



VI Всероссийская научная конференция  
«ПРАКТИЧЕСКАЯ МИКРОТОМОГРАФИЯ»

РХЦ Государственного Эрмитажа  
«Старая деревня», г. Санкт-Петербург, 2023 г.

Сборник материалов конференции  
Article Book



УДК  
ББК  
С

Главный редактор: С.В. Кошеверская  
Рецензенты: Е.Б. Скворцова, И.К. Малкиель

General editor: S.V. Kosheverskaya  
Reviewers: E.B. Skvortsova, I.K. Malkiel

С Сборник материалов VI Всероссийской конференции «Практическая микротомография» / ФГУП «Государственный Эрмитаж», - СЕНТ, 2023, 112 с.

The book of abstracts and articles of the VI All-Russian conference «Practical microtomography», State Hermitage Museum, 2023, 112 p.

ISBN 978-5-4386-2337-3

© Государственный Эрмитаж, 2023

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии  
"Свое издательство"

---

Подписано в печать 05.12.2023. Формат 60×84 1/16. 4+4, офсет. 100 г, обложка 4+0, 300 г, ламинация. Гарнитура «Arial». Тираж 80 экз. Заказ \_\_\_\_.

---

Издательство "Свое издательство", 191040, Россия, г Санкт-Петербург, ул Пушкинская, 10 литера а, 1Н, тел. (812) 612-18-81

# Сборник материалов конференции

## Article Book

VI Всероссийская научная конференция  
«ПРАКТИЧЕСКАЯ МИКРОТОМОГРАФИЯ»

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
**ЭРМИТАЖ**  
*The State Hermitage Museum*



Санкт-Петербург, 2023  
[microct2023@gmail.com](mailto:microct2023@gmail.com)

## Оглавление

<b>Скворцова Е.Б., Абросимов К.Н.</b> РЕНТГЕНОВСКАЯ ТОМОГРАФИЯ В РОССИЙСКОМ ПОЧВОВЕДЕНИИ НА БАЗЕ ФИЦ «ПОЧВЕННЫЙ ИНСТИТУТ ИМ. В.В. ДОКУЧАЕВА».....	4
<b>Борисенко Н.Г., Артюков И.А., Ерискин А.А., Акунец А.А., Громов А.И., Кувшинов И.Р., Павлов Д.В., Пастухов А.В.</b> ОБ ОПЫТЕ МИКРОТОМОГРАФИИ НАНО-СТРУКТУРИРОВАННЫХ ОБЪЕКТОВ .....	10
<b>Войта Л.Л., Шемякина Ю.А., Никифорова В.С., Крючкова Л.Ю.</b> НЕКОТОРЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ МИКРОТОМОГРАФИИ В СИСТЕМАТИКЕ И МОРФОЛОГИИ МЛЕКОПИТАЮЩИХ .....	17
<b>Шумейко А.Э., Злобина Е.М.</b> МЕТРОЛОГИЯ АЛГОРИТМА ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕНТГЕНОТОМОГРАФИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ.....	24
<b>Клюева В.В., Романенко К.А.</b> ИЗУЧЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЧВ С ПОМОЩЬЮ ТОМОГРАФИЧЕСКОГО ПОДХОДА .....	29
<b>Абрамова Т.В., Бучкина Н.П., Доброхотов А.В., Крючкова Л.Ю., Балашов Е.В., Козырева Л.В.</b> БИОУГОЛЬ В ПОЧВЕ: ТОМОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	34
<b>Мельников Д.А.</b> ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОМОГРАФА NEOSCAN N80 (ЦКП «ТАКСОН» ЗИН РАН) ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗООЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ.....	39
<b>Пахневич А.В.</b> ФОССИЛИЗИРОВАННЫЕ МЯГКИЕ ТКАНИ В РАКОВИНАХ ИСКОПАЕМЫХ БРАХИОПОД, ВЫЯВЛЕННЫЕ С ПОМОЩЬЮ РЕНТГЕНОВСКОЙ МИКРОТОМОГРАФИИ.....	45
<b>Бугрова И.Ю., Бугрова Э.М., Крючкова Л.Ю.</b> МИКРОТОМОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОРФОЛОГИИ И СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ МЕЗОЗОЙСКИХ КОРАЛЛОВ И ПАЛЕОГЕНОВЫХ ФОРАМИНИФЕР.....	49
<b>Пахневич А.В.</b> ИССЛЕДОВАНИЯ ТИПОВЫХ ЭКЗЕМПЛЯРОВ ВИДОВ БРАХИОПОД ИЗ КОЛЛЕКЦИИ Д.В. НАЛИВКИНА .....	54

<b>Ржепаковский И.В., Тимченко Л.Д., Писков С.И., Сизоненко М.Н., Шахбанов М.Ш. МИКРОТОМОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КУРИНОГО ЭМБРИОНА.....</b>	<b>57</b>
<b>Пихур О.Л., Плоткина Ю.В., Кульков А.М., Тишков Д.С., Громов А.Л., Гречихин С.С. МИКРОТОМОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОДОНТОМ ЧЕЛОВЕКА .....</b>	<b>64</b>
<b>Плоткина Ю.В.<sup>1*</sup>, Пихур О.Л.<sup>2</sup>, Кульков А.М. МИКРОТОМОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОДОНТОМЫ ЕЖА.....</b>	<b>68</b>
<b>Пихур О.Л., Плоткина Ю.В., Кульков А.М., Тишков Д.С. МОРФОЛОГИЯ И СОСТАВ ТВЕРДЫХ ТКАНЕЙ ЗУБОВ ПРИ РАЗВИТИИ НЕКАРИОЗНЫХ ПОРАЖЕНИЙ ЗУБА .....</b>	<b>77</b>
<b>Богма М.В, Ильина Ю.И., Малкиель И.К. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОТОМОГРАФИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКСПОНАТОВ ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭРМИТАЖА. ....</b>	<b>81</b>
<b>Кульков А.М., Кулькова М.А., Кашуба М.Т., Малютина А.А., Кожуховская Ю.В. МИКРОТОМОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХ КОСТЯННЫХ ОРУДИЙ ИЗ ПОСЕЛЕНИЯ БАЙ-КИЯТ I(КРЫМ).....</b>	<b>85</b>
<b>Гефдинг И.П., Карева А.К. КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ, КАК СПОСОБ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ КОНСЕРВАЦИИ ДЕРЕВЯННЫХ ОСНОВ С БИОЛОГИЧЕСКИМИ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ .....</b>	<b>91</b>
<b>Шумейко А.Э., Цыганков В.А. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ГОРНОЙ ПОРОДЫ МЕТОДОМ КТ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ ЗАПАСОВ УГЛЕВОДОРОДОВ .....</b>	<b>98</b>
<b>Пискунова Н.Н., Крючкова Л.Ю. ВКЛЮЧЕНИЯ В КРИСТАЛЛАХ .....</b>	<b>102</b>
<b>Якушина О.А., Хозяинов М.С., Ожогина Е.Г. МИКРОТОМОГРАФИЯ: МИКРОСТРУКТУРА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ГЕОМАТЕРИАЛОВ .....</b>	<b>106</b>
<b>Карсанина М. В., Зубов А.С., Герке К. М. РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОРАФИИ .....</b>	<b>110</b>

РЕНТГЕНОВСКАЯ ТОМОГРАФИЯ  
В РОССИЙСКОМ ПОЧВОВЕДЕНИИ НА БАЗЕ  
ФИЦ «ПОЧВЕННЫЙ ИНСТИТУТ ИМ. В.В. ДОКУЧАЕВА»  
Скворцова Е.Б., Абросимов К.Н.

ФГБНУ ФИЦ "Почвенный институт им. В.В. Докучаева"  
X-RAY TOMOGRAPHY IN THE RUSSIAN SOIL SCIENCE ON  
THE BASIS OF THE FEDERAL RESEARCH CENTER "V.V.  
DOKUCHAEV SOIL SCIENCE INSTITUTE"

Skvortsova E.B., Abrosimov K.N.  
V.V.Dokuchaev Soil Science Institute

[eskvora@mail.ru](mailto:eskvora@mail.ru)

**Аннотация.** Приводятся данные о количестве почвенно-томографических статей в высокорейтинговых профильных журналах, опубликованных сотрудниками Почвенного института (в том числе в соавторстве) за период 2012-2023 гг. Обсуждается соотношение закрытой сТ пористости и общей сТ пористости, как диагностический показатель пространственно-геометрической деградации почвенной структуры, рассмотрена роль процессов увлажнения, замерзания и оттаивания в формировании пузырьковых пор.

**Abstract.** Data is provided on the number of soil tomographic articles in highly rated specialized journals published by employees of the Soil Institute (including co-authors) for the period 2012-2023. The ratio of closed CT porosity to total CT porosity as a diagnostic indicator of spatial-geometric degradation of soil structure is discussed, the role of humidification, freezing and thawing processes in the formation of bubble pores is considered.

Томографические исследования почв в России были начаты в 2011-2012 гг. на базе Почвенного института им. В.В. Докучаева при поддержке геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Первое десятилетие основное внимание уделялось анализу почвенных агрегатов и цилиндрических микромонолитов диаметром 3 см и высотой 4 см. Исследования проводили при разрешении 8-16,8 мкм с использованием микротомографа SkyScan 1172, установленного в Почвенном институте и долгое время служившего базой всех почвенно-томографических работ страны. Позднее, к исследованиям были привлечены макротомографы сторонних организаций с разрешением 100-200 мкм/пиксель.

Необычность почв, как объекта томографического анализа, заключается в разнообразии факторов почвообразования, их высокой пространственной изменчивости, специфике живого населения почвы, поликомпонентности и многопорядковости почвенной массы, динамичности почвенной влажности и др. В настоящее время томография почв вызывает большой научный интерес, что отражается в возрастающей публикационной активности исследователей (табл. 1).

Всего опубликовано более 50 статей в рецензируемых журналах, в том числе в список ВАК ходят 35, в списки SCOPUS и WoS – 45 статей.

**Табл. 1. Количество статей в профильных журналах (2012-2022)**

Название журнала	Количество статей	Название журнала	Количество статей
Почвоведение (Eurasian Soil Science)	14	Вестник Московского университета. Серия 5: География	1
Бюллетень Почвенного института	7	Доклады РАН, серия: Науки о Земле (Doklady Earth Sciences)	1
Geoderma	3	Проблемы агрохимии и экологии	2
Geoderma Regional	2	Quaternary Research	1
Catena	2	Quaternary International	1
Soil Research	2	Soil & Environment	1
Soil and Tillage Research	1	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science	6
Scientific Reports	1		

Российские томографические работы нацелены на широкий географический охват и часто посвящены генетическим проблемам почвоведения. Основными объектами томографических исследований до настоящего времени являлись почвы лесной, лесостепной и степной биоклиматических зон Европейской территории России (целинные, пахотные и залежные). Помимо этого, исследовали горизонты почв пустынной и полупустынной зоны на примере Прикаспийской низменности, эндолитные педогенные образования Антарктиды, различные насыпные модели почв и грунтов, почвенные новообразования и другие минеральные и органические объекты. Одним из существенных направлений исследований является анализ томографических показателей, чувствительных к изменению структурного состояния почвы.

Примером таких исследований служит проведенный, совместно с Южным федеральным университетом, анализ естественных и антропогенно-преобразованных почв в парково-рекреационных и промышленно-селитебных зонах городов Ростов-на-Дону и Аксай (Gorbov S.N., Abrosimov K.N et all, 2022). Исследования показали, что информативным показателем пространственно-геометрического

состояния почвенной структуры является доля закрытой сТ пористости в общей сТ пористости (рис. 1).

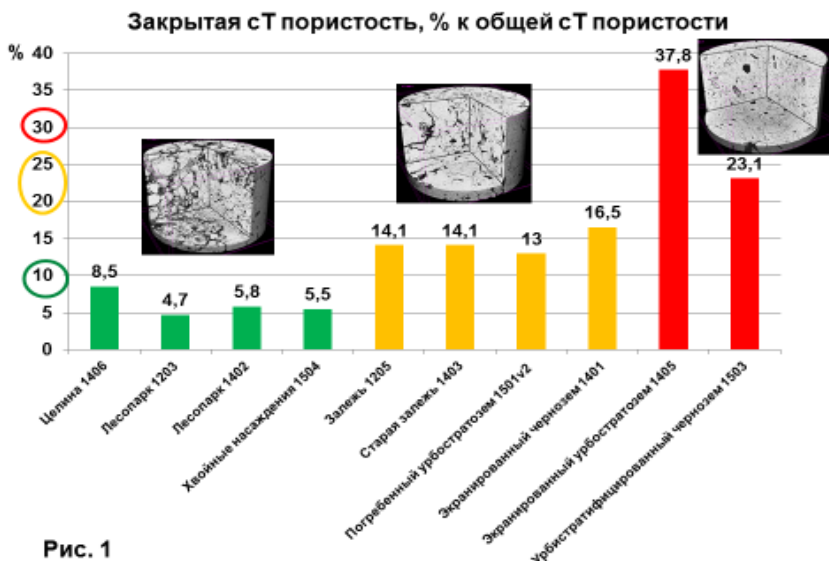


Рис. 1

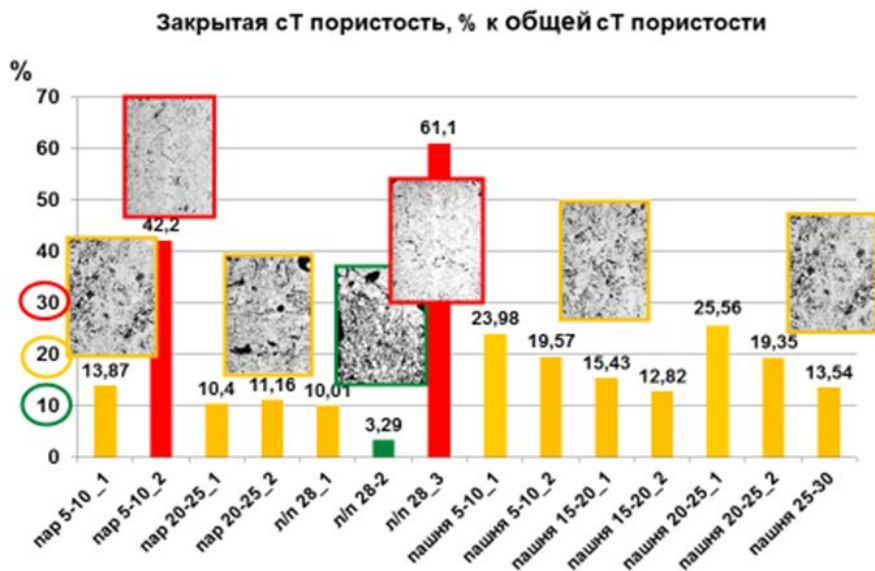


Рис. 2



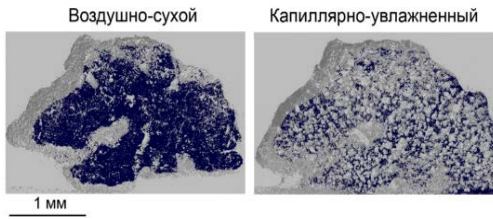
Сходные результаты получены при анализе соотношения закрытой и общей сТ пористости на участках черного пара в севообороте, почвы под 60-летней лесополосой и пашни под посевом пшеницы (чернозем мицелярно-карбонатный, опытные участки Курского НИИ агропромышленного производства) (рис. 2, с использованием томографических изображений из материалов кандидатской диссертации Д.С. Фомина, 2022 г.). Проведенные исследования позволяют заключить, что на данном уровне структурной организации почвы (агрегатном) соотношение величин закрытой сТ пористости (сТз) и общей сТ пористости (сТо) можно расценивать как диагностический признак пространственно-геометрической деградации почвенной структуры.

Выделяются следующие степени деградации:

сТз/сТо*100%	Степень деградации
< 10	без признаков деградации
10-20 (25)	умеренная деградация
> 30	сильная деградация

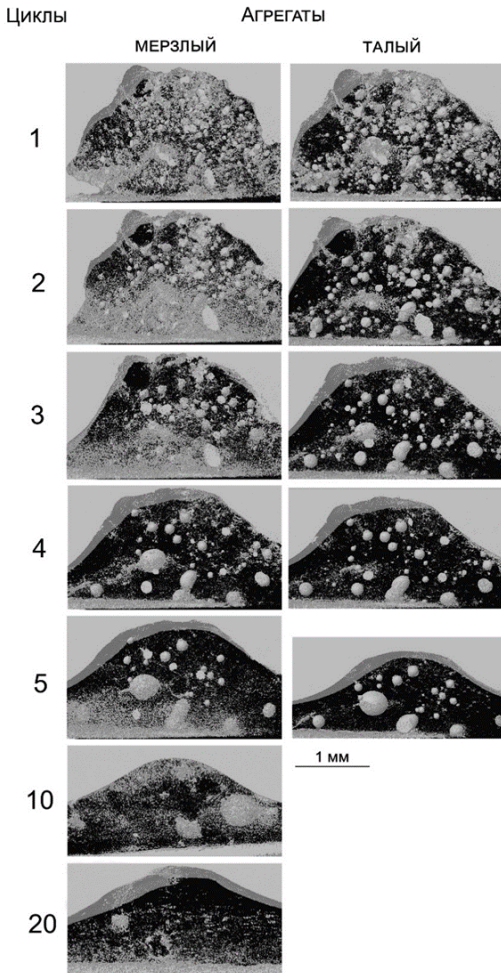
Помимо прикладных, томографический анализ успешно применяли в почвенно-генетических исследованиях. Так, была установлена возможная роль процессов промерзания-оттаивания в формировании везикулярных пор в агрегатах из подзолистого горизонта дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы (Е.Б. Скворцова, Е.В. Шеин, К.А. Романенко, К.Н. Абросимов, 2020 г.). С использованием охлаждающего столика SkyScan microcooling stage, установленного непосредственно в камере микротомографа SkyScan 1172, было проведено многократное промерзание до -20 °С и оттаивание до комнатной температуры одного и того же агрегата d=3 мм из подзолистого горизонта. Перед первым промораживанием агрегат был помещен в SkyScan microcooling stage и увлажнен до полной капиллярной влагоемкости. Последующие циклы промерзания и оттаивания, а также сканирование агрегата в его разных состояниях проводили, не вынимая столик с агрегатом из камеры томографа.

Сканирование проводили при следующих состояниях агрегата: воздушно-сухой, при капиллярном насыщении водой, в мерзлом состоянии при однократном промораживании, в мерзлом состоянии после 5 циклов оттаивания-замерзания, в мерзлом состоянии после 10 циклов оттаивания-замерзания и в мерзлом состоянии после 20 таких циклов. Исследования показали, что основные томографически видимые изменения внутриагрегатного порового пространства приурочены к стадии капиллярного увлажнения и первым пяти циклам замораживания-оттаивания (рис. 3 - 5).



**Рис. 3.** Трехмерные СТ реконструкции внутреннего строения воздушно-сухого и капиллярно-увлажненного агрегата. SkyScan 1172. Почвенная масса черная, поры и лед светлые.

Капиллярное увлажнение воздушно-сухого агрегата обуславливает зарождение пузырьковых микропор в почвенной массе (рис. 3).



**Рис. 4.** Трехмерные томографические реконструкции внутреннего строения агрегата при циклическом замораживании-оттаивании. SkyScan 1172. Почвенная масса черная, поры и лед светлые.

Первичное замораживание добавляет к общей картине признаки морозной микрошлировости. Первичное оттаивание запускает процессы обособления и постепенного укрупнения пузырьковых пор (рис. 4, цикл 1).

На последующих циклах многие пузырьковые поры выходят за пределы расплывшегося агрегата и при 10-20 кратном замораживании, в мерзлом агрегате, ведущим мотивом структурной организации становятся горизонтально ориентированные морозные микрошлиры (рис. 4, циклы 10-20).



**Рис. 5.** Содержание пор с округлыми срезамы ( $8 < F^* \leq 1$ ) в первых пяти циклах опыта.  $F^* = (4\pi S/P^2 + D/L)/2$ , где  $S$  - площадь плоского среза поры,  $P$  - его периметр,  $D$  и  $L$  ширина и длина описанного вокруг среза поры прямоугольника.

Работа выполнена с привлечением оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием "Функции и свойства почв и почвенного покрова" Почвенного института им. В.В. Докучаева.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Герке К.М., Скворцова Е.Б., Корост Д.В. Томографический метод исследования порового пространства почв: состояние проблемы и изучение некоторых почв России //Почвоведение. 2012. №7. С. 781-791. ISSN: 0032-180X.
2. Скворцова Е.Б., Шеин Е.В., Абросимов К.Н., Герке К.М., Романенко К.А., Корост Д.В. Рентгеновская микротомография в Российском почвоведении: достижения и перспективы //Современные методы исследований почв и почвенного покрова. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. 2015. С. 19-35.
3. Gorbov S.N., Abrosimov K.N et all. X-ray microtomography analysis of urban soils of rostov region //Geoderma regional, 2022, Т. 31, С. E00592 DOI: 10.1016/j.geodrs.2022.e00592.
4. Е.Б. Скворцова, Е.В. Шеин, К.А. Романенко, К.Н. Абросимов Формирование пузырьковых пор в агрегатах из элювиального горизонта дерново-подзолистой почвы //Почвоведение. 2020. № 7 С. 840-849. DOI: 10.31857/S0032180X2007014X.

## ОБ ОПЫТЕ МИКРОТОМОГРАФИИ НАНО-СТРУКТУРИРОВАННЫХ ОБЪЕКТОВ

Борисенко Н.Г., Артиуков И.А., Ерискин А.А., Акунец А.А., Громов А.И., Кувшинов И.Р., Павлов Д.В., Пастухов А.В.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

## ON THE EXPERIENCE OF MICROTOMOGRAPHY OF NANO—STRUCTURED OBJECTS

Borisenko N.G., Artiukov I.A., Eriskin A.A., Akunets A.A., Gromov A.I., Kuvshinov I.R., Pavlov D.V., Pastukhov A.V.

P.N. Lebedev Physical Institute

[borisenkong@lebedev.ru](mailto:borisenkong@lebedev.ru)

**Аннотация.** В рентгеновской микротомографии часто возникают задачи визуализации и измерений малоплотных и малоконтрастных объектов с наноструктурированием, вдобавок с низкими  $A$  и  $Z$ . Запросы к точности диагностики на пределе разрешения прибора возникают со стороны исследователей из медицинских, биологических, материаловедческих и физических коллективов. В результате работ на аппарате Neoscan N80 изучены разработанные в ФИАН лазерные термоядерные мишени с традиционно высокими нанометровыми требованиями к точности определяемых параметров, а также биологические ткани разного происхождения. Продемонстрированы возможности измерений, реконструкции и восстановления параметров малоплотных малоконтрастных объектов и изделий, а также существующие ограничения при работе с веществами и композитами, с наноструктурированием частей в своем составе [1].

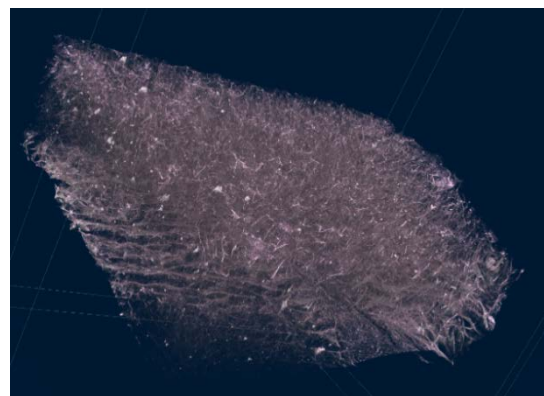
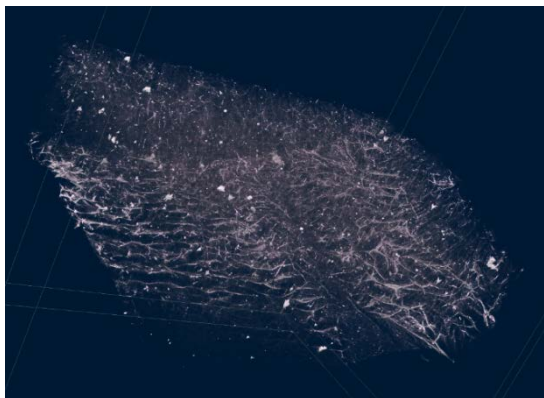
Проведено сравнение 3D измерений сходных объектов на микротомографе и на синхротронных источниках рентгена.

**Abstract.** In X-ray microtomography, there are often problems of visualization and measurement of low-density and low-contrast objects, with nanostructuring, in addition with low  $A$  and  $Z$ . Requests for diagnostic accuracy at the limit of the device resolution arise from researchers from medical, biological, materials science and physical collectives. As a result of the work on the Neoscan 80 apparatus, laser thermonuclear targets developed at FIAN with traditionally high nanometer requirements for the accuracy of the determined parameters,

as well as biological tissues of various origins, were studied. The possibilities of measuring, reconstructing and restoring parameters of low-density low-contrast objects and products, as well as existing limitations when working with substances and composites, with nanostructuring of parts in their composition are demonstrated [1]. A comparison of 3D measurements of similar objects on a microtomograph and on synchrotron X-ray sources was carried out.

Для использования в качестве малоплотных материалов лазерных мишеней разработаны макропористые полимерные композиты на основе сшитых полисахаридов (хитозана) с микродисперсными включениями серебра (менее 1 мкм), от 8 до 18 масс. %. Для получения композитных материалов с малой плотностью в качестве полимерной матрицы использовали природный полисахарид хитозан ( $\beta$ -(1-4)-2-амино-2-дезоксид-Д-гликополисахарид), сшитый в водном растворе глутаровым диальдегидом. После введения микрочастиц серебра методом химического осаждения и образования гидрогеля, жидкая фаза удалялась методами криовысушивания и сублимационного высушивания в вакууме от воды композитных гидрогелей получены макропористые материалы с плотностью 30-60 мг/см<sup>3</sup> и размером пор 1-10 мкм. Микропоры размером до 150 нм в композитных материалах не обнаружены (метод исследования - низкотемпературная сорбция азота)

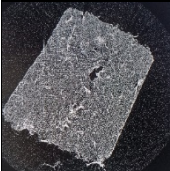
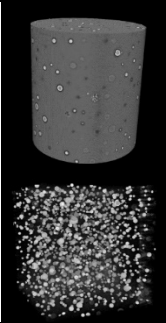
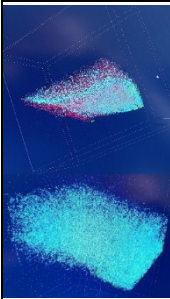
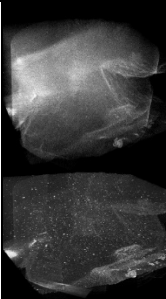
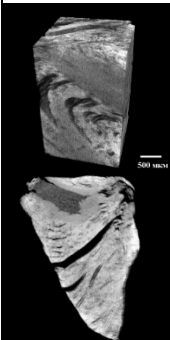
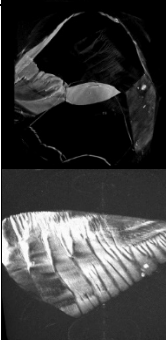
В таблице представлены для сравнения микротомограммы близких объектов, выполненные на Неоскан N80 (слева) и на синхротронных пучках практически монохроматического рентгеновского излучения. Во втором случае возможно реализовывать полный фазовый контраст и измерять внутреннюю наноструктуру, однако доступность таких установок ограничена, время дорого, а объекты изучения должны быть малы. Область применения Неоскан N80 предлагает диапазон размеров на несколько порядков больше и вариативность управления при большей доступности, но без преимуществ работы с параллельным и почти монохроматичным мощным пучком рентгена.



**Рис.1**

Микротомографическое исследование на Neoscan N80 плоского сетчатого образца из композита - сшитого хитозана плотностью  $30 \text{ мг/см}^3$  с порами  $10 \text{ мкм}$  и с субмикронными частицами серебра (8-18 масс. %). Верхний кадр – демонстрирует однородность и размер структурных ячеек.; нижний кадр – высвечено распределение тяжелых примесей по объему полимерной матрицы (Хитозан 138-2 WC) (+Ag).

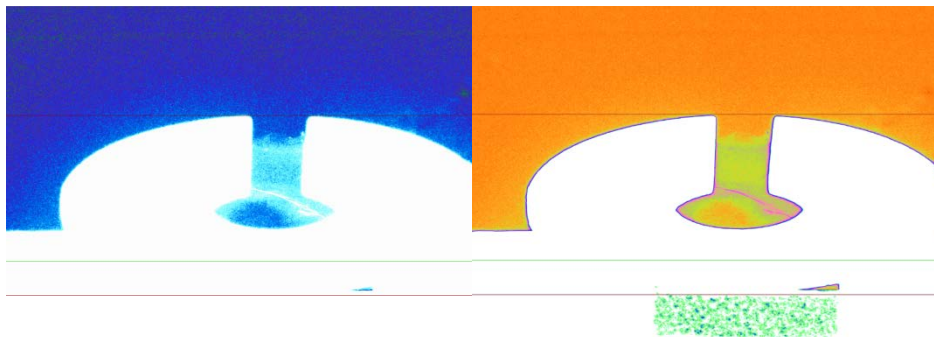
Рентгеновская микротомография выполнена аппаратно-программными средствами без предварительного окрашивания, либо контрастирования, предварительного окрашивания и контрастирования.

