не следует подробно останавливаться на том, что распределение разных химических элементов в зубах (в том числе в enameloid-e – эмалеподобном слое) ископаемых эласмобранхий являлось предметом пристального интереса, начиная с появления первых рентгеноспектральных анализаторов (волнодисперсионных и энергодисперсионных) и специализированных микрозондов (Cameca, Camebax), а также установок исследования катодолюминесценции на основе растровых электронных микроскопов и разработки сравнительно доступных Оже-спектрометров на подобной платформе. Однако интерес к данной проблематике возник существенно раньше (и решался в тот ранний период с использованием поляризационной микроскопии, в том числе с opak-/ультраopak- иллюминаторами). Сравнительно релевантные современному уровню базовых знаний статьи по распределению минералов и паттернов минерализации в зубах эласмобранхий известны с 1970-х гг. (в частности по enameloid-y (Fosse et al., 1974)) и становятся тривиально общераспространенными с 1980-х гг. (в частности, по enameloid-y (Bendix-Almgreen, 1983; Kemp, 1985; Prostack, Skobe, 1988)). В настоящее время работы по распределению минералов и паттернов биоминерализации (и фоссилизационного замещения) в зубах эласмобранхий являются стандартным и неизбежным звеном их исследования, причём работы с скрупулёзным вниманием к enameloid-y до сих пор составляют существенную их часть (Sasagawa, 2002; Enault et al., 2015; Underwood et al., 2015).

Следует указать на причины, заставляющие нас достаточно подробно останавливаться на enameloid-e. «Эмалоид» (enameloid), также известный под названием «дуродентиум», несомненно, является гомологом (или аналогом) эмали млекопитающих, однако по минерализации она качественно отличается от неё – в отличие от гидроксиапатита млекопитающих, дуродентиум состоит из фторапатита и формируется за счёт эмиссии соответствующих неорганических ионов от клеток эпителия при генерации коллагенового матрикса одонтобластами. То есть, в отличие от эмали зуба млекопитающих, эмалоид/enameloid – продукт кооперативной активности эпителиальных и мезенхимальных клеток (Shellis, Miles, 1976; Daculsi, Kerebel, 1980; Sasagawa, 1998; Suga et al., 1992; Prostack, Seifert, 1993; Gillis, Donoghue, 2007; Kawasaki, 2013; Kawasaki et al., 2021; McCormack et al., 2024).

Вполне очевидно, что для исследования подобной эмали структуры необходим арсенал методов электронной микроскопии и рентгеновского, микрозондового анализа. Особенно это необходимо для дифференциального анализа процессов биоминерализации и замещения, в т. ч. в сравнительной палеоморфологии и тафономии, так как общеизвестно, что в зубах четвероногих (надкласса челюстноротых из группы костных позвоночных) дентин минерализуется ранее эмали, но в случае enameloid-а минерализация происходит, предшествуя дентину в зубах рыб. В то же время, у ряда рыб можно найти одновременно и enameloid, и настоящую эмаль (что, кстати, является систематическим/кладистическим признаком).

Поэтому наличие инструментария, позволяющего характеризовать эмаль и enameloid, является существенным вкладом в систематику и «тафономическую хемосистематику» рыб, реализуемую с привлечением инструментального морфологического исследования их зубов, в том числе – с учётом онтогенетической гетеродонтии (Shimada, 2002; Cullen, Marshall, 2019). В настоящее время для данных работ (в отличие от ранних 1990-х гг. (Sasagawa, Akai, 1992) можно использовать как расширенные техники кристаллографии (в обычных работах ограничивающейся стандартным рентгенодифрактографическим анализом (Kesmez et al., 2004)), так и методы рентгеновской микротомографии, которые позволяют одновременно характеризовать саму минеральную структуру зубов и одновременно проследить (визуализируя в колокализации) пути её васкуляризации (Ivanov, Nilov, 2016; Jambura et al., 2019).

1.4. Физиология и экофизиология эласмобранхий в контексте анализа их зубов

В аспекте физиологии и экофизиологии эласмобранхий ископаемые зубы эласмобранхий можно применять в реконструкции:

- Механизмов питания (Moss, 1977; Frazzetta, 1994), включая ранние механизмы всасывающего питания (Coates et al., 2019) (всасывающее питание у различных рыб – способ добычи пищи, при котором рыба резко открывает рот, создавая отрицательное давление, засасывая воду с добычей, в т.ч. мелкими беспозвоночными, планктоном, личинками, мелкой рыбой), а затем выплевывая воду через жабры, оставляя пищу в глотке);
- Функциональной анатомии и биомеханики питания (Wilga, Ferry, 2015);
- Эволюции способов захвата жертвы (Motta, Huber, 2004);
- Экологии питания (Wilga et al., 2007; Cortés et al., 2008; Paredes-Aliaga et al., 2024);
- Процессов резорбции зубов – продуктов биоминерализации – у эласмобранхий (Böttcher, 2024);
- Соотношения размеров тела, рациона и параметров зубов древних эласмобранхий, в том числе в зависимости от сезона (Shimada, 2002; Sommerville et al., 2011; McLennan, 2018);
- Влияние состава океана на биоминерализацию и сохранность зубов эласмобранхий (Leung et al., 2022);
- Онтогенетическую пластичность и степень филэмбриогенетической рекапитуляции превалирующих паттернов у эласмобранхий (и стабильность эволюционных трендов вплоть до современности) (Underwood et al., 2016; Meredith Smith et al., 2019; Dillon, Pimiento, 2025);
- Древних микробиомов эласмобранхий и их роли в физиологии последних (Perry et al., 2021).

1.5. Биогеографическое разнообразие местонахождений зубов ископаемых эласмобранхий

Принципиальная особенность, обеспечивающая заинтересованность биогеографов в изучении ископаемых зубов акул, заключается в повсеместной распространенности их на территории пространственно-разнесенных областях, странах и на разных континентах:

1. В Австралии и Новой Зеландии (Daymond, 1999; Rees et al., 2024), а также на островах Малайского архипелага (напр., Борнео), известного в западной литературе под названием Insulindia или Indo-Australian Archipelago (Kocsis, 2024);
2. В Азии, в частности в:
 - 2.1. Индии (Prasad et al., 2004; Prasad et al., 2017).
 - 2.2. Тайване (Lin et al., 2022).
 - 2.3. Тайланде (Cappetta et al., 2006).
 - 2.4. Южной Кореи (Yun, 2021).

3. В Африке (как Северной ([Adnet et al., 1990](#); [Boulembia, Adnet, 2023](#)), так и Южной ([Smale, 2005](#))).

4. В Антарктике и прилежащих островах (типа острова Сеймур, известного также под названием Симур, находящегося недалеко от полуострова Тринити, северной оконечности Антарктического полуострова ([Long, 1992](#)).

5. В Европе ([Leidner, Thies, 1999](#)), в частности в:

5.1. Австрии ([Feichtinger et al., 2025](#)).

5.2. Бельгии ([Iserbyt, De Schutter, 2012](#)).

5.3. Великобритании ([Paton, 1993](#)).

5.4. Германии ([Höltke et al., 2023](#)).

5.5. Западный Казахстан (общезвестно, что большая часть территории относится к Центральной Азии, но некоторые части, включая Западно-Казахстанскую область, находятся в Европе, делая Казахстан трансконтинентальным государством) ([Radwański, Marcinowski, 1996](#))

5.6. Польше ([Schultz, 1977](#)).

5.7. Европейской части России ([Mertiniene, 1995](#)).

5.8. Украине ([Sokolskyi, Guinot, 2021](#)).

6. Северной Америке, в частности:

6.1. Канаде ([Beavan, Russell, 1999](#); [Mutter et al., 2007](#)).

6.2. США ([Schubert, 2013](#); [Shimada et al., 2015](#); [Swinehart et al., 2020](#)).

7. Южной Америке/Латинской Америке, в частности:

7.1. Аргентине ([Johns et al., 2014](#)).

7.2. Перу ([Landini et al., 2017](#)).

7.3. Чили ([Suaez et al., 2004](#)).

Исходя из изложенного, очевидно, что коллекционное сохранение (или «музеефикация») зубов ископаемых эласмобранхий и их мультипараметрическая каталогизация с целью последующего исследования новыми и классическими методами микроскопии и микроанализа представляет собой актуальную задачу, поскольку, в широком контексте, каждый из таких образцов зубов эласмобранхий является кладезем не(до)оцененной информации ([Marsili, 2007](#); [Andreev, Motchurova-Dekova, 2010](#); [Clayton et al., 2013](#)).

Однако не все музеи, особенно провинциальные и в развивающихся странах имеют современные микроскопы, позволяющие работать над исследованием подобных структур на микроскопическом уровне. В особенности это утверждение верно для электронных микроскопов.

2. Методы

2.1. Потребность в доступных методах исследования.

Исходя из изложенного очевидно, что необходимо повсеместное внедрение методов, обеспечивающих прецизионное микроскопическое микроструктурное исследование зубов эласмобранхий. К таковым методам относятся методы электронной микроскопии, микрозондового анализа, катодолюминесценции в колонне СЭМ под пучком, электронной и рентгеновской микротомографии и т.д. (см. выше). Но они являются дорогостоящими и экзотическими, а в распоряжении многих лабораторий имеются старые электронные микроскопы (в особенности – на территории быв. СССР/СНГ), которые достаточны для визуального контроля образцов, но не имеют оцифровки. С одной стороны, они удобны для просмотра зубов ископаемых эласмобранхий, так как их увеличения и разрешения с избытком хватает для этих целей (хотя не хватает для анализа ультраструктуры клеточной стенки или наноструктуры кристаллов замещения и наноминералогии метаморфизма и метасоматоза в процессах фоссилизации). С другой стороны, необходимо создание средств автоматизации, которые сделали бы их даже при сохранении слабых (и устаревающих) технических параметров релевантными в задачах «палеодонтологических» исследований.

2.2. Выбор инструмента для автоматизации и фотосистемы автоматизации

Jeol JSM-T330A – сканирующий электронный микроскоп конца 1980-х годов, до сих пор обладающий приемлемыми характеристиками. К сожалению, он рассчитан на документирование результатов с помощью плёночных фотоаппаратов, что в наши дни

неудобно. Поэтому мы доработали его, используя цифровой фотоаппарат Canon A590IS, CHDK, кабель синхронизации затвора и переходник, распечатанный на 3D принтере. Подробнее процесс описан ниже.

Нами был использован фотоаппарат Canon A590IS (прошивка 100e), вместо него возможно использовать многие фотоаппараты фирмы Canon. Фотоаппарат должен поддерживать CHDK (Canon Hacker's Development Kit — резидентная программа для компактных и зеркальных цифровых фотоаппаратов фирмы Canon, базирующихся на процессорах DIGIC) (CHDK, 2025). К достоинствам Canon A590IS следует отнести возможность одновременного подключения USB кабеля, блока питания и кабеля передачи аналогового видеосигнала. Использовать фотоаппарат, не имеющий дополнительного входа питания и видеовыхода возможно, но не столь удобно.

2.3. Протокол автоматизации с использованием CHDK – практические рекомендации для пользователя.

2.3.1. Во-первых, требуется установить CHDK на фотоаппарат.

Для этого желательно использовать SD-карту объёмом не более 4 ГБ. Установку CHDK проще всего произвести так:

1. Подготовьте компьютер, подключённый к интернету, SD-карту, которая будет отформатирована, и любую фотографию, сделанную фотоаппаратом.

2. Установите на компьютере Java, если она ещё не установлена: <https://java.com/ru/download/>

3. Скачайте программу-установщик CHDK "STICK" по следующей ссылке: <https://www.softpedia.com/get/Multimedia/Graphic/Digital-Photo-Tools/Mitchell-STICK.shtml>

4. Распакуйте STICK, запустите файл, соответствующий вашей ОС. Для ОС Windows требуется запустить файл stick.bat или stick.cmd (один из них может не приводить к успешной установке CHDK, в таком случае нужно использовать другой) с правами администратора.

5. Перетащите мышью фотографию в красный прямоугольник программы или выберите путь к файлу кнопкой Browse (в некоторых случаях может сработать только один метод). Затем следуйте подсказкам программы. В случае, если вы используете SD-карту объёмом более 4 GB, STICK может не справиться с её подготовкой, в таком случае можно выбрать карту меньшего объёма или подготовить карту самостоятельно, по следующей инструкции: <http://chdk.clan.su/publ/1-1-0-7>

6. После завершения подготовки переведите флажок на карте в положение Lock.

2.3.2. Во-вторых, требуется настроить CHDK:

1. Нажмите на фотоаппарате <Print>, <Menu>.

2. Вы окажетесь в меню CHDK. Нажатием <Set> войдите в раздел <Enhanced photo operations>.

3. С помощью кнопок <Set>, <Up>, <Down> установите следующие параметры:

- a. Disable overrides – No

- b. Override TV type – long exp

- c. Long exp value – введите сюда выдержку, требуемую вашим микроскопом (в случае Jeol JSM-T330A – 38 секунд).

- d. Override AV, Override ISO, Subj dist – тут вы можете выставить диафрагму, ISO и фокусное расстояние фотоаппарата. Мы используем значения «20, 12, 250»

- e. При выставлении значений меню, описанных в предыдущих двух пунктах, слева от значений должны появиться галочки, подтверждающие активность введённых значений.

- f. Disable overrides on start – снять галочку. Этот пункт заставляет CHDK сохранить введённые значения при выключении фотоаппарата.

