



European Reviews of Chemical Research

Issued since 2014

E-ISSN 2413-7243
2024. 11(1). Issued once a year

EDITORIAL BOARD

Bekhterev Viktor – Sochi State University, Sochi, Russian Federation (Editor in Chief)
Belskaya Nataliya – Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation
Kuvshinov Gennadiy – Sochi State University, Sochi, Russian Federation
Elyukhin Vyacheslav – Center of Investigations and Advanced Education, Mexico, Mexico
Kestutis Baltakys – Kaunas University of Technology, Kaunas, Lithuania
Mamardashvili Nugzar – G.A. Krestov Institute of Solution Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Ivanovo, Russian Federation
Maskaeva Larisa – Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation
Md Azree Othuman Mydin – Universiti Sains Malaysia, Penang, Malaysia
Navrotskii Aleksandr – Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation
Ojovan Michael – Imperial College London, London, UK

Journal is indexed by: **CrossRef** (UK), **Electronic scientific library** (Russia), **Journal Index** (USA), **Open Academic Journals Index** (USA), **ResearchBib** (Japan), **Scientific Indexing Services** (USA)

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

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

Postal Address: 1717 N Street NW, Suite 1,
Washington, District of Columbia 20036

Release date 15.09.24
Format 21 × 29,7/4.

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

Headset Georgia.

Founder and Editor: Cherkas Global
University Press

Order № 119.

© European Reviews of Chemical Research, 2024

European Reviews of Chemical Research

2024

Is. 1

CONTENTS

Enhancing Thermal Conductivity of Phase Change Materials: A Review of Methods A. AL-Nassar, A.N. Makeev	3
Exotic High-Resolution Multichannel and Position-Sensitive Methods for Physico-Chemical Archaeometry O.V.Gradov, A.A. Skrynnik	12
History of Science	
Sergey Vasilyevich Lebedev (1874–1934): a Biographical Essay to the 150th Anniversary of the Birth of the Russian Chemist A.M. Mamadaliev	50

Copyright © 2024 by Cherkas Global University



Published in the USA
 European Reviews of Chemical Research
 Issued since 2014.
 E-ISSN: 2413-7243
 2024. 11(1): 3-11

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



Enhancing Thermal Conductivity of Phase Change Materials: A Review of Methods

Ashraf AL-Nassar ^{a,*}, Andrei N. Makeev ^a

^aNational Research University (Moscow Power Engineering Institute) Moscow, Russian Federation

Abstract

Currently, the accumulation of thermal energy is an important task not only in traditional thermal energy systems to balance energy supply and demand, but also in renewable energy systems, where energy production can vary greatly. At the same time, special attention is paid to the latent accumulation of thermal energy. This is mainly due to the high energy density that can be stored at the time of its excess generation and the ability to maintain an isothermal regime during phase transitions. This property makes phase transition materials (PCMs) particularly valuable in various thermal energy storage applications. One of the main limitations to the overall efficiency of thermal energy storage systems based on PCMs is the relatively low thermal conductivity of the material used. This determines the rate of absorption and release of heat during the phase transition, which ultimately significantly limits the scope of such storage systems. This article not only examines the role of PCMs in thermal energy storage systems, but also identifies key advantages and several innovative strategies to increase the thermal conductivity of PCMs. These strategies include the addition of ribs, the use of nanoparticles, the implementation of heat pipes, and encapsulation techniques. It is expected that these developments will significantly improve the practice of sustainable energy management and contribute to more efficient use of renewable energy sources using thermal energy storage devices based on phase transition materials. The summary of the study highlights the importance of using phase transition materials to ensure a sustainable energy future where thermal energy storage is an integral part of the functioning of energy systems.

Keywords: latent heat, energy storage, phase transition materials, thermal conductivity, encapsulation, nanoparticle materials, heat pipes.

1. Введение

Накопители тепловой энергии (НТЭ) играют важнейшую роль в современных энергетических системах, обеспечивая возможность накопления избыточной тепловой энергии для последующего использования. Эта возможность важна для балансирования спроса и предложения, особенно в системах возобновляемой энергетики, где производство энергии может быть неустойчивым. Системы НТЭ помогают повысить энергоэффективность, сократить выбросы парниковых газов и повысить общую надежность энергоснабжения. Накопитель скрытой тепловой энергии (НСТЭ) – это тип НТЭ, который накапливает энергию в виде скрытого тепла, которое поглощается или высвобождается, когда материал претерпевает фазовый переход, например, из твердого состояния в жидкое или из жидкости в газ. Материалы с фазовым переходом используются в системах НСТЭ из-

* Corresponding author

E-mail addresses: ashrafnassar@yandex.ru (A. AL-Nassar)

за их высокой плотности накопления энергии и способности накапливать и высвобождать энергию практически при постоянных температурах до тех пор, пока МФП не вернется в исходную фазу, где накопленная энергия высвобождается. НСТЭ обладает рядом преимуществ перед другими типами НТЭ, такими как явное накопление тепла и термохимическое хранение.

Явное накопление тепла предполагает накопление энергии путем изменения температуры материала, что обычно требует больших объемов и имеет меньшую плотность энергии по сравнению со скрытым накоплением тепла.

Термохимическое хранение предполагает накопление энергии посредством обратимых химических реакций, которые могут быть сложными и дорогостоящими.

Материалы с фазовым переходом играют ключевую роль в этих системах, предоставляя эффективные решения для накопления тепловой энергии. Однако низкая теплопроводность МФП является значительной проблемой, ограничивая скорость накопления и извлечения энергии. Цель данной работы состоит в обзоре современных методов повышения теплопроводности МФП, а также в анализе их эффективности и практичности для улучшения тепловых характеристик.

2. Методы улучшения производительности

В данном разделе описаны методы исследования, направленные на повышение теплопроводности МФП. Рассмотрены следующие методы:

I. Увеличение контактных поверхностей с использованием ребер.

Этот метод считается самым простым и используется для увеличения площади поверхности теплопередачи и осуществляется с помощью ребер или металлической фольги. Лопастей могут иметь прямоугольную или круглую форму и считаются более прочными и толстыми, чем металлическая фольга толщиной менее 0,1 мм. В результате небольшого расстояния между фольгой передача тепла за счет проводимости считается наиболее влиянием на процесс аккумуляции тепла, а относительно длинные лопасти позволяют осуществлять передачу посредством конвекции.

Применение ребер было введено одна эффективная техника для улучшения теплопроводности МФП. Авторы работы ([Kamkari, Shokouhmand, 2014](#)) показали, что общее время плавления можно сократить на 18 % и 37 % соответственно, когда в МФП погружены одно и три ребра, по сравнению с МФП без ребер. Также были подробно изучены эффекты геометрических характеристик ребра. В работе ([Amudhalapalli, Devanuri, 2024](#)) Исследование сосредоточилось на повышении эффективности системы хранения латентного тепла с использованием различных конфигураций и ориентаций ребер. В текущем анализе поверхность теплоотдачи трубы теплоносителя увеличена за счет радиальных (R-тип), спиральных (S-тип) и продольных (L-тип) ребер, результаты показали значительное сокращение времени зарядки вертикально расположенного теплообменника по сравнению с другими ориентациями: на 47,5 %, 45,7 % и 23 % для конфигураций R-типа, S-типа и L-типа соответственно ([Kudachi et al., 2022](#)). В этой статье были разработаны две конфигурации теплообменника (ТО), одна без внутреннего трубчатого ребра и другая с кольцевым ребром как для цикла зарядки, так и для разрядки. В целом, экспериментальное исследование продемонстрировало, что включение ребер в системы хранения тепловой энергии на основе МФП значительно повышает их эффективность и эффективность в хранении и высвобождении тепловой энергии. В данной статье ([Ma et al., 2023](#)) было исследовано влияние формы ребер на теплоотдачу фазового материала (МФП) и сравнивались на основе формы труб с ребрами и количества труб с ребрами, Использование труб с ребрами является эффективным методом для повышения теплоотдачи в системах НСТЭ и различные расположения ребер, такие как постепенное увеличение диаметра ребер от верха до низа или все ребра с одинаковым диаметром, оказывают влияние на процесс накопления тепла и работоспособность системы. В работе ([Gupta, Rathod, 2023](#)) было количественно оценено влияние формы ребер на процесс плавления фазового материала (МФП) в прямоугольном замкнутом пространстве с постоянной температурой стенки и рассмотрены три различные конфигурации с разными формами ребер. Исследование подчеркивает важность оптимизации конструкции ребра для максимизации эффективности теплоотдачи и улучшения эффективности систем хранения тепловой энергии на основе МФП. В статье

(Kumar et al., 2021) проведено комплексное двумерное численное исследование для изучения теплоотдачи на основе фазового материала (МФП) с ребристым теплоотводом с целью термического управления электронными устройствами. Исследование подчеркивает важность оптимизации конфигурации теплоотвода, такой как количество ребер, для улучшения термического управления компонентами электроники. Количество ребер в теплоотводе напрямую влияет на эффективность теплоотдачи на основе МФП, с увеличением количества ребер улучшается общая производительность. Несколько исследований – в основном теоретических, проведенных в работах (Youssef et al., 2018; Liu, 2016; Abujas et al., 2016; Ibrahim et al., 2017) подтвердили, что тепловая эффективность зарядки и разрядки МФП значительно улучшается за счет встраивания ребристых трубок и труб в МФП. В работе (Parry et al., 2014) авторы разработали вычислительно эффективную численную модель для системы хранения тепловой энергии типа "оболочка-труба", где теплообмен происходит между фиксированным количеством фазового материала, находящегося в контакте с трубой, через которую протекает высокотемпературная жидкость. Результаты показали, что системы с ребрами и несколькими трубами имели более быстрое повышение температуры во время зарядки по сравнению с базовым проектированием и Поверхность контакта теплообменника теплоносителя с трубой с ребрами по сравнению с круглыми ребрами была в два раза выше для продольных ребер, что привело к быстрому плавлению и затвердеванию МФП.