	<p>Слева -3D визуализация (NEOSCAN N80, ФИАН) сетки ПАМС закритической сушки, с 0,4 масс. % углеродных нанотрубок (CNT) Плотная часть – крепление на воск.</p> <p>Справа -полимерный нанокомпозит с углеродными нанотрубками (концентрация нанотрубок 0,1% wt) [5] (PETRA III, ФРГ),</p>	
	<p>Слева -хитозан с частицами серебра, <b>Neoscan N80</b></p> <p>Справа – CHO-аэрогель с коллоидным золотом [6] канал P015, синхротрон (PETRA III, ФРГ), энергия фотонов 12 кэВ, пиксель - 0,325 мкм, на нижнем снимке кластеры Au</p>	
	<p>Слева - ткань сердечной мышцы крысы (контрастирование 5%-раствором йода). <b>NEOSCAN N80, ФИАН</b></p> <p>Справа - сильно-сшитая полимерная сетка (CH) без контрастирования</p>	



Большинство наших образцов нельзя контрастировать, поскольку это разрушит их. В настоящей работе, за одним исключением, мы приводим неконтрастированные образцы с тонкой структурой, которую необходимо выявить.

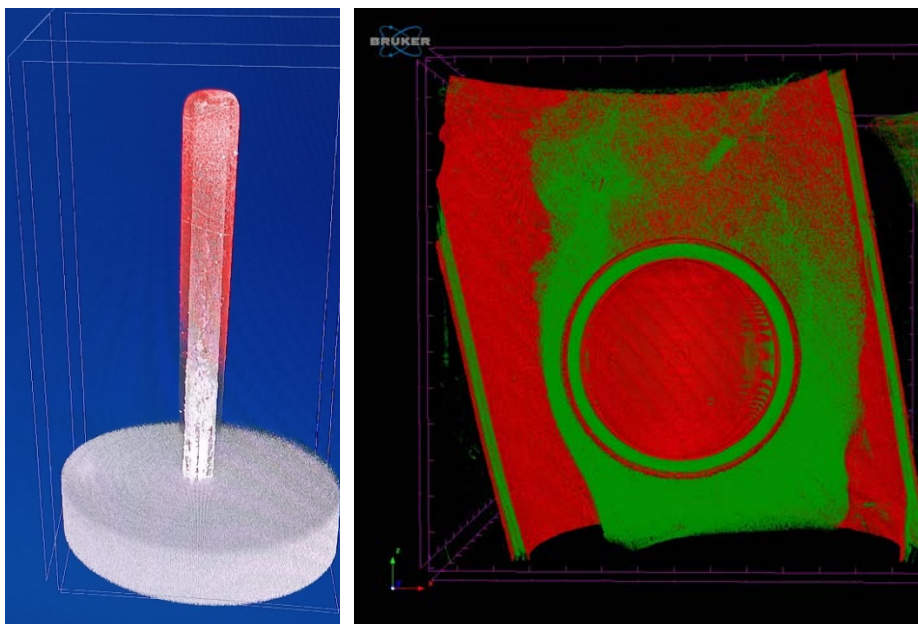
Продолжим рассматривать «неудобные» для съемки объекты, которые удалось проконтролировать.



**Рис.2.** Микрорадиография на Neoscan N80 – теневой снимок пены в медной шайбе. Органическая ацетатцеллюлозная пена с плотностью 8 мг/куб.см., включая 10 вес. % наночастиц Au (не разрешаются).

Пена (рис.2) по плотности лишь в несколько раз превышает плотность воздуха при н.у. и удерживается внутри, непрозрачной для рентгеновского излучения, медной шайбы-держателя с прорезью. Чрезвычайно прозрачный объект исследования в держателе, блокирующем ход лучей при вращении во время съемки, не допускает полноценной реконструкции микротомограмм. Однако, при низком напряжении на трубке, теневые снимки позволяют разглядеть такое изделие. Для достижения большей оптической плотности шайба наклонена, в реальности она круглая. Так в пене отчетливо видна перфорированная область, ребро складки и однородность в остальных местах. И метод можно использовать в качестве массового контроля мишеней для лазерного облучения.





**Рис.4.** Слева - 3D-изображение графитового стержня 500 мкм со слоем металла (красная) плотностью 1/200 от твердотельной, сделанное на Neoscan N80 для измерений градиента и плотности металлического слоя из наночастиц. Справа – полая стеклянная микросфера в аэрогеле 10 мг/см<sup>3</sup> (зеленая пенка) внутри тонкостенного пластикового микроцилиндра. Сечение по обработке томограммы [4]

Приведенные на рис.3 образцы имеют в своем составе не только наноструктурированные металлическую (слева) и полимерную (справа) пены, но и сделаны из слоев и частей, измеряемых в микрометрах. Если металлическая пена еще видима оптически и в рентгене, то полимерная пена прозрачна. Одновременное восстановление частей, сильно различающихся оптической плотностью, сделано в программе CT VOX.

Таким образом, представленные работы, которые выполнены на микротомографе NEOSCAN N80 (ФИАН) и рентгеновских пучках синхротронного излучения PETRA III (ФРГ) доказывают, что трудно, но возможно снимать слабоконтрастные малоплотные образцы на микротомографе и на синхротроне без необратимых окрашивания и контрастирования микро- и наноструктурированных объектов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Borisenko N. G.; Akunets A. A.; ..., Sklizkov G. V.; "Noisy" low-density targets that worked as bright emitters under laser illumination// J of Phys: Conf .Series. (2020) DOI: [10.1088/1742-6596/1692/1/012026](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1692/1/012026)
2. Пастухов А.В., Акунец А.А., Борисенко Н.Г. Способ получения малоплотных сверхсшитых полимеров монолитного типа. Патент России ИЗ№2738607 С1, 14.12.2020 (БИ №35, 2020).
3. Pastukhov A.V., Tsyurupa M.P., Davankov V.A. Hypercrosslinked polystyrene: a polymer in a non-classical physical state. *J. Polymer. Sci., Part B: Polym. Phys.* 1999. V.37. P.2324-2333. (10.1002/(SICI)1099-0488(19990901)37:17<2324::AID-POLB4>3.0.CO;2-B)
4. Artyukov, I.; Borisenko, N.; Burenkov, G.; Eriskin, A.; Polikarpov, M.; Vinogradov, A. X-ray 3D Imaging of Low-Density Laser-Target Materials. *Photonics* 2023, 10, 875.
5. Artyukov I.A., Bellucci S., Levin V.M., Morokov E.S., Petronyuk Yu.S. "In-Situ Studies of Fractal Microstructure in Nanocarbon-Polymer Composites". ASAM-8 - The 8th Asian Symposium on Advanced Materials, Book of Abstracts (July 3 – 7, 2023, Novosibirsk, Russia), 2023, p. 104-105.
6. Levin, V., Petronyuk, Y., Artyukov, I., Bukreeva, I., Malykhin, A., Longo, E., ... & Tromba, G. (2023). Three-Dimensional Study of Polymer Composite Destruction in the Early Stages. *Polymers*, 15(2), 276.

НЕКОТОРЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ  
КОМПЬЮТЕРНОЙ МИКРОТОМОГРАФИИ В СИСТЕМАТИКЕ И  
МОРФОЛОГИИ МЛЕКОПИТАЮЩИХ

Войта Л.Л.<sup>1</sup>, Шемякина Ю.А.<sup>1</sup>, Никифорова В.С.<sup>1</sup>, Крючкова Л.Ю.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Зоологический институт РАН (Санкт-Петербург)

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет

SOME TECHNICAL FEATURES IN THE COMPUTED MICRO  
TOMOGRAPHY IMPLEMENTATION TO THE SYSTEMATICS AND  
MORPHOLOGY OF MAMMALS

Voyta L.L.<sup>1</sup>, Shemyakina Yu.A.<sup>1</sup>, Nikiforova V.S.<sup>1</sup>, Kryuchkova L.Yu.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The Zoological Institute of RAS (Saint-Petersburg)

<sup>2</sup>Saint-Petersburg State University

[leonid.voyta@zin.ru](mailto:leonid.voyta@zin.ru)

**Аннотация.** В работе представлено краткое описание некоторых технических особенностей применения компьютерной рентгеновской микротомографии (микро-СТ) в исследованиях рецентных и ископаемых млекопитающих, таких как, использование "конгломератора" образцов с последующими способами дешифровки данных на этапе предобработки. Также дается краткий обзор некоторых опубликованных результатов использования микро-СТ в лаборатории териологии Зоологического института РАН с 2018 года по н.в.

**Abstract.** The current study shortly represents some technical features in the X-ray computed micro tomography implementation in studies of recent and fossil mammals such as usage of a "conglomerator of specimens" and following data deciphering during a pre-analysis step. In addition, we are given a short overview of some published results of the micro-CT usage that obtained in the Laboratory of theriology of the Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences from 2018 until present.

В лаборатории териологии ЗИН РАН (Санкт-Петербург) с 2016 г. ведется плановая работа по внедрению методов компьютерной микротомографии и связанных с ней технологий анализа морфологических данных для задач систематики и реконструкции филогении млекопитающих. В работе используется оборудование Ресурсного центра "Рентгенодифракционные методы исследования" Научного парка СПбГУ (г. Санкт-Петербург; <https://researchpark.spbu.ru/equipment-xrd-rus/3003-xrd-skyssan1172-rus>) и

Центра коллективного пользования "Таксон" ЗИН РАН (г. Санкт-Петербург; <https://www.ckp-rf.ru/ckp/3038>; <https://www.zin.ru/ckp/equipment.html>).

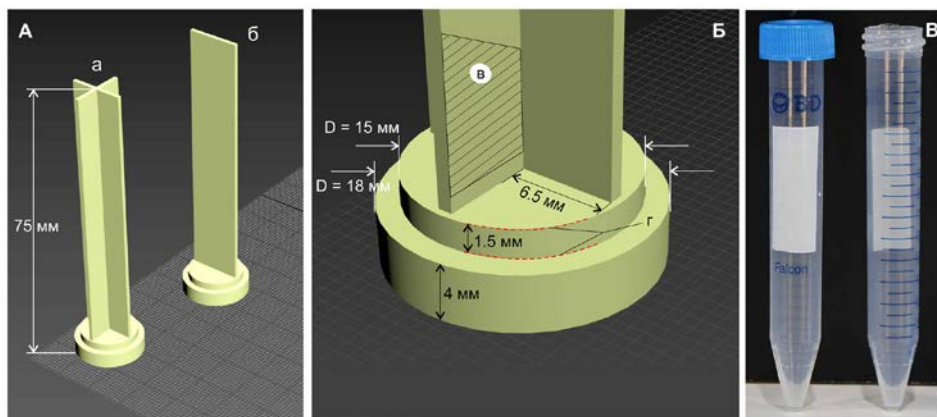
За годы использования данных микро-СТ был накоплен определенный опыт, который позволяет предлагать некоторые технические решения, направленные, в первую очередь, на снижения трудозатрат и машинных часов при обработке данных, снижению суммарного времени использования ресурса томографа, стандартизацию процесса сканирования однотипных образцов, от постановки на столик до реконструкции теневых изображений.

Одной из важных особенностей микро-СТ является возможность интактного (неразрушающего) изучения образцов, что часто, особенно в случае изучения палеонтологических образцов, сталкивается с необходимостью сканирования комбинированных образцов, состоящих из целевых объектов (костей, зубов захороненных животных) и вмещающей породы. При условии успешного сканирования возникает проблема "дешифровки" содержимого сканированного объема, т.е. как разделить субобразцы для последующей индивидуальной обработки. В литературе есть масса примеров анализа комбинированных образцов, включая и искусственно сформированные (см., например, Schwarz et al., 2023).

В лаборатории териологии ЗИН РАН (как части УФК ЗИН РАН, <https://zin.ru/collections/>) хранятся уникальные материалы ископаемых и современных млекопитающих из разных частей земного шара. Среди них имеются материалы, составляющие естественные конгломераты в алевритах, например, коллекции из вилафранкского местонахождения Мухкай 2 в Дагестане (Sablin, Iltsevich, 2021). Наличие естественных конгломератов, которые требуют особых вариантов дешифровки данных микро-СТ сканирования, натолкнуло нас на разработку серии "конгломераторов", которые бы позволили легко монтировать образцы определенного размерного класса так, чтобы за одно сканирование получать данные не по одному, а сразу по нескольким образцам. Отличие материала, смонтированного на таких конгломераторах, от естественных комбинированных образцов (Sablin, Iltsevich, 2021) и искусственных (Schwarz et al., 2023), должно сводиться к определенности положения каждого смонтированного объекта, что решает сразу три задачи: (а) простота монтажа и снятия объектов после съемки; (б) образцы не соприкасаются, что обеспечивает быструю обработку на этапе реконструкции и построения 3Д модели; (в) существенное сокращение суммарного времени сканирования серии образцов.

На сегодня имеется серия конгломераторов для сканирования отдельных костных структур мелких млекопитающих: черепов, нижних челюстей, их фрагментов и изолированных зубов, в размерном классе от 2 до 30 мм. Моделирование конгломератора под конкретную группу образцов проводится в графической оболочке Autodesk 3ds Max (Рис. 1) с

выводом готовой 3Д модели в форматах STL или PLY. Далее модели проходят предварительную подготовку в программе MeshLab (или альтернативной) с последующей распечаткой их на 3Д принтере из пластика ABS.



**Рис. 1.** Скриншот моделей конгломераторов в оболочке 3ds Max (А, Б) и вмещающие пробирки Falcon 15ml (В). Обозначения: а, модель с крестообразной несущей поверхностью (нижние челюсти, их фрагменты и изолированные зубы); б, модель с одной среднерасположенной несущей поверхностью (череп землеройки, нижние челюсти мелких млекопитающих и их фрагменты); в, несущая плоскость, куда наносится воск и монтируется образец; г, внутренний диаметр основания, позволяющий использовать конгломератор в комбинации с защитной пробиркой Falcon. На вкладках А и Б показаны размерные параметры моделей в мм. Изображение пробирки Falcon взято с сайта <https://lab-medica.ru/>

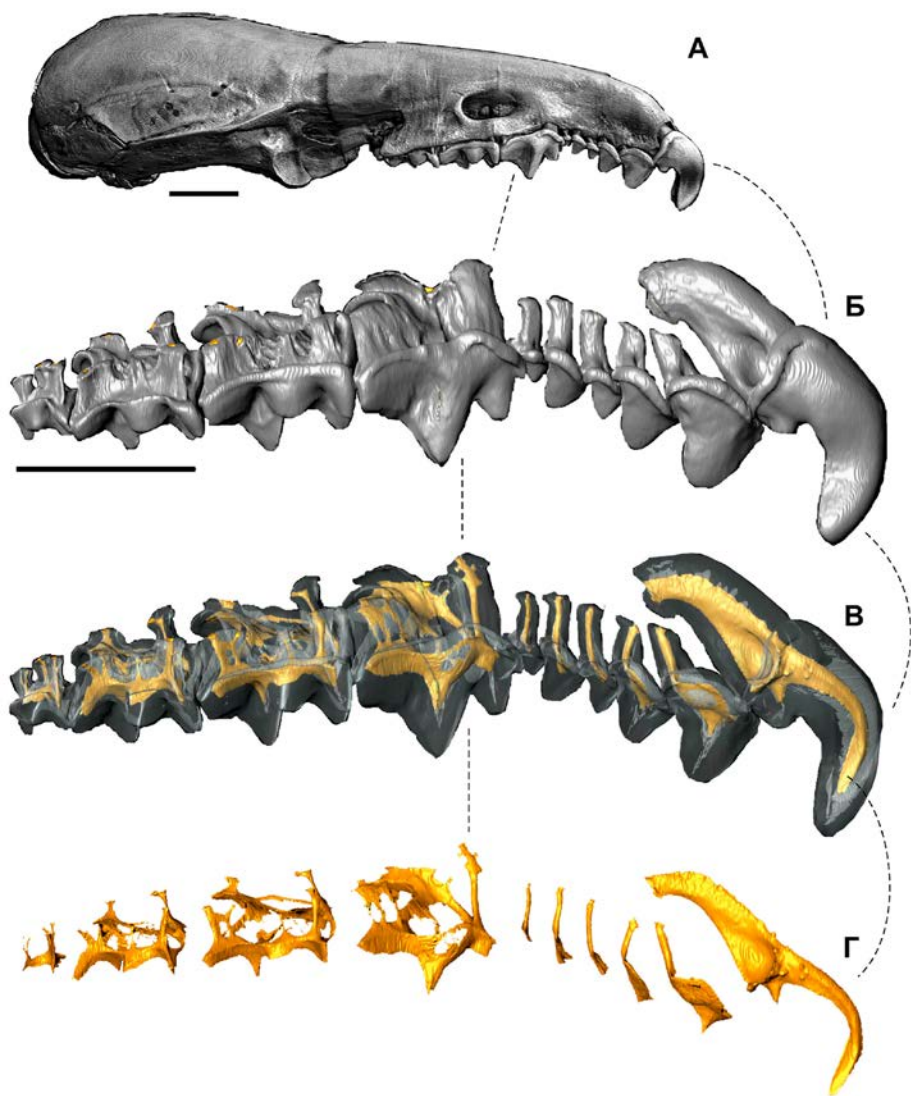
Важной особенностью использования конгломераторов является возможность установки на столик микротомографа в заданном положении, что унифицирует положение плоскостей от съемки к съемке и облегчает дальнейшую дешифровку.

Монтировка материала проводится на зуботехнический воск "для брекетов", который доступен в специализированных магазинах или в распространенных онлайн-маркетах.

Для дешифровки и разделения материала на отдельные участки трехмерного тома (по количеству включенных экземпляров) проводится в двух бесплатных программах от SkyScan-Brucker: CTvox и DataViewer (2004-2011 SkyScan, 2012-2023 Brucker microCT).

Вначале том (stack) загружается в CTvox для определения относительного положения смонтированных образцов. Далее, том загружается в DataViewer, где с использованием инструмента "Draw/Save Multiple Volume of Interest (VOI)" в субтома по отдельности сохраняются индивидуальные образцы для дальнейшей обработки.

**Краткий обзор исследований Eulipotyphla.** Первые примитивные попытки использования микро-СТ были опубликованы при описании нового рода и вида миоценовой шаргинской землеройки *Shargainosorex angustirostris* (Soricidae), когда было проведено краткое описание 2Д рентгенограммы нижней челюсти вида в латеральной проекции для определения количества и формы корней нижних антемоляров a1 и p4 (Zazhigin, Voyta, 2018). Позднее на сканере SkyScan 1172 (РЦ СПбГУ) был реализован проект по описанию скрытых признаков зубной системы землероек. С использованием микро-СТ были исследованы структуры зубов рецентных и ископаемых землероек, не доступные для анализа обычными способами, а именно, структуры эндодонта (дентин + пульпа) и поверхность эмаль-дентиновой границы (enamel-dentine junction, EDJ). В результате исследования эндодонта в разных группах Soricinae, Crocidurinae и Crocidosoricinae был разработан новый подход к анализу внутренних структур зубов землероек, их описанию (рис. 2), и новый источник одонтологических признаков (Voyta et al., 2020), которые расширили признаковую матрицу, используемую для кладистического анализа. В результате, на основании разработки 2020 г., была подготовлена новая матрица и проведена реконструкция филогении на основе морфологических признаков (Voyta et al., 2022a). Как выяснилось, форма пульпарных полостей, обводных и корневых каналов зубов землероек позволяет в сравнительном аспекте оценивать сложные морфогенетические процессы, лежащие в основе формирования конечных признаков коронки зуба, т.н., "эмалевой поверхности" (outer enamel surface, OES) и, нередко, количества корней. Именно с учетом того, что у землероек проявляется избирательность зарастания пульпарных полостей и каналов, связанная с вероятным наличием "поверхностной чувствительности" зубов (occlusal sensitivity; см. Voyta et al., 2020), а также с учетом различий в генезисе пульпы, дентина (мезодерма) и эмали (эктодерма), был сформулирован еще один оригинальный подход сравнительного описания изменчивости в проявлении и топологии элементов коронки зубов землероек с использованием данных OES, EDJ и поверхности пульпарного эндокаста (pulp endocast surface, PES; см. Voyta et al., 2022b). Использование PES, так же, как и EDJ, возможно только с применением микротомографии и последующей отдельной реконструкцией поверхности дентина и границы эндокаста пульпы зуба.



**Рис. 2.** Комбинированный рисунок 3Д моделей черепа (А), верхнего ряда зубов (Б, В) и реконструированного эндокаста пульпарных полостей (Г) землеройки *Sorex mirabilis* (ZIN 83904) в латеральной проекции. "В" показывает положение пульпарных полостей внутри зубов и корней, которые даны полупрозрачным материалом. Масштаб = 1 мм.

В 2022 г. также был опубликован уникальный материал по вымершей фауне из местонахождения Тагай-1 из миоцена Восточной Сибири (о Ольхон, оз. Байкал) (Daxner-Höck et al., 2022). Насекомоядные тагайской фауны были описаны и проиллюстрированы с использованием микро-СТ (NeoScan N80, ЗИН РАН) (Voyta et al., 2022c).

В рамках выполнения гранта РФФИ №22-24-00510 в период 2022–2023 гг. изучались особенности реакции палеосообществ землероек на глобальные и региональные флуктуации средовых факторов в позднечетвертичное время. В ходе этой работы исследовались также модельные сообщества вымерших неогеновых землероек Anourosoricini (Soricinae) с территории Северной Азии (юг Западной Сибири, Казахстан), которые также описывались с использованием микро-СТ (Zazhigin, Voyta, 2022). Отдельной работой, опубликованной в 2023 г. была разработка протокола анализа динамики морфопространства сообществ землероек с использованием, как рецентных, так и ископаемых выборок семи видов *Sorex* (Soricinae): *S. isodon*, *S. unguiculatus*, *S. daphaenodon*, *S. caecutiens*, *S. minutissimus*, *S. roboratus* и *S. mirabilis*. Микро-СТ использовалось для формирования выборок трехмерных модели нижних челюстей для многомерного статистического анализа. Именно в этой работе активно использовались конгломераторы образцов, что позволило за 4 сеанса провести сканирование около 200 экземпляров с разрешением 6–8 мкм, из которых 118 рецентных и 64 ископаемых челюсти были взяты в работу. В результате было сформировано многофакторное морфопространство по форме первого нижнего коренного зуба, которое учитывало межвидовые, внутривидовые и хронографические вариации фенотипа (Войта и др., 2023).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №22-24-00510. Авторы благодарят Д.В. Григорьева за помощь в 3Д-печати конгломераторов. Микротомографические исследования (работа на оборудовании) выполнены в рамках гос. темы АААА-А19-119091190094-8.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Войта Л.Л., Омелько В.Е., Изварин Е.П., Кропачева Ю.Э., Эйдинова Е.О., Шемякина Ю.А., Никифорова В.С., Струкова Т.В., Смирнов Н.Г. Позднечетвертичные сообщества землероек Soricidae Урала и Дальнего Востока России: протокол формирования многофакторного морфопространства (2023) Труды Зоологического института РАН, 327, сс. 555–590. DOI: 10.31610/trudyzin/2023.327.3.555.



2. Daxner-Höck G., Mörs T., Kazansky A.Y., Matasova G.G., Ivanova V.V., Shchetnikov A.A., Filinov I.A., Voyta L., Erbajeva M.A. A synthesis of fauna, palaeoenvironments and stratigraphy of the Miocene Tagay locality (Olkhon Island, Lake Baikal, Eastern Siberia) (2022) *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments*, 102, pp.969–983. DOI: 10.1007/s12549-022-00558-8
3. Sablin M.V., Iltsevich K.Yu. Faunal complex of the Early Pleistocene Mukhai 2 locality (2021) *Proceedings of the Zoological Institute RAS*. 325, pp. 82–90. DOI: 10.31610/trudyzin/2021.325.1.82
4. Schwarz D., Fritsch G., Issever A.S., Hildebrandt T. Description of contents of unopened bamboo corsets and crates from Quarry Ig/WJ of the Tendaguru locality (Late Jurassic, Tanzania, East Africa) as revealed by medical CT data and the potential of this data under paleontological and historical aspects (2023) *Palaeontologia Electronica*, 26.1.a4. DOI: 10.26879/1231
5. Voyta L.L., Abramov A.V., Lavrenchenko L.A., Nicolas V., Petrova E.A., Kryuchkova L.Yu. Dental polymorphisms in *Crociodura* (Soricomorpha: Soricidae) and evolutionary diversification of crocidurine shrew dentition (2022a) *Zoological Journal of the Linnean Society*, 196, pp. 1069–1093. DOI: 10.1093/zoolinlean/zlab103
6. Voyta L.L., Mörs T., Erbajeva M.A. Erinaceomorpha and Soricomorpha (Mammalia) of the Miocene Tagay fauna (Olkhon Island, Lake Baikal, Eastern Siberia): A preliminary report (2022c) *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments*, 102, pp. 897–914. DOI: 10.1007/s12549-022-00557-9
7. Voyta L.L., Omelko V.E., Tiunov M.P., Petrova E.A., Kryuchkova, L.Yu. Temporal variation in soricid dentition: Which are first — qualitative or quantitative features? (2022b) *Historical Biology*, 34, pp. 1901–1915. DOI: 10.1080/08912963.2021.1986040
8. Voyta L.L., Zazhigin V.S., Petrova E.A., Krjutchkova L.Y. Shrew dentition (Lipotyphla: Soricidae) – endodontic morphology and its phylogenetic resolving power (2020) *Mammal Research*, 65, pp. 33–48. DOI: 10.1007/s13364-019-00455-0
9. Zazhigin V.S., Voyta L.L. A new middle Miocene crocidosoricine shrew from the Mongolian Shargain Gobi Desert (2018) *Acta Palaeontologica Polonica*, 63, pp. 171–187. DOI: 10.4202/app.00396.2017
10. Zazhigin V.S., Voyta L.L. New Neogene anourosoricin shrews from northern Asia (2022) *Palaeontologia Electronica*, 25.3.a29. DOI: 10.26879/1209

МЕТРОЛОГИЯ АЛГОРИТМА ИНТЕРПРЕТАЦИИ  
РЕНТГЕНОТОМОГРАФИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ  
Шумейко А.Э., Злобина Е.М.  
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина  
METROLOGY OF THE X-RAY TOMOGRAPHIC IMAGING  
INTERPRETATION ALGORITHM  
Shumeiko A.Ed., Zlobina E.M.  
Gubkin University (National University of Oil and Gas)  
[geomodel@mail.ru](mailto:geomodel@mail.ru)

**Аннотация.** Рассмотрены причины возникновения погрешностей при определении геометрии и свойств для метода компьютерной томографии. Разработан метод численной оценки параметров неоднородной структуры объемного объекта повышенной точности. Основан на известных интегральных характеристиках неоднородности объекта и способе повышения контрастности исходных данных. Результаты представлены на примере определения структурных характеристик продуктивных пластов горных пород.

**Abstract.** The causes of errors in determining geometry and properties for the computed tomography method are considered. The method of numerical estimation of parameters of heterogeneous structure of volume object of increased accuracy has been developed. It is based both on known integral characteristics of object heterogeneity and method of increasing contrast of initial data. The results are presented on an example of determining the structural characteristics of productive rock formations.

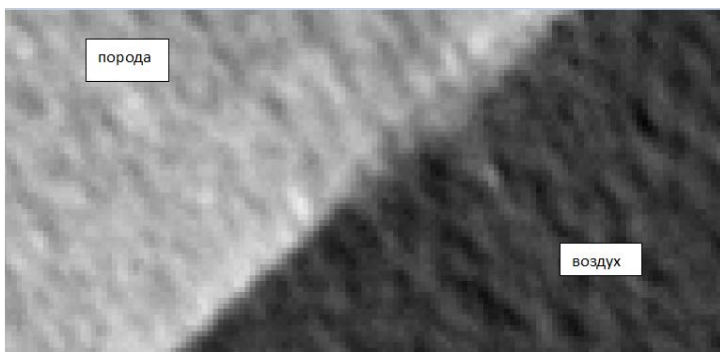
Методы рентгенотомографической съемки создавались, в первую очередь, для исследования биологических объектов. При этом объект исследования состоит из достаточно однородных по поглощению рентгеновского излучения и по структуре органических тканей. Для горных пород, более неоднородных по строению и более вариативных по структуре и свойствам, необходимо применять математические обработки, специфически ориентированные на работу с неоднородными объемами. Исходя из этого, авторы направили свои усилия на совершенствование математического аппарата для получения корректных результатов в исследовании горных пород методом микротомографии.

Существенным является тот факт, что при работе с цифровыми сборками томографических снимков, элементарный пиксель на изображении никогда не повторяется адекватно на других снимках. Это связано с поворотами объекта при съемке, где в каждое накопленное поглощение входят различные сочетания составляющих элементов, даже в условно постоянной точке объема. В результате, при суммировании изображений, вариативность поглощения в точке приводит к значительной вариативности результата.