4. Дважды нажав <Menu>, вернитесь в основное меню, и с помощью <Set>, <Up>, <Down> перейдите в раздел «CHDK settings», в подраздел «Remote parameters».

5. Установите «Enable remote», «Switch type – one push», «Control mode – normal».

6. Нажмите на фотоаппарате <Menu>, <Print>.

2.3.3. В-третьих, следует создать линию синхронизации. Для синхронизации используется импульс напряжением в 3-5В и током в несколько миллиампер, подаваемый по линиям питания USB-входа фотоаппарата со стандартной полярностью. Появление сигнала эквивалентно частичному нажатию на кнопку фотографирования, исчезновение

сигнала эквивалентно полному нажатию на кнопку (началу фотографирования). При создании линии синхронизации в связке Jeol JSM-T330A – Canon A590IS можно поступить следующим образом:

1. Взять кабель USB-A – mini-USB-B.
2. Отрезать разъём USB-A, освободить, зачистить и залудить чёрный и красный провода, белый и зелёный провода можно отрезать.
3. Снять заглушку на правой части передней панели микроскопа и отвинтить два винта, поддерживающих полосу с кнопкой <Shutter>.
4. Найти на ближайшей к кнопке Shutter плате линии земли и питания (для этого посмотрите на pinout любой из микросхем; земля обозначена как Gnd, питание – Vcc).
5. Кнопка <Shutter> имеет две группы переключающих контактов, одна из которых не используется. Подпаяйте к неиспользуемой нормально разомкнутой паре контактов красный провод кабеля USB и линию питания, найденную в предыдущем пункте.
6. Чёрный провод припаяйте к найденной линии земли.
7. Соберите микроскоп.
8. Теперь при подключении USB кабеля к фотоаппарату и нажатию на кнопку <Shutter> будет автоматически начинаться съёмка.

2.3.4. В-четвёртых, требуется переходник для оптического подключения фотоаппарата к экрану микроскопа. Его параметры зависят от используемой системы, для случая связки Jeol JSM-T330A – Canon A590IS была создана следующая модель (см. [Рисунок 1](https://www.tinkercad.com/things/2i7MgsxqgKt-sem)): <https://www.tinkercad.com/things/2i7MgsxqgKt-sem>

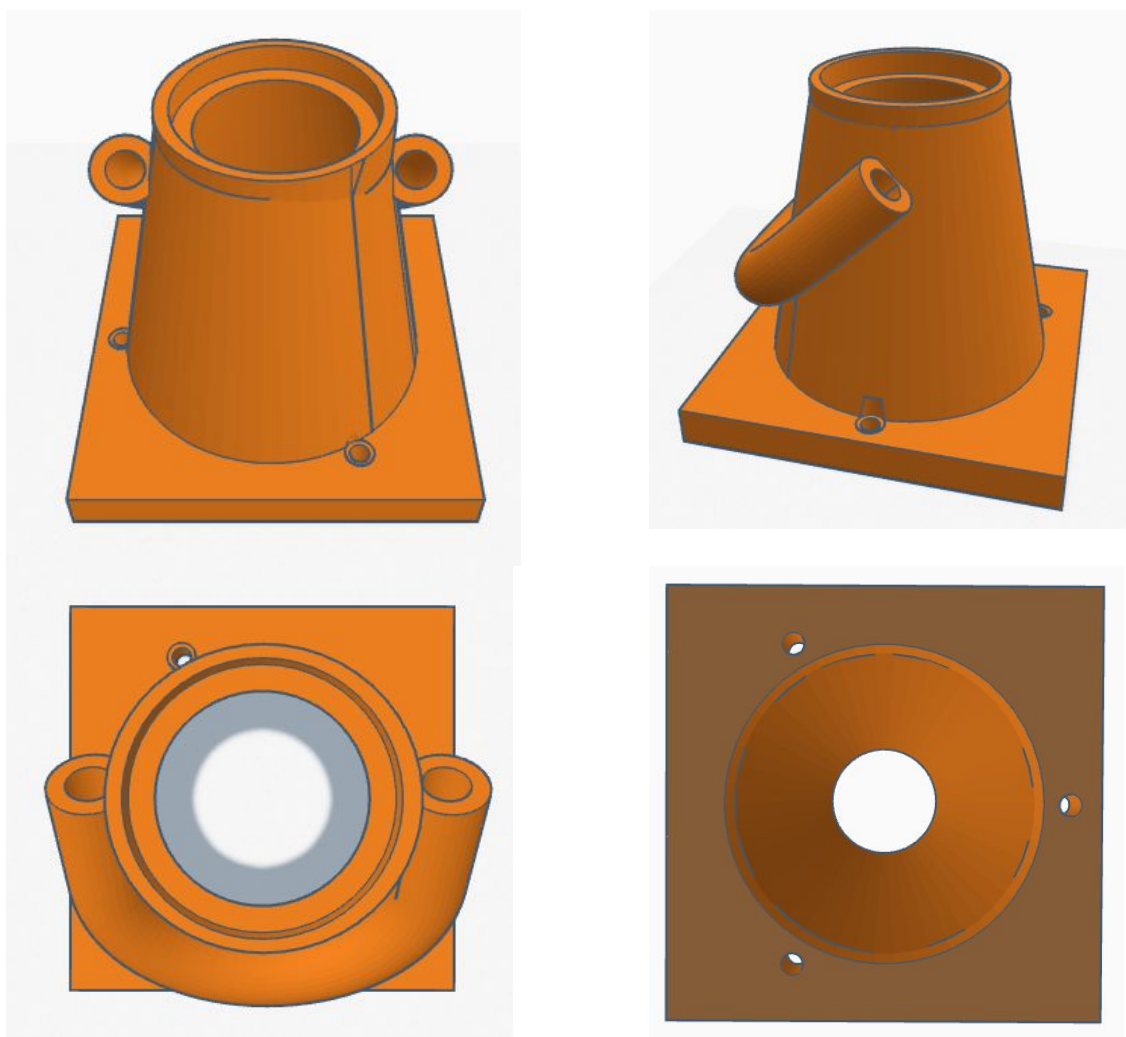


Рис. 1. Переходник для оптического подключения фотоаппарата к экрану микроскопа.

Можно также улучшить обзор маленького экрана растрового микроскопа, подключив к фотоаппарату телевизор с аналоговым видеовходом (через кабель AVC-BC300, STV-250N или стандартный камкордерный кабель, см. схему) или входом Scart (через тот же кабель и переходник «Видео-Scart»).



Рис. 2. Классический способ подключения к внешнему телемонитору переходника STV-250N

В итоге всех вышеперечисленных мероприятий создаётся система, выглядящая как это показано на [Рисунках 3а, 3б](#).

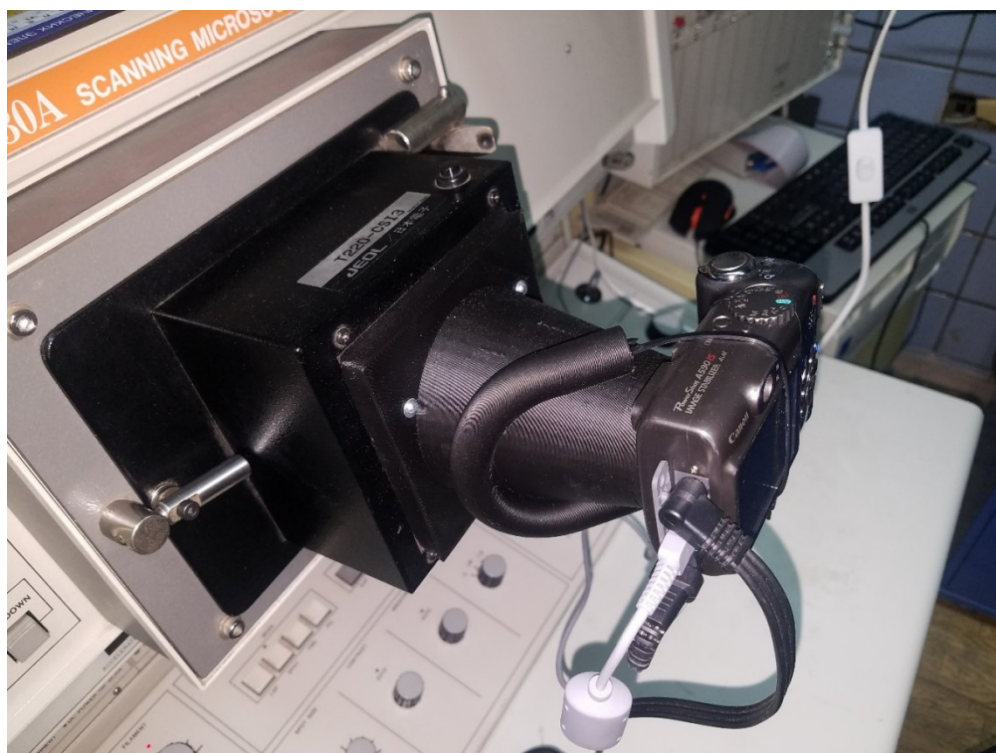


Рис. 3а. Общий вид переходника с фотоаппаратом, расположенного и закрепленного на мониторе сканирующего электронного микроскопа

2.4. Последовательность действий оператора. Процесс фотографирования

1. Настройтесь на изображение, как обычно.
2. Установите минимальный Spot size, настройте яркость и контрастность.
3. Настройте время экспозиции кадра (в случае Jeol JSM-T330A – нажмите клавишу «Qucik» слева от «Shutter»).
4. Закройте крышку фотодокументатора. Включите фотоаппарат. В случае Canon A590IS, фотоаппарат должен быть в режиме «М», и требуется выбрать ручной фокус.

5. Для Jeol JSM-T330A имеет смысл добиться гашения послесвечения экрана. Для этого опустите клавишу «Slow 1», не отпуская её, подождите 3-4 секунды, опустите клавишу «Shutter», отпустите клавишу «Slow 1», после этого отпустите клавишу «Shutter».

6. Если всё сделано правильно, фотоаппарат сделает кадр с экрана микроскопа за время экспозиции, затем за то же время сделает темновой кадр, вычтет второй из первого, и запишет его на SD-карту.

7. Полученную серию фотографий удобно обрабатывать программой Irfanview в режиме «File → Batch conversion/rename → Advanced».



Рис. 3б. Система с внешним телемонитором в процессе фотографирования с экрана СЭМ

2.5. Размещение образцов

Образцы размещаются на вращающемся столике так, как это показано на [Рисунке 4а](#) (вид сверху) и [Рисунке 4б](#) (вид сбоку).

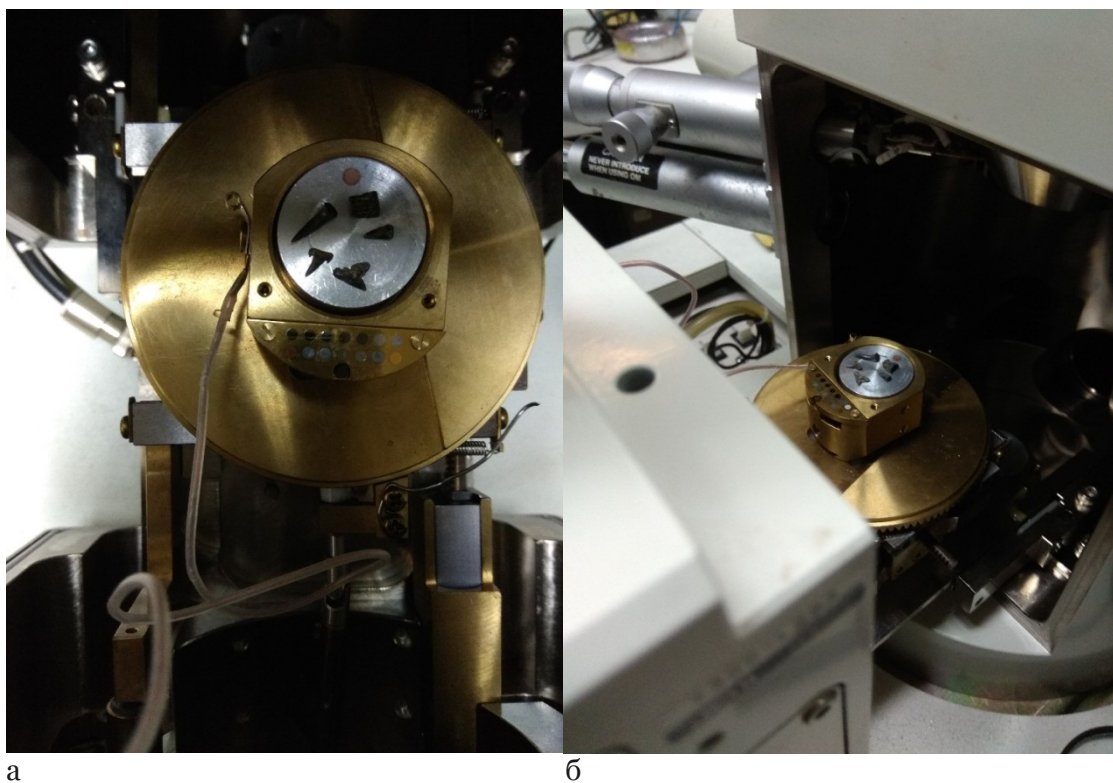


Рис. 4. Размещение образцов на вращающемся столике электронного микроскопа.