II. Использование наночастиц для увеличения теплопроводности.

Добавление очень маленьких молекул с высокой теплопроводностью к веществу с фазовым переходом привлекло внимание в последние десятилетия. Этими частицами могут быть графит, металлы (алюминий, медь, серебро) или оксиды металлов (оксид алюминия, оксид меди, оксид магния). Выбор наночастиц зависит от таких факторов, как стоимость, повышение теплопроводности, совместимость с МФП и предполагаемое применение.

Добавление металлических наночастиц к МФП исследовали несколько исследователей. В работе (Khyad et al., 2016) добавили 1 % массовой доли алюминиевого порошка в МФП (температура плавления ниже 80 °C) и наблюдали увеличение теплопроводности в 18 раз, а именно, с 0,23 Вт/(м·К) до 4,11 Вт/(м·К). Эффект добавления алюминиевого порошка в МФП также изучали авторы работы (Li et al., 2015), с акцентом на процессы плавления и затвердевания, а также увеличение теплопроводности, они показали, что при добавлении 1 % и 2 % массовых долей алюминия время затвердевания МФП (с интервалом плавления от 45,8 до 50,3 °C) сократилось с 220 минут до 140 минут. В другом исследовании авторы (Şahan et al., 2015) использовали наномагнетит (Fe₃O₄), и для составов МФП с 10% и 20% парафин-наномагнетита теплопроводность МФП увеличилась на 48 % и 60 %, соответственно. В работе (Vallejo et al., 2018) исследовали влияние различных дисперсий функционализированных графеновых нанопластинок на теплоотдачу и стабильность смеси пропиленгликоля и воды с массовым соотношением 3:7. Согласно их результатам, теплопроводность используемой в исследовании МФП была увеличена до 16 % для случая с 1 % массовой долей функционализированных графеновых нанопластинок. В статье (Mebarek-Oudina, Chabani, 2023) обобщается общий обзор того, как преодолеть эти ограничения путем адаптации наносушеных фазовых материалов. Интеграция наночастиц ускоряет процессы плавления/затвердевания, что приводит к более быстрым фазовым переходам по сравнению с чистыми МФП, улучшая термофизические свойства фазовых материалов и повышая тепловую эффективность. В работе (Jalil et al., 2022) исследовано влияние использования фазового материала (МФП) на эффективность охлаждения теплоотвода, показывая, что рабочий теплоотвод с МФП может снизить температуру до 18 °C, и добавление небольшого количества (2 %) наночастиц (Al₂O₃) в МФП улучшило производительность теплоотвода, указывая на потенциал для дальнейшей оптимизации в системах охлаждения. В данной статье (Chinnasamy, Honghyun, 2022) исследовались фазовые свойства четырех металлических наночастиц, а именно Al₂O₃, CuO, Fe₃O₄ и SiC при концентрациях 1, 3, 5 и 5 вес. %. Добавление металлических наночастиц при разных концентрациях приводило к незначительным изменениям в температурах фазового перехода и различным значениям скрытой теплоты, варьирующимся от 6,56 % до 18,5 %. Нанокompозитные фазовые материалы (МФП) Al₂O₃ и CuO проявили значительные улучшения в тепловых и физических свойствах по сравнению с нанокompозитами Fe₃O₄ и

SiC, что делает их подходящими для приложений в управлении внутренней тепловой нагрузкой. В работе (Nitsas, Koronaki, 2021) проведен экспериментальный анализ органических фазовых материалов, Добавление медных наночастиц к органическому фазовому материалу (МФП) уменьшает время тепловой зарядки на 25,3 % при концентрации 0,165 %, Гибридные наночастицы меди и оксида алюминия в МФП при концентрациях от 0,165 % до 0,816 % снижают время на 10,8 % по сравнению с чистым МФП. Статья (Zhang et al., 2022) введена новая конфигурация вентиляционной системы с использованием синусоидальных контейнеров фазового материала (МФП) внутри канала, где рассматривалась смесь TiO₂ и RT25 как МФП. Результаты показали, что включение наноматериалов в МФП может улучшить эффективность поглощения тепла и снизить общее время процесса в вентиляционной системе. В работе (Amudhalapalli, Devanuri, 2022) изучено почти 40 различных наночастиц по их эффективности в улучшении термофизических свойств МФП, работающих в диапазоне от 30 до 100 °C, с акцентом на изменения в теплопроводности и скрытой теплоты.

III. Тепловая трубка.

Интеграция тепловых трубок с материалами с фазовым переходом объединяет их соответствующие преимущества для создания синергетической системы терморегулирования. Тепловые трубки эффективно передают тепло, используя принцип фазового перехода, при котором рабочая жидкость испаряется в испарителе за счет приложенного тепла, поступает в конденсатор для выделения тепла, конденсируется обратно в жидкость и возвращается за счет капиллярного действия. МФП, с другой стороны, накапливают и высвобождают тепловую энергию во время фазовых переходов при определенных температурах. За счет встраивания или окружения тепловых трубок материалами с фазовым переходом значительно повышается теплопроводность и эффективность теплопередачи. Тепловые трубки известны своей способностью быстро и эффективно передавать тепло на большие расстояния при минимальном тепловом сопротивлении. В сочетании с МФП, которые обладают высокой способностью к скрытому накоплению тепла, тепловые трубки обеспечивают быстрое и равномерное распределение тепловой энергии, поглощаемой МФП во время фазового перехода (обычно из твердого состояния в жидкое) по всему материалу. Такая быстрая теплопередача предотвращает образование локальных очагов перегрева и позволяет МФП быстро поглощать тепло, максимально увеличивая потенциал накопления энергии. Кроме того, на этапе затвердевания (превращения жидкости в твердое вещество) тепловые трубки способствуют высвобождению накопленной тепловой энергии, поддерживая постоянный температурный профиль. Такой синергетический подход не только повышает общую эффективность теплопередачи системы, но и улучшает ее чувствительность к изменяющимся тепловым нагрузкам, что делает ее идеальной для применений, где важен точный контроль температуры и терморегулирование, таких как охлаждение электроники, системы аккумулирования тепла для возобновляемых источников энергии и пассивные решения для отопления и охлаждения зданий.

В работе (Rahim et al., 2022) исследование успешно разработало и протестировало систему солнечного накопления тепла, объединяющую френелевы линзы, тепловые трубы и материалы с изменением фазы для эффективного накопления тепла. Система продемонстрировала способность накапливать тепло до 730 кДж с использованием 2 кг МФП на основе парафина с температурой плавления от 54 до 59 °C. В данной статье (Hayat et al., 2020) Исследование направлено на улучшение теплового управления электронными системами путем комбинации МФП, медного пористого материала и тепловых труб. Результаты показали, что гибридная система охлаждения (Foam- МФП -HP) с вентилятором значительно снижает температуру на 47%, 51% и 54% при тепловых потоках 2, 2.5 и 3 кВт/м² после 6000 секунд зарядки. В работе (Patil, Chandrakishor, 2014) Исследование направлено на повышение эффективности теплообмена в системе теплоаккумуляции с использованием МФП, тепловых труб и медных трубок, интегрированных с солнечной системой нагрева воды. Результаты показывают, что использование тепловых труб с МФП обещает быть перспективным подходом для эффективного накопления солнечной энергии и обеспечения непрерывного поставления горячей воды для бытовых нужд. Статья (Reay, 2015) исследовала использование тепловой трубки с МФП в цилиндрическом контейнере. Авторы