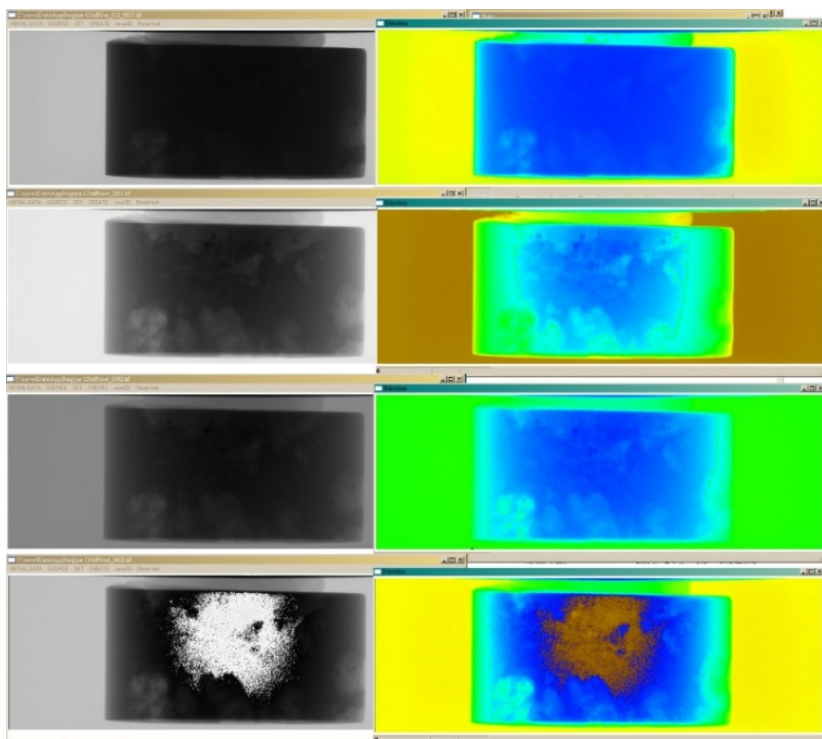
В отличие от стандартных программ, разработанная авторами программа использует специальные процедуры обработки изображений для учета «размытости» изображений, статистической вариативности, пересечения интервалов уровней поглощения для неоднородных составляющих и их совокупности в объеме полученных сечений.

Модель неоднородной объемной структуры может быть использована для построения визуальной модели, но непригодна для расчетов по причинам, указанным выше. На реальном изображении при большом увеличении видно, что границы пустот в сечениях не определяются достаточно контрастно, а воздух в пространстве съемки не является однородным и по плотности, в изображении, пересекается с элементами структуры объекта. Это следствие применения математической процедуры восстановления структурной неоднородности по множеству изображений, полученных рентгеновским просвечиванием образца в разных ракурсах. Принятая практика обрезки гистограммы яркости изображения объекта весьма субъективно и приближенно представляет исходное строение изучаемого объекта.

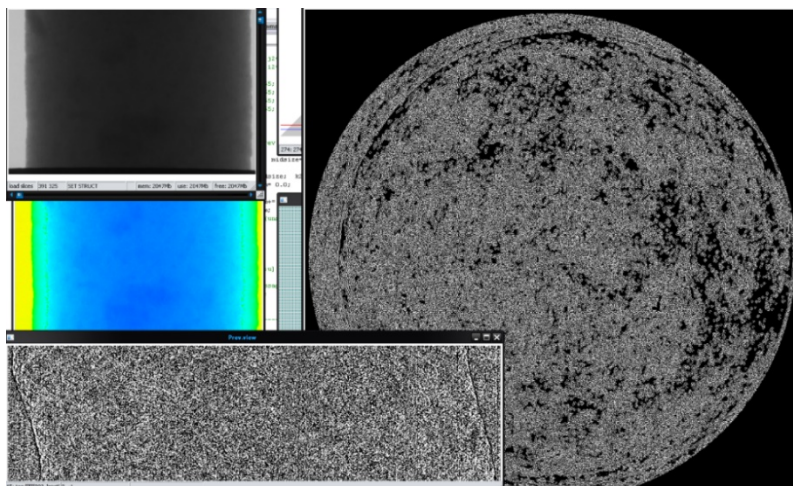
Разработан метод оценки неоднородной структуры объемного объекта повышенной точности, основанный на известных интегральных характеристиках неоднородности объекта и способе повышения контрастности исходных данных. Результаты представлены на примере определения структурных характеристик продуктивных пластов горных пород.



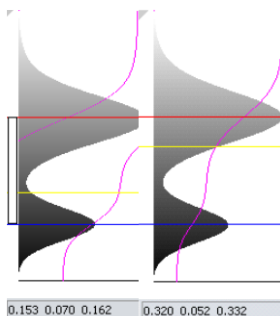
*Структура объекта после стандартной математической процедуры восстановления.*



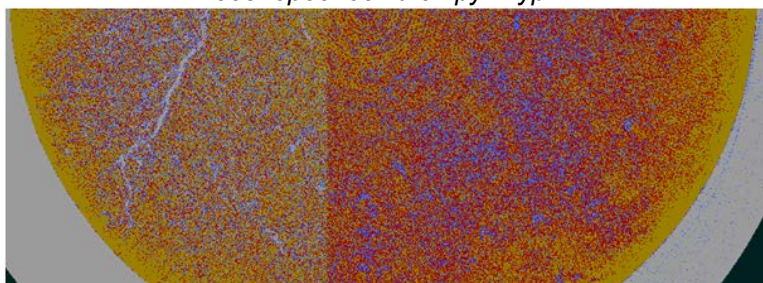
*Применение фильтров обратного восстановления.*



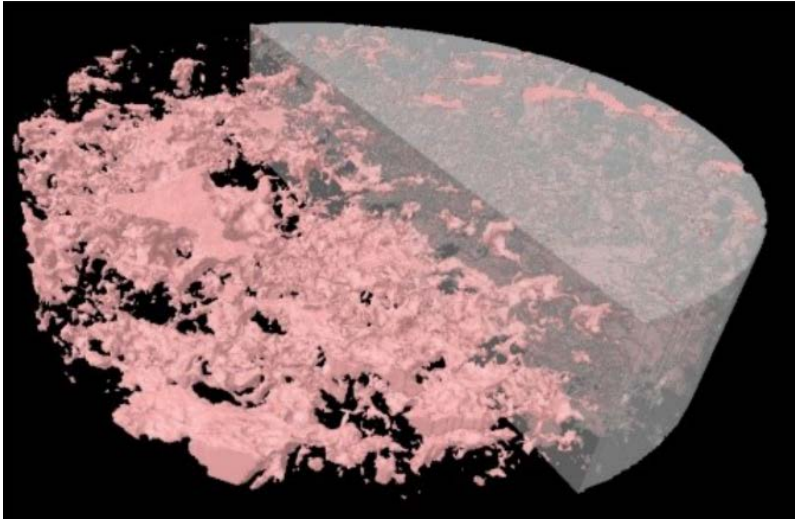
*Структура объекта после применения фильтра обратного восстановления.*



*Гистограмма плотности в результате процедуры восстановления неоднородности структуры.*



*Структура объекта на основании стандартного метода (слева) и уточненного по размытости (справа).*



*Восстановленная структура внутренней неоднородности.*

# ИЗУЧЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЧВ С ПОМОЩЬЮ ТОМОГРАФИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Клюева В.В., Романенко К.А.

ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева»

## MICROTOMOGRAPHIC APPROACH FOR SOIL STRENGTH STUDIES

Klyueva V.V., Romanenko K.A.

V.V. Dokuchaev Soil Science Institute

[vvklyueva@gmail.com](mailto:vvklyueva@gmail.com)

**Аннотация.** Представленное исследование состояло из томографического анализа агрегатов гумусовых (пахотных) горизонтов (агро)дерново-подзолистой почвы и (агро)чернозема миграционно-мицеллярного (Московская и Курская области) до сдавливания и определения их механической прочности. Исследование показало, что наибольшие значения механической прочности характерны для агрегатов с наименьшими значениями общей и открытой томографической пористости, общая томографическая пористость наиболее полно характеризует долю дисперсии значений механической прочности. Также выявлено, что для дерново-подзолистых почв значимое влияние на изменение механической прочности агрегатов оказывает вид землепользования, а для черноземов – размер исследуемой фракции.

**Abstract.** The presented study consisted of a tomographic analysis of aggregates of humus (arable) horizons of a (agro)soddy-podzolic soil and a (agro)typical chernozem (Moscow and Kursk oblasts) before compression and the following determination of their mechanical strength. The study showed that the lower total and open tomographic porosities the higher mechanical strength of soil aggregates. Total tomographic porosity most fully characterizes the proportion of dispersion in mechanical strength values. It was also revealed that the factor of the most significant influence on the mechanical strength values for is a land use and the size of the studied fraction for soddy-podzolic soils and chernozems, respectively.

Прочность почвенной структуры – свойство, влияющее на проходимость сельскохозяйственной техники, обрабатываемость почв, противозерозионную устойчивость, рост и развитие растений, процессы



передвижения и расхода влаги. В связи с многоуровневой структурной организацией почвы для каждого отдельного уровня существует набор оптимальных методических подходов, наиболее подробно описывающих свойства системы. Для агрегатного уровня структурной организации томографический подход делает возможным проведение серий испытаний по одновременному исследованию внутреннего строения почвы и её прочностных характеристик.

**Объекты и методы.** Объектами исследования являлись воздушно-сухие агрегаты горизонта Р1 агродерново-подзолистой почвы (опытное поле Зеленоградского опорного пункта Почвенного института, залежь, Московская область), горизонта АУ дерново-подзолистой почвы (сложный ельник, д. Дарьино, Московская область), горизонта АУ чернозема миграционно-мицеллярного под лесополосой и РУ агрочернозема миграционно-мицеллярного (Курский НИИ АПП) (рис.1 А,Б,В,Г, соответственно) размером 10-7 и 5-3 мм, выделенные методом сухого просеивания на автоматическом рассеве. Агрегаты были исследованы в 8-10 кратной повторности. До проведения эксперимента агрегаты изучаемых почв были предварительно высушены в сушильном шкафу при 50<sup>0</sup>С в течение 6 часов.

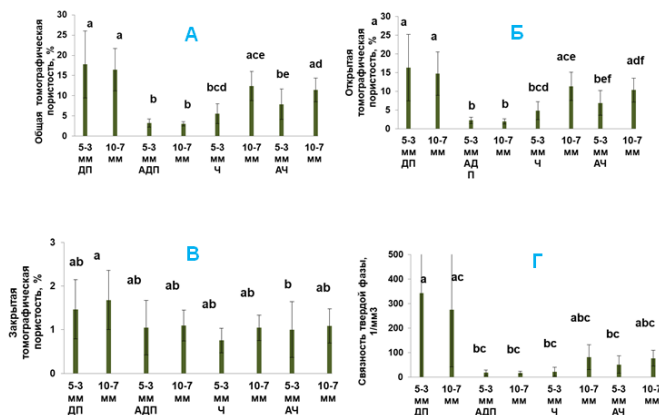


**Рисунок 1.** А, Б – дерново-подзолистая и агродерново-подзолистая почвы, В,Г – чернозем миграционно-мицеллярный и агрочернозем миграционно- мицеллярный.

Томографическая съемка проводилась на микротомографе Bruker SkyScan 1172G (Бельгия), с разрешением 6.97 мкм/пиксель, 0.5 мм Al фильтром. Последующее сдавливание агрегатов проводилось предметным столиком для тестирования материалов (Material Testing Stage 1). Статистическая обработка проводилась в программах Microsoft Excel и Statistica. Значимость отличия средних значений томографических показателей, механической прочности проверялась с помощью дисперсионного анализа с применением критерия Тьюки для уровня статистической значимости  $\alpha=0.05$ .



**Результаты и обсуждение. Томографическая съемка агрегатов почв до сдавливания.** На рисунке 2 представлены характеристики порового пространства изученных агрегатов: закрытой, открытой, общей томографических пористостей, связность твердой фазы. Наибольший разброс значений томографических показателей характерен для агрегатов размерных фракций дерново-подзолистой почвы под лесом. Гистограммы средних значений открытой и общей томографической пористостей (рис. 2, А,Б) показывают сходную картину: большие значения характерны для дерново-подзолистой почвы под лесом по сравнению с агродерново-подзолистой почвой (при незначимых отличиях между размерными фракциями).



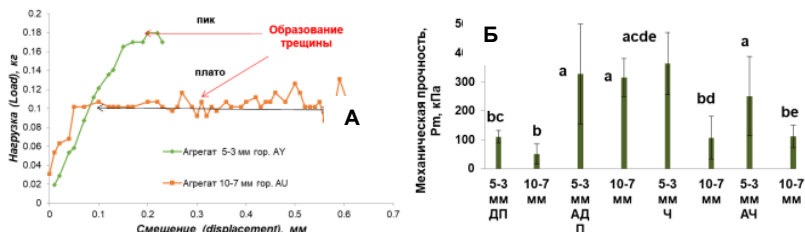
**Рис. 2.** Томографические показатели порового пространства агрегатов фракций изученных почв: А – общая пористость, Б - открытая пористость, В - закрытая пористость, Г – связность твердой фазы (ДП и АДП – дерново-подзолистая и агродерново-подзолистая почвы, Ч и АЧ – чернозем и агрочернозем миграционно-мицеллярные соответственно, изображены средние и стандартные отклонения средних значений показателей, разные буквы соответствуют значимым отличиям средних в подгруппах при уровне значимости  $\alpha=0.05$ ,  $n=8-10$ ).

При этом общая и открытая томографическая пористость агрегатов 5-3 мм дерново-подзолистой почвы больше таковых агродерново-подзолистой почвы в 6 и 8 раз соответственно, а агрегатов 10-7 мм – в 5 и 7 раз соответственно. В черноземах не выражены различия открытой и общей пористостей между естественной и пахотной почвой, наблюдается тенденция увеличения значений пористостей для фракции 10-7 мм. Статистический анализ полученных значений закрытой пористости (рис. 2, В) в большинстве случаев не выявил значимых отличий для агрегатов

фракций почв. Наибольшая связность твердой фазы (рис. 2, Г) была отмечена для агрегатов фракций дерново-подзолистой почвы размерной фракции 5-3 мм. Минимальные значения были отмечены для агрегатов агродерново-подзолистой почвы обеих фракций и агрочернозема и чернозема миграционно-мицеллярного фракции 5-3 мм. Полученные результаты показывают схожую картину с распределением значений общей и открытой томографических пористостей и объясняются наличием положительной взаимосвязи между связностью твердой фазы и пористостью.

### **Сдавливание агрегатов почв, расчет их механической прочности.**

После исследования внутреннего пространства агрегатов, верхнее плато столика вручную подводилось к агрегату до соприкосновения с ним, включался режим сжатия (compression). В режиме тестирования верхнее плато было неподвижным, нагрузка создавалась за счет давления нижним плато на агрегат. На графике можно увидеть пики, характеризующие образование трещины в агрегате (рис. 3).



**Рис. 3. А – Вид кривых нагрузки и образование трещины в агрегате: четко выраженный пик (на примере агрегата 5-3 мм, гор. АУ дерново-подзолистой почвы), плато (на примере агрегата 10-7 мм, гор. АУ чернозема миграционно-мицеллярного). Б – Значения давления ( $P_m$ , кПа), принимаемого за механическую устойчивость (ДП и АДП – дерново-подзолистая и агродерново-подзолистая почвы, Ч и АЧ – чернозем и агрочернозем миграционно-мицеллярные соответственно, изображены средние и стандартные отклонения средних значений показателей, разные буквы соответствуют значимым отличиям средних в подгруппах при уровне значимости  $\alpha=0.05$ ).**

За предельную нагрузку (Load, кг) разрушения агрегата (образования трещины) принималось значение нагрузки, оказываемое предметным столиком на агрегат, и достаточное для образования трещины в нем при ее визуальном фиксировании оператором. В нашем эксперименте наблюдалось два варианта пиков: четко выраженный пик в момент образования трещины с последующим снижением значений нагрузки или менее выраженный пик, то есть выход значений нагрузки на плато

некоторой протяженности. Предельной нагрузкой разрушения агрегата рассматривалось значение нагрузки в пике в первом случае и максимальное из значений после выхода на плато – во втором случае. Расчет механической прочности ( $P_m$ , кПа) агрегатов почв (механической устойчивости, давления образования трещины) (рис. 3) производился, основываясь на допущении о сферичности агрегата: давление его разрушения (кПа) рассчитывалось через нагрузку (кг), приложенную к агрегату, и отнесенную к площади ( $m^2$ ) круга-сечения агрегата с рассчитанным радиусом.

Наибольшие значения механической прочности агрегатов (рис.3, Б) характерны для агрегатов агродерново-подзолистой почвы обеих фракций, а также для агрегатов фракций 5-3 мм агрочернозема и чернозема под лесополосой. Средние значения механической прочности агрегатов агродерново-подзолистой почвы обеих фракций оказались выше таковых для дерново-подзолистой почвы. Различий в прочности агрегатов между размерными фракциями 10-7 и 5-3 мм для агропочвы и почвы под лесом не было выявлено. Средние значения механической прочности агрегатов агрочернозема и чернозема под лесополосой по фракциям не отличались. Прочность агрегатов агрочернозема фракции 5-3 мм выше таковой фракции 10-7 мм.

Вид всех выявленных и статистически подтвержденных линейных взаимосвязей между изучаемыми морфометрическими показателями и механической прочностью почв является отрицательным как для дерново-подзолистых почв, так и для черноземов миграционно-мицеллярных: с увеличением того или иного вида томографической пористости и связности твердой фазы происходит снижение механической прочности агрегатов изучаемых почв. При этом и для дерново-подзолистых почв, и для черноземов миграционно-мицеллярных фактором, наиболее полно характеризующим долю дисперсии значений механической прочности по сравнению с другими факторами при рассмотрении парной регрессии, является общая томографическая пористость ( $R^2=0.49$  и  $0.52$  соответственно). Отметим, что парный регрессионный анализ показал статистически подтвержденный вклад закрытой пористости в изменение механической прочности, что, однако, не было выявлено для черноземов миграционно-мицеллярных. Было показано, что для дерново-подзолистых почв значимое влияние на изменение механической прочности агрегатов оказывает вид землепользования, а для черноземов миграционно-мицеллярных – размер исследуемой фракции.

*Благодарности.* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ «А» 19-04-01056 «Трансформация свойств и строения внутриагрегатных пор суглинистых почв при переменной влажности и внешней нагрузке».

## БИОУГОЛЬ В ПОЧВЕ: ТОМОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Абрамова Т.В.<sup>1</sup>, Бучкина Н.П.<sup>1</sup>, Доброхотов А.В.<sup>1</sup>,  
Крючкова Л.Ю.<sup>2</sup>, Балашов Е.В.<sup>1</sup>, Козырева Л.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБНУ АФИ (Санкт-Петербург)

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет

## BIOCHAR IN SOIL: TOMOGRAPHIC STUDIES

Abramova T.V.<sup>1</sup>, Buchkina N.P.<sup>1</sup>, Dobrokhотов A.V.<sup>1</sup>,  
Kryuchkova L.Y.<sup>2</sup>, Balashov E.V.<sup>1</sup>, Kozyreva L.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Agrophysical Research Institute (St. Petersburg)

<sup>2</sup> St. Petersburg State University

[buchkina@agrophys.ru](mailto:buchkina@agrophys.ru)

**Аннотация.** В работе приведены результаты исследований, свидетельствующие о существенном изменении порового пространства легкосуглинистой дерново-подзолистой почвы после внесения в нее биоугля в качестве мелиоранта, а также об изменении самого биоугля в процессе «старения» в почве. Томографические исследования помогут объяснить изменения, происходящие в водоудерживающей способности почв, эмиссии парниковых газов в атмосферу, вымывании элементов питания растений при внесении биоугля. Кроме того, они помогут оценить трансформацию биоугля в почве.

**Abstract.** The results presented in the paper indicate significant changes in the pore space of loamy sand soddy-podzolic soil after biochar application, as well as changes in the biochar itself during its “aging” in the soil. Tomographic studies will help to explain the changes occurring in the water-holding capacity of soils, the emission of greenhouse gases into the atmosphere, and the leaching of plant nutrients when biochar is applied. In addition, they will help evaluate the transformation of biochar in soils.

**Введение.** Биоуголь — это продукт, получаемый в результате пиролиза, при котором биомасса — например, древесина или сельскохозяйственные отходы (солома, рисовая шелуха, шелуха кедровых орехов, куриный помет) — подвергается термической обработке при высоких температурах в условиях ограниченного доступа кислорода. Использование биоугля в сельском хозяйстве в качестве мелиоранта может приводить к изменению водоудерживающей способности почв (Buchkina et al., 2017; Igaz et al., 2018; Razzaghi et al., 2020); влиять на эмиссию парниковых газов (N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>) в атмосферу (He et al., 2017;

Buchkina et. al., 2019), оказывать воздействие на вымывание из почвы элементов питания растений (Abramova, Buchkina, 2022).

Кроме того, биоуголь, находясь в почве, и сам претерпевает существенные изменения, которые отражаются на его физических, химических и биологических свойствах.

Микротомографические исследования помогут объяснить изменения, происходящие в водоудерживающей способности почв, эмиссии парниковых газов в атмосферу, вымывании элементов питания растений при внесении биоугля. Кроме того, они помогут оценить трансформацию биоугля в почве.

**Материалы и методы.** Для исследования использовали пахотный горизонт легкосуглинистой дерново-подзолистой почвы среднего (СОК) и высокого (ВОК) уровня плодородия. Эксперимент проводили в пластиковых сосудах объемом пять литров. В почву вносили древесный биоуголь с размером частиц от 5 до 30 мм из расчета 20 т/га. Контрольные и экспериментальные сосуды (повторность опыта 4-кратная) находились в реальных климатических условиях севера С-Петербурга (N60.0004°, E30.3837°) в течение двух лет. В 2023 г. с помощью металлических цилиндров из этих сосудов отобрали образцы почвы с ненарушенным сложением для микротомографических исследований. Кроме того, из почвы были отобраны частицы биоугля, которые тоже изучались микротомографическим методом.

Исследования проводились на микротомографе N80 (Neoscan, Бельгия) с разрешением 600 нм и нанотомографе 2011 (Skyscan, Bruker, Бельгия) с разрешением 250 нм в Ресурсном центре «Рентгенодифракционные методы исследования» СПбГУ в рамках гос. темы АААА-А19-119091190094-8.

**Результаты и обсуждение.** В более ранних исследованиях нами было установлено, что внесение биоугля в почву может приводить к достоверному снижению эмиссии закиси азота из сельскохозяйственных почв (Balashov et. al., 2021). Установлено, что при внесении высоких доз биоугля (40 т/га) может происходить увеличение потерь влаги из почвы при иссушении и снижение теплопроводности почв (Рис. 1). Выявлено, что при внесении минеральных удобрений совместно с биоуглем, вымывание из почвы доступных форм  $N-NH_4^+$ ,  $P_2O_5$  и  $K_2O$  происходит в меньшем количестве по сравнению с контрольными вариантами опыта (Abramova, Buchkina, 2022). Все вышеперечисленные изменения могут быть связаны с изменениями порового пространства почв, которое оказывает существенное влияние на распределение влаги и воздуха в почвах, а следовательно, и на процессы нитрификации и денитрификации, на теплопроводность субстрата и на количество влаги удерживаемой в поровом пространстве почвы.

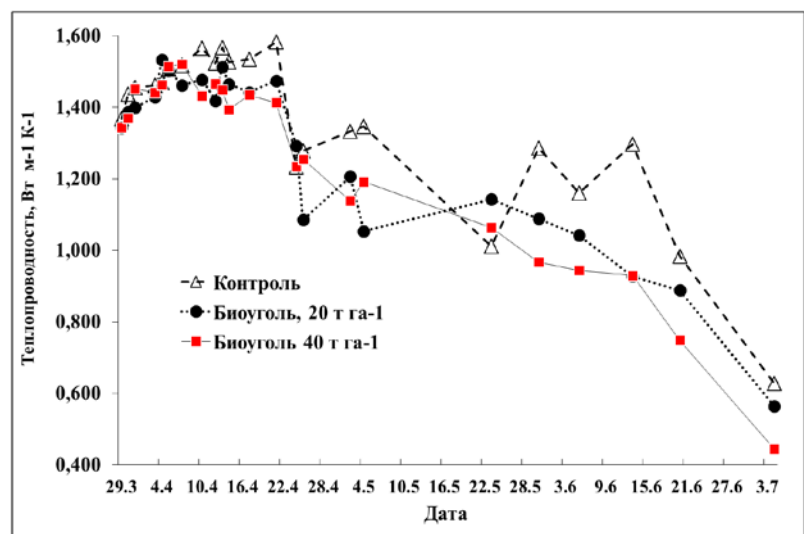
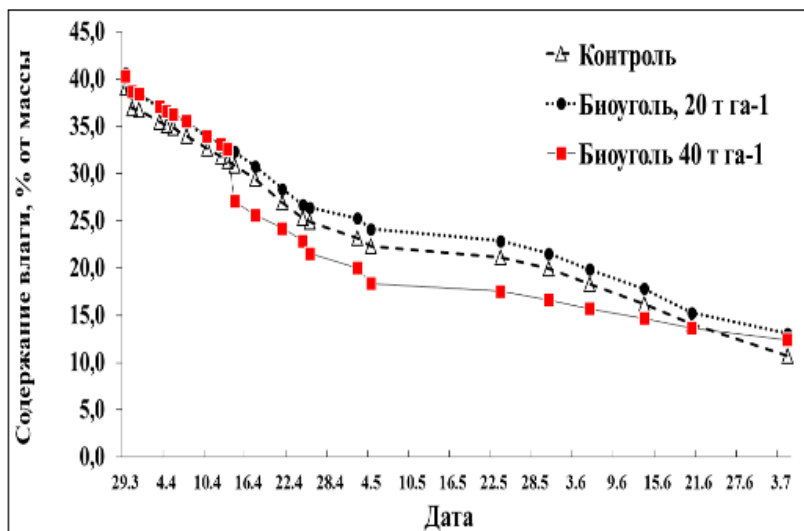
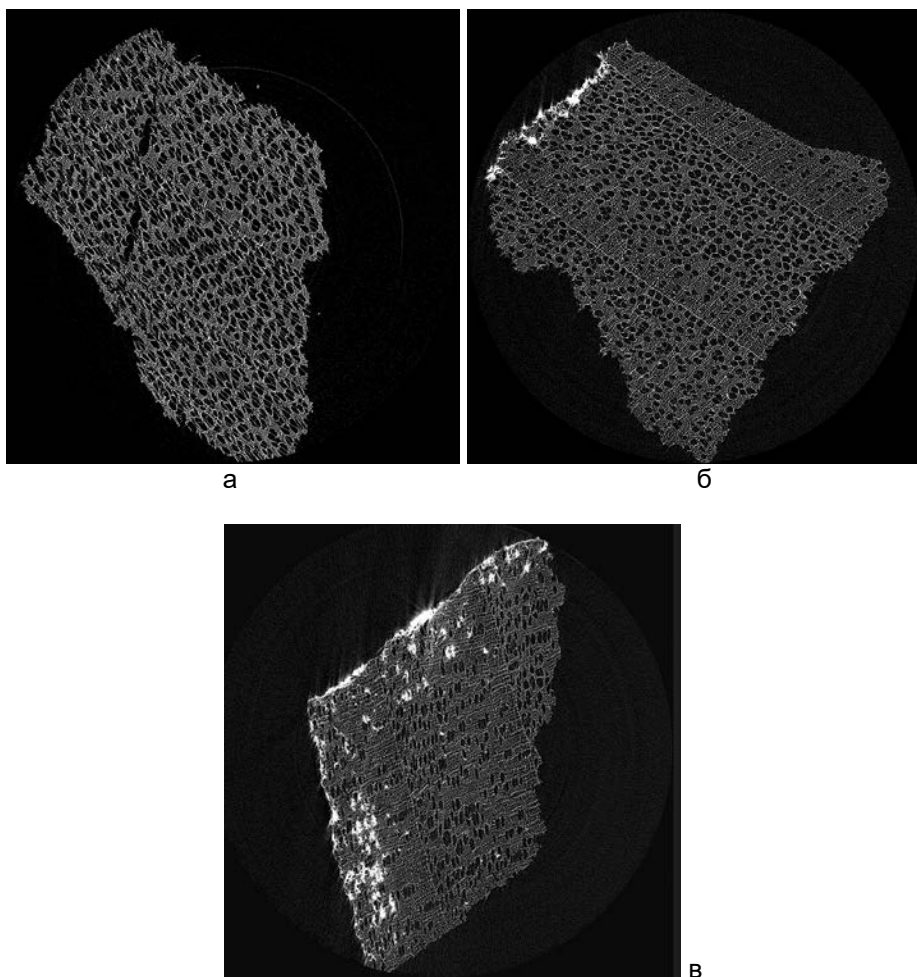


Рис. 1. Увеличение потерь влаги (а) и снижение теплопроводности (б) легкосуглинистой дерново-подзолистой почвы при внесении высокой дозы биоугля.



**Рис. 2.** Биоуголь исходный – (а) и через два года после внесения в среднекультуренную (б) и высококультуренную (в) легкосуглинистую дерново-подзолистую почву.