3. Результаты

Результаты – электронные микрофотографии изображений зубов ископаемых эласмобранхий при разных увеличениях представлены на сериях изображений ниже:

– **Рисунок 5.** Общий вид зуба при 35х, масштабная линейка/скейлбар – 500 мкм. Ускоряющее напряжение – 5 кВ. На рисунке (а) показана исходная микрофотография, на рисунке (б) её колоризация с использованием средств искусственного интеллекта.

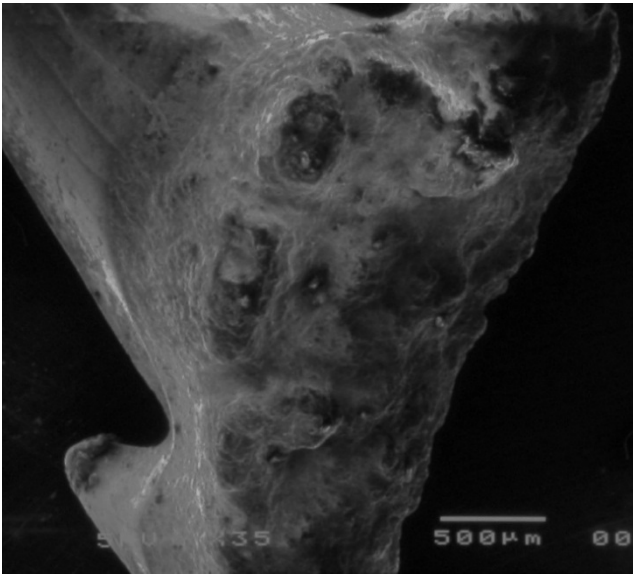
– **Рисунок 6.** Тот же образец. Увеличение 200х, скейлбар – 100 мкм, ускоряющее напряжение – 5 кВ.

– **Рисунок 7.** Тот же образец. Увеличение 750х, скейлбар – 10 мкм, ускоряющее напряжение – 5 кВ.

– **Рисунок 8:** Тот же образец. Увеличение 1 500х, скейлбар – 10 мкм, ускоряющее напряжение – 5 кВ.

– **Рисунок 9:** Тот же образец. Увеличение 5 000 х, ускоряющее напряжение – 5 кВ.

– **Рисунок 10:** Тот же образец. Увеличение 10 000 х, ускоряющее напряжение – 5 кВ.



а



б

Рис. 5. Общий вид зуба при увеличении 35х (а – исходная микрофотография; б – её колоризация с использованием средств искусственного интеллекта), масштабная линейка/ скейлбар – 500 мкм. Ускоряющее напряжение – 5 кВ

Можно видеть, что в диапазоне от до 35 х («электронная макрофотография») до 5 000 х увеличения все микроструктуры визуализируются достаточно хорошо, а на границе между 5 000 х и 10 000 х начинается размывание изображения, довольно сильно мешающее качественной визуализации на микрофотографии с 10 000 х. В то же время, когда очевидны причины размытия, связанные с нестабильностью по току, механическими вибрациями и т.д., нестабильности могут быть устранены (но этот вопрос не входит в предмет интереса, описываемый в настоящей статье, а для палеонтолога, работавшего с оптическим микроскопом, 5 000 х – также довольно существенный прогресс в понимании микроархитектуры ископаемого образца).

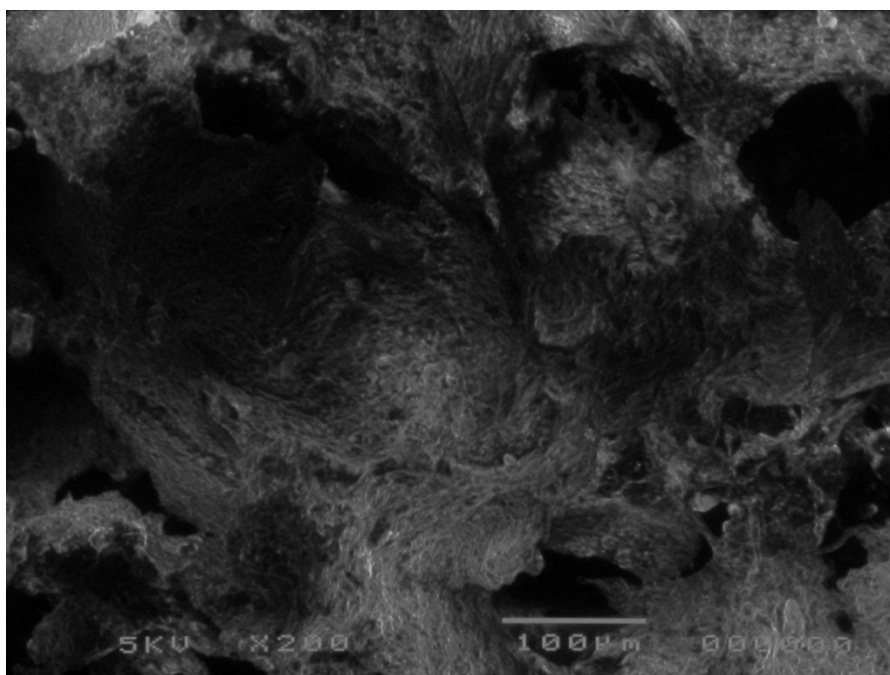


Рис. 6. Тот же образец. Увеличение 200х, скейлбар – 100 мкм, ускоряющее напряжение – 5 кВ

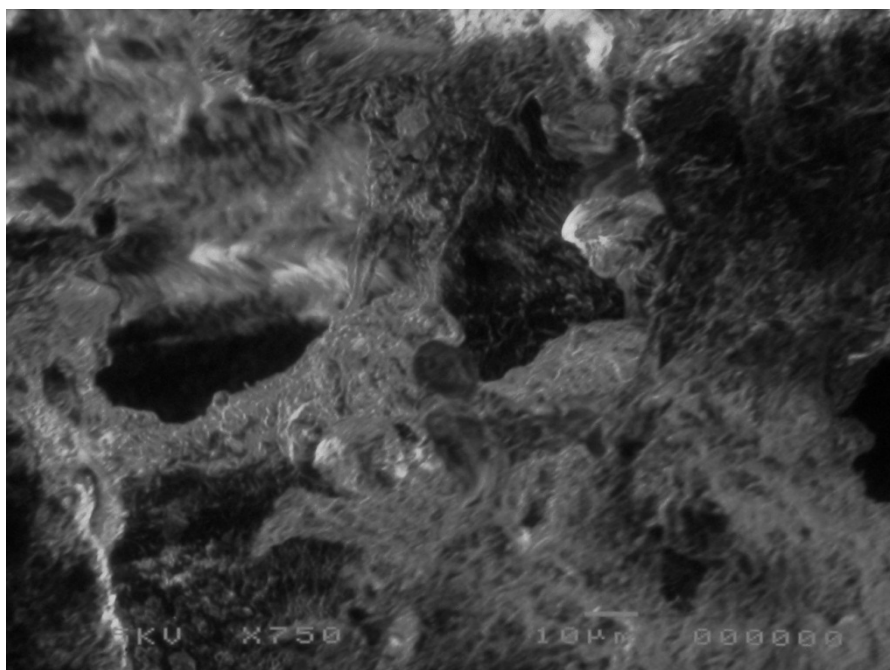


Рис. 7. Тот же образец. Увеличение 750х, скейлбар – 10 мкм, ускоряющее напряжение – 5 кВ

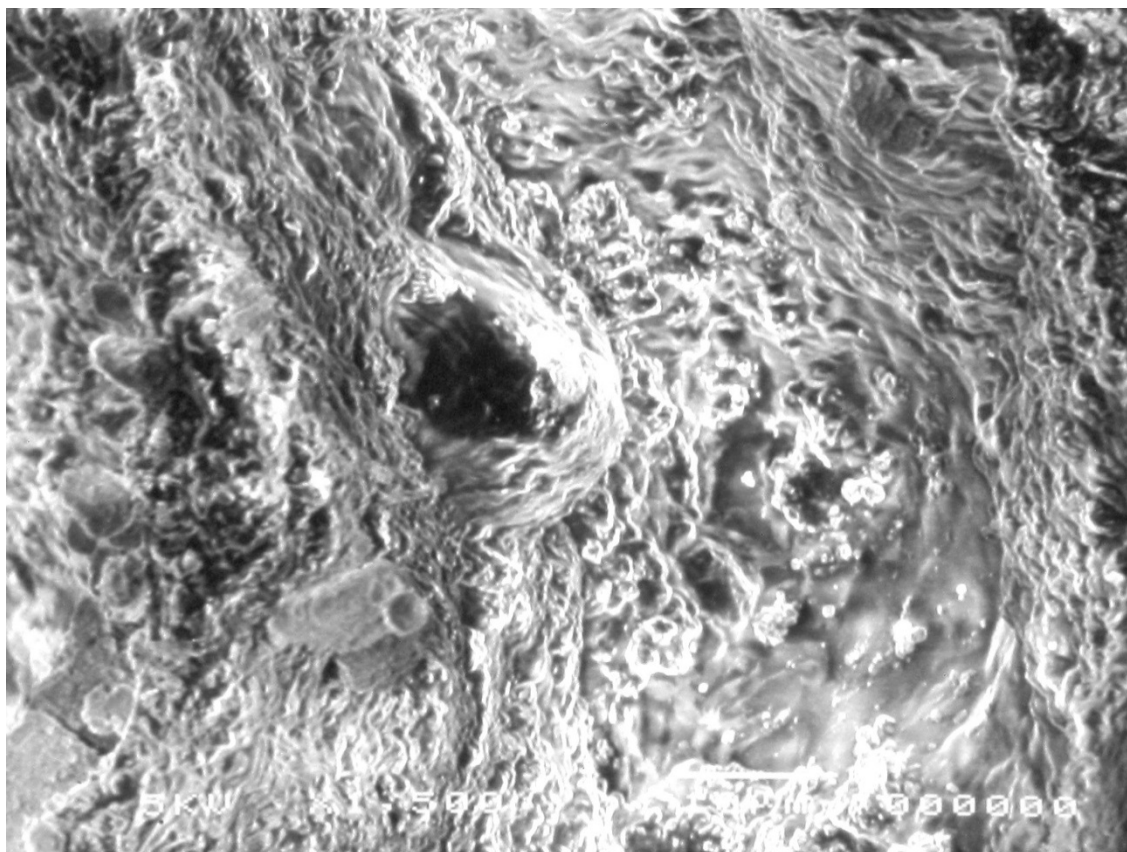


Рис. 8. Тот же образец. Увеличение 1 500х, скейлбар – 10 мкм, ускоряющее напряжение – 5 кВ