работы (Boo et al., 2011) исследовали численное моделирование системы хранения тепла с вставленными тепловыми трубками для высокотемпературного и среднетемпературного диапазонов. В работе (Sharifi et al., 2012) численно моделировали процесс плавления МФП в скрытом тепле тепловая энергия с встроенными тепловыми трубками, провели параметрический анализ, показавший, что скорость плавления заметно превышает результаты, полученные с использованием стержня или трубы. Авторы работы (Tiari et al., 2017) повысили тепловую эффективность НСТЭ системы с использованием тепловых трубок. Экспериментальные исследования показали, что внедрение сети тепловых трубок значительно увеличило время зарядки накопителя. В работе (Tiari et al., 2015) также разработали инструмент вычислительного моделирования для изучения поведения высокотемпературной НСТЭ системы с использованием технологии ребристых тепловых трубок. В этом исследовании была создана двумерная модель для оценки эффективности числа ребристых тепловых трубок в процессе зарядки системы. Было установлено, что увеличение числа тепловых трубок с 1 до 3 приводит к увеличению скорости зарядки на 10 %, однако изменение общего числа ребер не приводит к заметному изменению эффективности настройки НСТЭ. Тиари и др. изучили цилиндрический резервуар с ребристой тепловой трубкой в двух измерениях с точки зрения конструкции тепловой трубки, длины ребра и числа ребер и выяснили, что большее количество ребристых тепловых трубок приводит к более быстрому процессу плавления/затвердевания. В работе (Gan, Hung, 2023) исследовали влияние размера нано-фитинг материала на общее тепловое поведение микротепловой трубки, а также практическую реализацию нано-фитинг в высокоэффективной системе охлаждения для микроэлектроники для совместимости с окружающей средой. Авторы работы (Zhang, 2020) предложили новую комбинированную тепловую трубку/ребра из медной пены и оценили ее производительность путем сравнения с производительностью ребристой тепловой трубки. В работе (Feng, 2022) исследовали эксперимент/численное исследование проектирования и оптимизации гибридного холодильного блока, использующего составной фазовый материал и плоскую тепловую трубку для термического управления аккумуляторами. В статье (Diao et al., 2019) численно исследовали поведение нового типа устройства для хранения латентного тепла (НСТЭ) на основе плоских микротепловых трубок с прямоугольными продольными ребрами.

IV. Инкапсуляция МФП.

Инкапсуляция МФП представляет собой процесс заключения фазопереходных материалов в оболочку или капсулу из другого материала и классифицируется на 4 группы:

1. Микрокапсулирование: МФП заключают в микроскопические капсулы, обычно размером от нескольких микрометров до миллиметров. Эти микрокапсулы могут быть включены в различные матрицы, такие как полимеры или строительные материалы.
2. Макрокапсулирование: В этом случае МФП заключают в более крупные контейнеры или капсулы, которые могут быть использованы в тепловых аккумуляторах или теплообменниках.
3. Наноканпулирование: МФП заключают в наноканпулы, что позволяет улучшить теплопередачу на наноскопическом уровне. Этот метод часто используется в передовых технологиях и материалах.
4. Композитные материалы: МФП смешивают с высокотеплопроводными материалами (например, графитом, углеродными нанотрубками или металлическими частицами) и инкапсулируют в композитную матрицу для улучшения тепловых характеристик.

Технология микроинкапсуляции, как подчеркивают различные исследования, предлагает метод преодоления проблем, связанных с обработкой МФП, предоставляя стабильную структуру и улучшенную эффективность теплообмена. В статье (Mahmood et al., 2022) авторы предоставляют надежный источник информации о последних достижениях и разработках в области микроинкапсулированных фазовых переходных материалов, исследование демонстрирует потенциал микроинкапсулированных МФП в обеспечении надежного метода для хранения и управления тепловой энергией, с акцентом на улучшение теплообмена и обеспечение стабильных структур для долгосрочной эксплуатации. В работе (Dutkowski et al., 2022) изучено влияние физического состояния микроинкапсулированного фазового материала на гидравлическое сопротивление смеси в круглом канале. Проведены детальные исследования гидравлического сопротивления микроинкапсулированной смеси МФП в канале диаметром 4 мм, испытания проводились с смесью МФП на 21,5 % по массе

при различных температурах (18,4 °C, 26,1 °C, 30,5 °C), представляющих твердое, фазовое и жидкое состояния. Исследование показало, что с увеличением числа Рейнольдса сопротивление потока также увеличивается, причем изменения плотности в смеси в первую очередь зависят от состояния МФП, а не от вязкости. Авторы работы (Santos, 2021) разработаны новый дизайн для панели инкапсуляции с учетом практических аспектов, таких как стоимость производства и удобство изготовления, помимо теплообмена и перепада давления. Предложенный дизайн удвоил способность к теплообмену, что позволяет лучше обмениваться тепловой энергией между панелями МФП и воздухом в теплообменниках МФП-воздух, и новый дизайн также увеличил объемную емкость на 13,7 %, обеспечивая больше МФП для хранения и высвобождения теплоты. В работе (Hoang et al., 2015) исследовано тепловое поведение инкапсулированного фазового материала (Rubitherm RT5) с двумя разными массовыми долями МФП, результаты показали, что инкапсулированный МФП обладает превосходной тепловой буферной способностью по сравнению с обычными упаковочными материалами, улучшая тепловую защиту для перепродуктов. В работе (Tyagi et al., 2014) представлено сравнительное исследование двух различных типов систем терморегулирования для отопления помещений с использованием гексагидрата хлорида кальция в качестве материала для накопления тепловой энергии, заключенного в панели и шарики. В данной работе (Giro-Paloma et al., 2019) изучен материал с фазовым переходом (инкапсулирован в микрокапсулы для увеличения теплопередачи и контроля изменений объема при фазовом переходе). Включение восков в микрокапсулы обеспечивает улучшенную теплопередачу и лучший контроль изменений объема во время фазовых переходов, что делает его перспективным подходом для технологии скрытого аккумулирования тепла. В обзоре (Shchukina et al., 2018), посвященном материалам с фазовым переходом для аккумулирования тепловой энергии, в частности их наноинкапсулированию, авторы рассматривают наноинкапсулирование как многообещающий метод повышения эффективности материалов с фазовым переходом, как органических, так и неорганических, за счет обеспечения высокой удельной поверхности и регулирования теплообмена между оболочкой капсулы и корпусом. современный уровень развития технологии инкапсуляции МФП в основном включает макро- и микрокапсулирование, но существует потребность в передовых исследованиях многофункциональных нанокапсул для улучшения тепловых свойств и эффективности. В исследовательской работе (Höhlein et al., 2018) представлена подробная стратегия разработки макрокапсулирования материалов с фазовым переходом, процесс инкапсулирования включает в себя анодированные алюминиевые трубы, герметично закрытые механическими методами для гидрата неорганической соли, но, несмотря на эффективность разработанных макрокапсул, их высокая стоимость в основном обусловлена индивидуальным изготовлением, побуждение к разработке недорогих концепций герметизации с использованием пищевых продуктов массового производства или алюминиевых банок для будущей работы. В работе (Valizadeh, Torabi Angaji, 2020) исследование было сосредоточено на изготовлении, характеристике и термических свойствах нанокапсул AP25 в качестве органических материалов с фазовым переходом для хранения тепловой энергии. Нанокапсулы продемонстрировали высокую скрытую теплоту фазового перехода – 141,8 Дж/г при 27,4°C, что указывает на их значительный потенциал для применения в качестве накопителей тепловой энергии.

Методы увеличения поверхностей обмена и использования тепловой трубки повышают эффективность процесса теплопередачи внутри МФП, тогда как другие методы увеличивают теплопроводность МФП и тем самым усиливают термодиффузию внутри него. Объединение методов повышает эффективность передачи и хранения тепла.

3. Заключение

Системы скрытого накопления тепловой энергии, использующие уникальные свойства материалов с фазовым переходом, предлагают многообещающее решение для эффективного накопления тепловой энергии и регулирования температуры. Несмотря на высокую плотность накопления энергии и изотермические свойства, низкая теплопроводность МФП остается серьезной проблемой, которую необходимо преодолеть, чтобы в полной мере использовать их потенциал. В этой статье представлен всесторонний

обзор современных методов повышения теплопроводности МФП для систем накопления скрытой тепловой энергии. Анализ показывает, что добавление высокопроводящих частиц, увеличение площади поверхности теплопередачи, использование тепловых трубок и инкапсулирование МФП являются эффективными подходами к улучшению тепловых свойств МФП. Прогресс в улучшении теплопроводности МФП открывает большие перспективы для разработки систем НСТЭ. Продолжая исследовать и совершенствовать эти методы, мы сможем раскрыть весь потенциал МФП и внести свой вклад в создание более эффективных и устойчивых решений для хранения энергии и управления температурой в различных отраслях промышленности. Перспективы будущих исследований включают дальнейшую оптимизацию этих методов и их интеграцию в коммерческие энергетические системы для повышения их эффективности и устойчивости.