К настоящему времени томографические исследования полученных почвенных образцов и образцов биоугля только начаты. На рис. 2 можно видеть накопление минеральной твердой фазы почв на внешних поверхностях биоугля. Такие пленки из минеральной фазы почв были обнаружены нами и ранее на биоугле из шестилетнего полевого эксперимента (с помощью растрового электронного микроскопа). Было

показано, что почва на поверхности биоугля может существенно снижать его пористость и изменять водопроницаемость.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Abramova T.V., Buchkina, N.P. 2022. Short-term effect of heavy precipitation on nutrient leaching from arable sandy loam Albic Luvisol amended with fertiliser and biochar. *Zemdirbyste*, 109 (1): 11-20.
2. Igaz D., Horák J., Kondrlová E., Domanová J., Šimanský V., Rodný M., Buchkina N.P. 2018. Can a single dose of biochar affect selected soil physical and chemical characteristics? *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 66 (4): 421-428.
3. He Y., Zhou X., Jiang L., Li M., Du Z., Zhou G., Shao J., Wang X., Xu Z., Bai S. H., Wallace H., Xu C. 2017. Effects of biochar application on soil greenhouse gas fluxes: a meta-analysis. *GCB Bioenergy*, 9 (4): 743-755.
4. Balashov E., Buchkina N., Šimanský V., Horák, J. 2021. Effects of slow and fast pyrolysis biochar on N<sub>2</sub>O emissions and water availability of two soils with high water-filled pore space. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 69 (4): 467–474.
5. Buchkina N.P., Balashov E.V., Šimanský V., Igaz D., Horák J. 2017. Changes in biological and physical parameters of soils with different texture after biochar application. *Agricultural Biology*, 52, (3): 471-477.
6. Buchkina N. P., Hüppi R., Leifeld J. 2019. Biochar and short-term N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> emission from plant residue-amended soil with different fertilisation history. *Zemdirbyste-Agriculture*, 106 (2): 99-106.
7. Razzaghi F., Obour P. B., Arthur E. 2020. Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. *Geoderma*, 361: 114055.



ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОМОГРАФА NEOSCAN N80  
(ЦКП «ТАКСОН» ЗИН РАН) ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ЗООЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Мельников Д.А.

Зоологический институт РАН

EXPERIENCE OF USING THE NEOSCAN N80 FLAT-PANEL  
TOMOGRAPH (CORE FACILITIES CENTER «TAXON» ZIN  
RAS) FOR STUDYING ZOOLOGICAL AND  
PALEONTOLOGICAL OBJECTS

Melnikov D.A.

Zoological Institute of Russian Academy of Sciences

[persicus@zin.ru](mailto:persicus@zin.ru)

[melnikovda@yandex.ru](mailto:melnikovda@yandex.ru)

**Аннотация.** В период с июля 2022 г. по март 2023 г. мною было проведено более 30 сеансов работы на микротомографе Neoscan N80 с плоскопанельным детектором, общей продолжительностью более 150 часов. Всего было отсканировано свыше 100 различных зоологических объектов и их частей в рамках совместных проектов с сотрудниками ЗИН РАН и других учреждений. Предметом изучения являлись: строение и аномалии развития скелета амфибий и рептилий; особенности автотомии и регенерации хвоста и остеодерм рептилий; строение черепов, блоков костей черепа и отдельных костей ископаемых черепах. Томографические данные хорошо дополняют уже имеющиеся рентгенологические и гистологические, а также дают самостоятельные результаты по внутреннему строению зоологических и палеонтологических объектов. Работа выполнена в ЦКП «Таксон» с использованием коллекций ЗИН РАН в рамках государственного задания 122031100282-2.

**Abstract.** During the period from July 2022 to March 2023, I conducted more than 30 sessions on the Neoscan N80 flat-panel microtomograph with a total duration of more than 150 hours. In total, over 100 different zoological objects and their parts were scanned as part of joint projects with employees of the Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences and other institutions. The subject of the study was: the structure and developmental anomalies of the skeleton of amphibians

and reptiles; features of autotomy and regeneration of the tail and osteoderms of reptiles; the structure of skulls, blocks of skull bones and individual bones of fossil turtles. Tomographic data well complement existing X-ray and histological data, and also provide self-sufficient results on the internal structure of zoological and paleontological objects. The work was carried out at the Core Facilities Center "Taxon" using the collections of the Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences within the framework of state assignment 122031100282-2.

В период с июля 2022 г. по март 2023 г. мною было проведено более 30 сеансов работы на томографе Neoscan N80 общей продолжительностью около 155 часов. Всего было отсканировано свыше 100 различных зоологических объектов и их частей в рамках совместных проектов с сотрудниками ЗИН РАН и других учреждений.

Предметом изучения являлись: строение черепа агамовых ящериц рода *Pseudotrapelus* Fitzinger, 1843 и систематика рода (собственные исследования); автотомия и регенерация хвоста и развитие остеодерм ящериц семейств Agamidae, Anguinae, Leiosauridae, Liolaemidae, Opluridae, Phrynosomatidae и Scincidae (Н.Б. Ананьева - ЗИН РАН; Г.О. Черепанов – СПбГУ; Д.А. Гордеев - Волгоградский государственный университет (ВолГУ); бицефалы *Testudo graeca* (Linnaeus, 1758) (Н.Б. Ананьева - ЗИН РАН; Д.А. Гордеев – ВолГУ); аномалии развития осевого скелета и внутривидовая изменчивость количества позвонков тритонов рода *Lissotriton* Bell, 1839 (Salamandridae) (Д.В. Скоринов, С.Н. Литвинчук - ЦИН РАН); аномалии развития скелета лягушек рода *Pelophylax* Fitzinger, 1843 (Ranidae) (Д.А. Гордеев - ВолГУ); строение субэлитральной полости жуков-чернотелок (Coleoptera: Tenebrionidae) рода *Blaps* Fabricius, 1775 (И.А. Чиграй - ЗИН РАН); строение черепов, блоков костей черепа и отдельных костей палеогеновых морских черепах Cheloniidae indet., *Argillochelys* sp., *Eochelone* sp., *Itiochelys rasstrigin* Danilov et al., 2010, *Puppigerus camperi* (Gray, 1831), черепах-трионихид Trionychidae indet. и "*Trionyx*" *ikoviensis* Danilov et al., 2011 (И.Г. Данилов - ЗИН РАН, Е.А. Звонок - Луганск); строение черепа и морфология отдельных костей базальной среднеюрской черепахи *Heckerochelys romani* Sukhanov, 2006 (Heckerochelyidae) (И.Г. Данилов, Е.М. Образцова - ЗИН РАН).

По итогам сканирования на томографе образцов и обработки полученных изображений были получены следующие результаты:

1) выявлены диагностические признаки строения черепа (форма лобной и теменной костей, длина и форма ретроартикулярных отростков челюстной кости), отличающие новый вид *Pseudotrapelus* из центральной Аравии от всех остальных видов этого рода (готовится описание нового вида с

использованием данных томографии в журнал *Diversity: Special Issue "Herpetofauna of Euraisa"*);

2) изучены особенности развития остеодерм и связь этого процесса с процессом регенерации хвоста у сцинковых ящериц, впервые показано принципиальное сходство морфологии и микроструктуры оригинальных и регенерированных остеодерм, прослежен процесс развития комплексных остеодерм в ходе регенерации хвоста щиткового сцинка *Eurylepis taeniolata* Blyth, 1854 после автотомии (рукопись подана в *Journal of Developmental Biology*);

3) установлены особенности строения субэлитральной полости у *Blaps*, она имеет значительный объем и сопоставима с объемом брюшной полости (данные вошли в кандидатскую диссертацию И.А. Чиграя);

4) выявлены особенности строения скелета аномальной озерной лягушки с «культёй» передней конечности и костным выростом в области грудины (готовится описание комплексной аномалии в *Russian Journal of Herpetology*);

5) получены данные о строении скелета аномального экземпляра (бицефалия) *T. graeca* из герпетологической коллекции ЗИН РАН, они сопоставлены с выявленным ранее случаем бицефалии у того же вида из Дагестана (готовится описание для публикации в *Russian Journal of Herpetology*);

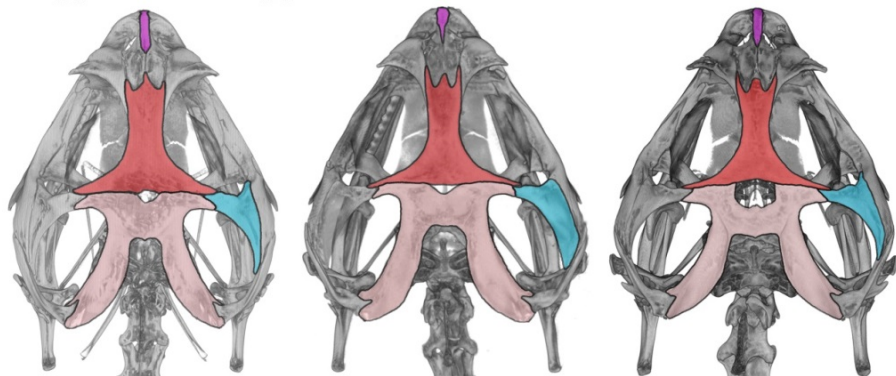
6) обнаружены аномальные экземпляры тритонов из Абхазии (*Lissotriton lantzi*) и Турции (*L. schmidtleri*), характеризующиеся наличием «шейных ребер»;

7) получены данные о строении внутренней части черепа вымерших трионихид и морских черепах;

8) установлена форма зуба крупного позвоночного, застрявшего в пластинке панциря вымершей морской черепахи. Томографические данные хорошо дополняют уже имеющиеся рентгенологические (*Lissotriton*) и гистологические (*Scincidae*), а также дают самодостаточные результаты по внутреннему строению зоологических (*Pseudotrapelus*, *Pelophylax*, *Blaps*) и палеонтологических объектов.

Результаты, иллюстрирующие применение метода – проект с микротомографией черепов агам рода *Pseudotrapelus*. Выявлены общие тенденции в изменении некоторых признаков строения черепа (форма костей) при наложении на молекулярно-генетическую схему родственных отношений (рис. 1). Форма теменной кости (розовый) изменяется от широкой со слабо выраженными задними отростками к узкой с сильно выраженными задними отростками, независимо в двух филогенетических линиях – Африканской и Аравийской – от базальных представителей к более продвинутым.

## Африканская группа видов



*P. chlodnickii* ZISP 31811

Африка

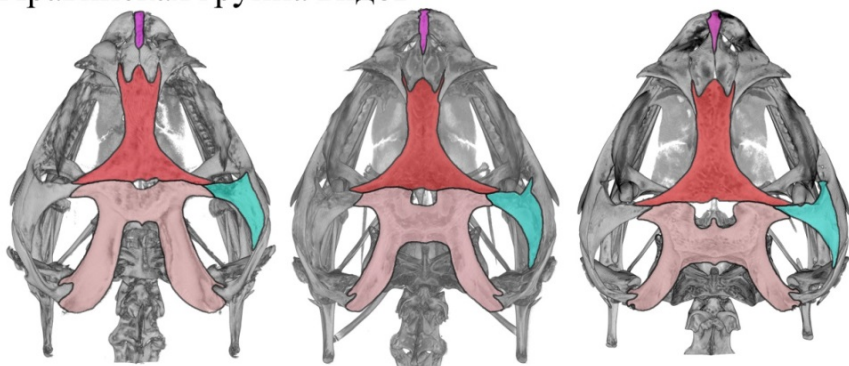
*P. sinaitus* ZISP 8592

Синай

*P. sp. nov.* ZISP 32107

Аравия

## Аравийская группа видов



*P. aqabensis* ZISP 26382

сев-зап Аравия

*P. dhofarensis* ZISP 26980

южная Аравия

*P. jensvindumi* ZISP 30670

юго-вост Аравия

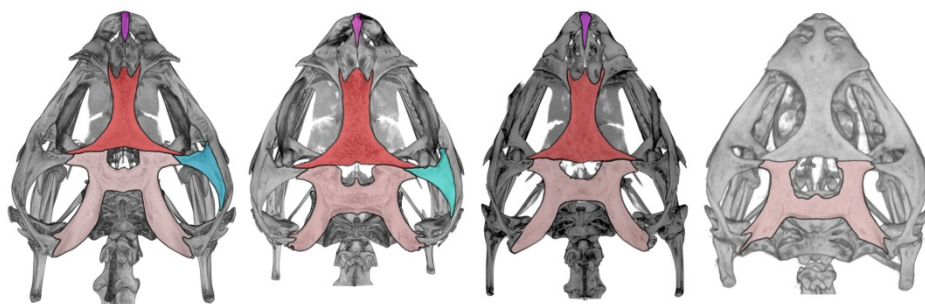
3-4 млн лет

5-6 млн лет

продвинутый вид ←

→ базальный вид

**Рис. 1.** Строение черепа разных видов *Pseudotrappelus*.



*P. sp. nov.* ZISP 32107  
сев-вост Аравия

*P. jensvindumi* ZISP 30670  
юго-вост Аравия

*Acanthocercus yemensis*  
ZISP 32115  
юго-зап Аравия

*Xenagama taylora*  
ZISP 31822  
сев-вост Африка

Базальные виды *Pseudotrapelus*

Сестринские *Pseudotrapelus* роды

**Рис. 2.** Форма теменной кости (розовый) у базальных видов рода *Pseudotrapelus* и сестринских ему родов Афро-Аравийских агамовых ящериц – *Acanthocercus yemensis* и *Xenagama taylora*.

Самые древние псевдотрапелюсы – *P. sp. nov.* в Африканской группе и *P. jensvindumi* в Аравийской группе – характеризуются незначительной выраженностью задних отростков теменной кости и большим промежутком между ними. Самые продвинутые псевдотрапелюсы – *P. chlodnickii* в Африканской группе и *P. aqabensis* в Аравийской группе – характеризуются длинными развитыми задними отростками теменной кости и узким промежутком между ними.

Базальные виды рода *Pseudotrapelus* и сестринских ему родов Афро-Аравийских агамовых ящериц характеризуются широкой теменной костью – большим промежутком между задними отростками теменной кости и незначительным развитием этих отростков (рис. 2). Это, по-видимому, является предковым состоянием признака у рода *Pseudotrapelus*. Виды *Pseudotrapelus*, характеризующиеся таким состоянием признака, населяют восточную часть Аравийского полуострова и длительное время были изолированы от остальной части ареала рода и, по-видимому, представляют собой реликты позднего миоцена.

**Благодарности.** В первую очередь благодарю организаторов VI Всероссийской научной конференции «Практическая микрофотография» за прекрасно организованное мероприятие и гостеприимство. Зам.директора ЗИН РАН по научной работе И.Г. Данилов вписал меня в обучение томографированию. Руководитель ЦКП А.А. Намятова всегда с вниманием относилась к нашим заявкам. Руководитель отдела сервиса

ООО «Аналитика и приборы» А.А. Ашин провел трёхдневный практический курс работы на томографе Neoscan N80 и всегда с готовностью отвечал на все вопросы. Ответственный инженер ЦКП «Таксон» В.С. Никифорова делилась знаниями и умениями. Коллеги П.В. Кияшко, Е.В. Сыромятникова, И.Т. Кузьмин, Л.Л. Войта участвовали в обсуждении работы и давали ценные рекомендации. Коллеги Н.Б. Ананьева (ЗИН РАН), Г.О. Черепанов (СпбГУ), Д.А. Гордеев (ВолГУ), И.А. Чиграй (ЗИН РАН), И.Г. Данилов (ЗИН РАН), Е.М. Образцова (ЗИН РАН), Д.В. Скоринов, С.Н. Литвинчук (оба ЦИН РАН), Е.А. Звонок (Луганск), Шибяева Е.В. (РГПУ им. А.И. Герцена), И.В. Доронин (ЗИН РАН), А.О. Аверьянов (ЗИН РАН) ставили интересные задачи.

Всем вышеперечисленным я очень благодарен.

Работа выполнена в ЦКП «Таксон» с использованием коллекций ЗИН РАН в рамках государственного задания 122031100282-2.

ФОССИЛИЗИРОВАННЫЕ МЯГКИЕ ТКАНИ В  
РАКОВИНАХ ИСКОПАЕМЫХ БРАХИОПОД, ВЫЯВЛЕННЫЕ  
С ПОМОЩЬЮ РЕНТГЕНОВСКОЙ МИКРОТОМОГРАФИИ

Пахневич А.В.

Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка  
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

FOSSILIZED SOFT TISSUES IN THE FOSSIL  
BRACHIOPOD SHELLS IDENTIFIED USING X-RAY  
MICROTOMOGRAPHY

Pakhnevich A.V.

Borissiak Paleontological Institute of RAS  
Joint Institute for Nuclear Research

[alvpb@mail.ru](mailto:alvpb@mail.ru)

**Аннотация.** Рентгеновская микротомография является очень полезным методом для выявления фоссилизованных мягких тканей в раковинах ископаемых брахиопод. Описаны два случая обнаружения фоссилизованных остатков: лофофора в раковине *Sharovaella mirabilis* (поздний девон, Закавказье) и медиальных ножных мышц в раковине *Paryphorhynchus badura* (поздний девон, северо-восток Казахстана).

**Abstract.** X-ray microtomography is a very useful technique for identifying fossilized soft tissues in fossil brachiopod shells. Two cases of discovery of fossilized remains are described: a lophophore in the shell of *Sharovaella mirabilis* (Late Devonian, Transcaucasia) and median pedicle muscles in the shell of *Paryphorhynchus badura* (Late Devonian, northeastern Kazakhstan).

В ископаемом состоянии мягкие ткани животных сохраняются исключительно редко. Хорошо известны случаи находок замерзших в вечной мерзлоте трупов млекопитающих. В других случаях органические вещества обугливаются, при этом, хотя бы частично, сохраняется форма тел животных. Иногда мягкие ткани замещаются минералами. Место, где сохраняются подобные остатки называется лагерштеттом. В них не происходит окисление органических веществ из-за дефицита кислорода, разрушение их редуцентами или падальщиками. Такое явление хорошо известно и для брахиопод, которых неоднократно находили в лагерштеттах. Фоссилизованные мягкие ткани брахиопод хорошо

визуально определяются. Но есть случаи, когда, замещенные минералами, мягкие ткани сохраняются внутри раковин, условия захоронения которых никак не связаны с лагерьштеттами. В редких случаях их можно обнаружить, препарировав раковину. Но лучше всего они определяются с помощью рентгеновской микротомографии.

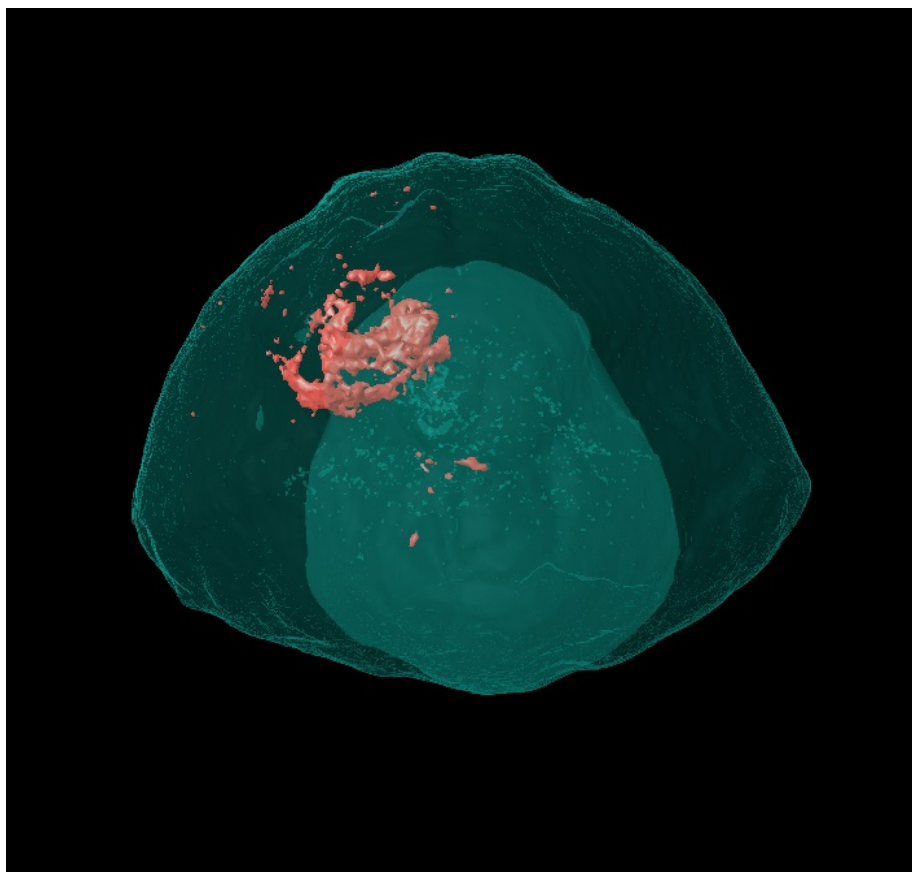
Традиционный способ изучения внутреннего строения раковин многих брахиопод – шлифы или шлифовки. По сравнению с микротомографией, это трудоемкие методы. И вероятность найти фоссилизированные мягкие ткани таким образом стремится к нулю. При шаге 0,2 мм для шлифовок, или при изготовлении 4-5 шлифов из раковины длиной около 20 мм, теряется много информации. В микротомографии подобной раковины расстояние между виртуальными срезами около 34 мкм и меньше, и получается их не менее нескольких сотен. Поэтому на шлифовках и шлифах мы можем не увидеть фоссилизированные мягкие ткани.

В нашем случае ископаемые мягкие ткани были найдены в раковинах брахиопод отряда Rhynchonellida позднего девона.

Часть мягкого лофофора обнаружена в раковине *Sharovaella mirabilis* (Pakhnevich, 2012) из отложений верхнего фамена Закавказья (рис.1) (Пахневич, 2017). Для ископаемых брахиопод этого отряда не был известен тип лофофора (органа фильтрации), поскольку он не сохранялся в ископаемом состоянии. Оказалось, что спиролофный лофофор существовал у них, как минимум, с позднего девона до наших дней (отряд Rhynchonellida известен с ордовика). На срезах было видно, что мягкие ткани замещены каким-то контрастным, по сравнению с породой, минералом. С помощью микроанализа подобных включений в других раковинах выявлено, что они состоят из минералов железа. Возможно, ткани лофофора были изначально пиритизированы. Затем произошла лимонитизация и в настоящее время мягкие ткани замещены гидроксидом или оксидом железа. Возможно процесс фоссилизации тканей ускорился за счет деятельности бактерий. При изучении подобных контрастных включений были найдены биоморфные образования, которые сходны по размеру и форме с фоссилизированными клетками бактерий.

Из 440 раковин она была единственной, в которой обнаружены фоссилизированные мягкие ткани. Дугообразную контрастную структуру также удалось выявить в раковине *Beckmannia pentagona* (Kayser, 1871), но доказать ее принадлежность к фоссилизированным мягким тканям не удалось. Еще в ряде раковин были найдены парные симметрично расположенные включения. Возможно они связаны с разрушившимися мягкими тканями.





**Рис. 1.** 3D-модель раковины брахиоподы *Sharovaella mirabilis* Pakhnevich, 2012 с фрагментом фоссилизованного лофофора.

В другом случае, в раковине брахиоподы *Paryphorhynchus badura* Nalivkin, 1937 из отложений верхнего девона северо-восточного Казахстана, контрастные включения обнаружены в области макушек обеих створок. Два контрастных тяжа в макушке спинной створки интерпретированы как медиальные ножные мышцы ножки. С ее помощью брахиоподы прикрепляются к твердому субстрату. По расположению ножки можно реконструировать прижизненное положение животного.

Примечательно, что в обоих случаях раковины являются голотипами видов.

Таким образом, рентгеновская микротомография является очень перспективным методом выявления фоссилизированных мягких тканей брахиопод. Вероятно, внутри раковин из-за дефицита кислорода и отсутствия доступа падальщикам формируются условия сходные с лагерштеттом. В связи с чем предлагается новый термин «*микрoлагерштетт*».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пахневич А.В. Реконструкция лофофора девонских ринхонеллид (Brachiopoda) с помощью рентгеновской микротомографии // Палеонтологический журнал, 2017. №2, С. 35 – 45.

МИКРОТОМОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
МОРФОЛОГИИ И СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ  
МЕЗОЗОЙСКИХ КОРАЛЛОВ И ПАЛЕОГЕНОВЫХ  
ФОРАМИНИФЕР

Бугрова И.Ю., Бугрова Э.М., Крючкова Л.Ю.

Санкт-Петербургский государственный университет

MICROTOMOGRAPHIC STUDIES OF MORPHOLOGY AND  
TAXONOMIC CHARACTERS OF MESOZOIC CORALS AND  
PALEOGENE FORAMINIFERES

Bugrova I.Yu., Bugrova E.M., Kruchkova L.Yu.

St.-Petersburg State University

[i.bugrova@spbu.ru](mailto:i.bugrova@spbu.ru)

**Аннотация.** С помощью микротомографа Bruker Skyscan 1172 и нанотомографа Bruker Skyscan 2011 изучены мезозойские кораллы из коллекций Палеонтологического музея СПбГУ и палеогеновые фораминиферы из коллекции Э.М. Бугровой. Выявление внутренней структуры фоссилий позволило уточнить их таксономическое положение.

**Abstract.** Mesozoic corals from the collections of the Paleontological Museum of St. Petersburg University and Paleogene foraminiferes from the collection of E.M. Bugrova were studied using a Bruker Skyscan 1172 microtomograph and a Bruker Skyscan 2011 nanotomograph. The identification of the internal structure of the fossils made it possible to clarify their taxonomic position.

Для современной систематики ископаемых организмов требуется изучение их внутреннего строения и сравнение с типовыми экземплярами, что невозможно без частичного или полного разрушения музейных образцов. Эта проблема может быть отчасти решена путем применения методов рентгеновской микро- и нанотомографии (мСТ и нСТ).

В РЦ «РДМИ» СПбГУ в рамках гос. темы АААА-А19-119091190094-8 методом мСТ нами изучены **шестилучевые кораллы** (25 экз.) из монографических коллекций Е.В. Соломко (1888, № 99), К.К. Фохта (1897, № 98) (верхняя юра Крыма) и Н.И. Каракаша (1907, № 103) (нижний мел Крыма), хранящихся в Палеонтологическом музее СПбГУ (Бугрова, Крючкова, 2018, 2019). Обнаруженные детали внутреннего строения позволили пересмотреть или уточнить таксономическое положение

большинства исследованных кораллов - от вида до семейств и отрядов. Так, по определению И.Ю. Бугровой, образцы № 98/48 *Latiphyllia fromenteli* Et., № 98/50 *L. thurmanni* Koby, № 99/94 *Leptophyllia deformis* Sol., № 99/92 *L. pulchella* Sol. относятся к *Acrosmilia cupulata* Beauvais; № 98/49 *L. thurmanni* Koby – к *A. aff. soemmanni* (From.); № 99/93 *Leptophyllia deformis* Sol., № 99/24 *Montilialtia ? rosula* Eichw. – к *A. soemmanni* (de From.); № 99/91a, b *Leptophyllia pocillum* Sol. – к *Epismilia* sp.; № 99/23 *M. ? rosula* Eichw. – к *Montilialtia* sp.; № 99/25 *M. vasiformis* Mich. – к *E. aff. spira* Sol.; № 99/27 *Asterosmilia retowski* Sol. – к *Peplosmilia* sp.; № 99/26 *Pleurosmilia coralline* Et. (Табл., фиг. 1а, б), № 99/44b, № 99/45 *Thecosmilia aff. furcata* Koby, № 99/46, № 99/48a *Th. trichotoma* Münst. – к *Th. trichotoma* Münst.; № 103/1539 *Latimeandrea neocomiensis* Sol. и № 103/1537 *L. circularis* From. – к *Meandrea neocomiensis* (Sol.).

Методом нСТ проведен анализ фораминифер (колл. Э.М. Бугровой, 5 экз., размер раковин 0.35–0.50 мм), при изучении которых, с помощью световой оптики, виды и роды диагностировались в основном по внешней морфологии. Данным методом выявлено внутреннее их строение на разнонаправленных виртуальных «сечениях».

Из группы **планктонных фораминифер** изучены два вида-маркёра стратиграфических рубежей в разрезах палеогена территорий бывшего СССР. В настоящее время оба вида относят к роду *Subbotina*.

Вид *Globigerina azerbaijanica* Chalilov, 1967, описанный из палеогена Малого Кавказа, был переопределен (Berggren, Norris, 1997) как ювенильная форма *Globigerapsis index* (Finlay), а затем без проведения ревизии приписан (публикации В.Н. Беньямовского) к роду *Globigerinatheka*. В сечениях его раковин (табл., фиг. 2) наблюдаются низкотрохоидное навивание оборотов и большие, только пупочные устья всех камер, что соответствует авторскому описанию, тогда как для рода *Globigerinatheka* (табл., фиг. 3) характерны раковины сферические или субсферические с шовными устьями. Ошибочное отождествление этих форм очевидно. В результате подтверждены валидность вида *G. azerbaijanica* и правомерность его использования.