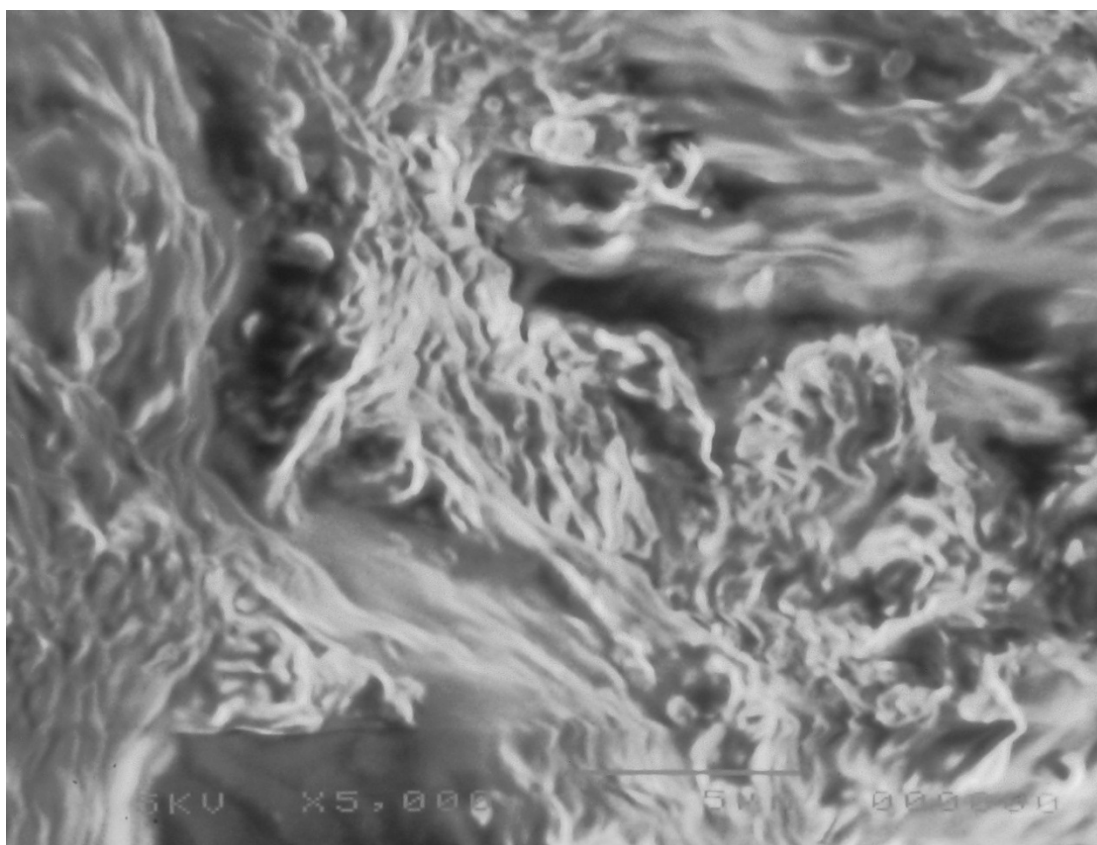


Рис. 9. Тот же образец. Увеличение 5 000 х, ускоряющее напряжение – 5 кВ

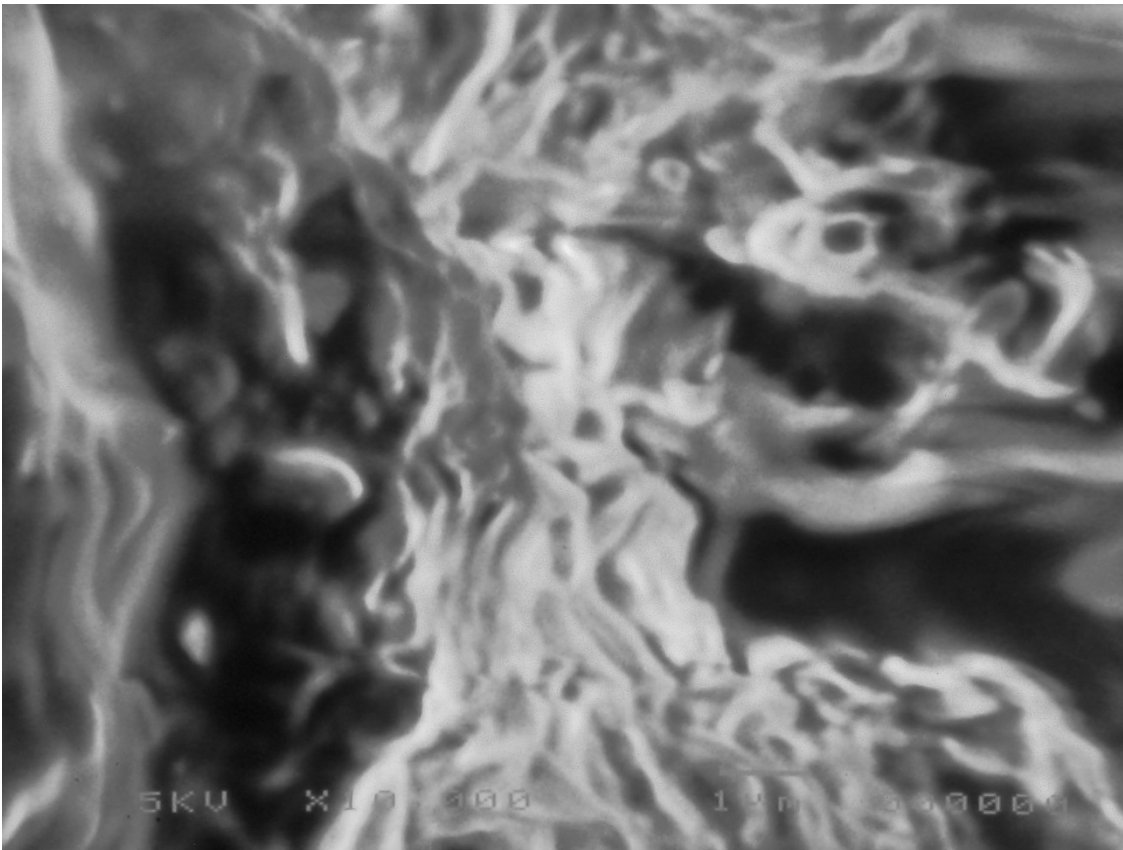


Рис. 10. Тот же образец. Увеличение 10 000 x, ускоряющее напряжение – 5 кВ

4. Заключение

В статье рассматривается научная и прикладная значимость зубов ископаемых эласмобранхий как ключевого источника данных для систематики, филогенетики и эволюционной морфологии. В обзорной части показано, что зубы эласмобранхий (видоизменённые плакоидные чешуи, связанные с хрящевыми челюстями) обладают высокой видоспецифичностью и потому широко используются в таксономической идентификации, включая применение диагностических ключей и стандартизованных протоколов сбора и описания. Подчёркивается, что наряду с кожными дентикулами (не относящимися к ихтиоодонтологии) зубы дают морфометрические индикаторы, релевантные не только для систематики эласмобранхий, но и для более широких задач эволюционной биологии и сравнительной анатомии позвоночных. В контексте филогенетических реконструкций отмечается особая роль «палеоодонтологических» данных: начиная с классических работ середины XX века и вплоть до современных цифровых исследований, именно зубные признаки остаются одним из наиболее информативных «прямых свидетелей» эволюционных преобразований у акул и их родственников. Отдельно обсуждается современный тренд к формализованной обработке морфологических данных: для анализа паттернов морфогенеза и вариабельности зубов у ископаемых и современных форм применяются методы многомерной статистики, прежде всего РСА как способ уменьшения размерности и шумов в сложных наборах признаков, а также дискриминантный анализ для таксономического разделения и проверки классификационных гипотез. Существенным ограничением этих реконструкций названы тафономические повреждения и деградация поверхности зубов, снижающие точность распознавания диагностических признаков, что требует явного учёта тафономии и стратиграфического контекста при интерпретации морфологии.

Тем самым эта статья формулирует рамку для комплексного подхода, в котором морфологическая систематика и филогенетика зубов эласмобранхий сопрягаются с оценкой сохранности и микроморфологических критериев/дескрипторов, получаемых методами

электронной микроскопии, что должно повысить надёжность идентификаций и эволюционных выводов при работе с ископаемым материалом. В контексте настоящей работы также принципиально, что геохимическое картирование должно быть SEM-навигационным. Это снижает риск артефактов – продуктов ошибочного приписывания тафономических или диагенетических градиентов физиологии и позволяет корректно сравнивать зубы из разных палеобассейнов, осадочных фаций и климатических режимов.

В экспериментальной части показано, что можно для этих целей автоматизировать и вновь оцифровать достаточно старые сканирующие электронные микроскопы 1980-х гг. с невысокими метрологическими характеристиками и получать на них изображения на уровне достаточно современных компактных электронных микроскопов с увеличением (полезным увеличением) от нескольких тысяч до 5 000 крат и с предельным выводимым на оцифровку (в силу механической нестабильности и размытия изображения) до 10 000 крат. Приведен ряд иллюстративных электронных микрофотографий микроструктуры зубов эласмобранхий с нарастающим увеличением от 35х до 10 000х. Для минимальной по увеличению «электронной макрофотографии» показаны возможности колоризации/создания цифрового псевдоцвета (pseudo-color mode), сопоставимого с цветом образца в условиях визуального наблюдения и макрофотографии. Этот подход реализуется сейчас с использованием средств искусственного интеллекта/машинного обучения.

5. Вклад авторов

1. Павел Л. Александров – Автоматизация электронного микроскопа. Экспедиционные работы по сбору зубов ископаемых эласмобранхий. Получение микрофотографий ископаемых зубов эласмобранхий в диапазоне увеличения от 35 х до 10 000 х (Alexandrov et al., 2019). Написание раздела «Материалы и методы» и полного руководства пользователя электронного микроскопа JEOL JSM, оцифрованного и модернизированного им.

2. Михаил К. Филиппов – Реставрация вакуумных систем, очистка колонны электронного микроскопа, ввод в эксплуатацию нового источника питания, замена технических масел.

3. Фёдор К. Орехов – Вклад в написание рентгеноспектральной части обзора.

6. Благодарности

Авторы выражают признательность организаторам общедоступной инфраструктуры просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии в ИХФ РАН и в корпусе ИБХФ РАН (<https://timeresolvedelectronmicroscopy.com/>; <https://www.electronmicroscopy.tech/>) за коллаборацию и обсуждение возможностей электронно-микроскопического исследования зубов ископаемых эласмобранхий в низкобюджетных лабораториях, благодаря чему и была написана эта статья.

Литература

CHDK – CHDK. Список поддерживаемых фотоаппаратов. [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/CHDK#Поддерживаемые_модели_цифровых_фотоаппаратов (дата обращения: 25.09.2025).

Adnet et al., 1990 – Adnet S., Marivaux L., Cappetta H., Charruault A.L., El Mabrouk E., Jiquel S., Ammar H.K., Marandat B., Marzougui W., Merzeraud G., Temani R. Diversity and renewal of tropical elasmobranchs around the Middle Eocene Climatic Optimum (MECO) in North Africa: New data from the lagoonal deposits of Djebel el Kébar, Central Tunisia // *Palaeontologia Electronica*. 1990. 23(2): a38.

Akhtar et al., 2020 – Akhtar A.A., Santi L.M., Griffiths M.L., Becker M., Eagle R.A., Kim S., Kocsis L., Rosenthal Y., Higgins J.A. A record of the $\delta^{44}/^{40}\text{Ca}$ and [Sr] of seawater over the last 100 million years from fossil elasmobranch tooth enamel // *Earth and Planetary Science Letters*. 2020. 543: 116354.

Akhtar, 2021 – Akhtar A.A. Ca cycling in seawater: insights from isotopic studies of elasmobranch teeth and shallow-water carbonates. Princeton University, 2021.

Alexandrov et al., 2019 – Alexandrov P.L., Gradova M.A., Gradov O.V. SEM measurements of teeth of Elasmobranchs (Chondrichthyes, Elasmobranchii) [preliminary non-processed raw data]. IEEE Dataport. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.21227/e6sz-d392>

- Andreev, Motchurova-Dekova, 2010 – Andreev P., Motchurova-Dekova N. Checklist of the fossil shark and bony fish teeth (Elasmobranchii and Actinopterygii) housed at the National Museum of Natural History, Sofia // *Bulletin of the Natural History Museum*. 2010. 3: 115-129.
- Assemat et al., 2024 – Assemat A., Adnet S., Bayez K., Hassler A., Arnaud-Godet F., Mollen F.H., Girard C., Martin J.E.. Exploring diet shifts and ecology in modern sharks using calcium isotopes and trace metal records of their teeth // *Journal of Fish Biology*. 2024. 105(5): 1469-1481.
- Atkinson, Collin, 2012 – Atkinson C.J., Collin S.P. Structure and topographic distribution of oral denticles in elasmobranch fishes // *The Biological Bulletin*. 2012. 222(1): 26-34.
- Beavan, Russell, 1999 – Beavan N.R., Russell A.P. An elasmobranch assemblage from the terrestrial-marine transitional lethbridge coal zone (Dinosaur Park Formation: Upper Campanian), Alberta, Canada // *Journal of Paleontology*. 1999. 73(3): 494-503.
- Bendix-Almgreen, 1983 – Bendix-Almgreen S.E. Carcharodon megalodon from the Upper Miocene of Denmark, with comments on elasmobranch tooth enameloid: coronoin // *Bulletin of the Geological Society of Denmark*. 1983. 32(1-2): 1-32.
- Berio, Debiais-Thibaud, 2021 – Berio F., Debiais-Thibaud M. Evolutionary developmental genetics of teeth and odontodes in jawed vertebrates: a perspective from the study of elasmobranchs // *Journal of Fish Biology*. 2021. 98(4): 906-918.
- Böttcher, 2024 – Böttcher R. Root resorption during tooth replacement in sharks – A unique character of the Hybodontiformes (Chondrichthyes, Elasmobranchii) // *Palaeodiversity*. 2024. 17(1): 121-194.
- Boulembia, Adnet, 2023 – Boulembia S., Adnet S. A new Palaeogene elasmobranch fauna (Tebessa region, eastern Algeria) and the importance of Algerian-Tunisian phosphates for the North African fossil record // *Annales de Paléontologie*. 2023. 109(3): 102632.
- Boyne, 1970 – Boyne P.J. Study of the chronologic development and eruption of teeth in elasmobranchs // *Journal of dental research*. 1970. 49(3): 556-560.
- Cappetta et al., 2006 – Cappetta H., Buffetaut E., Cuny G., Suteethorn V. A new elasmobranch assemblage from the Lower Cretaceous of Thailand // *Palaeontology*. 2006. 49(3): 547-555.
- Ciampaglio et al., 2005 – Ciampaglio C.N., Wray G.A., Corliss B.H. A toothy tale of evolution: convergence in tooth morphology among marine Mesozoic–Cenozoic sharks, reptiles, and mammals // *The Sedimentary Record*. 2005. 3(4): 4-8.
- Clayton et al., 2013 – Clayton A.A., Ciampaglio C.N.C., Cicimurri D.J. An Inquiry into the Stratigraphic Occurrence of a Claibornian (Eocene) Vertebrate Fauna from Covington County, Alabama // *Bulletin of the Alabama Museum of Natural History*. 2013. 31(2).
- Coates et al., 2019 – Coates M.I., Tietjen K., Olsen A.M., Finarelli J.A. High-performance suction feeding in an early elasmobranch // *Science Advances*. 2019. 5(9): eaax2742.
- Cope, 1884 – Cope E.D.. On the structure of the skull in the elasmobranch genus *Didymodus* // *Proceedings of the American Philosophical Society*. 1884. 21(116): 572-590.
- Cortés et al., 2008 – Cortés E., Papastamatiou Y.P., Carlson J.K., Ferry-Graham L., Wetherbee B.M., Cyrino J.E.P., Bureau D.P., Kapoor B.G. An overview of the feeding ecology and physiology of elasmobranch fishes // *Feeding and digestive functions of fishes*. 2008. Pp. 393-443.
- Cullen, Marshall, 2019 – Cullen J.A., Marshall C.D. Do sharks exhibit heterodonty by tooth position and over ontogeny? A comparison using elliptic Fourier analysis // *Journal of Morphology*. 2019. 280(5): 687-700.
- Daculsi, Kerebel, 1980 – Daculsi G., Kerebel L.M.. Ultrastructural study and comparative analysis of fluoride content of enameloid in sea-water and fresh-water sharks // *Archives of Oral Biology*. 1980. 25(3): 145-151.
- Daymond, 1999 – Daymond S.M. *Gondwanodus irwinensis* gen. et sp. nov., a new elasmobranch from the Early Permian (Late Sakmarian) Fossil Cliff Member of the Holmwood Shale, Perth Basin, Western Australia // *Records – Western Australian Museum*. 1999. 19(4): 371-378.
- Díaz-Delgado et al., 2025 – Díaz-Delgado E., Chung M.T., Magozzi S., Willis T.J., Trueman C.N. Potential metabolic records in isotope signals of chondrichthyan hard tissues // *Journal of Fish Biology*. 2025. In press.