References

- [Abujas et al., 2016](#) – *Abujas, Carlos R., et al.* (2016). Performance comparison of a group of thermal conductivity enhancement methodology in phase change material for thermal storage application. *Renewable energy*. 97: 434-443.
- [Amudhalapalli, Devanuri, 2022](#) – *Amudhalapalli, G.K., Devanuri, J.K.* (2022). Synthesis, characterization, thermophysical properties, stability and applications of nanoparticle enhanced phase change materials—A comprehensive review. *Thermal Science and Engineering Progress*. 28: 101049.
- [Amudhalapalli, Devanuri, 2024](#) – *Amudhalapalli, G.K., Devanuri, J.K.* (2024). Effect of fin configuration and orientation of latent heat storage system on the melting and solidification performance. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 238(5):1747-1759.
- [Boo et al., 2011](#) – *Boo, J.H., Lee, S.K., Kim, J.K.* (2011). Numerical analysis of a thermal storage system with inserted heat pipes for medium-high temperature range *The International Heat Pipe Symposium*.
- [Chinnasamy, Honghyun, 2022](#) – *Chinnasamy, V., Honghyun, C.* (2022). Thermophysical investigation of metallic nanocomposite phase change materials for indoor thermal management. *International Journal of Energy Research*. 46(6): 7626-7641.
- [Diao et al., 2019](#) – *Diao, Y.H. et al.* (2019). Numerical investigation of the thermal performance enhancement of latent heat thermal energy storage using longitudinal rectangular fins and flat micro-heat pipe arrays. *Applied energy*. 233: 894-905.
- [Dutkowski et al., 2022](#) – *Dutkowski, K. et al.* (2022). Influence of the Physical State of Microencapsulated PCM on the Pressure Drop of Slurry in a Circular Channel *Materials*. 15(19): 6719.
- [Feng, 2022](#) – *Feng, R. et al.* (2022). Experimental and numerical study on the cooling performance of heat pipe assisted composite phase change material-based battery thermal management system. *Energy Conversion and Management*. 272: 116359.
- [Gan, Hung, 2023](#) – *Gan, J.S., Hung, Y.M.* (2023). Remarkable thermal performance enhancement of micro heat pipes with graphene-nanoplatelet nano-wicks. *Nanomaterials*. 13(2): 232.
- [Giro-Paloma et al., 2019](#) – *Giro-Paloma, J. et al.* (2019). Microencapsulation of Phase Change Materials. *Applications of Encapsulation and Controlled Release*. CRC Press. 375-403.
- [Gupta, Rathod, 2023](#) – *Gupta, N., Rathod, M.K.* (2023). Numerical Investigation on Finned Latent Heat Storage Unit. *Recent Advances in Thermal Sciences and Engineering: Select Proceedings of ICAFFTS 2021*. Singapore: Springer Nature Singapore, 485-497.
- [Haya et al., 2020](#) – *Hayat, M.A. et al.* (2020). Phase change material/heat pipe and Copper foam-based heat sinks for thermal management of electronic systems. *Journal of Energy Storage*. 32: 101971.
- [Hoang et al., 2015](#) – *Hoang, H.-M. et al.* (2015). Heat transfer study of submicro-encapsulated PCM plate for food packaging application. *International Journal of Refrigeration*. 52: 151-160.
- [Höhlein et al., 2018](#) – *Höhlein, S., König-Haagen, A., Brüggemann, D.* (2018). Macro-encapsulation of inorganic phase-change materials (PCM) in metal capsules. *Materials*. 11(9): 1752.
- [Ibrahim et al., 2017](#) – *Ibrahim, N.I., et al.* (2017). Heat transfer enhancement of phase change materials for thermal energy storage applications: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 74: 26-50.

Jalil et al., 2022 – Jalil, J.M., Mahdi, H.S., Allawy, A.S. (2022). Cooling performance investigation of PCM integrated into heat sink with nano particles addition. *Journal of Energy Storage*. 55: 105466.

Kamkari, Shokouhmand, 2014 – Kamkari, B., Shokouhmand, H. (2014). Experimental investigation of phase change material melting in rectangular enclosures with horizontal partial fin. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 78: 839-851.

Khyad et al., 2016 – Khyad, A., et al. (2016). Energy storage with PCMs: Experimental analysis of paraffin's phase change phenomenon & improvement of its properties. *J. Mater. Environ. Sci.* 7(7): 2551-2560.

Kudachi et al., 2022 – Kudachi, Badal, et al. (2022). Experimental Study of PCM Based Latent Heat Thermal Energy Storage System Using Fins. *International Conference on Advances in Energy Research*. Singapore: Springer Nature Singapore.

Kumar et al., 2021 – Kumar, Anuj, et al. (2021). Numerical Simulation of PCM-Based Heat Sink with Plate Fins for Thermal Management of Electronic Components. *Theoretical, Computational, and Experimental Solutions to Thermo-Fluid Systems: Select Proceedings of ICITFES 2020*. Springer Singapore.

Li et al., 2015 – Li, W., Wang, Y.-H., Kong, C.-C. (2015). Experimental study on melting/solidification and thermal conductivity enhancement of phase change material inside a sphere. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 68: 276-282.

Liu, 2016 – Liu, Lingkun, et al. (2016). Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 62: 305-317.

Ma et al., 2023 – Ma, Fei, et al. (2023). A review on heat transfer enhancement of phase change materials using fin tubes. *Energies*. 16(1): 545.

Mahmood et al., 2022 – Mahmood, T. et al. (2022). Design and Fabrication of Microencapsulated Phase Change Materials for Energy/Thermal Energy Storage and Other Versatile Applications. *Nanocomposite Materials for Biomedical and Energy Storage Applications*. IntechOpen.

Mebarek-Oudina, Chabani, 2023 – Mebarek-Oudina, F., Chabani, I. (2023). Review on nano enhanced PCMs: insight on nePCM application in thermal management/storage systems. *Energies*. 16(3): 1066.

Nitsas, Koronaki, 2021 – Nitsas, M., Koronaki, I.P. (2021). Performance analysis of nanoparticles-enhanced PCM: An experimental approach. *Therm. Sci. Eng. Prog.* 25: 100963.

Parry et al., 2014 – Parry, A.J., Eames, P.C., Agyenim, F.B. (2014). Modeling of thermal energy storage shell-and-tube heat exchanger. *Heat Transfer Engineering*. 35(1): 1-14.

Patil, Chandrakishor, 2014 – Patil, R.M., Ladekar, C. (2014). Experimental investigation for enhancement of latent heat storage using heat pipes in comparison with copper pipes. *International Refereed J. of Engineering and Science*. 3(9): 44-52.

Rahim et al., 2022 – Rahim, N.C., et al. (2022). Designing a Solar Heat Storage System using Heat Pipe and Phase-Change Material (PCM). *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 91(1): 102-114.

Reay, 2015 – Reay, D.A. (2015). Thermal energy storage: the role of the heat pipe in performance enhancement. *International Journal of Low-Carbon Technologies*. 10(2): 99-109.

Şahan et al., 2015 – Şahan, N., Fois, M., Paksoy, H. (2015). Improving thermal conductivity phase change materials—A study of paraffin nanomagnetite composites. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 137: 61-67.

Santos, 2021 – Santos, Th. et al. (2021). Numerical Design and Laboratory Testing of Encapsulated PCM Panels for PCM-Air Heat Exchangers. *Applied Sciences*. 11(2): 676.

Sharifi et al., 2012 – Sharifi, N. et al. (2012). Heat pipe-assisted melting of a phase change material. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 55(13-14): 3458-3469.

Shchukina et al., 2018 – Shchukina, E.M. et al. (2018). Nanoencapsulation of phase change materials for advanced thermal energy storage systems. *Chemical Society Reviews*. 47(11): 4156-4175.

Tiari et al., 2015 – Tiari, S., Qiu, S., Mahdavi, M. (2015). Numerical study of finned heat pipe-assisted thermal energy storage system with high temperature phase change material. *Energy Conversion and Management*. 89: 833-842.

Tiari et al., 2017 – Tiari, S., Qiu, S., Mahdavi, M., Qiu, S. (2017). Experimental study of a latent heat thermal energy storage system assisted by a heat pipe network. *Energy Conversion and Management*. 153: 362-373.

Tyagi et al., 2014 – Tyagi, V.V. et al. (2014). Thermodynamics and performance evaluation of encapsulated PCM-based energy storage systems for heating application in building. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 115: 915-924.

Valizadeh, Torabi Angaji, 2020 – Valizadeh, S., Ehsani, M., Torabi Angaji, M. (2020). Preparation, characterization and thermal properties of PCM nanocapsules with polystyrene/nanographene oxide shell for energy storage. *Heat and Mass Transfer*. 56: 575-586.

Vallejo et al., 2018 – Vallejo, J.P., et al. (2018). Potential heat transfer enhancement of functionalized graphene nanoplatelet dispersions in a propylene glycol-water mixture. Thermophysical profile. *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 123: 174-184.