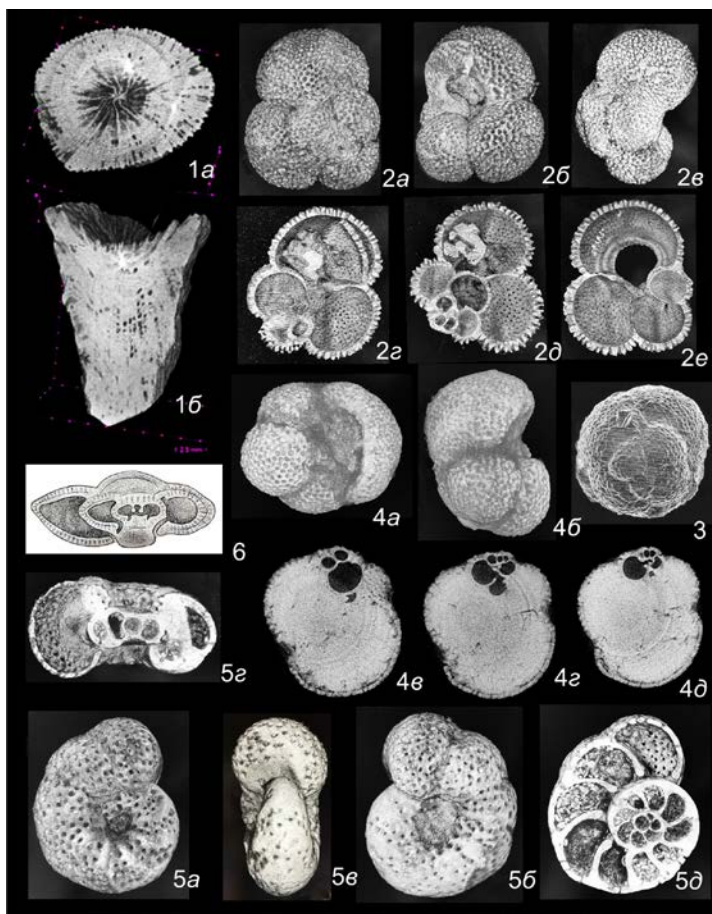
Вид *Globigerina turkmenica* Chalilov, 1948, был описан из разреза в Зап. Туркмении. Раковина голотипа этого вида, возможно, утрачена, и вид – как «nomen dubium non conservandum» – не был признан (Berggren, Norris, 1997). По правилам Международного кодекса зоологической номенклатуры (МКЗН, 2004, ст. 73.1.4) утрата голотипа не делает обозначенный вид невалидным. В данном случае его функции могут быть переданы неотипу (МКЗН, 2004, ст. 75.1) – топотипическому экземпляру, изученному с помощью нСТ (табл., фиг. 4). В результате восстановлена валидность индекса биостратиграфической зоны, утвержденной для проведения геологических работ в России.

Из **бентосных фораминифер** рассмотрена видовая группа «*Anomalina granosa*», появившаяся на рубеже мела и палеогена, и однозначно относимая к этому роду. Целью изучения является уточнение статуса рода *Anomalina* d'Orbigny, 1826 и производных от него таксонов (от подсемейства до подотряда). Первоописание рода было кратким, изображение схематично, раковина типа рода – *A. punctulata* (по монотипии) в авторской коллекции не сохранилась. Неопределенность положения номинативного рода *Anomalina* побуждает возвращаться к вопросу о его валидности. По заявке в Международную комиссию по зоологической номенклатуре (МКЗН) был поднят вопрос об исключении названия *Anomalina* (Hansen, Rögl, 1980), и до принятия решения род был отвергнут (Loeblich, Tappan, 1988). Проведя изучение истории рода, С.А. Ревец (Revets, 1997) предложил сохранить его название с типом *A. ariminensis* d'Orbigny in Fornasini, 1902, что и было утверждено (Bulletin of Zoological Nomenclature 55(3), 1998, p. 186). Однако это решение не всеми принято, и виды аномалин по-прежнему приписывают родам *Gavelinella*, *Anomalinoides*, *Brotzenella* и *Anomalina*. Можно напомнить, что еще 4 вида аномалин были описаны А. Орбиньи в 1846 г. из миоцена Венского бассейна. Изучением их топотипов выявлено, что лишь *A. badenensis* является видом валидным и соответствует диагнозу рода (Papp, Schmid, 1985, p. 65, pl. 57, lectotype figs 5–7). Этот вид также может рассматриваться в качестве типового (МКЗН, 2004, ст. 69–70).

Морфологические признаки видов группы «*Anomalina granosa*» и *A. badenensis* сходны. На виртуальных срезах раковины *A. granosa* (Hantken, 1875) видны низкотрохоидное полуинволютное навивание, открытый пупок, округлый периферический край, интериомаргинальное устье (табл., рис. 5). Эти признаки присущи видам всей группы, как и зернистая, двухслойная, крупнопористая стенка. Отмечается также большое сходство с родом *Linaresia* González-Donoso, 1968 (Loeblich, Tappan, 1988, pl. 722), однако данное наименование преокупировано для таксона животного мира (*Linaresia mammillifera* Zulueta, 1908).

По результатам проведенного исследования предлагается: 1 – для единообразного понимания рода *Anomalina* рассмотреть *Anomalina badenensis* d'Orbigny, 1846 emend. Papp et Schmid, 1985 в качестве неотипа; 2 – выделить новый род с типовым видом *Truncatulina granosa* Hantken, 1875, описанным из отложений палеогена Венгрии (Hantken, 1875); голотип вида сохранился в оригинальной коллекции его автора (Nagy-Gellai, 1989, pl. XVII, 1–5).

**Выводы.** Благодаря применению методов мСТ и пСТ при изучении фоссилий, получены сведения ценные в научном и в практическом отношении. Надеемся, эти методы будут использоваться при ревизии материалов из коллекций Палеонтологического музея СПбГУ.



**ТАБЛИЦА. Фоссилии, изученные методами тСТ и пСТ (3D и 2D изображения).**  
**Кораллы.** 1 – *Thecosmilia trichotoma* Münst. Поперечное ( $D=16$  mm) (а) и продольное ( $h=37$  mm) (б) сечения. Крым, в. юра. **Фораминиферы** (вне масштаба). 2 а,б,в – *Globigerina azerbaijanica* Chal. (SS, US, PS); 2 г,д,е – последовательные сечения раковины. Сев. Кавказ, Адыгея, р. Белая, ср. эоцен. 3 – *Globigerinatheka barri* Brönn. – тип рода (Atlas..., 2006, pl. 7.2, fig. 1 – SS). 4 а,б – *Globigerina turcmenica* Chal. (US, PS); 4 в,г,д – последовательные сечения раковины. Туркмения, Мал. Балхан, ср. эоцен. 5 а,б,в – *Anotalina granosa* (Hantken) (SS, PS, US); 5 г,д – сечения раковины: г – осевое, д – перпендикулярное оси. Крым, р. Альма, в. эоцен. 6 – *Brotzenella monterelensis* (Marie) – шлиф: осевое сечение. Туркмения, хр. Туаркыр, в. мел, маастрихт. Сокращения: стороны SS – спиральная, US – пупочная, PS – периферический край.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бугрова И.Ю., Крючкова Л.Ю. Матер. LXIV сессии ПО при РАН. СПб.: ВСЕГЕИ, 2018. С. 28–30. 2. Бугрова И.Ю., Крючкова Л.Ю. Матер. LXV сессии ПО при РАН. СПб.: ВСЕГЕИ, 2019 С. 298–300.
3. Международный кодекс зоологической номенклатуры. Москва. 2004.
4. Халилов Д.М. Гостоптехиздат, Азерб. отд. Баку–Ленинград. 1948. 93 с.
5. Халилов Д.М. Изд-во АН Азерб. ССР. Баку. 1967. 287 с.
6. Atlas of Eocene planktonic foraminifera. Cushm. Found. Foram. Res. Spec. publ. No 41. 2006. 513 p.
7. Berggren W.A., Norris R. D.//Micropaleontology, vol.43, Suppl.1.1997. 116 p.
8. Hansen H.J., Rögl F.J. Foram. Res., v. 10. 1980. P. 153–155.
9. Hantken M. Jb. Ung. Geol. Anst. Bd. 4. H. 1. 1875. S. 1–93.
10. Loeblich A.R., Tappan H. Foraminiferal genera and their classification // N.Y. Van Nostrand Reinhold. 1988. 1059 p.
11. Nagy-Gellai A. Inst. Geol. Publ. Hungarum. 1989. P. 133–143.
12. Papp A., Schmid M.E Abh. Geol. Bundesanstalt. Bd. 37. Vien. 1985. 309 s.
13. Revets S.A. Bull. Zool. Nomenclature 54(1). 1997. P. 6–10.

ИССЛЕДОВАНИЯ ТИПОВЫХ ЭКЗЕМПЛЯРОВ ВИДОВ  
БРАХИОПОД ИЗ КОЛЛЕКЦИИ Д.В. НАЛИВКИНА

Пахневич А.В.

Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН  
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна  
THE STUDIES OF TYPE SPECIMENS OF BRACHIOPOD  
SPECIES FROM COLLECTIONS BY D.V. NALIVKIN  
Pakhnevich A.V.

Borissiak Paleontological Institute of RAS, Moscow  
Joint Institute for Nuclear Research, Dubna

[alvpb@mail.ru](mailto:alvpb@mail.ru)

**Аннотация.** С помощью рентгеновской микротомографии переизучена коллекция типовых экземпляров видов брахиопод отряда Rhynchonellida, описанных Д.В. Наливкиным. Положительные результаты получены по 64% типовых экземпляров.

**Abstract.** Using X-ray microtomography, the collection of type specimens of brachiopod species of the Order Rhynchonellida described by D.V. Nalivkin was reexamined. Positive results were obtained for 64% of type specimens.

Академиком Дмитрием Васильевичем Наливкиным описаны значительные коллекции брахиопод и выделены десятки новых видов, подвидов и родов. Со времени первоописаний прошел значительный срок. Назрела необходимость переизучения типовых коллекций ряда видов. Валидность некоторых типовых экземпляров ставится под сомнение отдельными специалистами. Типовые экземпляры нельзя разрушать с помощью шлифовок, поэтому рентгеновская микротомография является важнейшим методом для проведения ревизии. Было изучено 169 типовых экземпляров брахиопод отряда Rhynchonellida из отложений девона и нижнего карбона, которые хранятся в ЦНИГРмузее им. Ф.Н. Чернышева (Санкт-Петербург). Также анализировались оригиналы для таксонов, описанных в открытой номенклатуре. Материалы происходят из Средней Азии, Европейской части России, Якутии, с Урала, Горного Алтая.

Изучение проводилось в несколько этапов.

1. Проведены работы созданию шкалы контрастности минералов для оценки возможной перспективности исследований (Пахневич, 2009).



2. Проанализирована результативность исследований. Положительным признан результат микротомографии, где удалось распознать хотя бы одну морфологическую внутрираковинную структуру. Результативность составила 64%.

3. Охарактеризована сохранность типовых экземпляров. Внутри некоторых раковин были выявлены потенциально опасные трещины, которые, в перспективе, могли привести к разрушению уникальных образцов.

4. Предложено провести оцифровку коллекций типовых экземпляров с выделением кибертипов по примеру современных коллекций (см. Faulwetter et al., 2013)

5. Выделено 10 типов сохранности раковин брахиопод на основе сравнения минерального состава раковин и вмещающих пород и их контрастности (рис. 1).

6. В одном из голотипов обнаружены фоссилизированные мышечные мягкие ткани. Они интерпретированы как медиальные ножные мышцы. Мягкие ткани были замещены контрастным минералом.

Всего изучены типовые экземпляры из 12 монографий Д.В. Наливкина.

Из 80 видов для 24 удалось уточнить таксономическое положение, для 21 выявить новые важные морфологические структуры, для 35 видов информации по внутреннему строению оказалось недостаточно для уточнения таксономического положения. Полученные результаты важны для понимания источников формирования фауны, смены доминирующих видов и сообществ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пахневич А.В. О результативности микротомографических исследований палеонтологических объектов / Современная палеонтология. Классические и новейшие методы-2009. М.: ПИН РАН, 2009. С. 127–141.
2. Faulwetter S., Vasileiadou A., Kouratoras M., Dailianis T., Arvanitidis C. Micro-computed tomography: Introducing new dimensions to taxonomy // ZooKeys, 2013. V. 263. P. 1–45. doi: 10.3897/zookeys.263.4261



**Рис. 1.** *Виртуальный срез раковины девонской брахиоподы с окремненными раковинными структурами.*

# МИКРОТОМОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КУРИНОГО ЭМБРИОНА

Ржепаковский И.В., Тимченко Л.Д., Писков С.И.,  
Сизоненко М.Н., Шахбанов М.Ш.

Северо-Кавказский федеральный университет

## MICROTOMOGRAPHIC STUDY OF A CHICKEN EMBRYO

Rzhepakovsky I.V., Timchenko L.D., Piskov S.I., Sizonenko M.N.,  
Shakhbanov M.Sh.

North Caucasian Federal University

[irzhepakovskii@ncfu.ru](mailto:irzhepakovskii@ncfu.ru)

**Аннотация.** Наиболее оптимальной и эффективной методикой окрашивания эмбриона в предплодный период (9-12 сутки инкубации, эмбриональные стадии HH35-HH38) достоверно была определена окраска 1% раствором фосфорновольфрамовой кислоты при нагреве 40°C и экспозиции 96 часов. Были получены микротомографические результаты, характеризующие как внешний вид эмбриона, так и позволяющие визуализировать расположение, структуру, рассчитать объем и рентгенплотность внутренних органов. Полученные результаты открывают значительные перспективы использования куриного эмбриона в предплодный период эмбриогенеза, как модель для скрининга тератогенности.

**Abstract.** The most optimal and effective method for staining an embryo in the prefetal period (9-12 days of incubation, embryonic stages HH35-HH38) was reliably determined by staining with a 1% solution of phosphotungstic acid when heated to 40°C and exposed for 96 hours. Microtomographic results were obtained, characterizing both the appearance of the embryo and allowing visualization of the location, structure, and calculation of the volume and radiographic density of internal organs. The results obtained open up significant prospects for the use of the chick embryo in the prefetal period of embryogenesis as a model for screening for teratogenicity.

**Введение.** Куриный эмбрион все чаще рассматривается как удобная биологическая модель, на которой можно с высокой степенью достоверности тестировать тератогенные эффекты (Wachholz et al., 2021; Ribatti, Annese, 2023). Для изучения процессов эмбриогенеза и его нарушений морфологические особенности выступают ключевыми

аспектами. Однако небольшие размеры и сложные пространственные детали эмбрионов, особенно на ранних этапах развития, вызывают сложность изучения их трехмерной анатомии. Незаменимыми инструментами в этом аспекте выступают методы трехмерной визуализации, среди которых все больший интерес привлекает метод рентгеновской микротомографии (микроКТ) (Osterwalder et al., 2021). МикроКТ – неразрушающий метод визуализации, преимуществами которого являются скорость исследования, высокое разрешение, количественная оценка размера и морфологии тканей, возможность полнообъемной визуализации (Metscher, 2009). Однако применение метода ограничено низкой рентгеноконтрастностью эмбриональных тканей. В связи с этим, целью настоящей работы являлась отработка простого, но эффективного способа контрастирования для микроКТ визуализации куриного эмбриона с использованием фосфорновольфрамовой кислоты (ФВК). Ранее проведенные нами исследования показали, что на 5-8 сутки инкубации окрашивание фосфорновольфрамовой кислотой при нагреве 40°C приводит к достаточному уровню общего рентгенконтрастирования эмбриона, а также дифференцирования внутренних органов. Однако низкий уровень проницаемости ФВК и повышение количества соединительной ткани в процессе инкубации, требует анализа возможности контрастирования на следующих стадиях развития.

### **Материалы и методы.**

**Приготовление эмбриона.** Использовались оплодотворенные куриные яйца «Хайсекс Браун», приобретенные в ООО «Агротермсервис плюс» (Республика Адыгея, Гиагинская станица). Яйца инкубировались до сроков от 9-х до 12-х суток (от HH35 до HH38) (Hamburger, Hamilton, 1951) при температуре 37,5°C и 50% относительной влажности в цифровом инкубаторе Rcom Maru Deluxe Max 380 (AUTOELEX CO., LTD, Korea). На каждые сутки инкубации (с 9 по 12 сутки) согласно рекомендациям по гуманной эвтаназии (Bjornstad et al., 2015; Underwood, Anthony, 2020) эмбрионы умерщвлялись, путем воздействия CO<sub>2</sub> (70%) продолжительностью 20 минут. Извлеченные эмбрионы фиксировали в 10% забуференном растворе формалина 72 часа.

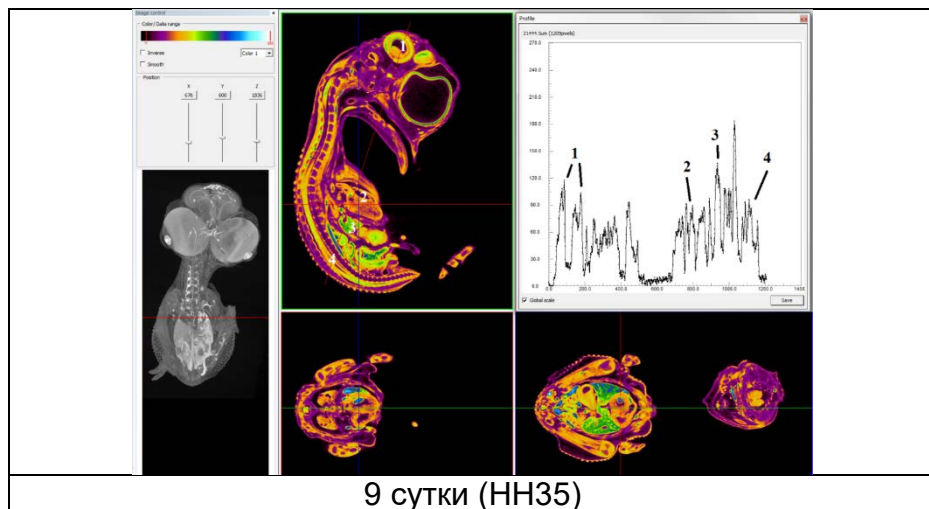
**Окраска.** Для контрастирования фиксированные эмбрионы (9-12 сутки инкубации, эмбриональные стадии HH35-HH38) промывали под проточной водой в течение 12 часов, обезвоживали в сменных порциях этанола 30% (2 часа), 50% (2 часа), 70% (12 часов), помещали в 1 % раствор фосфорновольфрамовой кислоты 1:20 (объем эмбриона к объему раствора) и выдерживали 96 часов при 40°C.

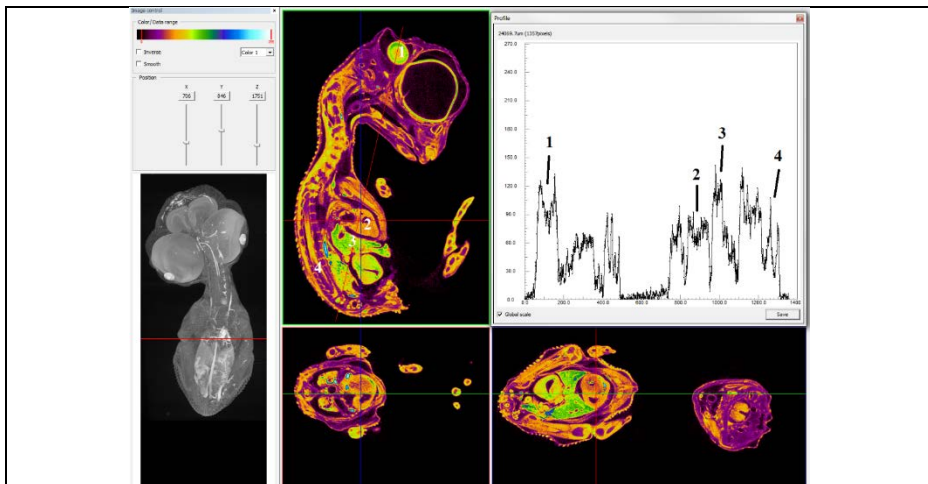
**Системы визуализации микроКТ.** Пробирки с образцами эмбрионов в 70% растворе этилового спирта были перенесены в

микротомограф Skyscan 1176 (Брукер, Бельгия) и закреплены на месте пенопластовыми направляющими. Сканирование эмбрионов выполняется путем поворота 11-мегапиксельной камеры (4000×2672 пикселей) на 180° (0,3°/ шаг), усреднение трех изображений на шаг, в результате чего получается 8,87 мкм изометрическое пространственное разрешение. Сгруппированные изображения (стеки изображений) были обработаны и реконструированы в наборы 3Д-данных с использованием NRecon (версия 1.7.4.2, Брукер, Бельгия). Процесс занял около 2 часов для каждой пробирки с образцом. Постобработка, выравнивание, ориентация в пространстве (x, y, z), отображение профилей рентгенконтрастности и выделение отдельных областей реконструированных материалов проводились в программе DataViewer (1.5.6.2, Брукер, Бельгия). Визуализация 3D изображений проводилась в программе CTvox (3.3.0r1403, Брукер, Бельгия). Морфометрия и оценка рентгенплотности эмбриона в единицах шкалы Хаунсфилда (HU) осуществлялись с помощью программного обеспечения CT-analyser (1.18.4.0, Брукер, Бельгия), по разработанным нами методикам для различных видов тканей (Rzhepakovsky et al., 2021; Nagdalian et al., 2021).

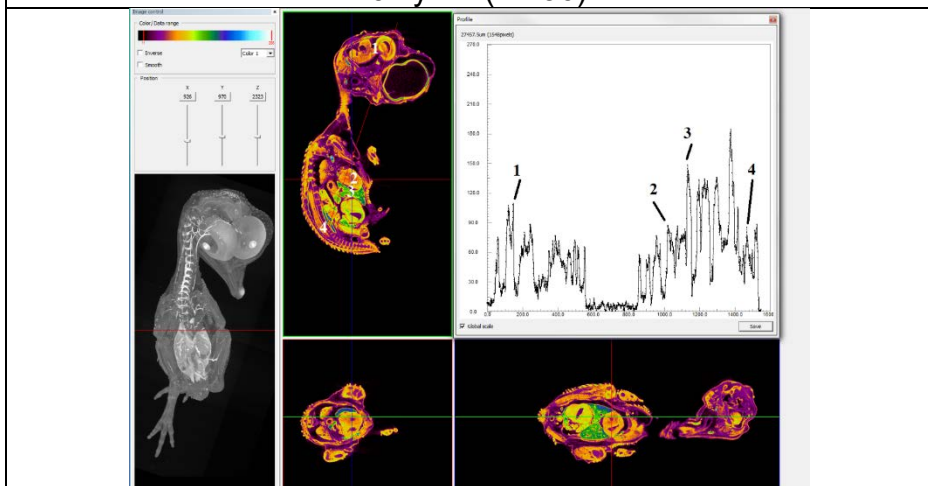
### Результаты исследования.

Полученные результаты отображены на рисунках и свидетельствуют о высоком уровне визуализации органов и тканей эмбриона на всех исследуемых стадиях с 9 по 12 сутки (от HH35 до HH38) при применении методики окрашивания 1% ФВК при нагреве 40°C и экспозиции 96 часов.

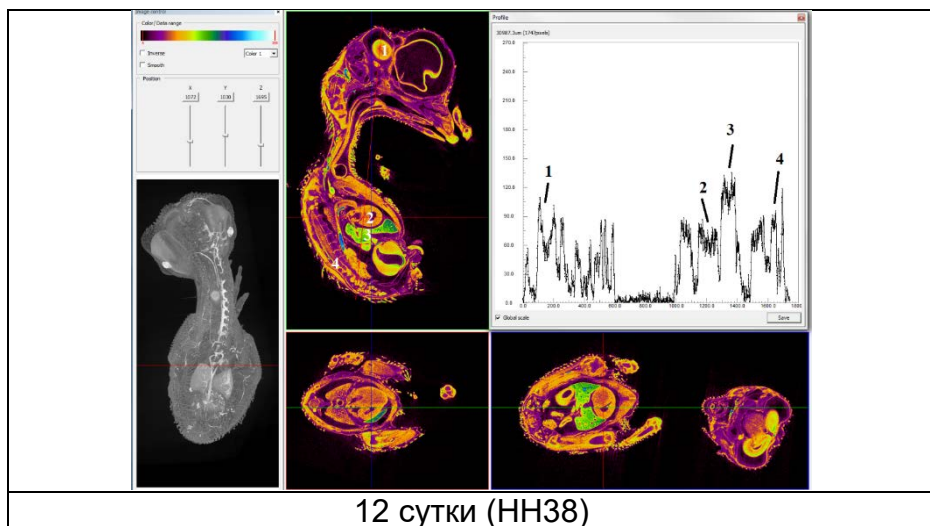




10 сутки (HH36)



11 сутки (HH37)



**Рис. -** Репрезентативные изображения продольного и поперечного сечений куриных эмбрионов (9-12-е сутки, эмбриональные стадии HH35-HH38), обработанных 1%-ным раствором ФВК. На изображениях куриных эмбрионов в продольном сечении отмечены следующие органы: мозг – 1; сердце – 2; печень – 3; позвоночник и нервный канал – 4. Визуализация и отображение профилей рентгеноконтрастности различных структур куриного эмбриона в программе DataViewer.

При сканировании эмбрионов на всех исследуемых стадиях развития использовался фильтр Al+Cu с проходящим уровнем излучения в большинстве плоскостей куриного эмбриона в пределах 30-50%, что позволило хорошо визуально отделить окружающий фон от структур эмбриона. При этом пики гистограмм (оттенков серого), характеризующие различные органы эмбриона, были на высоком уровне. Внутренние органы хорошо визуализированы, не имеют дефектов, например, отсутствия контрастного окрашивания в первую очередь структур печени. Печень, по нашим данным, в первую очередь из всех органов теряет контрастность при недостаточном окрашивании ФВК.

В таблице приведены результаты, показывающие увеличение визуализируемого объема эмбрионов на исследуемых эмбриональных стадиях HH 36, HH 37 и HH 38 по отношению к стадии HH 35 на 24,7%, 66,5% и 175,8%, соответственно (при  $P \leq 0,05$ ). При этом общая рентгенплотность по шкале Хаунсфильда снижалась не выражено и по сравнению с 9 сутками (HH 35) снизилась к 12 суткам только на 9,14 % (при  $P > 0,05$ ).

**Таблица. Визуализированный объем и рентгеновская плотность куриного эмбриона при контрастной окраске 1% раствором ФВК 96 часа при 40°C (9-12 сут., эмбриональные стадии HH35-HH38), n=5, M±m**

Параметр	9 сутки, (HH35)	10 сутки, (HH36)	11 сутки, (HH37)	12 сутки, (HH38)
Визуализируемый объем, мм <sup>3</sup>	762±45	950±53	1269±91	2101,5±184
Рентгеновская плотность по шкале Хаунсфилда, HU	7438,8±302	7312,1±248	6959,6±212	6758,7±135

### **Заключение.**

Оптимальной и эффективной методикой окрашивания эмбриона в предплодный период (9-12 сутки инкубации, эмбриональные стадии HH35-HH38) достоверно определена окраска 1% раствором фосфорновольфрамовой кислоты при нагреве 40°C и экспозиции 96 часов. МикроКТ данные, характеризующие как внешний вид эмбриона в предплодном периоде, так и позволяющие визуализировать расположение, структуру, рассчитать объем и рентгенплотность внутренних органов открывают значительные перспективы использования куриного эмбриона в предплодный период эмбриогенеза, как модель для скрининга тератогенности.

**Финансирование.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-24-00282, <https://rscf.ru/project/23-24-00282/>.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Bjornstad S., Austdal L.P.E., Roald B., Glover J.C., Paulsen R.E. Cracking the Egg: Potential of the Developing Chicken as a Model System for Nonclinical Safety Studies of Pharmaceuticals // *Journal of Pharmacology and Experimental Therapeutics*. 2015. 355(3), 386–396. DOI:10.1124/jpet.115.227025.
2. Hamburger V., Hamilton H.L. A series of normal stages in the development of the chick embryo // *Journal of morphology*. 1951. 88(1), 49-92. DOI:10.1002/aja.1001950404.
3. Metscher B.D. MicroCT for developmental biology: A versatile tool for high-contrast 3D imaging at histological resolutions. *Developmental dynamics: an official publication of the American Association of Anatomists*. 2009. 238(3), 632-640. DOI:10.1002/dvdy.21857.
4. Nagdalian A.A., Rzhepakovsky I.V., Siddiqui S.A., Piskov S.I., Oboturova N.P., Timchenko L.D., Lodygin A.D., Blinov A.V., Ibrahim S.A. Analysis of the content of mechanically separated poultry meat in sausage using computing microtomography // *J Food Compos Anal* 2021; 100: 103918. DOI:10.1016/j.jfca.2021.103918.
5. Osterwalder M., Bolten J.S., Rodgers G., Humbel M., Schulz G., Tanner C., et al. Hard X-ray microtomography of Zebrafish larvae // *International Conference on X-Ray Lasers* 2020. SPIE; 2021. 308–322. DOI:10.1117/12.2593119.
6. Rzhepakovsky I., Anusha Siddiqui S., Avanesyan S., Benlidayi M., Dhingra K., Dolgalev A., ... & Grimm W.D. Anti-arthritic effect of chicken embryo tissue hydrolyzate against adjuvant arthritis in rats (X-ray microtomographic and histopathological analysis) // *Food Science & Nutrition*/ 2021. 9(10), 5648-5669. DOI: 10.1002/fsn3.2529.
7. Ribatti D., Annese T. Chick embryo in experimental embryology and more // *Pathology-Research and Practice*. 2023; 154478. DOI:10.1016/j.prp.2023.154478
8. Underwood W., Anthony R. AVMA guidelines for the euthanasia of animals: 2020 edition. Retrieved on March. 2020. 2013(30), 2020-1.
9. Wachholz G.E., Rengel B.D., Vargesson N., Fraga L.R. From the farm to the lab: how chicken embryos contribute to the field of teratology // *Frontiers in Genetics*. 2021. 12. 666726. DOI:10.3389/fgene.2021.666726.

## МИКРОТОМОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОДОНТОМ ЧЕЛОВЕКА

Пихур О.Л.<sup>1</sup>, Плоткина Ю.В.<sup>2\*</sup>, Кульков А.М.<sup>3</sup>, Тишков Д.С.<sup>1</sup>, Громов  
А.Л.<sup>1</sup>, Гречихин С.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Курский государственный медицинский университет

<sup>2</sup> Институт геологии и геохронологии докембрия РАН

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный университет,

## MICROTOMOGRAPHIC STUDIES OF HUMAN ODONTOMAS

Pikhur O.L.<sup>1</sup>, Plotkina Yu.V.<sup>2\*</sup>, Kulkov A.M.<sup>3</sup>, Tishkov D.S.<sup>1</sup>,  
Gromov A.L.<sup>1</sup>, Grechikhin S.S.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kursk State Medical University, Kursk, Russia

<sup>2</sup> IPGG RAS, St.Petersburg, Russia

<sup>3</sup> St.Petersburg State University, St.Petersburg, Russia

[jplotkina@yandex.ru](mailto:jplotkina@yandex.ru)

**Аннотация.** Методом рентгеновской компьютерной микротомографии изучены образцы одонтом, удаленных у лиц молодого возраста. Полученные изображения новообразований и построенные трехмерные модели исследуемых объектов позволили детально изучить морфологию одонтом, установить классификационный вид и провести их дифференциальную диагностику.

**Abstract.** X-ray computed microtomography was used to study samples of odontomas removed from young people. The obtained images of neoplasms and constructed 3D models of the objects under study made it possible to study in detail the morphology of odontomas, establish the classification type of odontomas and conduct their differential diagnosis.

Доброкачественные опухоли и предопухолевые образования костей челюстно-лицевой области, к которым относятся одонтомы, наблюдаются у лиц обоих полов различного возраста и сопровождаются формированием значительных деформаций костей верхней и нижней челюстей. В настоящее время вопросы этиопатогенеза одонтом полностью не изучены, диагностика одонтом сложна из-за их выраженной морфологической неоднородности. Современные методы исследования дают возможность детально изучать морфологическое строение различных видов одонтом без нарушения их целостности.

Изучены образцы одонтом, удаленные в ходе хирургического вмешательства по медицинским показаниям у пациентов обоего пола в возрасте 6-20 лет. Методом рентгеновской компьютерной микротомографии, с помощью томографа Skyscan 1172 (Бельгия), были изучены морфология и внутреннее строение одонтом, а также построены 3D-модели исследуемых объектов.

Среди изученных образцов одонтом выделены следующие классификационные виды: твердая простая одонтома (рис. 1) и твердая сложная составная одонтома (рис. 2).

Детально описанными примерами являются:

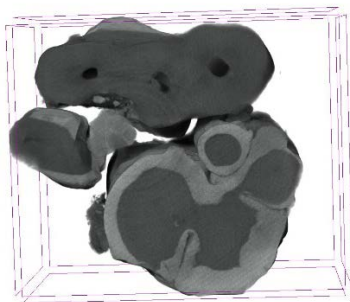
- 1) твердая простая одонтома размером 0,6 x 0,9 см, удаленная у пациента мужского пола в возрасте 7 лет, в области центрального верхнего левого резца;
- 2) твердая сложная составная одонтома размером 0,5 x 1,0 см, обнаруженная у пациентки 20 лет, в области третьего нижнего моляра слева;
- 3) твердая сложная составная одонтома размером 1,0 x 1,2 см у пациента мужского пола в возрасте 11 лет, в области моляров нижней челюсти слева.



**Рис. 1.** Твердая простая одонтома по данным компьютерной микротомографии: а – внешний вид; б – внутреннее строение.



а

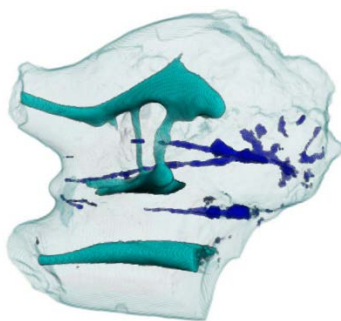


б

Z - 6.367mm



skyScan\_1172 В



Г

**Рис. 2.** Твердая сложная составная одонтома по данным компьютерной микротомографии: а – внешний вид; б – внутреннее строение и взаиморасположение одонтоидов; в – единственный срез, перпендикулярный оси удлинения одонтомы; г – расположение полостей (синий цвет), каналов и анастомозов между ними (голубой цвет) внутри крупного одонтоида.

Твердые сложные составные одонтомы содержат 6-8 одонтоидов, размер которых варьирует от 2-3 до 7-8 мм.

Твердую одонтому составляют петрифицированные высокодифференцированные зубные структуры. В состав этой опухоли

входят разные ткани зуба: эмаль, дентин, цемент, периодонт, пульпа. Эти ткани обызвествлены и находятся на разной стадии развития. Эта одонтома покрыта плотной капсулой. Простая твердая одонтома включает части одного фолликулярного зачатка, в то время как сложная твердая одонтома представлена сочетанием различных тканей зуба разных зачатков. Простая одонтома – одонтома, образованная небольшим количеством хаотично перемешанных твёрдых тканей, достаточных для формирования только одного зуба. Морфологически образование выглядит как инкапсулированный узелок с недоразвитым или деформированным зубом. Простая одонтома связана с пороком развития одного зубного зачатка.

Сложная одонтома образована значительным количеством твёрдых тканей, достаточным для построения нескольких зубов. Такая одонтома связана с нарушением развития нескольких зачатков зубов, поэтому содержит твердые ткани на разных стадиях развития. Составная сложная одонтома состоит из нескольких правильно сформированных, но деформированных зубов (одонтоидов), с центрально расположенной в них пульпой. Морфологически она представляет собой инкапсулированный узел из нескольких одонтоидов, легко разделяющихся или плотно спаянных между собой соединительной тканью.

На основе полученных данных, проведена диагностика и дифференциальная диагностика исследуемых образований с другими одонтогенными и неодонтогенными опухолями челюстно-лицевой области и установлен классификационный вид одонтом. С помощью метода компьютерной микротомографии построена трехмерная модель исследуемого объекта, что позволило получить полное представление о морфологическом строении одонтомы.

Микротомографическое исследование проведено в Научно-исследовательском центре рентгеноструктурных исследований Санкт-Петербургского государственного университета в соответствии с Государственным заданием РФ № ААААА 19-119091190094.

# МИКРОТОМОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОДОНТОМЫ ЕЖА

Плоткина Ю.В.<sup>1\*</sup>, Пихур О.Л.<sup>2</sup>, Кульков А.М.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии и геохронологии докембрия РАН

<sup>2</sup> Курский государственный медицинский университет

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный университет,

## MICROTOMOGRAPHY INVESTIGATION OF HEDGEHOGS ODONTOMA

Plotkina Yu.V.<sup>1\*</sup>, Pikhur O.L.<sup>2</sup>, Kulkov A.M.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> IPGG RAS, St.Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Kursk State Medical University, Kursk, Russia

<sup>3</sup> St.Petersburg State University, St.Petersburg, Russia

[jplotkina@yandex.ru](mailto:jplotkina@yandex.ru)

**Аннотация.** Методом рентгеновской компьютерной микротомографии изучена одонтома ежа, полученная в ходе хирургического операционного вмешательства. Получены трехмерные изображения данного новообразования, что позволило детально описать морфологию одонтомы и установить ее классификационный вид. Рассмотрен вопрос этиопатогенеза одонтомы.

**Abstract.** A hedgehog odontoma obtained during surgical intervention was studied by X-ray computed microtomography. Three-dimensional images of this neoplasm were obtained, which made it possible to describe in detail the odontoma morphology and establish its classification type. The etiopathogenesis of odontoma was considered.

Одонтома – образование, которое является результатом аномалии развития тканей зубов, то есть опухоль органоспецифическая и развивается только в челюстных костях. Одонтома, как правило, имеет неправильную шишковатую форму и варьирует в размерах от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. Симптомы заболевания зависят от места локализации одонтомы, ее размеров и выраженности воспалительных явлений в окружающих тканях.

Одонтома составляет порядка четверти от всех доброкачественных одонтогенных опухолей и делит первое место по частоте встречаемости с амелобластомой, поэтому проблему можно назвать достаточно распространенной в стоматологической практике.

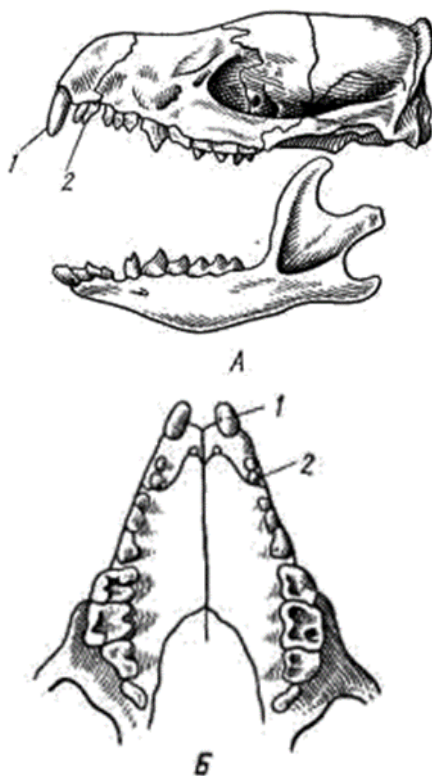
В литературе встречаются данные об обнаружении одонтом у животных, чаще у собак и лошадей. Этиопатогенез, морфология и признаки классификации одонтом человека и млекопитающих животных сходны, также как их диагностика и лечение.

Обыкновенный или европейский еж относится к отряду насекомоядных класса млекопитающих. Зубной аппарат ежей обычно содержит от 34 до 44 зубов. Ежи относятся к дифидодонам – животным (в основном млекопитающим), у которых в молодости появляются временные зубы, а затем они выпадают и заменяются постоянными по достижении определенного возраста (6-9 недель). Основные виды зубов у ежей: резцы (I) - наружный и внутренний, клыки (C), премоляры (PM) и моляры (M).

Типичная зубная формула ежа:  $I \frac{3}{2} C \frac{1}{1} PM \frac{3}{2} M \frac{3}{3}$ .

Зубной ряд обследованного ежа имел следующие характеристики. Общее количество зубов составляло 36. Моляры (3) - большие, плоские зубы, расположенные на заднем крае челюсти, служащие для разжевывания пищи. Премоляры (3) - меньшие, острые зубы, расположенные впереди моляров, помогающие обрабатывать пищу перед тем, как она попадет на задние зубы. Клыки отсутствуют. Резцы (3) подразделяются на наружный (1) и внутренний (2). Верхние резцы внутренней (передней) пары (левый и правый) разделены широким промежутком. Моляры и премоляры верхних и нижних зубных рядов бугорчатые, без промежутков (диастем).

Нами исследована одонтома, удаленная в ходе хирургического вмешательства по медицинским показаниям (острый воспалительный процесс) в ветеринарной клинике Санкт-Петербургского зоопарка. Методом рентгеновской компьютерной микротомографии с помощью томографа Skyscan 1172 (Бельгия) были изучены морфология и внутреннее строение одонтомы.



**Рис. 1.** Схематичное изображение зубо-челюстного аппарата ежа обыкновенного. А – вид сбоку; Б – вид снизу: 1 - наружный резец, 2 - внутренний резец (<https://helpiks.org>, 2014).

Из анамнеза жизни ежа известно, что животное в первые 2-3-месяца жизни, после отлучения от грудного вскармливания, получал неполноценное и несбалансированное питание. Вследствие этого у ежа было нарушено нормальное развитие организма, в том числе и зубо-челюстной системы. Кроме того, еж приобрел пищевую аллергию и наблюдалось частичное отсутствие шерсти. Далее еж проходил лечение, было скорректировано питание и наблюдалась нормализация общего состояния (восстановление шерстяного покрова и весовых норм организма соответственно возрасту). В возрасте 4 лет появились симптомы воспаления в ротовой полости.

Рентгенологическое обследование позволило выявить очаг воспаления в области одонтомы на верхней челюсти с левой стороны



(рис.2). Кроме того, была установлена сопутствующая стоматологическая патология – хронический генерализованный пародонтит (рис. 3).



**Рис. 2.** Череп обследованного ежа по данным рентгенологического исследования: очаг воспаления в области одонтомы на верхней челюсти слева.



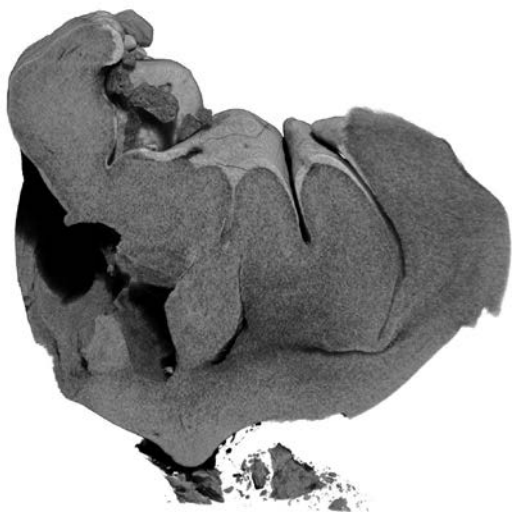
**Рис. 3.** Рентгенологический снимок зубо-челюстного аппарата обследованного ежа: хронический генерализованный пародонтит, наличие зубных камней.

Одонтома, экстрагированная у ежа, классифицирована как твердая сложная составная (рис. 4). В ней представлены разные виды твердых тканей зуба: эмаль, дентин, цемент. Данная одонтома имеет размер 0,8 x 0,7 см и состоит из 8 одонтоидов разной величины, соединенных между собой.

С внутренней стороны самого крупного одонтоида эмаль отсутствует (рис. 4 в, г), а с внешней стороны и на жевательной поверхности она имеет неравномерную толщину, есть участки с обнаженным дентином (рис. 4а, д, е). На жевательной поверхности эмаль образует очень глубокие складки, уходящие в дентин на 70-80 % его толщины (рис. 4 б, е). Возможно, наличие таких складок послужило причиной возникновения воспалительного процесса за счет накопления микроорганизмов.



a

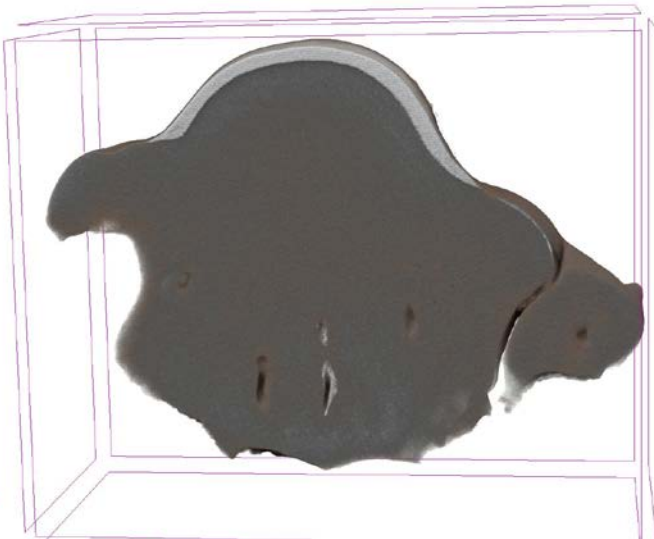


6





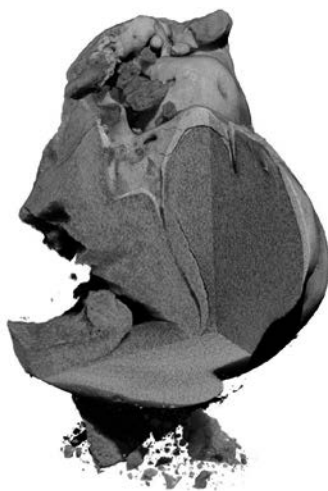
B



Г



д



е



**Рис. 4.** 3D модели одонтомы ежа по данным компьютерной микротомографии.

Причиной возникновения одонтомы, вероятно, было нарушение процесса формирования зубо-челюстного аппарата в начальный период жизни, вследствие неправильного питания животного. Заболевание протекало долгое время бессимптомно, что типично для одонтом. Новообразование было обнаружено в результате обследования ежа при развитии воспалительного процесса в области одонтомы, после того как применяемая противовоспалительная терапия оказалась неэффективной. Хирургическое удаление одонтомы привело к положительному исходу заболевания.

Использование метода рентгеновской компьютерной микротомографии позволило получить представление о внутреннем строении одонтомы без нарушения ее целостности. Метод позволил точно поставить диагноз «одонтома» и конкретизировать классификационный вид одонтомы. Это особенно важно, так как каждая одонтома уникальна и не повторяет ни одну другую, даже если они относятся к одному виду по классификации. Кроме того, метод дает возможность провести дифференциальную диагностику с другими новообразованиями челюстно-лицевой области. Данные, получаемые на основе этих исследований, позволяют раскрывать этиопатогенетические механизмы образования одонтом и являются основой для диагностики и проведения лечебно-профилактических мероприятий по поводу этой патологии.

Микротомографическое исследование проведено в Научно-исследовательском центре рентгеноструктурных исследований Санкт-Петербургского государственного университета в соответствии с Государственным заданием РФ № ААААА 19-119091190094.

Авторы выражают благодарность сотруднику ветеринарной клиники Санкт-Петербургского зоопарка врачу Юлии Акиньховой.

## МОРФОЛОГИЯ И СОСТАВ ТВЕРДЫХ ТКАНЕЙ ЗУБОВ ПРИ РАЗВИТИИ НЕКАРИОЗНЫХ ПОРАЖЕНИЙ ЗУБА

Пихур О.Л.<sup>1</sup>, Плоткина Ю.В.<sup>2\*</sup>, Кульков А.М.<sup>3</sup>, Тишков Д.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Курский государственный медицинский университет

<sup>2</sup> Институт геологии и геохронологии докембрия РАН

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный университет

## MORPHOLOGY AND COMPOSITION OF HARD TEETH TISSUES IN THE DEVELOPMENT OF NON-CARIOUS LESIONS OF THE TOOTH

Pikhur O.L.<sup>1</sup>, Plotkina Yu.V.<sup>2\*</sup>, Kulkov A.M.<sup>3</sup>, Tishkov D.S.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kursk State Medical University, Kursk, Russia

<sup>2</sup> IPGG RAS, St.Petersburg, Russia

<sup>3</sup> St.Petersburg State University, St.Petersburg, Russia

[jplotkina@yandex.ru](mailto:jplotkina@yandex.ru)

**Аннотация.** Методами рентгеновской компьютерной микротомографии (mCT), сканирующей электронной микроскопии (SEM) и микрозондового анализа проведено изучение морфологии и состава твердых тканей зубов при некариозных поражениях, в виде повышенной стираемости, эрозии и клиновидных дефектов зуба. Выявлены характерные морфологические изменения, происходящие при развитии данных патологий. Определено содержание основных элементов и значения Ca/P-коэффициента в эмали и дентине.

**Abstract.** X-ray computed microtomography, scanning electron microscopy and microprobe analysis were used to study the morphology and composition of hard teeth tissues in non-carious lesions in the form of increased abrasion, erosion and wedge-shaped defects of tooth. The characteristic morphological changes occurring during the development of these pathologies are revealed. The content of the main elements and the values of the Ca/P-coefficient in enamel and dentin were determined.

В настоящее время в структуре стоматологических заболеваний среди взрослого населения России наблюдается тенденция к увеличению распространенности некариозных поражений зуба, поэтому изучение морфологии и состава твердых тканей зубов при этой патологии несомненно является важной задачей.

Изучены образцы твердых тканей зубов при развитии некариозных поражений, возникающих после прорезывания зуба, в виде повышенной стираемости, эрозии и клиновидных дефектов. Зубы были удалены по медицинским показаниям у пациентов обоего пола в возрасте 20-65 лет.

Внутреннее строение зубов изучено методом рентгеновской компьютерной томографии с помощью томографа Neoscan N80 (Бельгия). Морфология поверхности и сколов твердых тканей зубов изучена методом сканирующей электронной микроскопии (TESCAN VEGA 3, Чехия). Содержание основных элементов в твердых тканях зубов определяли с использованием SEM Hitachi S-3400N, Oxford Instruments X-Max20 EDS. Спектры обработаны с помощью программного пакета AzTec Energy (версия 2.2) методом TrueQ. В исследованных образцах был изучен как сам очаг поражения, так и прилегающие к нему области.

При изучении образцов зубов с некариозными поражениями выявлены характерные морфологические признаки повышенной стираемости (рис. 1), эрозии (рис. 2) и клиновидных дефектов (рис. 3), а также морфологические изменения, происходящие в эмали, дентине, цементе и особенности строения эмалево-дентинного и эмалево-цементного соединения при развитии данных патологий.

При исследовании образцов зубов с повышенной стираемостью выявлено, что характерным признаком является наличие фасеток стертости. Процесс стирания зубов сопровождается обламыванием тонкого слоя эмали, сохранившегося по периметру зуба. В дентине, оказавшемся на поверхности в результате прогрессирования процесса стирания, обнаруживаются признаки компенсаторных процессов, что выражается в уплотнении поверхностного обнаженного слоя, облитерации дентинных канальцев и образовании заместительного дентина.

Эрозия представляет собой дефект эмали округлой формы. Дно эрозии матовое и шероховатое из-за убыли эмали вследствие воздействия какого-то агрессивного фактора (механического и/или химического). Это приводит к откалыванию значительных участков эмали по периферии эрозии и углублению ее к эмалево-дентинной границе.

Исследование эмали и границы клиновидного дефекта со стороны режущего края или жевательной поверхности позволило выделить два варианта перехода между клинически неизменной эмалью и тканями в зоне поражения: образование нависающего края эмали над областью клиновидного дефекта и резкий переход между эмалью и клиновидным дефектом. Развитие того или другого варианта обуславливается характером и длительностью воздействия патологического фактора или их совокупности.



При некариозных поражениях наблюдается развитие трещиноватости внутри эмали, между эмалью и дентином и в области эмалево-цементного соединения различной степени выраженности, что свидетельствует о резком снижении прочности соединения эмали и дентина, и ведет к потере значительных участков твердых тканей зуба.

При повышенной стираемости зубов содержание основных элементов варьировало в эмали: Ca (35.78-38.09 вес %), P (18.14-18.97 вес %), Na (0.47-0.63 вес %), Mg (0.34-0.73 вес %); в дентине: Ca (33.31-34.76 вес %), P (17.50-17.92 вес %), Na (0.62-1.08 вес %), Mg (0.73-1.00 вес %). Среднее значение Ca/P-коэффициента составило в эмали 1.53, в дентине - 1,48.

При наличии эрозии состав эмали менялся в диапазоне: Ca (24.56-30.73 вес %), P (13.81-16.62 вес %), Mg (0.37-0.65 вес %), Na (0.87-1.14 вес %). Ca/P-коэффициент составил 1.40.

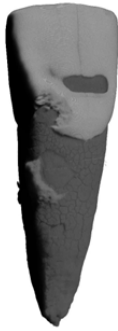
При изучении состава эмали при клиновидном дефекте зуба установлены следующие содержания элементов: Ca (26.57-31.35 вес %), P (15.02-17.63 вес %), Mg (0.27-0.98 вес %), Na (0.69-1.38 вес %), Cl (0.14-0.69 вес %), F (1.75 вес %). Среднее значение Ca/P-коэффициента - 1.37.

Изучение строения и состава твердых тканей зубов, при развитии некариозных поражений, позволяет определить особенности этиологии и патогенеза этих патологических процессов и создает теоретические предпосылки к повышению эффективности профилактики и лечения стоматологических заболеваний.

Микротомографические исследования проведены в Научно-исследовательском центре рентгеноструктурных исследований Санкт-Петербургского государственного университета в соответствии с Государственным заданием РФ № ААААА 19-119091190094.



**Рис. 1.** 3D модели зубов с повышенной стираемостью по данным компьютерной микротомографии.



а

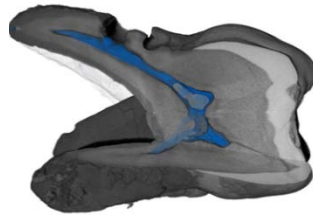


б

**Рис. 2.** 3D модели зубов с эрозией по данным компьютерной микротомографии.



а



б

**Рис. 3.** 3D модели зубов с клиновидными дефектами по данным компьютерной микротомографии: а – премоляр нижней челюсти; б – моляр верхней челюсти.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОТОМОГРАФИИ ДЛЯ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКСПОНАТОВ ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ЭРМИТАЖА

Богма М.В., Ильина Ю.И., Малкиель И.К.

Государственный Эрмитаж

EXPERIENCE OF APPLICATION OF  
MICROTOMOGRAPHY FOR RESEARCH THE STATE  
HERMITAGE MUSEUM EXHIBITS.

Bogma M.V, Ilyina Yu.I., Malkiel I.K.

The State Hermitage Museum

[bogma.mv@hermitage.ru](mailto:bogma.mv@hermitage.ru)

**Аннотация.** Статья посвящена микротомографическому изучению особенностей технологии изготовления эллинистической керамики.

**Abstract.** The article describes to the X-Ray 3D microtomographic study of the features of the Hellenistic ceramics manufacturing technology.

В отделе Античного мира Государственного Эрмитажа хранится ценнейший образец эллинистической керамики – миниатюрный красноглиняный кубок с рельефом (рис.1), купленный в 1908 году в Ольвии Б.В.Фармаковским.



**Рис. 1.** Кубок эллинистический, Инв. № Ол.4424, хранитель Ю.И. Ильина, реставратор Т.В. Шлыкова.

Кубок датируется сер. II – сер. I вв. до н.э., Пергам. Он представляет собой тонкостенный сосуд высотой 8,3 см простой вертикальной формы с туловом, плавно сужающимся книзу, с покатыми плечиками, широким горлом, на плоском дне. Нижнюю часть тулова украшает декоративный фриз в низком рельефе, изображающий изгибающуюся ветвь плюща. Тесто светло-рыжего цвета, относительно слабого обжига, визуальное изучение и микроскопическое исследование показали, что оно имеет тонкую текстуру и содержит мельчайшие включения слюды. Стало возможным изучить детали изображений на рельефе: в частности, были выявлены мелкие фигурки птицы (рис. 2) и ящерицы (рис. 3) в верхней части фриза. Высказано предположение, что изображенная ящерица - это вид сцинков (мабуи), обитающий на Ближнем Востоке (определение произведено м.н.с. лаборатории герпетологии Зоологического института РАН Д.А. Мельниковым). Также была выявлена благопожелательная надпись на греческом языке (рис. 4).



**Рис. 2.** *Изображение на рельефе фигурки птицы.*



**Рис. 3.** *Изображение на рельефе фигурки ящерицы.*



**Рис. 4.** *Благопожелательная надпись на греческом языке*

Для исследования возможной технологии изготовления рельефа кубка применялся метод рентгеновской 3D-микротомографии.

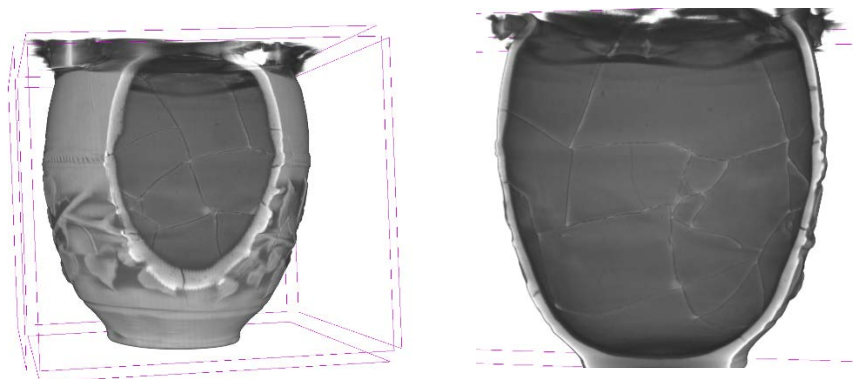
Рентгеновская 3D-микротомография использует рентгеновские лучи для создания поперечных сечений физического объекта, которые можно использовать для воссоздания виртуальной модели (3D-модели) без разрушения исходного объекта. Эти процессы могут раскрывать различные детали объекта, которые не видны невооруженным глазом, что может помочь специалистам при оценке состояния, планировании реставрационных работ, а также изучении самого памятника. Сканирование визуализирует всю внутреннюю трехмерную структуру объекта и полностью сохраняет образец для других видов исследований.

Сканирование проводилось на микротомографе SKYSCAN 1273, (Bruker, Бельгия) при 70 kV, 114 мкА, время экспозиции 75 минут. Микротомографическое исследование состоит из нескольких этапов: сканирование образца; последующая реконструкция теневых изображений с построением базы изображений, перпендикулярных оси вращения образца; визуализация полученных данных для качественного изучения внутреннего строения объекта и вывода необходимых изображений для дальнейшего использования.



**Рис. 5.** 3D-модель кубка.

В результате построения и послойного изучения 3D-модели кубка (рис. 5) удалось подтвердить предположение хранителя Ю.И. Ильиной о технике выполнения сосуда (рис. 6 и рис. 7).



**Рис. 5 и 6.** Послойные срезы 3D модели кубка.

Нижняя часть с рельефом отминалась в форму «на выход» (подобную формам, в которых изготавливались знаменитые «мегарские» чаши с рельефом). Затем, к полученному полуфабрикату присоединялась верхняя часть, полученная гончарным способом, а место стыка маскировалось тонкой наклепной лентой с насечками.