- Dillon, Pimiento, 2025 – Dillon E.M., Pimiento C. Aligning paleobiological research with conservation priorities using elasmobranchs as a model // *Paleobiology*. 2025. 51(1): 112-131.
- Enault et al., 2015 – Enault S., Guinot G., Koot M. B., Cuny G. Chondrichthyan tooth enameloid: past, present, and future // *Zoological Journal of the Linnean Society*. 2015. 174(3): 549-570.
- Feichtinger et al., 2021 – Feichtinger I., Ivanov A.O., Winkler V., Dojen C., Kindlimann R., Kriwet J., Pfaff C., Schraut G. Stumpf S.. Scarce ctenacanthiform sharks from the Mississippian of Austria with an analysis of Carboniferous elasmobranch diversity in response to climatic and environmental changes // *Journal of Vertebrate Paleontology*. 2021. 41(2): e1925902.
- Feichtinger et al., 2025 – Feichtinger I., Weinmann A.E., Harzhauser, M., Schwarzhan W., Golebiowski R., Pollerspöck J. Deep-marine elasmobranchs from the Badenian (Langhian, Middle Miocene) of the Central Paratethys of Austria // *Austrian Journal of Earth Sciences*. 2025. 118(1): 205-217.
- Fosse et al., 1974 – Fosse G., Risnes S., Holmbakken N. Mineral distribution and mineralization pattern in the enameloid of certain elasmobranchs // *Archives of Oral Biology*. 1974. 19(9): 771-IN5.
- Frazzetta, 1994 – Frazzetta T.H. Feeding mechanisms in sharks and other elasmobranchs. Biomechanics of feeding in vertebrates (pp. 31-57). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1994.
- Gillis, Donoghue, 2007 – Gillis J.A., Donoghue P.C. The homology and phylogeny of chondrichthyan tooth enameloid // *Journal of Morphology*. 2007. 268(1): 33-49.
- Gillis, Donoghue, 2007 – Gillis J.A., Donoghue P.C. The homology and phylogeny of chondrichthyan tooth enameloid // *Journal of Morphology*. 2007. 268(1): 33-49.
- Guinot et al., 2018 – Guinot G., Adnet S., Shimada K., Underwood C.J., Siverson M., Ward, D.J., Kriwet J., Cappetta H. On the need of providing tooth morphology in descriptions of extant elasmobranch species // *Zootaxa*. 2018. 4461(1): 118-126.
- Holmes et al., 2005 – Holmes L., Huveneers C., Raoult V., Clarke T. M., Dietz C., Meyer L. $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, and $\delta^{34}\text{S}$ isotope values from preserved elasmobranch jaws: Implications for ecological studies from existing collections // *Marine Environmental Research*. 2005. 207: 107063.
- Höltke et al., 2023 – Höltke O., Salvador R.B., Rasser M.W. Trophic relationships in the Early Miocene Upper Marine Molasse of Baden-Württemberg, Southwest Germany, with special emphasis on the elasmobranch fauna // *Palaeontologia Electronica*. 2023. 26(3): 1-38.
- Hussey et al., 2012 – Hussey N.E., MacNeil M.A., Olin J.A., McMeans B.C., Kinney M.J., Chapman D.D., Fisk A.T. Stable isotopes and elasmobranchs: tissue types, methods, applications and assumptions // *Journal of fish biology*. 2012. 80(5): 1449-1484.
- Iserbyt, De Schutter, 2012 – Iserbyt A., De Schutter P.J. Quantitative analysis of Elasmobranch assemblages from two successive Ypresian (early Eocene) facies at Marke, western Belgium // *Geologica belgica*. 2012. 15(3): 146-155.
- Ivanov, Nilov, 2016 – Ivanov A.O., Nilov S.P. Microtomographic research of the vascularization system in the teeth of Palaeozoic sharks / *Abstract book of the 2016 Annual Bruker microCT User Meeting*. 2016. Pp. 203-206.
- Jambura et al., 2018 – Jambura P.L., Pfaff C., Underwood C.J., Ward D.J., Kriwet J. Tooth mineralization and histology patterns in extinct and extant snaggletooth sharks, Hemipristis (Carcharhiniformes, Hemigaleidae) – Evolutionary significance or ecological adaptation? // *PLoS One*. 2018. 13(8): e0200951.
- Jambura et al., 2019 – Jambura P.L., Kindlimann R., López-Romero F., Marramà G., Pfaff C., Stumpf S., Türtscher J., Underwood C.J., Ward D.J., Kriwet J. (2019). Micro-computed tomography imaging reveals the development of a unique tooth mineralization pattern in mackerel sharks (Chondrichthyes; Lamniformes) in deep time // *Scientific Reports*. 2019. 9(1): 9652.
- Janvier, Pradel, 2015 – Janvier P., Pradel A. Elasmobranchs and their extinct relatives: diversity, relationships, and adaptations through time // *Fish Physiology*. 2015. 34: 1-17.
- Johns et al., 2014 – Johns M.J., Albanesi G.L., Voldman G.G. Freshwater shark teeth (Family Lonchidiidae) from the Middle-Upper Triassic (Ladinian-Carnian) Paramillo Formation in the Mendoza Precordillera, Argentina // *Journal of Vertebrate Paleontology*. 2014. 34(3): 512-523.
- Kawasaki et al., 2021 – Kawasaki K., Keating J.N., Nakatomi M., Welten M., Mikami M., Sasagawa I., Puttick M.N., Donoghue P.C., Ishiyama M. Coevolution of enamel, ganoin, enameloid, and their matrix SCPP genes in osteichthyans // *iScience*. 2021. 24(1): 102023.

- [Kawasaki, 2013](#) – Kawasaki K. Odontogenic ameloblast-associated protein (ODAM) and amelotin: Major players in hypermineralization of enamel and enameloid // *Journal of Oral Biosciences*. 2013. 55(2): 85-90.
- [Kemp, 1985](#) – Kemp N.E. Ameloblastic secretion and calcification of the enamel layer in shark teeth. *Journal of Morphology*. 1985. 184(2): 215-230.
- [Kesmez et al., 2004](#) – Kesmez M., Lyon J., Cocke D.L., Westgate J., McWhinney H., Grady T.L. Characterization of the evolutionary aspects of great white shark teeth by x-ray diffraction methods and other supporting techniques // *Adv. X-ray Anal.* 2004. 47: 327-337.
- [Kocsis, 2024](#) – Kocsis L. The elasmobranch fossil record of the Indo-Australian Archipelago since the Miocene: a literature review and new discoveries from Northern Borneo // *Diversity*. 2024. 16(6): 323.
- [Landini et al., 2017](#) – Landini W., Collareta A., Pesci F., Di Celma C., Urbina M., Bianucci G. A secondary nursery area for the copper shark *Carcharhinus brachyurus* from the late Miocene of Peru // *Journal of South American Earth Sciences*. 2017. 78: 164-174.
- [Leidner, Thies, 1999](#) – Leidner A., Thies D.. Placoid scales and oral teeth of Late Jurassic elasmobranchs from Europe // *Mesozoic fishes*. 1999. 2: 29-40.
- [Leung et al., 2022](#) – Leung J.Y., Nagelkerken I., Pistevos J.C., Xie Z., Zhang S., Connell S.D. Shark teeth can resist ocean acidification // *Global Change Biology*. 2022. 28(7): 2286-2295.
- [Lewy, Cappetta, 1989](#) – Lewy Z., Cappetta H. Senonian elasmobranch teeth from Israel. Biostratigraphic and paleoenvironmental implications // *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Monatshefte*. 1989: 212-222.
- [Lin et al., 2022](#) – Lin C.Y., Lin C.H., Shimada K. A previously overlooked, highly diverse early Pleistocene elasmobranch assemblage from southern Taiwan // *PeerJ*. 2022. 10: e14190.
- [Long, 1992](#) – Long D.J. Sharks from the La Meseta Formation (Eocene), Seymour Island, Antarctic Peninsula // *Journal of Vertebrate Paleontology*. 1992. 12(1): 11-32.
- [Maisey et al., 2014](#) – Maisey J.G., Turner S., Naylor G.J., Miller R.F. Dental patterning in the earliest sharks: implications for tooth evolution // *Journal of morphology*. 2014. 275(5): 586-596.
- [Maisey, 1984](#) – Maisey J.G. Higher elasmobranch phylogeny and biostratigraphy // *Zoological Journal of the Linnean Society*. 1984. 82(1-2): 33-54.
- [Maisey, 2012](#) – Maisey J.G. What is an 'elasmobranch'? The impact of palaeontology in understanding elasmobranch phylogeny and evolution // *Journal of Fish Biology*. 2012. 80(5): 918-951.
- [Marramà, Kriwet, 2017](#) – Marramà G., Kriwet J. Principal component and discriminant analyses as powerful tools to support taxonomic identification and their use for functional and phylogenetic signal detection of isolated fossil shark teeth // *PloS one*. 2017. 12(11): e0188806.
- [Marsili, 2007](#) – Marsili S. Pliocene elasmobranchs in the collection of the “museo civico giuseppe scarabelli” of Imola // *Quaderno di Studi e Notizie di Storia Naturale della Romagna*. 2007. 24: 19-36.
- [Marsili, 2008](#) – Marsili S. Systematic, paleoecologic and paleobiogeographic analysis of the Plio-Pleistocene Mediterranean elasmobranch fauna // *Atti Soc. Toscana Sci. Natur. Ser. A*. 2008. 113: 81-88.
- [McCormack et al., 2024](#) – McCormack J., Jaouen K., Bourgon N., Sisma-Ventura G., Tacail T.J., Müller W., Tütken T. Zinc isotope composition of enameloid, bone and muscle of gilt-head seabreams (*Sparus aurata*) raised in pisciculture and their relation to diet // *Marine Biology*. 2024. 171(3): 65.
- [McLennan, 2018](#) – McLennan L. Tooth wear, microwear and diet in elasmobranchs (Doctoral dissertation, University of Leicester), 2018.
- [Meredith Smith et al., 2019](#) – Meredith Smith M., Underwood C., Goral T., Healy C., Johanson Z. Growth and mineralogy in dental plates of the holocephalan *Harriotta raleighana* (Chondrichthyes): novel dentine and conserved patterning combine to create a unique chondrichthyan dentition // *Zoological letters*. 2019. 5(1): 11.
- [Mertiniene, 1995](#) – Mertiniene R. The teeth of *Symmorium reniforme* cope from the Upper Carboniferous of the Moscow area (Russia) // *Geobios*. 1995. 28: 147-150.
- [Miyake et al., 1999](#) – Miyake T., Vaglia J.L., Taylor L.H., Hall B.K. Development of dermal denticles in skates (Chondrichthyes, Batoidea): patterning and cellular differentiation // *Journal of Morphology*. 1999. 241(1): 61-81.

[Mollen, 2019](#) – Mollen F.H. Making Louis Agassiz's wish come true: combining forces and a new protocol for collecting comparative skeletal material of sharks, skates and rays, as a comment and an addition to 'The need of providing tooth morphology in descriptions of extant elasmobranch species' by Guinot et al. (2018) // *Zootaxa*. 2019. 4571(2): 295-300.

[Moss, 1977](#) – Moss S. Feeding mechanisms in sharks // *American Zoologist*. 1977. 17(2): 355-364.

[Motta, Huber, 2004](#) – Motta P.J., Huber D.R. Prey capture behavior and feeding mechanics of elasmobranchs // *Biology of sharks and their relatives*. 2004. 1: 165-195.

[Moy-Thomas, 1938](#) – Moy-Thomas, J.A. (1938). LXVII. On the teeth of a new Elasmobranch from the Calcareous sandstones of Glencarholm, Eskdale, Dumfriesshire // *Annals and Magazine of Natural History*. 1938. 2(12): 612-613.

[Moy-Thomas, 1939](#) – Moy-Thomas J.A.. The early evolution and relationships of the elasmobranchs // *Biological Reviews*. 1939. 14(1): 1-26.

[Mutter et al, 2007](#) – Mutter R.J., De Blanger K., Neuman A.G. Elasmobranchs from the Lower Triassic Sulphur Mountain Formation near Wapiti Lake (BC, Canada) // *Zoological Journal of the Linnean Society*. 2007. 149(3): 309-337.

[Paredes-Aliaga et al., 2024](#) – Paredes-Aliaga M.V., Botella H., Romero A. Testing dental microwear as a proxy for characterising trophic ecology in fossil elasmobranchs (chondrichthyans) // *Swiss Journal of Palaeontology*. 2024. 143(1): 29.