Youssef et al., 2018 – Youssef, W., Ge, Y.T., Tassou, S.A. (2018). CFD modelling development and experimental validation of a phase change material (PCM) heat exchanger with spiral-wired tubes. *Energy conversion and management*. 157: 498-510.

Zhang et al., 2022 – Zhang, Juan, et al. (2022). Simulation of charging of PCM within a duct containing nanoparticles. *ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*. 102.8: e202100375.

Zhang, 2020 – Zhang, C. et al. (2020). Numerical study on heat transfer enhancement of PCM using three combined methods based on heat pipe *Energy*. 195: 116809.

Улучшение теплопроводности материалов с фазовым переходом: обзор методов

Альнассар Ашраф ^{a,*}, Андрей Николаевич Makeev ^a

Аннотация. В настоящее время накопление тепловой энергии является важной задачей не только в традиционных теплоиспользующих энергосистемах для балансировки спроса и предложения энергии, но и системах возобновляемой энергетики, где производство энергии может варьироваться в весьма широких пределах. При этом скрытому накоплению тепловой энергии уделяется повышенное внимание. В основном это обуславливается высокой плотностью энергии, которую можно запасти в момент ее избыточной генерации и способностью поддерживать изотермический режим во время фазовых переходов. Это свойство делает материалы с фазовым переходом (МФП) особенно ценными в различных областях применения для хранения тепловой энергии. Одним из основных ограничений общей эффективности систем накопления тепловой энергии на основе МФП является относительно низкая теплопроводность используемого материала. Данное обстоятельство определяет скорость поглощения и выделения тепла в процессе фазового перехода, что в итоге значительно снижает область применения подобных накопительных систем. В настоящей статье не только рассматривается роль МФП в системах хранения тепловой энергии, но и определяются ключевые преимущества и различные инновационные стратегии для повышения теплопроводности МФП. Эти стратегии включают добавление ребер, использование наночастиц, внедрение тепловых трубок и методов инкапсуляции. Ожидается, что обозначенные разработки значительно улучшат практику устойчивого энергоменеджмента и будут способствовать более эффективному использованию возобновляемых источников энергии с использованием накопителей тепловой энергии на основе материалов с фазовым переходом. В подведении итогов исследования подчеркивается важность использования материалов с фазовым переходом для обеспечения устойчивого энергетического будущего, в котором накопление тепловой энергии является неотъемлемой частью функционирования энергетических систем.

Ключевые слова: скрытая теплота, накопление энергии, материалы с фазовым переходом, теплопроводность, инкапсуляция, наночастицы материалы, тепловые трубки.

* Корреспондирующий автор

Адреса электронной почты: ashrafnassar@yandex.ru (А. Ашраф)

Copyright © 2024 by Cherkas Global University



Published in the USA
 European Reviews of Chemical Research
 Issued since 2014.
 E-ISSN: 2413-7243
 2024. 11(1): 12-49

DOI: 10.13187/erchr.2024.1.12
<https://erchr.cherkasgu.press>



Exotic High-Resolution Multichannel and Position-Sensitive Methods for Physico-Chemical Archaeometry

Oleg V. Gradov ^{a,*}, Andrew A. Skrynnik ^b

^a FRC CP RAS, Russian Federation

^b INEPCP RAS, Russian Federation

Abstract

The aim of this review is to substantiate the fundamental feasibility of research and development related to archaeological and anthropological materials within the infrastructure previously utilized for work in physical chemistry, chemical, and biochemical physics. The assessment of capabilities is based on a literature analysis in the fields of archaeometry and archaeological analytics, as well as structural analysis for geoarchaeological and archaeomineralogical applications. On this basis, a plan for several research directions is proposed, where not only specialists in physical chemistry can be involved and trained, but also historians and archaeologists, among others. The user-friendly nature of the modern implementation of these methods allows for their mastery across various (non-physico-chemical) fields of study, starting from the early stages of university education. By not being overly complex in implementation, these research activities will not only enable achieving the standards of progressive foreign archaeometric laboratories but also contribute to DIY science/citizen science, engaging students in the humanities to address their challenges through rigorous scientific methods with higher technical and methodological organization. This will also enhance the methodological quality of certain archaeological publications.

Keywords: multichannel archaeometry, multispectral archaeometry, spectrozonal archaeometry, position-sensitive methods, physico-chemical archaeometry, microscopy, mapping.

1. Постановка проблематики

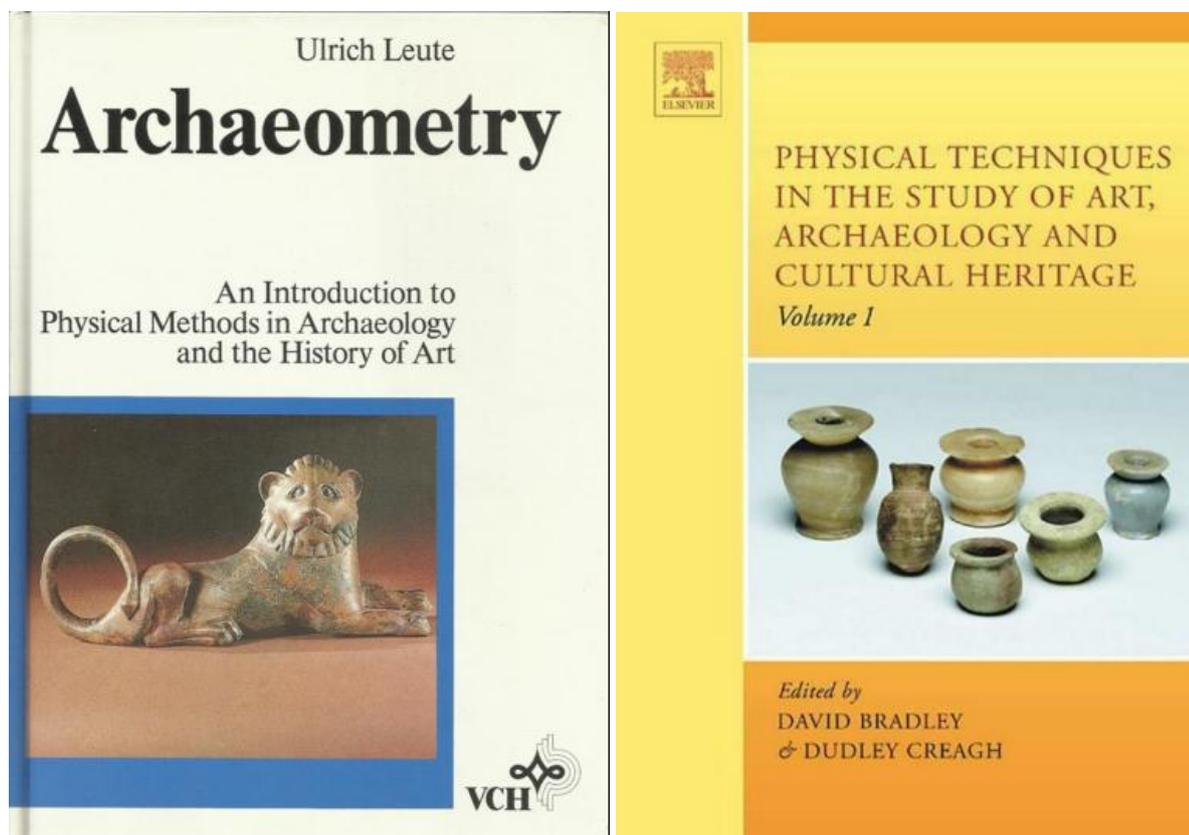
Методической задачей инструментальной археометрии являются неразрушающий контроль образцов, являющийся прямым следствием отнесения последних к объектам культурного наследия (в силу чего всё чаще используются тонкие спектрометрические методы, такие, как спектроскопия вторично-эмиссионного рентгеновского излучения/энергодисперсионная спектрометрия (Longoni et al., 1998; Hahn, 2010), спектроскопия комбинационного рассеяния/рамановская спектроскопия (Bouchard Smith, 2001; Smith, 2003)), по мере прогресса техники переходящий от качественного и полуколичественного уровня к количественной аналитике, в самом жестком хемометрическом значении этого термина (*sensu stricto*) (Milazzo, 2004). Вместе с тем, как логично заключить, исходя из автоматизированного контент-анализа литературы, есть форсайтная вероятность разделения археометрии на две (дополняющие друг друга, но не эквивалентные) области – «химическая археометрия», о которой речь шла выше (Trojanowicz, 2008),

* Corresponding author

E-mail addresses: o.v.gradov@gmail.com (O.V.Gradov), retromicroscopy@gmail.com (A.A. Skrynnik)

и постулированная Урихом Лёйте «физическая археометрия», получившая в 1980-е гг. широкий резонанс не только в немецких (Leute, 1992), но и в англоязычных (Weymouth, 1990) и франкоязычных (Langouët, 1988; Raepsaet, 1989) источниках. Физическая археометрия, базируясь на анализе структурных свойств материалов и различиях физического отклика близких материалов (коррелирующего с датировкой или уровнем нахождения, в силу различия способов изготовления, уровня деградации материала при нахождении в естественной среде, вплоть до субституции и тафономической деформации в ней, и превалирующих материалов той или иной эпохи или исторического периода), носит более универсальный характер, чем аналитическая химическая археометрия (которая, в силу специфики археометрируемого материала и опоры на предшествующие достижения собственно аналитической химии, делится на две части: минеральная или, что почти тождественно, «неорганическая археометрия» (Santos et al., 2009), базирующаяся на достижениях неорганической аналитической химии и геохимии, и органическая археометрия (Sauter et al., 2002), включающая в себя также методы биоорганической и полимерной химии). Однако ни достижение полного химического анализа образца, ни понимание его физических свойств, в отрыве от структуры, не является достаточным, с точки зрения комплексной интерпретации объектов археометрируемого культурного наследия.