В связи с ценными данными, полученными хранителем памятника в процессе исследования, стало понятно, что его нужно публиковать и экспонировать.

МИКРОТОМОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХ  
КОСТЯННЫХ ОРУДИЙ ИЗ ПОСЕЛЕНИЯ БАЙ-КИЯТ I (КРЫМ)

Кульков А.М.<sup>1,2</sup>, Кулькова М.А.<sup>2</sup>, Кашуба М.Т.<sup>2,3</sup>,  
Малютина А.А.<sup>3</sup>, Кожуховская Ю.В.<sup>2,4</sup>.

<sup>1</sup> Санкт Петербургский Государственный Университет

<sup>2</sup> РГПУ им.А.И.Герцена, СПб

<sup>3</sup> Институт Истории Материальной Культуры РАН, СПб

<sup>4</sup> Крымский Федеральный Университет им. В.И. Вернадского

MICROTOMOGRAPHIC STUDY OF TWO BONE TOOLS FROM  
THE SETTLEMENT OF BAY-KIYAT I (CRIMEA)

Kulkov A.M.<sup>1,2</sup>, Kulkova M.A.<sup>2</sup>, Kashuba M.T.<sup>2,3</sup>,  
Malyutina A.A.<sup>3</sup>, Kozhukhovskaya Yu.V.<sup>2,4</sup>.

<sup>1</sup> St.Petersburg State University, St.Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Herzen University, St.Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Institute of the History of Material Culture RAS, St.Petersburg

<sup>4</sup> V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol.

[aquacrystals@narod.ru](mailto:aquacrystals@narod.ru)

**Аннотация.** В данной работе впервые был проведен сравнительный анализ результатов трасологического и микротомографического анализов костных находок на памятнике Бай-Кият I (Северо-Западный Крым) и сравнение результатов с данными, приведенными в научной литературе.

**Abstract.** This work is devoted to trasological and microtomographic analyses of bone finds which had been applied for skin preparation at the Bai-Kiyat I settlement (North-Western Crimea). The results obtained were compared to the data from literature sources.

Данная работа посвящена первому комплексному трасологическому и микротомографическому исследованию костяных изделий поселения Бай-Кият (XII-XI вв.до н.э.). Были изучены три фрагмента челюстей овец, два из которых использовались в качестве тупиков (скребков для мездрения шкур). В исследуемых объектах были выявлены разные типы систем трещин. Отмечено, что для тупиков система трещин, соответствующая трещинам природного выветривания, развита гораздо меньше.

Кость является одним из самых древних материалов для изготовления орудий и инструментов. Следы осознанного воздействия (прорезы, метки, канавки) отмечаются на костяном материале возрастом

2,4 - 2,5 млн лет. Особое развитие индустрия кости получила с началом активного скотоводства. Скелет домашнего скота предоставлял человеку орудия самого различного типа – от иголки и наконечника стрелы до лопаты и топора.

Трасологические исследования поверхности позволяют определить технологию изготовления и использования того или иного орудия за счет изучения следов на поверхности древних орудий и, при необходимости, сравнения их с экспериментально изготовленными аналогами. Так (*M.W. Lager, 2010*) экспериментально доказал, что половины нижних челюстей оленей использовались для изготовления особых скребков для мездрения кожи (тупиков). Вообще, нижние челюсти применялись древними людьми не только для мездрения кожи, но и как серпы, наковальни и т.д. К сожалению, довольно часто на археологических памятниках встречаются костяные останки с выветренной поверхностью, что не позволяет однозначно судить о том является ли находка орудием или просто фрагментом кости. Микротомографические исследования, позволяющие судить о внутреннем строении артефактов, проводятся, к сожалению, нерегулярно (в отличие от исследований зубов), но позволяют сделать выводы о перспективности применения микротомографии для определения следов воздействия на костяные изделия и отличия таких воздействий от природных факторов.

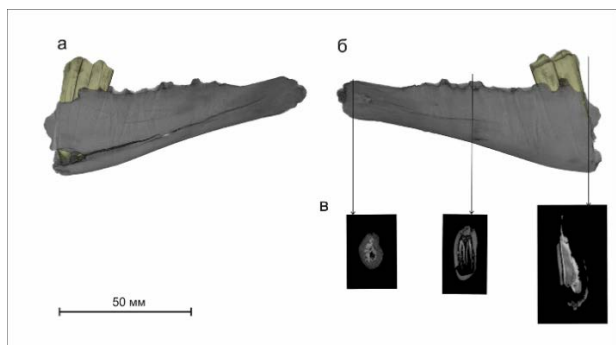
Данная работа посвящена выявлению следов воздействия человека на костный материал с помощью метода рентгеновской микротомографии. Ранее было проведено первое комплексное трасологическое и микротомографическое исследование костяных изделий поселения Бай-Кият I (северо-западный Крым, эпоха поздней бронзы, XII-XI вв до н. э.) обнаруженных в 1993-1994 годах В. А. Колотухиным (*Кашуба и др., 2023*). (рис 1)



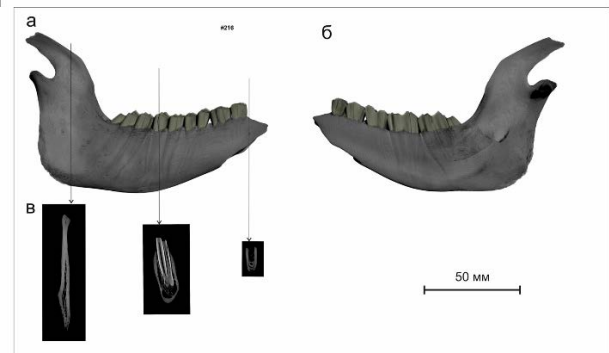


**Рис.1.** *Расположение памятника Бай-Кият, северо-западное побережье Крыма*

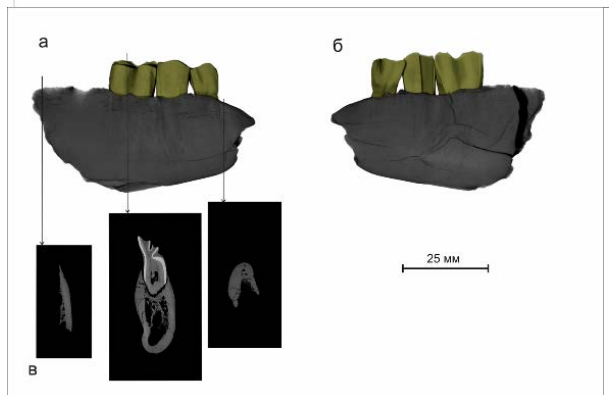
Были изучены три фрагмента челюстей овец, два из которых использовались в качестве тупиков (скребков для мездрения шкур). Находки исследовались трасологическим методом для выявления (или отсутствия) следов хозяйственного применения костяных останков и типа орудия, изготовленного из челюсти. Микротомографическое исследование применялось для выявления изменений в костной структуре между орудием из челюсти и фрагментом челюсти, не применявшейся в хозяйственной деятельности. Трасологический анализ выявил следы использования в качестве скребка для мездрения кожи на образцах №216 и №464. Для образца №342 следов использования выявлено не было. Анализ результатов микротомографического сканирования показал, что в образце №342 (рис. 2) присутствуют две пересекающиеся системы трещин – концентрические и в радиально-продольном направлении. Радиально-продольная трещиноватость более развита в наружных частях кости, а сами трещины, преимущественно, расширяются наружу. В образце №216 (рис. 3) наблюдается одна радиально-продольная трещина преимущественно равной ширины в радиальном направлении. Образец №464 (рис.4) демонстрирует две системы трещин – продольно радиальная система с преимущественным расширением трещин к центру челюсти и система с неупорядоченным распространением на лингвальной стороне. Трещины первой системы смыкаются преимущественно к наружной поверхности кости, для второй системы характерна равная ширина или расширение трещин к поверхности.



**Рис. 2**  
Микротомографическая реконструкция внешнего вида и строения обр. № 342



**Рис. 3**  
Микротомографическая реконструкция внешнего вида и строения обр. № 216

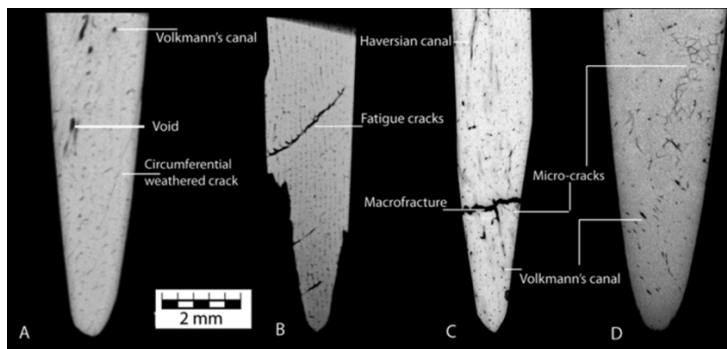


**Рис. 4**  
Микротомографическая реконструкция внешнего вида и строения обр. № 464

Для оценки развития трещиноватости кости вследствие выветривания, в работе (Behrensmeier, 1978) предложено разделить процесс на шесть стадий с 0 до 5. На нулевой стадии трещины выветривания отсутствуют, первая стадия характеризуется заметной продольной трещиноватостью и возможным образованием мозаичной трещиноватости по поверхности кости. На последней стадии кость полностью разрушена и невозможно

определить её исходную форму. В нашем случае, образец №342 демонстрирует вторую стадию выветривания – продольные остроугольные трещину и расслаивание кости по концентрическим трещинам. При этом поверхность кости частично утрачена, но сама кость сохраняет свою изначальную форму.

Примеры трещин, образовавшихся при воздействии на различные костяные орудия приведены в работе (Bradfield, 2016) (рис.5).



**Рис. 5.** Строение кости на микротомографических 2D срезах.

- А) выветривание, В) трещины напряжения (наконечник охотничьего орудия), С) микротрещины на острии прокола для кожи, Д) микротрещины на поверхности после топтания.*

Одна трещина типа В (рис 5) выявляется в образце №216, а для образца №464 можно выявить как трещины типа В, так и систему трещин аналогичных Д (хотя и более ярко выраженную).

Таким образом, микротомографическим методом в исследуемых объектах были выявлены разные типы систем трещин, позволяющих судить о наличии или отсутствия физического воздействия на кость. Кроме того, в ряде случаев, можно установить тип воздействия и дифференцировать трещины выветривания и степень выветривания. Следует заметить, что для тупиков система трещин, соответствующая трещинам природного выветривания, развита гораздо меньше, нежели в костях, не задействованных в хозяйственной деятельности человека.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 22-18-00065.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кашуба М.Т., Малютина А.А., Кульков А.М., Кожуховская Ю.В., Кулькова М.А. О функциональности использования нижней челюсти животных в хозяйстве Позднего Бронзового Века (по находкам из поселения Бай-Кият I, Полуостров Тарханкут) Самарский научный вестник. 2023. Т. 12, № 2
2. Behrensmeyer, A. K. Taphonomic and ecologic information from bone weathering. *Paleobiology* 48: 1978.150-162.
3. Bradfield J. Fracture analysis of bone tools: a review of the micro-CT and macrofracture methods for studying bone tool function // *Close to the bone: current studies in bone technologies* / ed. S. Vitezović. Belgrade: Institute of Archaeology, 2016. P. 71–79.
4. Lager M.W. Deer mandible tools: an examination of Oneota modified mandibles from La Crosse County, Wis-consin. UW-L Archaeology Senior Thesis. Wisconsin: Uni-versity of Wisconsin-La Crosse, 2010. 41 p.

КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ КАК СПОСОБ ОЦЕНКИ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ КОНСЕРВАЦИИ  
ДЕРЕВЯННЫХ ОСНОВ С БИОЛОГИЧЕСКИМИ  
ПОВРЕЖДЕНИЯМИ.

Гефдинг И.П.<sup>1</sup>, Карева А.К.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Государственный Эрмитаж

<sup>2</sup> Санкт-Петербургская государственная художественно-  
промышленная академия им. А. Л. Штиглица

COMPUTED TOMOGRAPHY AS A WAY TO EVALUATE THE  
EFFECTIVENESS OF METHODS OF PRESERVATION OF  
WOODEN BASES WITH BIOLOGICAL DAMAGE.

Gefding I.P.<sup>1</sup>, Kareva A.K.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>HERMITAGE MUSEUM EXHIBITS

<sup>2</sup>Saint Petersburg Stieglitz State Academy

[heffding@mail.ru](mailto:heffding@mail.ru)

[arinakfrestorer@mail.ru](mailto:arinakfrestorer@mail.ru)

**Аннотация.** Доклад посвящен опыту консервации иконы «Святой Николай Чудотворец» (конец 19-го века, частное собрание, размер: 31см\*25,5см\*2см). Икона поступила в реставрацию в аварийном состоянии, деревянный щит был изъеден личинками жука-точильщика, из летных отверстий сыпалась труха, древесина порошилась. Доска треснула посередине, её удерживала верхняя шпонка. Присутствовали следы старого синтетического клея на месте разлома. Красочный слой хрупкий, имел плохую связь с основой.

Был проведен полный комплекс реставрационных мероприятий. Оценка состояния сохранности деревянного щита иконы до реставрации и после реставрации проводилась при помощи компьютерной томографии. Исследование памятника помогло проанализировать насколько эффективен метод заполнения полостей для древесины в аварийном состоянии.

**Abstract.** The report is devoted to the conservation of the icon “St. Nicholas” (late 19th century, private collection, size: 31cm\*25.5cm\*2cm). The object was admitted to the restoration in critical condition. Complex of conservation work was carried out. The state of preservation of the wooden shield of the icon was assessed using computed tomography.

The study of the icon helped to analyze how effective the method of filling the voids of destroyed wood is.

**Ключевые слова:** компьютерная томография в музее, консервация деревянных основ, поливиниловый спирт (ПВС), реставрация икон.

### **Введение**

Значительная часть станковых живописных произведений, хранящихся в частных и музейных собраниях, выполнена на деревянной основе. Прежде чем приступить к реставрации такого рода памятника, специалист должен всесторонне изучить его неинвазивными способами. Исследование памятников при помощи компьютерной томографии целесообразно применять для решения многих искусствоведческих и реставрационных задач. [Стоянова М. 2018]. Так, например, КТ поможет выявить подделку. Достаточно часто древние иконописцы прибегали к созданию сложносоставных основ. Фальсификаторы же используют метод врезки более поздней живописи в древнюю доску, которая, к сожалению, утратила свои красочные слои. Коллекционеры, которые при первом осмотре произведения обращают внимание на деревянную основу, как на главный признак оригинальности произведения, допускают ошибку в атрибуции.

Исследование памятника при помощи компьютерной томографии позволяет взглянуть изнутри на структуру произведения, помогает выявить его реальное состояние сохранности. Становится возможным выбирать сегменты и контрольные участки в объеме, чтобы оценить эффективность использования методик по укреплению структуры разрушенной древесины на иконных щитах с биологическими повреждениями. Часто к аварийному состоянию памятники приводит жизнедеятельность насекомых. Личинки жука-точильщика проделывают извилистые каналы, образовавшиеся пустоты ослабляют прочность досок и экстремально повышают гигроскопичность материала, что может стать причиной утраты памятника.

### **Методы и материалы.**

Икона «Святой Николай Чудотворец» (конец 19-го века, частное собрание, размер: 31см\*25,5см\*2см) поступила в реставрацию в аварийном состоянии, деревянный щит был изъеден личинками жука-точильщика, из летных отверстий сыпалась труха, древесина порошилась (рис. 1). Доска треснула посередине, части доски удерживала верхняя шпонка. Присутствовали следы старого синтетического клея на месте разлома. Тыльная сторона была покрыта несколькими слоями малярной закраски. Живописный слой лицевой стороны хрупкий, имел плохую связь с основой.



**Рис. 1.** Икона «Святой Николай Чудотворец» до реставрации.

В качестве основного неинвазивного исследования было решено использовать возможности компьютерной томографии. В данном случае было необходимо понять, насколько целесообразно бороться за сохранение сильно разрушенной авторской древесины. Иногда специалисты сталкиваются с таким понятием как «хроник». «Хроник» - предмет искусства, находящийся в столь критическом состоянии, что единственной целью консервации становится замедление необратимых процессов разрушения вещи. Сохранение целостности памятника – это первостепенная задача, но бывают ситуации, когда красочный слой находится под угрозой негативного влияния нестабильной основы. В таких случаях, реставратор может разрабатывать стратегию работы с памятником основываясь только на достаточном количестве данных о физическом состоянии объекта.

Перед началом работ на всю лицевую сторону иконы была нанесена профилактическая заклепка из папиросной бумаги с 1,5% осетровым клеем, чтобы предотвратить дальнейшее разрушение живописного слоя. До начала мероприятий по консервации, икона «Святой Николай Чудотворец» была просканирована на томографе. На полученных изображениях хорошо различимы пустоты, ходы, проеденные жуком, и рисунок годовых колец древесины. Так же контрастно выглядят

слои малярных закрасок и летные отверстия на тыльной и торцевых сторонах щита иконы, в которые краска затекала. Анализ подтвердил предположение об аварийном состоянии памятника.

Существует немало методик, позволяющих спасти живописный слой, выполненный на деревянной основе, от дальнейшего разрушения. Например, создание внешних поддерживающих систем или, популярный в прошлом, перенос красочного слоя на новое основание. Широко распространена практика стабилизации основы в аварийном состоянии путем пропитывания древесины и заполнения пустот различными составами. Именно этому методу было отдано предпочтение в данном случае.

Было решено укреплять древесину водным раствором поливинилового спирта (ПВС) [Velson Horie, 2010] по методу, разработанному Г.А. Преображенской [Преображенская Г. А., 2019]. Клей (ПВС 1 % раствор, марки 5/9) пропитывает волокна древесины, восстанавливая разрушенные связи в материале. Для лучшего прохождения клея была удалена поздняя масляная заплата с торцов и тыльной стороны щита иконы комбинированным методом, включая лазерную очистку. Особое внимание при очистке было уделено раскупориванию летных отверстий. Так же была удалена шпонка, а из продольного шва был выбран весь старый клей. После длительного многоэтапного процесса укрепления, щит иконы приобрел удовлетворительную прочность, не утратив при этом гигроскопичности, естественной для материалов растительного происхождения.

Следующим шагом в консервации памятника была обработка методики по заполнению внутренних полостей в древесине. В отличие от распространенного метода закупоривания летных отверстий, с использованием животного клея и опилок (или кусочков древесины, часто без учета направления волокон), полное армирование основы способствует стабилизации состояния сохранности объекта, вне зависимости от температурно-влажностного режима, и исключает вероятность проседания авторского грунта и живописи. В качестве наполнителя для укрепляющего состава на основе ПВС были использованы Microballoons. Это полые микро-шарики из фенольной смолы красновато-коричневого или белого цвета, используются в качестве наполнителя в клеях в случаях, когда склеиваемые детали имеют не идеально гладкую поверхность. Наполнитель химически нейтрален. Для обработки методики армирования был подобран образец древесины со схожими повреждениями. Состав подводился в пустоты в несколько подходов, при помощи шприца и постоянным вращением объекта, для лучшего распределения. После заполнения раствором полостей для образца было проведено сканирование в томографе. На полученном изображении хорошо просматриваются заполненные каналы и те участки,

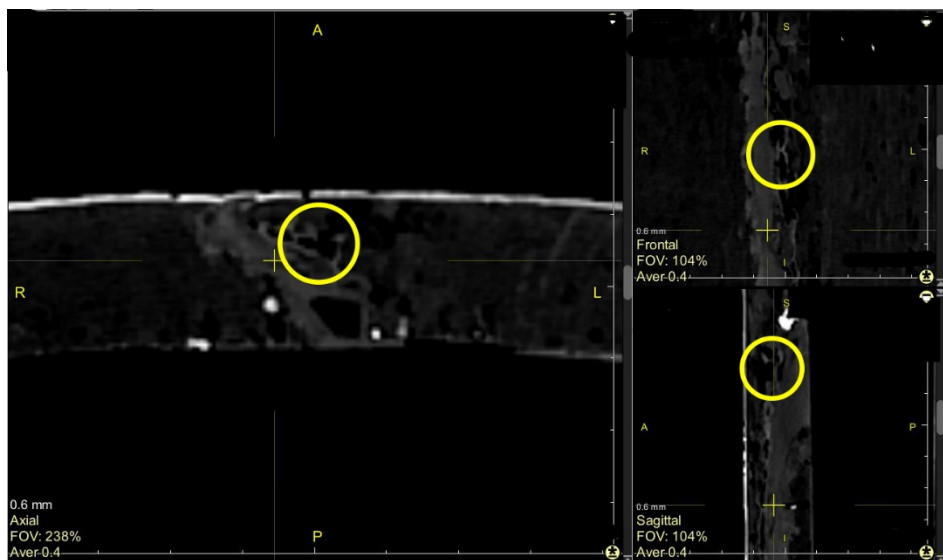


куда укрепляющий состав не проник. Фенольная смола имеет достаточную плотность, чтобы получить информативное изображение и в дальнейшем проанализировать эффективность консервации.

По отработанной методике был армирован весь щит иконы. Во избежание возникновения деформаций, на время просушивания фрагменты иконы дополнительно фиксировались, с выравниванием по плоскостям. Затем части иконы склеивались на водный раствор Fishglue с наполнителем Microbaloons. Ориентиром для совмещения фрагментов служили границы живописного изображения, а не общий профиль коробления доски. Для увеличения прочности к щиту с тыльной стороны был подклеен тонкий лист бальсы. Бальса - легкая мягкая древесина. В реставрации деревянных основ произведений живописи бальсу используют, как прокладочный материал. [Simon Bobak, 1998] Волокна бальсы легко сминаются, следовательно, при соприкосновении с произведением искусства, выполненном из более плотного материала, бальза не оставит на нем никаких повреждений. Также из-за простоты в обработке эту древесину удобно использовать для восполнения утрат древесины и для заполнения трещин.

### **Результаты.**

После консервационных мероприятий было проведено повторное исследование иконы в томографе. При сравнении результатов сканирования до и после, стало возможным дать оценку эффективности выбранному методу работы с памятником. Оказалось, что проходимость армирующего состава в структуру древесины относительно низкая. Наилучший результат наблюдается на участках иконного щита, с незатруднённым доступом (торцы, срединная трещина). Также видны пустоты, в которых наполнитель распределился неравномерно (рис. 2).



**Рис. 2.** Сечение щита иконы после проведенных работ по консервации основы.

### **Вывод.**

При изучении деревянных основ неоспоримо преимущество томографии перед рентгенографией, где трехмерный объект сводится к двумерному свето-теневому изображению, некоторые составляющие которого, фиксированные суммарно, мешают выявить то или иное повреждение основы. Доска-основа иконного щита может иметь значительную толщину, а значит при наблюдении повреждений в двумерном формате значительная часть информации о структуре памятника останется не выявленной.

Компьютерная томография позволяет различать элементы с перепадом плотности между ними до 1 %. Обычная рентгенография позволяет уловить минимальную разницу по плотности между соседними участками в 10-20 %. В данном исследовании различные по плотности материалы (перечень) хорошо идентифицируются.

Вышеописанное исследование - только начальная стадия в развитии направления КТ для изучения деревянных основ станковых живописных произведений. При наличии специализированного оборудования можно продолжить исследовательскую деятельность, чтобы:

- выяснить, какие армирующие составы наилучшим способом заполняют пустоты в древесине.

- научиться рассчитывать объём наполнителя в зависимости от размеров полостей.

- экспертно сопоставлять произведения, находящиеся в разных коллекциях: для сравнения произведений из одного иконостаса; для сравнения произведений, принадлежащих одному мастеру, а также томография сильно поспособствуют созданию доказательной базы, необходимой при атрибуции фрагментированных произведений. Например, на этапе сбора данных при реставрации распиленного произведения из коллекции Государственного Эрмитажа и коллекции Государственного Музея Истории религии, было очень сложно доказать, что фрагменты составляли некогда единое целое, так как авторская основа была полностью скрыта с обеих сторон грунтами и живописными слоями [Гарлова М. П., Гефдинг И.П. 2022].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Стоянова М. С., Максимова Г. А., Мазина А. Я., Проворова И. Н. Комплексное технико-технологическое исследование иконы Архангела из Национального музея в Белграде. // Сохранение культурного наследия. Исследования и реставрация = Preservation of Cultural Heritage. Research and Restoration : Мат-лы II Междунар. конф. в рамках V Международного культурного форума, СПб. 1–3 декабря 2016 г. / Сост. Ю. Г. Бобров. СПб. : Институт имени И. Е. Репина, 2018. С. 191–204.
2. Velson Horie, Materials for Conservation. / New York, 2010. С. 142-144.
3. Преображенская Г. А., Поляков А. В. Методические рекомендации по укрепляющей пропитке деревянной основы полихромной структуры с применением поливинилового спирта. // Труды Государственного музея истории религий. Вып. 19- СПб.: ФГБОУВПО «СПГУПТД», 2019. С. 194-211.
4. Simon Bobak. A Flexible Unattached Auxiliary Support // The Structural Conservation of Panel Paintings. / Edited by Kathleen Dardes and Andrea Rothe, 1998. С. 371-382.
5. Гарлова М. П., Гефдинг И.П., Нюрнбергский мастер. «Поклонение волхвов» и «Успение Богоматери». К завершению реставрации / Государственный Эрмитаж. – СПб.: Изд-во Гос. Эрмитажа, 2022.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ГОРНОЙ ПОРОДЫ  
МЕТОДОМ КТ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ  
ЗАПАСОВ УГЛЕВОДОРОДОВ

Шумейко А.Э., Цыганков В.А.

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина

INVESTIGATION OF ROCK STRUCTURE BY CT METHOD TO  
DETERMINE RESIDUAL HYDROCARBON RESERVES

Shumeiko A.Ed., Tsygankov V.A.

Gubkin University (National University of Oil and Gas)

[geomodel@mail.ru](mailto:geomodel@mail.ru)

**Аннотация.** Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению №075-15-2022-300 от 18.04.2022 в рамках программы развития НЦМУ «Рациональное освоение запасов жидких углеводородов планеты».

Предлагается комплексное решение определения численных параметров внутренней неоднородной структуры образцов углеводородосодержащих пород. Оно основано на стандартных и оригинальных технологиях обработки изображений и данных компьютерной микротомографии, и позволяет выявлять и оценивать структуры емкостного и фильтрационного пространств, масштабный фактор, коэффициент текущего остаточного нефтенасыщения, характер влияния вторичных процессов на «исходную» пористость.

**Abstract.** A complex solution is proposed for determining numerical parameters of internal heterogeneous structure of samples of hydrocarbon-containing rocks. It is based both on standard and original technologies of image processing and computed microtomography data and allows to detect and evaluate structures of capacitive and filtration spaces, scale factor, coefficient of current residual oil saturation, nature of influence of secondary processes on initial porosity.

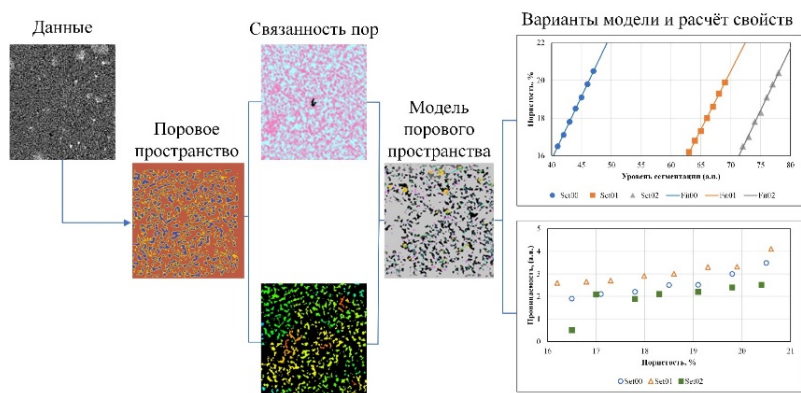
Актуальной на сегодняшний день темой является повышение точности изучения объектов глубокого залегания природных ископаемых. Анализируется традиционный микротомографический подход исследований кернового материала. Представлена авторская методика, основанная на математической обработке результатов съемки,

повышающая точность интерпретации полученных данных рентгеновской томографии. Новый подход позволяет решать следующие задачи:

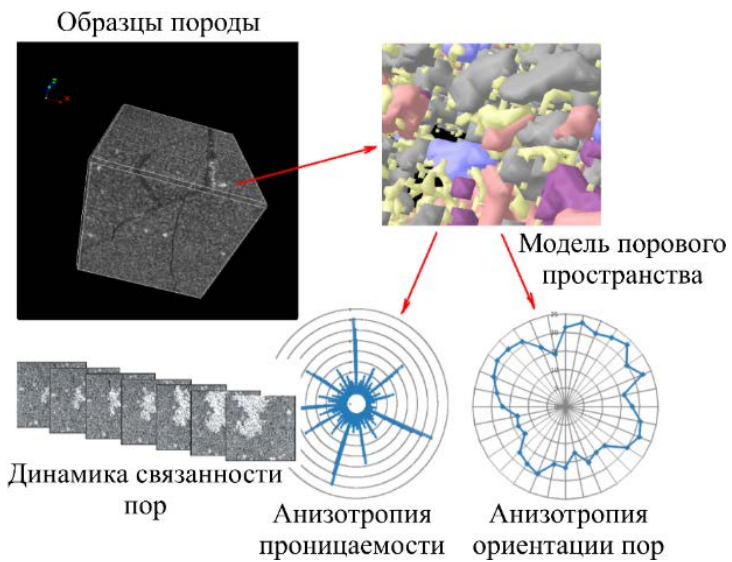
- Определение коэффициентов пористости и проницаемости исследуемых образцов горных пород;
- Определение пространственной структуры породы;
- Прогноз остаточного нефтенасыщения.