[Paton, 1993](#) – Paton R.L. Elasmobranch fishes from the Viséan of East Kirkton, West Lothian, Scotland // *Earth and Environmental Science Transactions of The Royal Society of Edinburgh*. 1993. 84(3-4): 329-330.

[Perry et al., 2021](#) – Perry C.T., Pratte Z.A., Clavere-Graciette A., Ritchie K.B., Hueter R.E., Newton A.L., Fischer G.C., Dinsdale E.A., Doane M.P., Wilkinson K.A., Bassos-Hull K. Elasmobranch microbiomes: emerging patterns and implications for host health and ecology // *Animal Microbiome*. 2021. 3(1): 61.

[Pollerspöck, Straube, 2018](#) – Pollerspöck J., Straube N. An identification key to elasmobranch genera based on dental morphological characters Part A: Squalomorph sharks (Superorder Squalomorphii) // *Bulletin of Fish Biology Volume*. 2018. 18(1/2): 77-105.

[Pollerspöck, Straube, 2020](#) – Pollerspöck J., Straube N. An identification key to elasmobranch species based on dental morphological characters. Part B: extant Lamniform sharks (Superorder Galeomorphii: Order Lamniformes) // *Bulletin of Fish Biology*. 2020. 19: 27-64.

[Prasad et al., 2004](#) – Prasad G.V., Manhas B.K., Arratia G. Elasmobranch and actinopterygian remains from the Jurassic and Cretaceous of India // *Mesozoic fishes*. 2004. 3: 625-638.

[Prasad et al., 2017](#) – Prasad G.V., Verma V., Sahni A., Lourembam R.S., Rajkumari P. Elasmobranch fauna from the upper most part of the Cretaceous Bagh Group, Narmada valley, India // *Island Arc*. 2017. 26(5): e12200.

[Prostak, Seifert, 1993](#) – Prostak K.S., Seifert P. Enameloid formation in two tetraodontiform fish species with high and low fluoride contents in enameloid // *Archives of oral biology*. 1993. 38(12): 1031-1044.

[Prostak, Skobe, 1988](#) – Prostak K.S., Skobe Z. Ultrastructure of odontogenic cells during enameloid matrix synthesis in tooth buds from an elasmobranch, Raja erinacea // *American journal of anatomy*. 1988. 182(1): 59-72.

[Radwański, Marcinowski, 1996](#) – Radwański A., Marcinowski R. Elasmobranch teeth from the mid-Cretaceous sequence of the Mangyshlak Mountains, Western Kazakhstan // *Acta Geologica Polonica*. 1996. 46(1-2): 165-169.

[Rees et al., 2024](#) – Rees J., Campbell H.J., Simes J.E. The first Triassic elasmobranch teeth from the Southern Hemisphere (Canterbury, New Zealand) // *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*. 2024. 67(4): 426-433.

[Samuel et al., 1987](#) – Samuel N., Bessem C., Bringas Jr, P., Slavkin H.C. Immunochemical homology between elasmobranch scale and tooth extracellular matrix proteins in *Cephaloscyllium ventriosum* // *Journal of Craniofacial Genetics and Developmental Biology*. 1987. 7(4): 371-386.

[Sasagawa, 1998](#) – Sasagawa I. Mechanisms of mineralization in the enameloid of elasmobranchs and teleosts // *Connective tissue research*. 1998. 39(1-3): 207-214.

- Sasagawa, 2002 – Sasagawa I. Mineralization patterns in elasmobranch fish // *Microscopy research and technique*. 2002. 59(5): 396-407.
- Sasagawa, Akai, 1992 – Sasagawa I., Akai J. The fine structure of the enameloid matrix and initial mineralization during tooth development in the sting rays, *Dasyatis akajei* and *Urolophus aurantiacus* // *Microscopy*. 1992. 41(4): 242-252.
- Schaeffer, Williams, 1977 – Schaeffer B., Williams M. Relationships of fossil and living elasmobranchs // *American Zoologist*. 1977. 17(2): 293-302.
- Schnetz et al., 2016 – Schnetz L., Pfaff C., Kriwet J. Tooth development and histology patterns in lamniform sharks (Elasmobranchii, Lamniformes) revisited // *Journal of Morphology*. 2016. 277(12): 1584-1598.
- Schubert, 2013 – Schubert J. Elasmobranch and osteichthyan fauna of the Rattlesnake Mountain Sandstone, Aguja Formation (Upper Cretaceous; Campanian), West Texas (Doctoral dissertation), 2013.
- Schultz, 1977 – Schultz O. Elasmobranch and teleost fish remains from the Korytnica Clays (Middle Miocene; Holy Cross Mountains, Poland) // *Acta Geologica Polonica*. 1977. 27(2): 201-210.
- Shellis, Miles, 1976 – Shellis R.P., Miles A.E.W.. Observations with the electron microscope on enameloid formation in the common eel (*Anguilla anguilla*; Teleostei) / *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences*. 1976. 194(1115): 253-269.
- Shimada et al., 2015 – Shimada K., Popov E. V., Siverson M., Welton B.J., Long D.J. A new clade of putative plankton-feeding sharks from the Upper Cretaceous of Russia and the United States // *Journal of Vertebrate Paleontology*. 2015. 35(5): e981335.
- Shimada, 2002 – Shimada K. Teeth of embryos in lamniform sharks (Chondrichthyes: Elasmobranchii) // *Environmental Biology of Fishes*. 2002. 63(3): 309-319.
- Shimada, 2002 – Shimada K. The relationship between the tooth size and total body length in the white shark // *Journal of Fossil Research*. 2002. 35(2): 28-33.
- Sibert et al., 2017 – Sibert E.C., Cramer K.L., Hastings P.A., Norris R.D. Methods for isolation and quantification of microfossil fish teeth and elasmobranch dermal denticles (ichthyoliths) from marine sediments. *Palaeontologia Electronica*. 2017. 20.
- Smale, 2005 – Smale M.J. The diet of the ragged-tooth shark *Carcharias taurus* Rafinesque 1810 in the Eastern Cape, South Africa // *African Journal of Marine Science*. 2005. 27(1): 331-335.
- Sokolskyi, Guinot, 2021 – Sokolskyi T., Guinot G. Elasmobranch (chondrichthyes) assemblages from the Albian (lower Cretaceous) of Ukraine // *Cretaceous Research*. 2021. 117: 104603.
- Sommerville et al., 2011 – Sommerville E., Platell M.E., White W.T., Jones A.A., Potter I.C. Partitioning of food resources by four abundant, co-occurring elasmobranch species: relationships between diet and both body size and season // *Marine and Freshwater Research*. 2011. 62(1): 54-65.
- Suarez et al., 2004 – Suarez M., Encinas A., Ward D. An Early Miocene elasmobranch fauna from the Navidad Formation, Central Chile, South America // *Cainozoic Research*. 2004. 4(1/2): 3-18.
- Suga et al., 1992 – Suga S., Taki Y., Ogawa M. Iron in the enameloid of perciform fish // *Journal of dental research*. 1992. 71(6): 1316-1325.
- Swinehart et al., 2020 – Swinehart A.L., Hoenig M.M., Ginter M. A new addition to the Devonian elasmobranch fauna of Michigan, USA // *The American midland naturalist*. 2020. 184(1): 109-115.
- Tomes, 1898 – Tomes C.S. VII. Upon the structure and development of the enamel of elasmobranch fishes // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Containing Papers of a Biological Character*. 1898. (190): 443-464.
- Underwood et al., 2015 – Underwood C.J., Johanson Z., Welten M., Metscher B., Rasch, L.J., Fraser G.J., Smith M.M. Development and evolution of dentition pattern and tooth order in the skates and rays (Batoidea; Chondrichthyes) // *PloS one*. 2015. 10(4): e0122553.
- Underwood et al., 2016 – Underwood C., Johanson Z., Smith M.M. Cutting blade dentitions in squaliform sharks form by modification of inherited alternate tooth ordering patterns // *Royal Society open science*. 2016. 3(11): 160385.
- Vennemann et al., 2001 – Vennemann T.W., Hegner E., Cliff G., Benz G.W. Isotopic composition of recent shark teeth as a proxy for environmental conditions // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2001. 65(10): 1583-1599.
- Wilga et al., 2007 – Wilga C.D., Motta P.J., Sanford C.P. Evolution and ecology of feeding in elasmobranchs // *Integrative and Comparative Biology*. 2007. 47(1): 55-69.

Wilga, Ferry, 2015 – Wilga C.A., Ferry L.A. Functional anatomy and biomechanics of feeding in elasmobranchs // *Fish physiology*. 2015. 34: 153-187.

Yun, 2021 – Yun C.G. First deep-sea shark fossil teeth from the Miocene of South Korea // *Zoodiversity*. 2021. 55(3): 225-232.

References

Adnet et al., 1990 – Adnet, S., Marivaux, L., Cappetta, H., Charruault, A.L., El Mabrouk, E., Jiquel, S., Ammar, H.K., Marandat, B., Marzougui, W., Merzeraud, G., Temani, R. (2020). Diversity and renewal of tropical elasmobranchs around the Middle Eocene Climatic Optimum (MECO) in North Africa: New data from the lagoonal deposits of Djebel el Kébar, Central Tunisia. *Palaeontologia Electronica*. 23(2): a38.

Akhtar et al., 2020 – Akhtar, A.A., Santi, L.M., Griffiths, M.L., Becker, M., Eagle, R.A., Kim, S., Kocsis, L., Rosenthal, Y., Higgins, J.A. (2020). A record of the $\delta^{44}/^{40}\text{Ca}$ and [Sr] of seawater over the last 100 million years from fossil elasmobranch tooth enamel. *Earth and Planetary Science Letters*. 543: 116354.

Akhtar, 2021 – Akhtar, A.A. (2021). Ca cycling in seawater: insights from isotopic studies of elasmobranch teeth and shallow-water carbonates. Princeton University.

Alexandrov et al., 2019 – Alexandrov P.L., Gradova M.A., Gradov O.V. (2019). SEM measurements of teeth of Elasmobranchs (Chondrichthyes, Elasmobranchii) [preliminary non-processed raw data]. IEEE Dataport. DOI: <http://dx.doi.org/10.21227/e6sz-d392>

Andreev, Motchurova-Dekova, 2010 – Andreev, P., Motchurova-Dekova, N. (2010). Checklist of the fossil shark and bony fish teeth (Elasmobranchii and Actinopterygii) housed at the National Museum of Natural History, Sofia. *Bulletin of the Natural History Museum*. 3: 115-129.

Assemat et al., 2024 – Assemat, A., Adnet, S., Bayez, K., Hassler, A., Arnaud-Godet, F., Mollen, F.H., Girard, C., Martin, J.E. (2024). Exploring diet shifts and ecology in modern sharks using calcium isotopes and trace metal records of their teeth. *Journal of Fish Biology*. 105(5): 1469-1481.

Atkinson, Collin, 2012 – Atkinson, C.J., Collin, S.P. (2012). Structure and topographic distribution of oral denticles in elasmobranch fishes. *The Biological Bulletin*. 222(1): 26-34.

Beavan, Russell, 1999 – Beavan, N.R., Russell, A.P. (1999). An elasmobranch assemblage from the terrestrial-marine transitional lethbridge coal zone (Dinosaur Park Formation: Upper Campanian), Alberta, Canada. *Journal of Paleontology*. 73(3): 494-503.

Bendix-Almgreen, 1983 – Bendix-Almgreen, S.E. (1983). Carcharodon megalodon from the Upper Miocene of Denmark, with comments on elasmobranch tooth enameloid: coronoin. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*. 32(1-2): 1-32.

Berio, Debais-Thibaud, 2021 – Berio, F., Debais-Thibaud, M. (2021). Evolutionary developmental genetics of teeth and odontodes in jawed vertebrates: a perspective from the study of elasmobranchs. *Journal of Fish Biology*. 98(4): 906-918.

Böttcher, 2024 – Böttcher, R. (2024). Root resorption during tooth replacement in sharks – A unique character of the Hybodontiformes (Chondrichthyes, Elasmobranchii). *Palaeodiversity*. 17(1): 121-194.

Boulema, Adnet, 2023 – Boulema, S., Adnet, S. (2023). A new Palaeogene elasmobranch fauna (Tebessa region, eastern Algeria) and the importance of Algerian-Tunisian phosphates for the North African fossil record. *Annales de Paléontologie*. 109(3): 102632.

Boyne, 1970 – Boyne, P.J. (1970). Study of the chronologic development and eruption of teeth in elasmobranchs. *Journal of dental research*. 49(3): 556-560.

Cappetta et al., 2006 – Cappetta, H., Buffetaut, E., Cuny, G., Suteethorn, V. (2006). A new elasmobranch assemblage from the Lower Cretaceous of Thailand. *Palaeontology*. 49(3): 547-555.

CHDK – CHDK. Spisok podderzhivaemykh fotoapparatov [List of supported cameras]. [Electronic resource]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/CHDK#Поддерживаемые_модели_цифровых_фотоаппаратов (date of access: 25.09.2025). [in Russian]

Ciampaglio et al., 2005 – Ciampaglio, C.N., Wray, G.A., Corliss, B.H. (2005). A toothy tale of evolution: convergence in tooth morphology among marine Mesozoic–Cenozoic sharks, reptiles, and mammals. *The Sedimentary Record*. 3(4): 4-8.

Clayton et al., 2013 – Clayton, A.A., Ciampaglio, C.N.C., Cicimurri, D.J. (2013). An Inquiry into the Stratigraphic Occurrence of a Claibornian (Eocene) Vertebrate Fauna from Covington County, Alabama. *Bulletin of the Alabama Museum of Natural History*. 31(2).