Поэтому в настоящем обзоре мы делаем акцент не на отдельно химических либо физических аспектах исследования материала, а пытаемся интегрировать химические, физические и микроструктурные изыскания в рамках единой инфраструктуры, работы на которой обеспечивают достижение понимания взаимосвязи этих дескрипторов. Как пример – можно привести применение физических спектральных методов для анализа археологического материала с позиционной чувствительностью, то есть привязкой его результатов к точкам конкретных образцов (как это делается в картирующих техниках археометрической спектроскопии (Radpour, 2019), в том числе радиочастотных (Somers et al., 2005) и культурного слоя в целом.



а

б

Рис. 1. Классические зарубежные издания в области «физической археометрии»

2. Обоснование необходимости мультиспектрального картирующего подхода

Никакие аналитические данные в анализе культурного наследия не имеют смысла в отсутствие привязки к форме и пространственной локализации. Это систематическое утверждение может быть распространено на все масштабы объектов археометрии. Для макромасштабов геодезической привязки местонахождений соответствующими задаче методами исследования являются лазерное дистанционное сканирование (если объект находится на поверхности) (Bonali et al., 2014) или же георадарные методы (Pettinelli et al., 2012) (если объект находится под поверхностью, в том числе – в нижних культурных слоях). Эти методы способны, при правильной постановке эксперимента, давать не только топографические данные, но и метрологические физико-химические данные (например, лазерный сканер – быть источником информации для лазерно-опосредованных методов спектроскопии; радар – для радиочастотных или ультразвуковых методов), являющиеся дескрипторами, т.е. характеристическими индикаторами образца, его реального физического, химического и археоминералогического состояния.

В отличие от фотографического картирования и обычной аэрофотосъёмки (Verhoeven et al., 2012), этот подход позволяет идентифицировать впоследствии все подобные объекты, исходя не из внешней схожести, а из объективных критериев, в рамках которых возможно сопоставление произвольных объектов. При этом, критерии спектрального анализа/«фингерпринтинга» могут быть выбраны даже для объектов с минимальными химическими различиями – например, путём замены «аналитических критериев» с химических на структурные или же текстурные (например: анизотропия, симметрия, интегральные частотные характеристики, интегральные пространственные характеристики образцов). Однако разрешающая способность любого принципа измерений коррелирует с длиной волны или характеристической частотой источников излучения, поэтому обеспечить полноценную идентификацию произвольного объекта, используя один метод, работающий на одной длине волны или в одном диапазоне, как правило, не представляется возможным. Единственной альтернативой этому является, по определению, использование многоволновых методов.

3. Почему нужно спускаться на микромасштабы картирования многоканальной колокализации в археометрических измерениях объектов культурного наследия?

В случае технологий, обеспечивающих многоволновое/спектральное оптическое позиционно-чувствительное картирование образцов, как правило, говорят о методиках спектрального, мультиспектрального, гиперспектрального картирования (imaging-a), в зависимости от количества выделяемых диапазонов исследования; это принято и в инструментальной археологии/археометрии (Alexakis et al., 2009). Однако стремление к прямому (без отхода от культурного слоя) исследованию образцов непосредственно на месте сбора, а также исследованию объекта целиком (часто сменяющееся требованиями изучить на едином приборе и макромасштаб, и микроструктуру целевых объектов наследия – что, в силу физических и технических ограничений, как правило, не является возможным), увы, является причиной использования не наиболее оптимальных метрологически, но наиболее доступных и визуально эффектных методов и технологий исследования. Так, в раскопках и в архивных изысканиях часто ограничиваются получением 3D-картины, получаемой с помощью обычного линейного либо многоугольного («кватернионного») 3D-сканера (Mara et al., 2009; Miljković Gajski, 2016) на одном масштабе измерений, при одной длине волны излучателя – лазера.

Между тем, реальное распределение материалов в сложном образце обычно не является однородным, а текстура исходного материала не является монодисперсной, в силу чего рационально производить измерения на тех увеличениях или масштабах, на которых реально сказывается неоднородность материала, а также культурный уровень его обработки, с привязкой к микрофотограмметрической сетке (Alshawabkeh El-Khalili, 2013).

Расширение и углубление структурных археометрических исследований от макро до микро уровня (в 3D-случае – переход от поверхностного лазерного сканирования к конфокальной микроскопии, в том числе – с различным масштабированием, дающим, в соответствии с новейшими результатами (Stemp et al., 2018), возможность установления

масштабно-инвариантных соотношений и приближенных размерностей Хаусдорфа для структуры объектов культурного наследия) позволит не ограничиваться поверхностным обликом объекта при его литературном описании для специальных журналов, то есть – перейти от *дескриптивной* археологии к (мульти-) *дескрипторной* археометрии.

Резольвометрические – то есть обеспечивающие разрешение на заданных длинах волн – качества методологии многомасштабного микроструктурного исследования позволят воспользоваться всеми дескрипторами, получаемыми методами спектроскопии на данных длинах волн либо в данных спектральных диапазонах.

Используя перестраиваемые лазерные источники (в том числе – генерирующие суперконтинуум), можно достичь результата картирования, превышающего ограниченные возможности человеческого зрения (и не всегда соответствующего ему), тем самым избежав эвристической ловушки, в которой нередко оказываются исследователи, подгоняя результаты стереовизуализации на базе данных лазерного сканирования под приемлемый для человеческого взгляда облик, но теряя при этом эвристическую ценность извлекаемых из изображения результатов (Jamhawi et al., 2016).

Забегая вперёд, отметим, что, с точки зрения спектроскопии, даже цвет древних красок и эстетических покрытий/композиций, в действительности, не всегда является таким, каким мы его видим; в частности, он может зависеть от коллоидной дисперсности (то есть размеров частиц) и угла освещения, примером чего является общеизвестная чаша Ликурга (Freestone et al., 2007; Vaughan, 2008) – изучение которой обычными, в том числе аналитически-химическими методами без учета дисперсности/коллоидной ультрамикроструктуры не даёт ничего примечательного (Brill, 1965; Scott, 1995), однако кардинальное изменение колориметрических оттенков при различном освещении – вплоть до полной невидимости – вынуждает рассуждать о плазмонно-резонансных эффектах и селективном исчезновении видимости, сравнивая её с современными метаматериалами (Leonhardt, 2007) и решая сложные инверсные математические задачи (Barchiesi, 2015).

Так как исследование размеров ультрадисперсных частиц в твёрдофазном состоянии – прерогатива методов ультрамикроскопии и аналитической электронной микроскопии (что и было сделано с кубком Ликурга (Barber et al., 1990)), макроскопическое изучение колориметрических свойств подобных археологических объектов малоинформативно.

4. Какие форматы предпочтительны для микровизуализации в археометрии?

Использование мультиспектрального и гиперспектрального – вплоть до ближнего и среднего инфракрасного диапазонов в исследовании архео-релевантных красителей, допантов, металлов/сплавов (Delaney et al., 2005; Han et al., 2020) в современных археометрических работах говорит о целесообразности вышеприведенной постановки задачи. Однако возникает вопрос (в особенности акцентирующийся в случае 3D-визуализации), учитывая непрозрачный и оптически-плотный характер превалирующей номенклатуры объектов археологии: на каких режимах физической регистрации допустимо производить исследование данных объектов?