Например, определение пористости, по представленной авторами методике, для конкретного образца керна показало значение в 25% против 16%, полученных при использовании традиционного метода. Данный прирост достигнут за счет учета статистического распределения яркостей точек изображения, относимых традиционно, с точки зрения литологии, к пустоте или сочетанию пустоты и скелета, или только к скелету, т.е. без учета «размытости» принимаемой в зачет авторами. Таким образом, комплексное решение, основанное на стандартных и оригинальных технологиях обработки изображений, позволяет выявлять и оценивать структуры емкостного и фильтрационного пространств, коэффициент текущего остаточного нефтенасыщения, характер влияния вторичных процессов на «исходную» пористость.

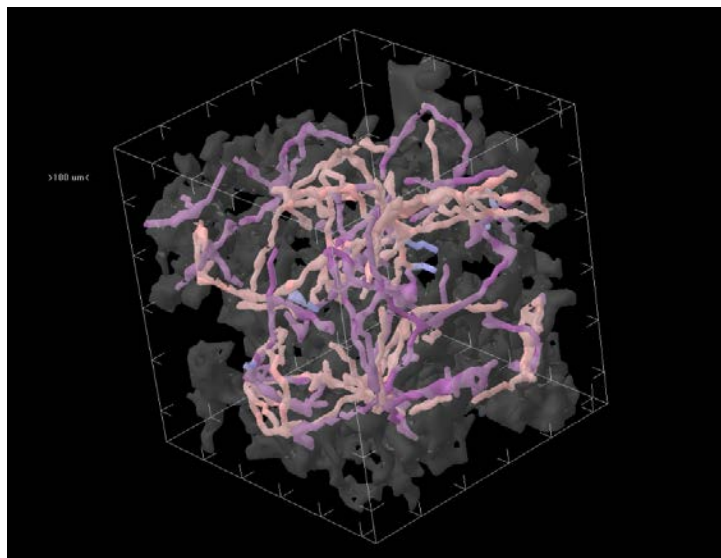
Этот метод исследований относится к прямым, имеет разрешение до 0,5 мкм, что позволяет детально изучить внутреннюю геометрию объектов в объеме слабосцементированных и литифицированных образцов без нарушения их целостности, затрачивая при этом минимум времени.



Структура обработки исходных данных.



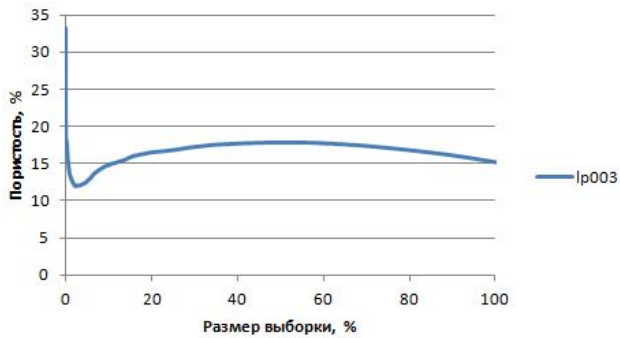
*Комплекс определяемых параметров.*



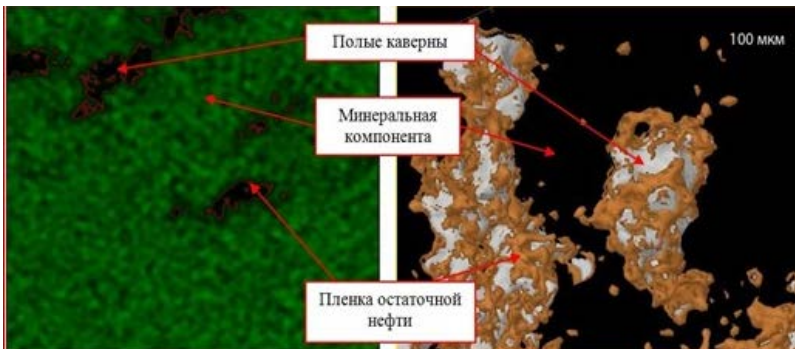
*Элемент ФЕС в структуре порового пространства образца горной породы.*



Гистограммы насыщенного и промытого образца.



Определение масштабного фактора.



Определение структуры остаточной нефти в порах.

## ВКЛЮЧЕНИЯ В КРИСТАЛЛАХ

Пискунова Н.Н.<sup>1</sup>, Крючкова Л.Ю.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет

## INCLUSIONS IN CRYSTALS

Piskunova N.N.<sup>1</sup>, Kryuchkova L.Yu.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Federal Research Center "Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences",

<sup>2</sup> St.Petersburg State University, St.Petersburg, Russia

[piskunova@geo.komisc.ru](mailto:piskunova@geo.komisc.ru)

**Аннотация.** Рассматривается актуальность применения метода микротомографии к изучению газовой-жидких включений в природных кристаллах и особенности вхождения в них твердых инородных примесей. Получены данные о распределении включений рутила и хлорита в кристаллах кварца месторождения Желанное (Приполярный Урал, Россия).

**Abstract.** The relevance of the application of microtomography to the study of gas-liquid inclusions in natural crystals and the peculiarities of solid foreign impurities in them is considered. The data on the distribution of rutile and chlorite inclusions in quartz crystals of the Zhelannoe deposit (Subpolar Urals, Russia) are obtained.

Включения в кристаллах – важный источник информации об условиях и механизмах кристаллогенеза и постростовых процессов. При их изучении исследователи неизменно сталкиваются с рядом вопросов, на которые, несмотря на развитие высокоразрешающих методов, так и не получены ответы. Например, как при остывании кристалла отлагается вещество из раствора, законсервированного в полости включения, нарастает ли оно эпитаксиально на стенки включения послойным или иным механизмом? С помощью атомно-силовой микроскопии нам удалось изучить послойный рельеф на стенках газовой-жидких включений в одних случаях (Piskunova et al., 2018) и свидетельства отложения на них аморфной фазы в других случаях (Пискунова, Кряжев, 2021). Однако такие выводы должны дополняться данными об ориентации относительно ростовой грани и о том, в какой части кристалла располагались изученные включения. Зная ориентацию, можно установить, где у включения формировались «дно» и «потолок» по мере зарастания, что важно для понимания механизмов. Расположение включений в центре кристалла или на его периферии указывает на разное время и, соответственно, на разные

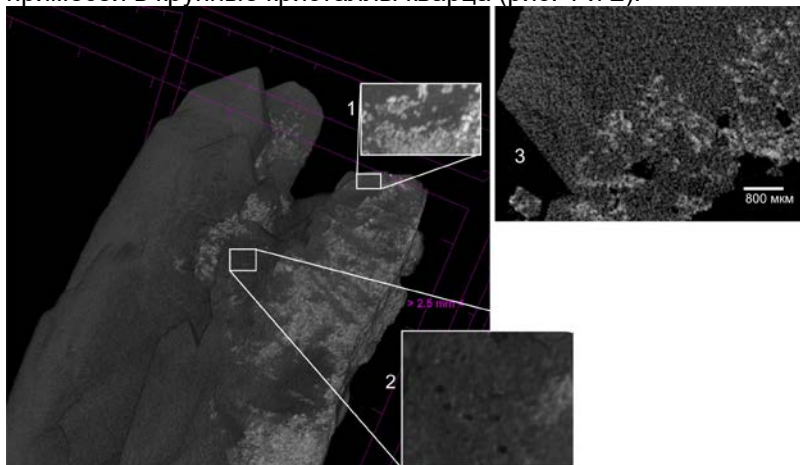


условия, при которых происходил захват включений. Кроме этого очень важным является установление конечной формы газовой-жидких пузырьков, наличие или отсутствие отрицательного ограничения полостей включений в природных кристаллах. Такие данные можно получить только с помощью микротомографии. Особенно это относится к непрозрачным кристаллам минералов, для них томография единственный метод получения описанной информации.

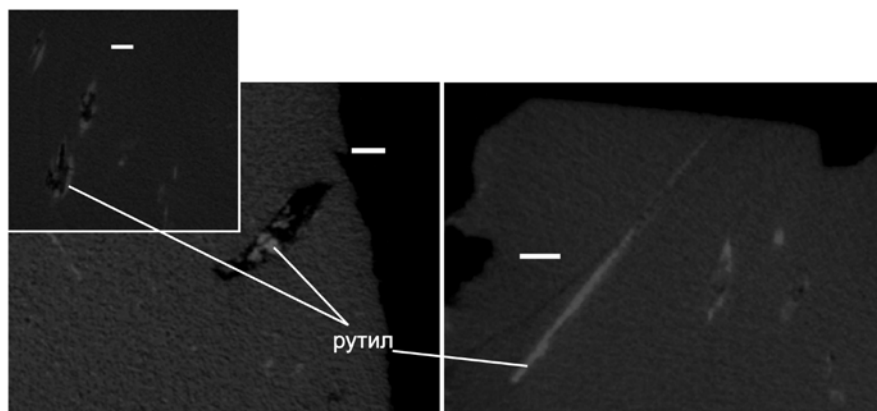
Для кристаллогенетических реконструкций очень важна также информация об особенностях вхождении твердых примесей в матрицу кристалла-хозяина. Она может пролить свет на скорости процессов, на причины образования различных дефектов упаковки и т.д. Нами с помощью АСМ проведено моделирование вхождения инородных частиц в растущую поверхность (Пискунова, 2023). Мы установили механизм формирования винтовой дислокации на захваченной частице, зарегистрировали явление наследования дислокации в наномасштабе. Интересно, что образование полости в модельном эксперименте происходило с формированием пространства между твердой частицей и кристаллом-хозяином, заполненного раствором. Сейчас нам необходимы томографические исследования природных кристаллов с крупными твердыми примесями, чтобы сопоставить с полученными в эксперименте результатами. Требуется установить особенности расположения твердых примесей, вроде рутила в кварце, относительно кристаллографических ориентаций и друг друга, наличие или отсутствие зазора между частицей и кристаллом-хозяином в различных типах включений и т.д. С помощью АСМ нами показано, что из более чем тридцати частиц, захваченных на участке 50×50 мкм, дислокацию вызвала только одна. Внедрение примесей не повлияло на характеристики послойного роста, а сам факт герметизации включения не гарантировал возникновения винтовой дислокации. С помощью нанотомографических исследований природных кристаллов с большим количеством инородных крупных примесей стоит задача установить количество и расположение дислокационных каналов, которые берут начало от внедренных примесей. Такие исследования не проводились, одна из последних крупных работ по изучению образования дислокаций на частицах была выполнена с помощью оптической микроскопии и постростовой рентгеновской дифракционной топографии (Neuroth, Klapper, 2020). Для природных кристаллов так и осталось непонятным, каждая ли частица, газовое или газовой-жидкое включение, сами являясь трехмерными дефектами, вызывают появление винтовой дислокации, которая как топологический дефект тянется сквозь ростовые слои до самой поверхности.

В данной работе приведены первые результаты изучения с помощью микротомографии (NeoScan N80 (Bruker, Бельгия)) кварца месторождений Желанное (Приполярный Урал) с включениями хлорита и

рутила. Установлены некоторые особенности вхождения указанных примесей в крупные кристаллы кварца (рис. 1 и 2).



**Рис. 1.** Крупный кристалл кварца (м. Желанное, Приполярный Урал) с включениями хлорита: (1) – распределение частиц хлорита в объеме под указанным участком, (2) – выходы на поверхность объемных дефектов, (3) – взаимное расположение включений хлорита и крупных газовой-жидких включений в объеме кварца.



**Рис. 2.** Приуроченность включений рутила к газовой-жидким включениям в крупном кристалле кварца (м. Желанное, Приполярный Урал). Масштабные линейки 1 мм.

АСМ-исследования проведены в ЦКП «Геонаука» ИГ ФИЦ Коми НЦ, микротомографические исследования проведены в ресурсном центре «Рентгено-дифракционные методы исследования» СПбГУ в соответствии с Государственным заданием РФ № АААА-А19-119091190094-8.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Piskunova N.N., V. Sokerina and L. Y. Kruchkova. Combining In Situ and Ex Situ Atomic-Force Microscopy Studies to Reconstruct Natural Crystallogenic Processes. Chapter in Book: "Atomic force microscopy principles, developments and applications". Editors: Bessie Moss and Clayton Stone. Published by Nova Science Publishers, Inc.: New York. ISBN: 978-1-53613-496-4. 2018. P. 47–66.
2. Пискунова Н.Н., Кряжев А. А. Нано- и микроморфологические доказательства коллоидной структуры содержимого включений кольцевых силикатных кристаллов Вестник геонаук. 2021. 8(320). С. 16—26. <https://doi.org/10.19110/geov.2021.8.2>.
3. Пискунова Н.Н. Прямое наблюдение процессов роста на кристаллической поверхности, инициируемых захватом примеси // ЗРМО, 2023. Т. 152. №3. С. 82–97. <https://doi.org/10.31857/S086960552303005X>.
4. Neuroth G., Klapper H. The Generation of Growth Dislocations by Inclusions and Growth-Face Damages: An Experimental Study. Crystal Research and Technology. 2020. V. 55. № 2. P. 1900159 (5). <http://doi.org/10.1002/crat.201900159>.

# МИКРОТОМОГРАФИЯ: МИКРОСТРУКТУРА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ГЕОМАТЕРИАЛОВ

Якушина О.А., Хозяинов М.С., Ожогина Е.Г.  
ГБОУ ВО «Университет «Дубна»

## X-RAY MICRO-CT: MICROSTRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF GEOMATERIALS

Yakushina O.A., Khozyainov M.S., Ozhogina E.G.  
Dubna State University

[yak\\_oa@mail.ru](mailto:yak_oa@mail.ru)

**Аннотация.**  $\mu$ СТ применяется для изучения строения, фазового состава геоматериалов для оценки их качества. Разработана методика анализа данных  $\mu$ СТ с использованием образца сравнения.

**Abstract.** Using of X-ray CT to study geomaterials texture, granules, pores, composition resulting in its quality is promising. The original  $\mu$ CT technique on attenuation gradations using a comparison sample is developed.

В нашей стране и за рубежом разные группы ученых развивают рентгеновскую томографию немедицинского назначения (HRXCT) для исследования горных пород (Gent Univ., Houston Univ., геофак МГУ, Университет Дубна, Почвенный ин-т РАН, ГИН РАН, ПИН РАН и другие). Однако, горные породы и минералы оказались для РТ сложным объектом при выделении отдельных минеральных фаз, по сравнению с разделением пустотного пространства и минерального скелета горной породы. Это связано как с использованием немонохроматического излучения, так и сложным поликомпонентным и изменчивым реальным составом геобъектов (плотность меняется от 1,0 до 22,7 г/см<sup>3</sup>; в медицине плотность тканей 0-1,2 г/см<sup>3</sup>) – микропримеси, изоморфизм, полиморфизм, микровключениях других минералов.

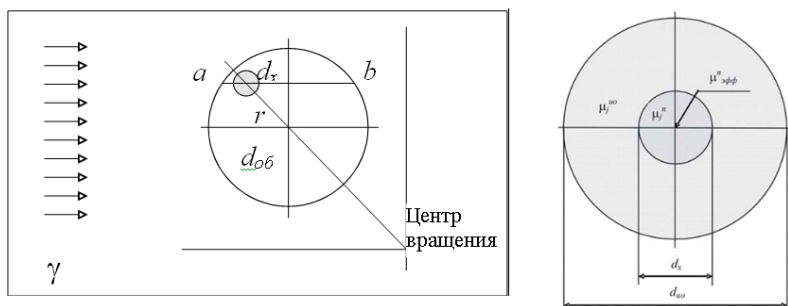
Укажем три направления для  $\mu$ СТ в изучении геоматериалов:

- 1) качественные исследования зерна и кусков горной породы для оценки общих характеристик и выделения представительных участков для детальных прецизионных исследований;
- 2) получение количественных данных на уровне микроструктуры;
- 3) моделирование при разных термобарических условиях, в т.ч. процессов вытеснения нефти в породах-коллекторах.

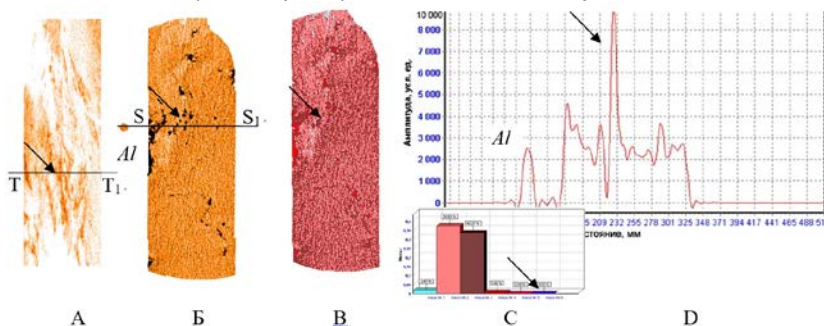
Для исследования методом РТ горных пород, минералов и их агрегатов (гранулярного состава, морфологии, содержания фаз), с целью

прогнозной оценки качества и др., предложена методика СТ анализа по полному диапазону градаций линейного коэффициента ослабления рентгеновского излучения (ЛКО) путем линейного и площадного анализов изображений томограмм, на основе построения гистограмм частотного распределения амплитуды ЛКО с использованием образца сравнения (ОС). Одновременно измеряют ЛКО исследуемого образца и ОС (алюминий), что позволило перейти от относительных измерений к абсолютным.

В программном обеспечении микротомографа «Геотом» реализован алгоритм коррекции немонотонности рентгеновского излучения, позволяющий путем подбора коэффициента снижать влияние этого эффекта на величины измеренных значений поглощения рентгеновских лучей. Разработано ПО анализа томограмм на основе распознавания образов – «TomAnalysis».



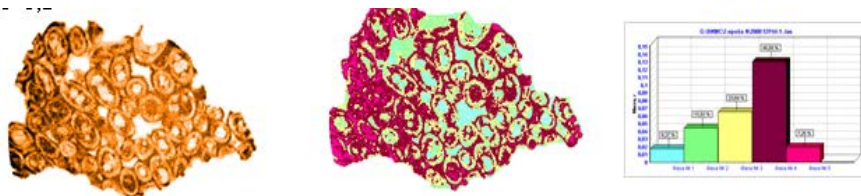
**Рис. 1.** Геометрия сканирования (слева) и схема расположения образца (ИО, справа) в поглощающей среде.



**Рис. 2.**  $\mu$ PT анализ: рентгенограмма (А), томограмма по сечению  $T-T_1$ , ОС – Al (Б), сегментация по TomAnalysis (В), соотношение фаз, в % (С), профиль ЛКО по линии  $S-S_1$  (D).

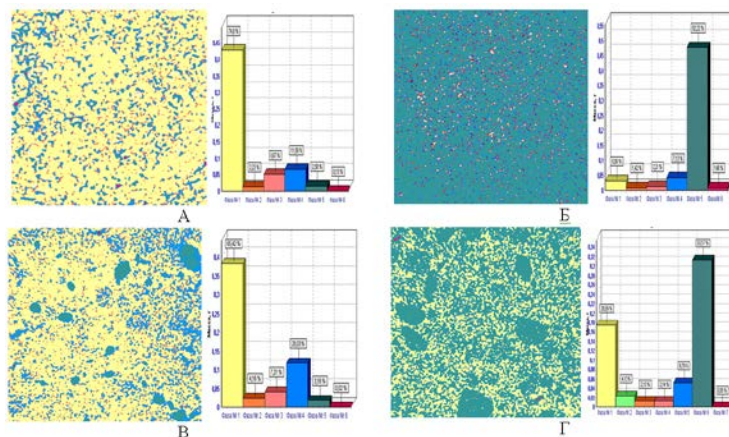
Приведем примеры исследования. По разработанной методике выполнен  $\mu$ PT анализ морфоструктуры магнетит-гематитовых руд. По

значениям ЛКО установлены соотношения главных рудных минералов гематита и магнетита, показана неравномерность процесса мартитизации. Оолиты концентрически-зонального строения покрыты оболочкой из магнетита, их центральная часть состоит из хлорита и серпентина. Микропоры имеют размер 10-30 мкм (рис. 3).



**Рис. 3.** Оолиты магнетит-гематитовых руд: слоистые Al-Si голубое, серпентин зеленое, хлорит желтое, гидроксиды железа оранжевое, гематит бордовое, магнетит малиновое.

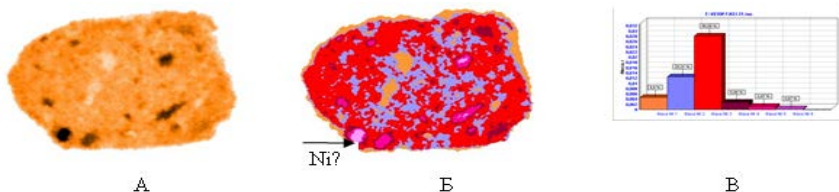
μРТ концентратов обогащения одного из рудных месторождений страны для сравнительного анализа и определения процента выхода полезных минералов по фракциям классифицированного материала, прогноз качества (рис. 4).



**Рис. 4.** Материал концентратов обогащения, μРТ: А, Б - 0.2+0.044 мм, В, Г – шлам -0.044+0 мм. Сегментация по «TomAnalysis», соотношение фаз, в%.

Металлургические шлаки изучались для определения направлений их использования, присутствия в них минеральных фаз и металлов определения. μРТ выявила неоднородность строения шлаков:

сыпьевидное распределение ультратонких включений рудных фаз: в виде единичных округлых выделений размером 0,001-0,5 мм, в основном <0,05 мм, которые могли быть связаны с включениями металлов (рис. 5); а более 50% обломков шлака вообще не содержали рудных включений. Основная стекловатая масса шлака сформирована эвтектическими колониями.



**Рис. 5.**  $\mu$ РТ шлаков, эвтектические колонии магнетита: оливиноранжее, магнетит голубое и красное, треворит коричневое и малиновое, Ni в треворите сиреневое.

Минералы структурного типа шпинели характеризуются наличием изоморфных замещений в катионной части, и при вхождении в структуру катионов с большей атомной массой (например, Ni, Co) это приводит к относительному возрастанию значений ЛКО, что фиксировалось на томограммах. РТ-анализом установлена неоднородность индивидуализированных выделений металлических фаз размером менее 0,03 мм по типу эвтектических колоний, с которыми может быть связано повышенное содержание никеля, а также кобальта в шлаке.

Ключевую роль в успешном развитии РТ будет играть как совершенствование аппаратной базы, прежде всего нового поколения детекторов рентгеновского излучения, развитие вычислительных мощностей, создание специализированного программного обеспечения, совмещенного с прибором; а также конструирование рентгеновских томографов для исследования полноразмерного ядра диаметром 100 мм, которые обеспечивают пространственное разрешение на уровне микрометров и могут быть оборудованы специальной камерой для термобарического моделирования пластовых условий.

Метод  $\mu$ РТ используется для исследований разных видов полезных ископаемых в комплексе физических методов, прежде всего в сочетании с оптической микроскопией.



РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ  
ДАННЫХ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ

Карсанина М. В., Zubov A.S., Gerke K. M.

Институт Физики Земли им.О.Ю.Шмидта РАН

DEVELOPMENT OF METHODS FOR STRUCTURAL  
ANALYSIS BASED ON X-RAY TOMOGRAPHY IMAGING

Karsanina M.V., Zubov A.S., Gerke K.M.

Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS (Moscow)

[marina.karsanina@gmail.ru](mailto:marina.karsanina@gmail.ru)

**Аннотация.** Отчет посвящен новейшим исследованиям в области структурного анализа, основанным на данных компьютерной томографии. После сегментации изображений – в простейшем случае на две фазы – поры и твердое вещество - необходимо описать структуру исследуемого объекта. Это можно сделать с помощью корреляционных функций, которые имеют ряд преимуществ перед широко используемыми метриками – пористостью, функционалами Минковского и т.д. Описание структуры необходимо для оценки репрезентативности исследуемой структуры. После того как выбран репрезентативный образец, можно смоделировать его физические свойства. Последнее не всегда возможно, поэтому мы обсудим влияние нестационарности на характеристики пористых сред на примере тензора проницаемости. Отчет завершается обсуждением важности анализа и его расширения в будущем.

**Abstract.** The report is devoted to the latest research in the field of structure analysis based on CT tomography data. After segmentation of the images – in the simplest case into two phases – pores and solid matter, it is necessary to describe the structure of the object under study. This can be done using correlation functions, which have a number of advantages over commonly used metrics – porosity, Minkowski functionals, etc. A description of the structure is necessary to assess the representativeness of the structure under study. After a representative sample is selected, it is possible to simulate its physical properties. The latter is not always possible, so we will discuss the effect of nonstationarity on the characteristics of porous media using the example



of the permeability tensor. The report concludes with a discussion of the importance of analysis and its expansion in the future.

Цифровые технологии, позволяющие определять физические свойства пористых материалов по данным об их строении, полученных на основе методов КТ съемки, достигли значительных успехов за последние годы [Герке и др., 2021]. В основе цифровых подходов лежат так называемое моделирование в масштабе пор – модели, которые описывают ключевые процессы, например, поток одно или многофазного флюида в порах [Gerke et al., 2018; Balashov, 2021; Evstigneev et al., 2023]. Получаемые результаты в виде гомогенизированных величин – проницаемости, капиллярных кривых и относительных проницаемостей, теплопроводности, коэффициента диффузии и т.п., считаются результатом такого моделирования.

Однако, как показывают последние исследования одного лишь моделирования как метода на основе КТ недостаточно для определения физических свойств по ряду причин:

- 1) Гомогенизация свойств не возможна без анализа репрезентативности изображения [Gerke et al., 2019];
- 2) Репрезентативность не может быть достигнута без анализа стационарности изображения (статистическая однородность) [Gerke and Karsanina, 2021];
- 3) Гомогенизация нестационарного объёма возможна, но не может быть перенесена за пределы домена моделирования, так как неоднородность сильно влияет на свойства [Karsanina and Gerke, 2023].

Для анализа структуры обычно используют набор классических метрик – пористость, функционалы Минковского, связность и другие. Однако, эти метрики по большей части скалярные и не позволяют описывать анизотропные структуры. В качестве альтернативы стандартным метрикам мы предлагаем использовать для анализа связку корреляционных функций [Posticov et al., 2023] с топологическими метриками в виде персистентных диаграмм [Zubov et al., 2022].

Там образом, КТ изображения далеко не всегда могут служить входными данными для моделирования в масштабе пор без дополнительного анализа структуры на основе векторных метрик.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Герке, К. М., Корост, Д. В., Карсанина, М. В., Корост, С. П., Васильев, Р. В., Лаврухин, Е. В., & Гафурова, Д. Р. (2021). Изучение и анализ современных подходов к построению цифровых моделей ядра и методов моделирования многофазной фильтрации в масштабах порового пространства. // Георесурсы, 23(2), 197-213.
2. Balashov, V. A. (2021). Dissipative spatial discretization of a phase field model of multiphase multicomponent isothermal fluid flow. *Computers & Mathematics with Applications*, 90, 112-124.
3. Evstigneev, N. M., Ryabkov, O. I., & Gerke, K. M. (2023). Stationary Stokes solver for single-phase flow in porous media: A blazingly fast solution based on Algebraic Multigrid Method using GPU. *Advances in Water Resources*, 171, 104340.
4. Gerke, K. M., Vasilyev, R. V., Khirevich, S., Collins, D., Karsanina, M. V., Sizonenko, T. O., ... & Mallants, D. (2018). Finite-difference method Stokes solver (FDMSS) for 3D pore geometries: Software development, validation and case studies. *Computers & geosciences*, 114, 41-58.
5. Gerke, K. M., Karsanina, M. V., & Katsman, R. (2019). Calculation of tensorial flow properties on pore level: Exploring the influence of boundary conditions on the permeability of three-dimensional stochastic reconstructions. *Physical Review E*, 100(5), 053312.
6. Gerke, K. M., & Karsanina, M. V. (2021). How pore structure non-stationarity compromises flow properties representativity (REV) for soil samples: Pore-scale modelling and stationarity analysis. *European journal of soil science*, 72(2), 527-545.
7. Karsanina, M. V., & Gerke, K. M. (2023). Stochastic (re) constructions of non-stationary material structures: Using ensemble averaged correlation functions and non-uniform phase distributions. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 611, 128417.
8. Postnicov, V., Karsanina, M. V., Khlyupin, A., & Gerke, K. M. (2023). The 2- and 3-point surface correlation functions calculations: From novel exact continuous approach to improving methodology for discrete images. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 628, 129137.
9. Zubov, A. S., Murygin, D. A., & Gerke, K. M. (2022). Pore-network extraction using discrete Morse theory: Preserving the topology of the pore space. *Physical Review E*, 106(5), 055304.

Санкт-Петербург, 2023

## Организаторы конференции:



Федеральное государственное бюджетное учреждение культуры «Государственный Эрмитаж»,  
г. Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 34  
[www.hermitagemuseum.org](http://www.hermitagemuseum.org)



Общество с ограниченной ответственностью  
«Аналитика и приборы»  
г. Санкт-Петербург, улица Ворошилова, 2  
[www.lab-nnz.ru](http://www.lab-nnz.ru) тел.: +7 (812) 326-10-56