Coates et al., 2019 – Coates, M.I., Tietjen, K., Olsen, A.M., Finarelli, J.A. (2019). High-performance suction feeding in an early elasmobranch. *Science Advances*. 5(9): eaax2742.

Cope, 1884 – Cope, E.D. (1884). On the structure of the skull in the elasmobranch genus *Didymodus*. *Proceedings of the American Philosophical Society*. 21(116): 572-590.

Cortés et al., 2008 – Cortés, E., Papastamatiou, Y.P., Carlson, J.K., Ferry-Graham, L., Wetherbee, B.M., Cyrino, J.E.P., Bureau, D.P., Kapoor, B.G. (2008). An overview of the feeding ecology and physiology of elasmobranch fishes. *Feeding and digestive functions of fishes*. Pp. 393-443.

Cullen, Marshall, 2019 – Cullen, J.A., Marshall, C.D. (2019). Do sharks exhibit heterodonty by tooth position and over ontogeny? A comparison using elliptic Fourier analysis. *Journal of Morphology*. 280(5): 687-700.

Daculsi, Kerebel, 1980 – Daculsi, G., Kerebel, L.M. (1980). Ultrastructural study and comparative analysis of fluoride content of enameloid in sea-water and fresh-water sharks. *Archives of Oral Biology*. 25(3): 145-151.

Daymond, 1999 – Daymond, S.M. (1999). *Gondwanodus irwinensis* gen. et sp. nov., a new elasmobranch from the Early Permian (Late Sakmarian) Fossil Cliff Member of the Holmwood Shale, Perth Basin, Western Australia. *Records – Western Australian Museum*. 19(4): 371-378.

Díaz-Delgado et al., 2025 – Díaz-Delgado, E., Chung, M.T., Magozzi, S., Willis, T.J., Trueman, C.N. (2025). Potential metabolic records in isotope signals of chondrichthyan hard tissues. *Journal of Fish Biology*. In press.

Dillon, Pimiento, 2025 – Dillon, E.M., Pimiento, C. (2025). Aligning paleobiological research with conservation priorities using elasmobranchs as a model. *Paleobiology*. 51(1): 112-131.

Enault et al., 2015 – Enault, S., Guinot, G., Koot, M. B., Cuny, G. (2015). Chondrichthyan tooth enameloid: past, present, and future. *Zoological Journal of the Linnean Society*. 174(3): 549-570.

Feichtinger et al., 2021 – Feichtinger, I., Ivanov, A.O., Winkler, V., Dojen, C., Kindlimann, R., Kriwet, J., Pfaff, C., Schraut, G., Stumpf, S. (2021). Scarce ctenacanthiform sharks from the Mississippian of Austria with an analysis of Carboniferous elasmobranch diversity in response to climatic and environmental changes. *Journal of Vertebrate Paleontology*. 41(2): e1925902.

Feichtinger et al., 2025 – Feichtinger, I., Weinmann, A.E., Harzhauser, M., Schwarzhan, W., Golebiowski, R., Pollerspöck, J. (2025). Deep-marine elasmobranchs from the Badenian (Langhian, Middle Miocene) of the Central Paratethys of Austria. *Austrian Journal of Earth Sciences*. 118(1): 205-217.

Fosse et al., 1974 – Fosse, G., Risnes, S., Holmbakken, N. (1974). Mineral distribution and mineralization pattern in the enameloid of certain elasmobranchs. *Archives of Oral Biology*. 19(9): 771-IN5.

Frazzetta, 1994 – Frazzetta, T.H. (1994). Feeding mechanisms in sharks and other elasmobranchs. In *Biomechanics of feeding in vertebrates* (pp. 31-57). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Gillis, Donoghue, 2007 – Gillis, J.A., Donoghue, P.C. (2007). The homology and phylogeny of chondrichthyan tooth enameloid. *Journal of Morphology*. 268(1): 33-49.

Gillis, Donoghue, 2007 – Gillis, J.A., Donoghue, P.C. (2007). The homology and phylogeny of chondrichthyan tooth enameloid. *Journal of Morphology*. 268(1): 33-49.

Guinot et al., 2018 – Guinot, G., Adnet, S., Shimada, K., Underwood, C.J., Siverson, M., Ward, D.J., Kriwet, J., Cappetta, H. (2018). On the need of providing tooth morphology in descriptions of extant elasmobranch species. *Zootaxa*. 4461(1): 118-126.

Holmes et al., 2005 – Holmes, L., Huveneers, C., Raoult, V., Clarke, T. M., Dietz, C., Meyer, L. (2025). $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, and $\delta^{34}\text{S}$ isotope values from preserved elasmobranch jaws: Implications for ecological studies from existing collections. *Marine Environmental Research*. 207: 107063.

Höltke et al., 2023 – Höltke, O., Salvador, R.B., Rasser, M.W. (2023). Trophic relationships in the Early Miocene Upper Marine Molasse of Baden-Württemberg, Southwest Germany, with special emphasis on the elasmobranch fauna. *Palaeontologia Electronica*. 26(3): 1-38.

- Hussey et al., 2012 – Hussey, N.E., MacNeil, M.A., Olin, J.A., McMeans, B.C., Kinney, M.J., Chapman, D.D., Fisk, A.T. (2012). Stable isotopes and elasmobranchs: tissue types, methods, applications and assumptions. *Journal of fish biology*. 80(5): 1449-1484.
- Iserbyt, De Schutter, 2012 – Iserbyt, A., De Schutter, P.J. (2012). Quantitative analysis of Elasmobranch assemblages from two successive Ypresian (early Eocene) facies at Marke, western Belgium. *Geologica belgica*. 15(3): 146-155.
- Ivanov, Nilov, 2016 – Ivanov, A.O., Nilov, S.P. (2016). Microtomographic research of the vascularization system in the teeth of Palaeozoic sharks. *Abstract book of the 2016 Annual Bruker microCT User Meeting*. Pp. 203-206.
- Jambura et al., 2018 – Jambura, P.L., Pfaff, C., Underwood, C.J., Ward, D.J., Kriwet, J. (2018). Tooth mineralization and histology patterns in extinct and extant snaggletooth sharks, Hemipristis (Carcharhiniformes, Hemigaleidae) – Evolutionary significance or ecological adaptation? *PLoS One*. 13(8): e0200951.
- Jambura et al., 2019 – Jambura, P.L., Kindlimann, R., López-Romero, F., Marramà, G., Pfaff, C., Stumpf, S., Türtscher, J., Underwood, C.J., Ward, D.J., Kriwet, J. (2019). Micro-computed tomography imaging reveals the development of a unique tooth mineralization pattern in mackerel sharks (Chondrichthyes; Lamniformes) in deep time. *Scientific Reports*. 9(1): 9652.
- Janvier, Pradel, 2015 – Janvier, P., Pradel, A. (2015). Elasmobranchs and their extinct relatives: diversity, relationships, and adaptations through time. *Fish Physiology*. 34: 1-17.
- Johns et al., 2014 – Johns, M.J., Albanesi, G.L., Voldman, G.G. (2014). Freshwater shark teeth (Family Lonchidiidae) from the Middle-Upper Triassic (Ladinian-Carnian) Paramillo Formation in the Mendoza Precordillera, Argentina. *Journal of Vertebrate Paleontology*. 34(3): 512-523.
- Kawasaki et al., 2021 – Kawasaki, K., Keating, J.N., Nakatomi, M., Welten, M., Mikami, M., Sasagawa, I., Puttick, M.N., Donoghue, P.C., Ishiyama, M. (2021). Coevolution of enamel, ganoin, enameloid, and their matrix SCPP genes in osteichthyans. *iScience*. 24(1): 102023.
- Kawasaki, 2013 – Kawasaki, K. (2013). Odontogenic ameloblast-associated protein (ODAM) and amelotin: Major players in hypermineralization of enamel and enameloid. *Journal of Oral Biosciences*. 55(2): 85-90.
- Kemp, 1985 – Kemp, N.E. (1985). Ameloblastic secretion and calcification of the enamel layer in shark teeth. *Journal of Morphology*. 184(2): 215-230.
- Kesmez et al., 2004 – Kesmez, M., Lyon, J., Cocke, D.L., Westgate, J., McWhinney, H., Grady, T.L. (2004). Characterization of the evolutionary aspects of great white shark teeth by x-ray diffraction methods and other supporting techniques. *Adv. X-ray Anal.* 47: 327-337.
- Kocsis, 2024 – Kocsis, L. (2024). The elasmobranch fossil record of the Indo-Australian Archipelago since the Miocene: a literature review and new discoveries from Northern Borneo. *Diversity*. 16(6): 323.
- Landini et al., 2017 – Landini, W., Collareta, A., Pesci, F., Di Celma, C., Urbina, M., Bianucci, G. (2017). A secondary nursery area for the copper shark *Carcharhinus brachyurus* from the late Miocene of Peru. *Journal of South American Earth Sciences*. 78: 164-174.
- Leidner, Thies, 1999 – Leidner, A., Thies, D. (1999). Placoid scales and oral teeth of Late Jurassic elasmobranchs from Europe. *Mesozoic fishes*. 2: 29-40.
- Leung et al., 2022 – Leung, J.Y., Nagelkerken, I., Pistevos, J.C., Xie, Z., Zhang, S., Connell, S.D. (2022). Shark teeth can resist ocean acidification. *Global Change Biology*. 28(7): 2286-2295.
- Lewy, Cappetta, 1989 – Lewy, Z., Cappetta, H. (1989). Senonian elasmobranch teeth from Israel. Biostratigraphic and paleoenvironmental implications. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Monatshefte*. Pp. 212-222.
- Lin et al., 2022 – Lin, C.Y., Lin, C.H., Shimada, K. (2022). A previously overlooked, highly diverse early Pleistocene elasmobranch assemblage from southern Taiwan. *PeerJ*. 10: e14190.
- Long, 1992 – Long, D.J. (1992). Sharks from the La Meseta Formation (Eocene), Seymour Island, Antarctic Peninsula. *Journal of Vertebrate Paleontology*. 12(1): 11-32.
- Maisey et al., 2014 – Maisey, J.G., Turner, S., Naylor, G.J., Miller, R.F. (2014). Dental patterning in the earliest sharks: implications for tooth evolution. *Journal of morphology*. 275(5): 586-596.

- Maisey, 1984 – Maisey, J.G. (1984). Higher elasmobranch phylogeny and biostratigraphy. *Zoological Journal of the Linnean Society*. 82(1-2): 33-54.
- Maisey, 2012 – Maisey, J.G. (2012). What is an ‘elasmobranch’? The impact of palaeontology in understanding elasmobranch phylogeny and evolution. *Journal of Fish Biology*. 80(5): 918-951.
- Marramà, Kriwet, 2017 – Marramà, G., Kriwet, J. (2017). Principal component and discriminant analyses as powerful tools to support taxonomic identification and their use for functional and phylogenetic signal detection of isolated fossil shark teeth. *PloS one*. 12(11): e0188806.
- Marsili, 2007 – Marsili, S. (2007). Pliocene elasmobranchs in the collection of the “museo civico giuseppe scarabelli” of Imola. *Quaderno di Studi e Notizie di Storia Naturale della Romagna*. 24: 19-36.
- Marsili, 2008 – Marsili, S. (2008). Systematic, paleoecologic and paleobiogeographic analysis of the Plio-Pleistocene Mediterranean elasmobranch fauna. *Atti Soc. Toscana Sci. Natur. Ser. A*. 113: 81-88.
- McCormack et al., 2024 – McCormack, J., Jaouen, K., Bourgon, N., Sisma-Ventura, G., Tacail, T.J., Müller, W., Tütken, T. (2024). Zinc isotope composition of enameloid, bone and muscle of gilt-head seabreams (*Sparus aurata*) raised in pisciculture and their relation to diet. *Marine Biology*. 171(3): 65.
- McLennan, 2018 – McLennan, L. (2018). Tooth wear, microwear and diet in elasmobranchs (Doctoral dissertation, University of Leicester).
- Meredith Smith et al., 2019 – Meredith Smith, M., Underwood, C., Goral, T., Healy, C., Johanson, Z. (2019). Growth and mineralogy in dental plates of the holocephalan *Harriotta raleighana* (Chondrichthyes): novel dentine and conserved patterning combine to create a unique chondrichthyan dentition. *Zoological letters*. 5(1): 11.
- Mertiniene, 1995 – Mertiniene, R. (1995). The teeth of *Symmorium reniforme* cope from the Upper Carboniferous of the Moscow area (Russia). *Geobios*. 28: 147-150.
- Miyake et al., 1999 – Miyake, T., Vaglia, J.L., Taylor, L.H., Hall, B.K. (1999). Development of dermal denticles in skates (Chondrichthyes, Batoidea): patterning and cellular differentiation. *Journal of Morphology*. 241(1): 61-81.
- Mollen, 2019 – Mollen, F.H. (2019). Making Louis Agassiz’s wish come true: combining forces and a new protocol for collecting comparative skeletal material of sharks, skates and rays, as a comment and an addition to ‘The need of providing tooth morphology in descriptions of extant elasmobranch species’ by Guinot et al. (2018). *Zootaxa*. 4571(2): 295-300.
- Moss, 1977 – Moss, S. (1977). Feeding mechanisms in sharks. *American Zoologist*. 17(2): 355-364.
- Motta, Huber, 2004 – Motta, P.J., Huber, D.R. (2004). Prey capture behavior and feeding mechanics of elasmobranchs. *Biology of sharks and their relatives*. 1: 165-195.
- Moy-Thomas, 1938 – Moy-Thomas, J.A. (1938). LXVII. On the teeth of a new Elasmobranch from the Calciforous sandstones of Glencartholm, Eskdale, Dumfriesshire. *Annals and Magazine of Natural History*. 2(12): 612-613.
- Moy-Thomas, 1939 – Moy-Thomas, J.A. (1939). The early evolution and relationships of the elasmobranchs. *Biological Reviews*. 14(1): 1-26.
- Mutter et al., 2007 – Mutter, R.J., De Blanger, K., Neuman, A.G. (2007). Elasmobranchs from the Lower Triassic Sulphur Mountain Formation near Wapiti Lake (BC, Canada). *Zoological Journal of the Linnean Society*. 149(3): 309-337.
- Paredes-Aliaga et al., 2024 – Paredes-Aliaga, M.V., Botella, H., Romero, A. (2024). Testing dental microwear as a proxy for characterising trophic ecology in fossil elasmobranchs (chondrichthyans). *Swiss Journal of Palaeontology*. 143(1): 29.
- Paton, 1993 – Paton, R.L. (1993). Elasmobranch fishes from the Viséan of East Kirkton, West Lothian, Scotland. *Earth and Environmental Science Transactions of The Royal Society of Edinburgh*. 84(3-4): 329-330.
- Perry et al., 2021 – Perry, C.T., Pratte, Z.A., Clavere-Graciette, A., Ritchie, K.B., Hueter, R.E., Newton, A.L., Fischer, G.C., Dinsdale, E.A., Doane, M.P., Wilkinson, K.A., Bassos-Hull, K. (2021). Elasmobranch microbiomes: emerging patterns and implications for host health and ecology. *Animal Microbiome*. 3(1): 61.