Конфокальная микроскопия адаптирована для анализа полупрозрачных или флуоресцирующих биологических структур, следовательно, в большинстве методов, в принципе, не может, несмотря на прогрессивность, являться микро-археометрическим средством анализа. Следовательно, необходим поиск иных, оптимальных технологий/принципов 3D-визуализации, приближенной к физической реальности, в археометрии, использующих отражение и преломление излучения заданных спектральных областей и поляризаций, при взаимодействии с археологическими предметами изучения, в роли аналитического сигнала (отметим, что физически конфокальная микроскопия может, в принципе, работать на отражение, но основная масса производителей – нацеленная на её внедрение в маргинальную молекулярно-биомедицинскую сферу – такие опции не устанавливает в свои приборы). К таковым можно отнести (до настоящего времени не применявшиеся в археометрии – в силу узости технико-методической базы последней – и, тем самым, заведомо, несущие не извлеченную до сих пор информацию) методы и инструменты рефлектометрического, рефрактометрического, интерферометрического/интерференционно-фазового микроскопического картирования, в частности, методы, оптической микроскопии, указанные ниже:

1. Фазово-модуляционную микроскопию микрорельефа (Andreev Indukaev, 2005; Andreev et al., 2005) или, что эквивалентно этому, модуляционную интерференционную микроскопию (Ignat'ev et al., 2015; Loparev et al., 2012) – базирующуюся на физических принципах, допускающих «субдлинноволновое» (преодолевающее критерий Релея) разрешение/сверхразрешение при исследовании объекта (Andreev Indukaev, 2003; Indukaev Andreev, 2003), в том числе – исследование ультрамикроструктур/наноструктур, в современной трактовке термина (Ignat'ev et al., 2011; Andreev et al., 2012), о важности учета которых сказано выше;

2. Интерференционную отражательную микроскопию (Barr Bunnell, 2009) (часто используемую в исследовании свойств дисперсных систем (Raedler Sackmann, 1992)), в том числе с усилением сигнала в видеографическом тракте (Park Park, 1989), позволяющим работать с низкоинтенсивными либо зашумлёнными источниками изображения, к которым часто относятся и образцы, извлеченные из естественной геологической среды (альтернативой чему является п. 1, так как сдвиг фазы вносит определяющий вклад в метрологический сигнал интерференционной отражательной микроскопии (Dubois, 2004));

3. Двухволновую интерференционную отражательную микроскопию (например, при использовании двух лазерных источников с различающимися длинами волн, либо с подачей излучения с двух монохроматоров) (Schilling et al., 2004; Maurstad et al., 2008), в пределе переходящую либо в спектрозональную (с регистрацией на обычной ПЗС- или КМОП-матрице; часто с использованием многокристалльных трёхкомпонентных [RGB] и люминофорных диодных источников (Simmert et al., 2018)), либо в гиперспектральную (в том числе – с лазерными, но не монохроматическими источниками излучения, и, в частности, источниками суперконтинуума (Chiu et al., 2012)) интерференционную отражательную микроскопию (Rentz Dupuis et al., 2008), что позволяет реконструировать 3D-структуру поверхности (Huerre et al., 2016) и трассировать (в 3D) частицы, входящие в состав образца, при экспериментальных воздействиях (Clack, Groves, 2005) (в настоящее время, нередко ассоциируемых с т.н. 4D-операндо-микроскопией);

4. Поляризационную отражательную микроскопию (Bortchagovsky, 2004), применимую в исследовании карбонизированного (обугленного) материала, часто встречающегося в раскопках (в том числе – в исследовании полиморфизма продуктов обжига или горения (Leuthe Riegler, 1992)), реализуемую также в ближнепольном варианте (Jalocha Van Hulst, 1995; Xiao, 1997);

5. Микроскопию дифференциального интерференционного контраста на отражение / преломление пучков, как по Номарскому (Lessor et al., 1979; Hartman et al., 1980), так и по Плуто (известная в бывшем СССР / СНГ и СЭВ как «поляризационно-интерференционная микроскопия» на установках, строящихся из комплектующих польского производителя PZO); возможно также проведение поляризационной микроколориметрии и DIC-микроколориметрии на одной и той же установке (на платформах LEITZ и PZO); в более прогрессивных (но и более требовательных к технико-инструментальным возможностям) вариациях возможно интегрировать: рамановскую микроскопию – микроскопию комбинационного рассеяния, FTIR микроспектрометрию в режиме полного внутреннего отражения, и DIC (дифференциальный интерференционный контраст) (Suci et al., 2001); доступно применение методов DIC в сравнительном варианте (или же, что терминологически точнее, в рациометрическом компаративном варианте) при параллельном или последовательном анализе двух и более образцов (Atkinson et al., 1992; Suci et al., 2001);

6. Отражательную Фурье-птихографическую микроскопию, в том числе – в варианте с флуоресценцией и полным внутренним отражением (Matlock et al., 2018; Liu et al., 2019);

7. Фазово-контрастную отражательную микроскопию (Landry et al., 2004); широкопольную фазовую микроскопию (Yaqoob et al., 2011) (в том числе – с динамической лазерной спекл-иллюминацией (Choi et al. 2014)); сверхближнепольную сканирующую «фазово-амплитудную» отражательную микроскопию (Atia et al., 1995) (регистрирующую комплексную информацию об амплитуде и о фазе в области анализа); фазовую микроскопию с восстановлением изображения на основе обратного рассеяния (Matlock et al., 2020) и накопленных данных интерферометрических регистрограмм (Hyeon et al., 2019);

8. Темнопольную отражательную микроскопию, в том числе – сверхразрешающую и на принципах динамического светорассеяния, оптоволоконную «оптофлюидную» (Faez, 2015; von Olshausen Rohrbach, 2013), фотоакустическую темнопольную отражательную микроскопию (с разными режимами модуляции акустооптического дефлектора) (Maslov et al., 2005; Song et al, 2008), а также, если это можно классифицировать так (что является спорным, с точки зрения оптики, так как речь идёт несколько о другом отражении), микроскопию полного внутреннего отражения (von Olshausen, 2012; Enoki et al., 2012);

9. Отражательную микроскопию неоптических диапазонов – ультрафиолетовую или инфракрасную (Bechtel et al., 2009; Fujinami et al., 2018), в том числе – флуоресцентную (инфракрасная микроскопия на отражении может сопровождаться инфракрасной спектрометрией, в том числе – в методиках полного внутреннего отражения (Bartick et al., 1994) с преобразованием Фурье (Caruso et al., 1998)); в ряде случаев возможно рекомендовать безапертурную вариацию инфракрасных методик (Lahrech et al., 1996), подобно подходам Рамановской безапертурной микроскопии, весьма часто используемым в отражательных модификациях (Sun Shen, 2003);

10. Лазерную отражательную микроскопию с использованием второй гармоники (Bozhevolnyi et al., 2001) и когерентно-дифракционное микро-/нанокартинирование с использованием высших гармоник (Seaberg, 2014; Zhang, 2015); с применением второй гармоники может быть реализован анализ в поляризационно-отражательном режиме (Okoro et al., 2018) и двухфотонная фотоакустическая/многофотонная фотоакустическая микроскопия на отражение (Song et al., 2016); также доступна актуальная для геоархеологических и биоминеральных материалов порозиметрия, использующая рассеяние второй или высшей гармоники (Maidikovski et al., 2006; Градов, 2019);

11. Угловую и многоугловую (включая сканирующую многоугловую) отражательную микроскопию (Olveczky et al., 1997; Dos Santos et al., 2016); особо эвристически ценной является поляризационная (если говорить о физике, так как для формирования изображения используется линейно поляризованное излучение, попадающее на отражающую поверхность под углом Брюстера) микроскопия угла Брюстера – обеспечивающая наблюдение объектов с размерами, меньшими пределов разрешения оптической микроскопии, не требуя, при этом, субдлинноволновых интерференционных и интерференционно-фазовых ухищрений; данный подход может сочетаться с ИК-Фурье-микроспектрометрией на отражение и поглощение (Wu et al., 1998, 2001; Amado et al., 2008) и поляризационной модуляцией (Islam et al., 2002);

12. Безлинзовую проекционную отражательную микроскопию, включая безлинзовую голографическую микроскопию или безлинзовую микроголографию (Lee et al., 2011), дающую возможность восстановления трёхмерной микроструктуры образца (Yuan et al., 2007); рендеринг изображения по данным позиционно-чувствительного счёта одиночных фотонов с легко восстанавливаемыми характеристиками диаграммы направленности по углу падения (Bisht et al., 2010) может осуществляться не только в оптическом, но и в «тепловом» инфракрасном диапазоне (Chen et al., 2009), а также в дальнем ультрафиолетовом (до дальней границы вакуумного УФ) или рентгеновском диапазоне (Roy et al., 2011) (но, при сравнении методов безлинзового картирования, необходимо исходить из того, что физика отражения и дифракции для монохроматического лазерного микропучка и для широкополосного источника оптического излучения качественно отличаются, причём напрямую экстраполировать уравнения для широкополосного микропучка на лазерный пучок нельзя, так как для микропучка когерентность не соблюдается – в отличие от лазерного источника (Edwards et al., 2014));