- [Pollerspöck, Straube, 2018](#) – Pollerspöck, J., Straube, N. (2018). An identification key to elasmobranch genera based on dental morphological characters Part A: Squalomorph sharks (Superorder Squalomorphii). *Bulletin of Fish Biology Volume*. 18(1/2): 77-105.
- [Pollerspöck, Straube, 2020](#) – Pollerspöck, J., Straube, N. (2020). An identification key to elasmobranch species based on dental morphological characters. Part B: extant Lamniform sharks (Superorder Galeomorphii: Order Lamniformes). *Bulletin of Fish Biology*. 19: 27-64.
- [Prasad et al., 2004](#) – Prasad, G.V., Manhas, B.K., Arratia, G. (2004). Elasmobranch and actinopterygian remains from the Jurassic and Cretaceous of India. *Mesozoic fishes*. 3: 625-638.
- [Prasad et al., 2017](#) – Prasad, G.V., Verma, V., Sahni, A., Lourembam, R.S., Rajkumari, P. (2017). Elasmobranch fauna from the upper most part of the Cretaceous Bagh Group, Narmada valley, India. *Island Arc*. 26(5): e12200.
- [Prostak, Seifert, 1993](#) – Prostak, K.S., Seifert, P. (1993). Enameloid formation in two tetraodontiform fish species with high and low fluoride contents in enameloid. *Archives of oral biology*. 38(12): 1031-1044.
- [Prostak, Skobe, 1988](#) – Prostak, K.S., Skobe, Z. (1988). Ultrastructure of odontogenic cells during enameloid matrix synthesis in tooth buds from an elasmobranch, Raja erinacea. *American journal of anatomy*. 182(1): 59-72.
- [Radwański, Marcinowski, 1996](#) – Radwański, A., Marcinowski, R. (1996). Elasmobranch teeth from the mid-Cretaceous sequence of the Mangyshlak Mountains, Western Kazakhstan. *Acta Geologica Polonica*. 46(1-2): 165-169.
- [Rees et al., 2024](#) – Rees, J., Campbell, H.J., Simes, J.E. (2024). The first Triassic elasmobranch teeth from the Southern Hemisphere (Canterbury, New Zealand). *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*. 67(4): 426-433.
- [Samuel et al., 1987](#) – Samuel, N., Bessem, C., Bringas Jr, P., Slavkin, H.C. (1987). Immunochemical homology between elasmobranch scale and tooth extracellular matrix proteins in Cephaloscyllium ventriosum. *Journal of Craniofacial Genetics and Developmental Biology*. 7(4): 371-386.
- [Sasagawa, 1998](#) – Sasagawa, I. (1998). Mechanisms of mineralization in the enameloid of elasmobranchs and teleosts. *Connective tissue research*. 39(1-3): 207-214.
- [Sasagawa, 2002](#) – Sasagawa, I. (2002). Mineralization patterns in elasmobranch fish. *Microscopy research and technique*. 59(5): 396-407.
- [Sasagawa, Akai, 1992](#) – Sasagawa, I., Akai, J. (1992). The fine structure of the enameloid matrix and initial mineralization during tooth development in the sting rays, Dasyatis akajei and Urolophus aurantiacus. *Microscopy*. 41(4): 242-252.
- [Schaeffer, Williams, 1977](#) – Schaeffer, B., Williams, M. (1977). Relationships of fossil and living elasmobranchs. *American Zoologist*. 17(2): 293-302.
- [Schnetz et al., 2016](#) – Schnetz, L., Pfaff, C., Kriwet, J. (2016). Tooth development and histology patterns in lamniform sharks (Elasmobranchii, Lamniformes) revisited. *Journal of Morphology*. 277(12): 1584-1598.
- [Schubert, 2013](#) – Schubert, J. (2013). Elasmobranch and osteichthyan fauna of the Rattlesnake Mountain Sandstone, Aguja Formation (Upper Cretaceous; Campanian), West Texas (Doctoral dissertation).
- [Schultz, 1977](#) – Schultz, O. (1977). Elasmobranch and teleost fish remains from the Korytnica Clays (Middle Miocene; Holy Cross Mountains, Poland). *Acta Geologica Polonica*. 27(2): 201-210.
- [Shellis, Miles, 1976](#) – Shellis, R.P., Miles, A.E.W. (1976). Observations with the electron microscope on enameloid formation in the common eel (Anguilla anguilla; Teleostei). *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences*. 194(1115): 253-269.
- [Shimada et al., 2015](#) – Shimada, K., Popov, E.V., Siverson, M., Welton, B. J., Long, D.J. (2015). A new clade of putative plankton-feeding sharks from the Upper Cretaceous of Russia and the United States. *Journal of Vertebrate Paleontology*. 35(5): e981335.
- [Shimada, 2002](#) – Shimada, K. (2002). Teeth of embryos in lamniform sharks (Chondrichthyes: Elasmobranchii). *Environmental Biology of Fishes*. 63(3): 309-319.
- [Shimada, 2002](#) – Shimada, K. (2002). The relationship between the tooth size and total body length in the white shark. *Journal of Fossil Research*. 35(2): 28-33.

- Sibert et al., 2017 – Sibert, E.C., Cramer, K.L., Hastings, P.A., Norris, R.D. (2017). Methods for isolation and quantification of microfossil fish teeth and elasmobranch dermal denticles (ichthyoliths) from marine sediments. *Palaeontologia Electronica*. 20.
- Smale, 2005 – Smale, M.J. (2005). The diet of the ragged-tooth shark *Carcharias taurus* Rafinesque 1810 in the Eastern Cape, South Africa. *African Journal of Marine Science*. 27(1): 331-335.
- Sokolskyi, Guinot, 2021 – Sokolskyi, T., Guinot, G. (2021). Elasmobranch (chondrichthyes) assemblages from the Albian (lower Cretaceous) of Ukraine. *Cretaceous Research*. 117: 104603.
- Sommerville et al., 2011 – Sommerville, E., Platell, M.E., White, W.T., Jones, A.A., Potter, I.C. (2011). Partitioning of food resources by four abundant, co-occurring elasmobranch species: relationships between diet and both body size and season. *Marine and Freshwater Research*. 62(1): 54-65.
- Suarez et al., 2004 – Suarez, M., Encinas, A., Ward, D. (2004). An Early Miocene elasmobranch fauna from the Navidad Formation, Central Chile, South America. *Cainozoic Research*. 4(1/2): 3-18.
- Suga et al., 1992 – Suga, S., Taki, Y., Ogawa, M. (1992). Iron in the enameloid of perciform fish. *Journal of dental research*. 71(6): 1316-1325.
- Swinehart et al., 2020 – Swinehart, A.L., Hoenig, M.M., Ginter, M. (2020). A new addition to the Devonian elasmobranch fauna of Michigan, USA. *The American midland naturalist*. 184(1): 109-115.
- Tomes, 1898 – Tomes, C.S. (1898). VII. Upon the structure and development of the enamel of elasmobranch fishes. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Containing Papers of a Biological Character*. (190): 443-464.
- Underwood et al., 2015 – Underwood, C.J., Johanson, Z., Welten, M., Metscher, B., Rasch, L.J., Fraser, G.J., Smith, M.M. (2015). Development and evolution of dentition pattern and tooth order in the skates and rays (Batoidea; Chondrichthyes). *PloS one*. 10(4): e0122553.
- Underwood et al., 2016 – Underwood, C., Johanson, Z., Smith, M.M. (2016). Cutting blade dentitions in squaliform sharks form by modification of inherited alternate tooth ordering patterns. *Royal Society open science*. 3(11): 160385.
- Vennemann et al., 2001 – Vennemann, T.W., Hegner, E., Cliff, G., Benz, G.W. (2001). Isotopic composition of recent shark teeth as a proxy for environmental conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 65(10): 1583-1599.
- Wilga et al., 2007 – Wilga, C.D., Motta, P.J., Sanford, C.P. (2007). Evolution and ecology of feeding in elasmobranchs. *Integrative and Comparative Biology*. 47(1): 55-69.
- Wilga, Ferry, 2015 – Wilga, C.A., Ferry, L.A. (2015). Functional anatomy and biomechanics of feeding in elasmobranchs. *Fish physiology*. 34: 153-187.
- Yun, 2021 – Yun, C.G. (2021). First deep-sea shark fossil teeth from the Miocene of South Korea. *Zoodyversity*. 55(3): 225-232.

К вопросу о постановке электронно-микроскопического исследования зубов ископаемых эласмобранхий в низкобюджетных лабораториях

Павел Леонидович Александров ^{a, b, *}, Михаил Константинович Филиппов ^c,
Фёдор Константинович Орехов ^c

^a Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва, Российская Федерация

^b Институт биоорганической химии имени М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова РАН, Москва, Российская Федерация

^c Институт Химической Физики им Н.Н. Семенова РАН, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается научная и прикладная значимость зубов ископаемых эласмобранхий как ключевого источника данных для систематики,

* Корреспондирующий автор

Адреса электронной почты: geochemicalphysics@gmail.com (П.Л. Александров)

филогенетики и эволюционной морфологии. В обзорной части показано, что зубы эласмобранхий (видоизменённые плакоидные чешуи, связанные с хрящевыми челюстями) обладают высокой видоспецифичностью и потому широко используются в таксономической идентификации, включая применение диагностических ключей и стандартизованных протоколов сбора и описания. Подчёркивается, что наряду с кожными дентикулами (не относящимися к ихтиоодонтологии) зубы дают морфометрические индикаторы, релевантные не только для систематики эласмобранхий, но и для более широких задач эволюционной биологии и сравнительной анатомии позвоночных. В контексте филогенетических реконструкций отмечается особая роль «палеоодонтологических» данных: начиная с классических работ середины XX века и вплоть до современных цифровых исследований, именно зубные признаки остаются одним из наиболее информативных «прямых свидетелей» эволюционных преобразований у акул и их родственников. Отдельно обсуждается современный тренд к формализованной обработке морфологических данных: для анализа паттернов морфогенеза и вариабельности зубов у ископаемых и современных форм применяются методы многомерной статистики, прежде всего PCA как способ уменьшения размерности и шумов в сложных наборах признаков, а также дискриминантный анализ для таксономического разделения и проверки классификационных гипотез. Существенным ограничением этих реконструкций названы тафономические повреждения и деградация поверхности зубов, снижающие точность распознавания диагностических признаков, что требует явного учёта тафономии и стратиграфического контекста при интерпретации морфологии. В экспериментальной части показано, что можно для этих целей автоматизировать и вновь оцифровать достаточно старые сканирующие электронные микроскопы 1980-х гг. с невысокими метрологическими характеристиками и получать на них изображения на уровне достаточно современных компактных электронных микроскопов с увеличением (полезным увеличением) от нескольких тысяч до 5 000 крат и с предельным выводимым на оцифровку (в силу механической нестабильности и размытия изображения) до 10 000 крат. Приведен ряд иллюстративных электронных микрофотографий микроструктуры зубов эласмобранхий с нарастающим увеличением от 35х до 10 000х. Для минимальной по увеличению «электронной макрофотографии» показаны возможности колоризации/создания цифрового псевдоцвета (pseudo-color mode), сопоставимого с цветом образца в условиях визуального наблюдения и макрофотографии. Этот подход реализуется сейчас с использованием средств искусственного интеллекта/машинного обучения.

Ключевые слова: фоссилизация, эласмобранхии, диагенез, минерализация, эмаллоид, сканирующая электронная микроскопия, микрозондовый анализ, волнодисперсионный рентгеновский спектрометр, энергодисперсионный рентгеновский спектрометр, детектор обратно отраженных электронов (детектор обратно рассеянных электронов).