13. Безлинзовую (как правило, многоугловую) птихографическую отражательную микроскопию в сфере Ульбрихта или же, что терминологически эквивалентно, интегрирующей фотометрической сфере (Градов, Орехов, 2019); однако не следует смешивать методы микроскопии в интегрирующей сфере с микроскопией полного внутреннего отражения (Temple, 1981; Prieve Frej, 1990) или полного внутреннего отражения во флуоресцентном режиме (Fish, 2009) на том основании, что интегрирующая сфера часто устанавливается в шаровых рефлексометрах полного отражения либо измерителях коэффициента полного отражения диффузно рассеивающих сред или поверхностей; это – качественно разные методы, причём оптимальный для работ с археологическими

образцами безлинзовый интегрирующий метод с программно реализуемой фильтрацией и реконструкцией изображения не является достаточно прогрессивным, в отличие от современных сверхразрешающих методов анализа с использованием микроскопии полного внутреннего отражения;

14. Отражательную микроголографию (как правило, по определению, многоугольную технику) или, тождественно, отражательную голографическую микроскопию ([Matrecano et al., 2014](#)) (исключая микроголографию полного внутреннего отражения ([Calabuig et al., 2014](#)), если речь идет о непрозрачных археологических находках), в том числе – ультракомпактную или совместимую с мобильными камерофонами безлинзовую микроголографию ([Lee et al., 2011](#)); с физико-механических позиций, важных для анализа археологических образцов, это может быть использовано для измерения/детектирования разломов и трещин ([Suzuki, 1998](#)), а также анализа адгезии (прилипания) органических остатков к подложкам/образцам культурного наследия (аналогично принципам клеточной адгезиметрии на голографических установках ([Ash et al., 2009, 2010](#)) – исключая технологии на основе полного внутреннего отражения ([Mandrachia et al., 2017](#))); в качестве источника излучения можно применять и частично-когерентные спектрально-светодиоды, и некоторые некогерентно-люминесцентные источники, чем удешевить и упростить полевое использование ([Lee et al., 2018; Yafei et al., 2016](#))); при этом, учитывая наличие в продаже светодиодов разного диапазона, в принципе, возможно говорить и о спектрально-светодиодной, и о мультиспектральной, и о гиперспектральной вариациях данного метода;

15. Дифракционную микрофотографию или же, что тождественно, томографическую дифракционную микроскопию ([Drsek et al., 2008; Maire et al., 2013](#)), в том числе – в формате, интегрирующем режимы на пропускание и на отражение ([Foucault et al., 2019](#)) (в археологии /археометрии данный метод может быть применим, в частности, для анализа осколков стеклянных либо слюдяных изделий, а также украшений из прозрачных или обладающих большим ориентом/блеском обработанных природных минералов); оптические параметры данной техники допускают достижение высокого ([Sarmis et al., 2010](#)) субмикронного разрешения ([Kühn et al., 2009](#)), замещая технически и экономически неприемлемые методы комбинирования отражательно-конфокальной микроскопии и оптической когерентной томографии ([Kang et al., 2009](#)), не требуя, в отличие от них, осевой юстировки (отражательная голография и голографическая микроскопия для микроструктурных томографических задач или микрофотографического сканирования поверхности по строкам развёртки кадров, в принципе, может быть и внеосевой ([Cheng et al., 2010](#))).

16. Все методы отражательной микроскопии, считавшиеся неэффективными (и забытые, в силу хода времени) при использовании некогерентных малоинтенсивных источников (лампы накаливания, дуги Петрова, люминесцентных источников ([Filler Peuker, 2000](#))), не исключая/подчеркивая статические и динамические интерференционно-отражательные методы микрофотографического анализа ([Zilker et al., 1987; Wiegand, 1998](#)), могут быть переведены на современные (уже достаточно дешёвые) когерентные источники, в частности – диодные лазеры и лазеры с диодной накачкой (DPSSL), работающие в различных спектрально-светодиодных диапазонах, соответствующих чувствительности современных спектрально-светодиодных матриц приборов с зарядовой связью и иных позиционно-чувствительных детекторов с матричными или линейными массивами фильтров Байера (RGB ([Cogswell et al., 1992](#)) или, как минимум, двухволновые/двухдиапазонные форматы детектирования ([Schilling et al., 2004; Kühn et al., 2009](#))). Аналогичные «отражательные» и рефракционные методы могут быть внедрены также для электронной микроскопии, включая:

17. Отражательную электронную микроскопию, развивавшуюся с 1950-х по 1980-е гг. ([Halliday, 1955; Yagi, 1987](#)) и оптимальную для археологической металлографии ([Hsu Cowley, 1983](#)); на той же основе можно внедрить корреляционную световую поляризационную и отражательную электронную микроскопию (PCLEM) ([Градов, 2018](#)) (при этом очевидно, что оптико-микроскопическое звено здесь может также базироваться на отражательной микроскопии – например, на методе микроскопии полного внутреннего отражения, совместимом с CLEM ([Richards et al., 2001](#))); CLEM в отражательной электронной микроскопии с лазерным возбуждающим модулем/излучателем может явиться инструментальным средством синхронного контроля и лазерной обработки анализируемого образца на предметном столе электронного микроскопа ([Heinrich Bostanjoglo, 1992](#));

18. Отражательную электронную микроскопию с дифракционным контрастом (Cowley et al., 1975) (недостаточно корректно отождествляемую нередко с дифракционной электронографией, имплементируемой в колонне отражательного электронного микроскопа или наблюдением «отражательных» аналогов линий Кикучи в растровой электронной микроскопии (Booker et al., 1967)) (Peng Cowley, 1987; Peng et al., 1987);

19. Электронную темнопольную отражательную микроскопию (Krakow et al., 1976) (считавшуюся уже утраченной технологией, однако вновь внедренную в практику десятилетие назад (Takeno et al., 2008)), также совместимую с режимом PCLEM;

20. Многоугловую отражательную и растровую электронную микроскопию на разных по числу осей многоугольных координатных столах, в том числе – трёх- или пяти-осных, аналогичных универсальному столику (столику Фёдорова) для оптической поляризационной микроскопии (Gradov, 2018);

21. Методы отражательной и сканирующей электронной микроскопии микроскопии с Y-модуляцией и Y-модулированным детектированием (Kelly et al., 1969; Basu, 1986), применяющиеся от анализа ископаемых микрофоссилий (Gasiński et al., 1978) и биологических структур (Rosa-Molinar et al., 1984) до нано-исследований (Treacy et al., 1999); данный подход может быть сопоставлен с интерференционно-картирующими экзотическими методами, рассмотренными в оптическом разделе (см. выше), так как Y-контраст хорошо выявляет микроструктуру даже когда, при использовании длинноволнового излучения (например, инфракрасного – в случае интерференционной оптической микроскопии), по стандартным критериям она не может быть разрешена, в силу недостаточности резольвометрических параметров – по вертикальной оси (Zand Albrecht-Buehler, 1989) (латеральное разрешение при этом может быть вполне достаточным);

22. Методы внутрикамерной (внутри откачиваемой колонны) микроголографической CLEM: целесообразно интегрировать отражательную электронную микроскопию с голографической оптической микроскопией, так как ранее эти методы работали только раздельно – хотя и рассматривались как средство для достижения единой цели с конца 1980-х гг. (Cohen Ichimiya, 1993); дополнительные метрологические дескрипторы для микроструктурной/ультрамикроструктурной характеристики образца могут быть извлечены при совмещении имэджинга с корреляционно-спектральным анализом голографических данных (Градов и др., 2018) (качество визуализации при этом может быть хуже, чем при лазерном сканирующем отражательном конфокально-микроскопическом анализе поверхности (Boyd Jones, 1995), однако метрологическое качество подобных измерений намного выше, в силу использования больших массивов угловых данных).

23. Аналогичные «отражательные» и рефракционные методы могут быть внедрены также для акустической микроскопии, включая:

24. Методы отражательной акустической микроскопии (Wickramasinghe, 1978), в том числе – сверхвысокого разрешения, обеспечиваемого в отражательном режиме фазовыми механизмами (Mohamed et al., 2011), подавлением релеевских волн (Nikoonahad et al., 1983), и т.д. (адекватно подобным техникам в оптической сверхразрешающей микроскопии), благодаря чему может быть достигнуто субмикронное разрешение (Zhang et al., 2012); например, эти методы являются эффективными в остеометрии – и могут отличить сильно минерализованную либо фоссилизированную кость от современной (впрочем, обычно это ограничивается обычными медицинскими задачами, в которых акустическая микроскопия может замещать (Bonorden, 1987));

25. Методы сканирующей угловой или же многоугловой отражательной акустической микроскопии – как в классической версии Аталара (Atalar, 1978, 1993), так и в современных версиях с различными методами высокочастотной временной развёртки (Chen et al., 2012);

26. Методы «акустической отражательной Фурье-микроскопии», заменяющие методы «корреляционно-спектрального анализа» микроскопических изображений и карт (имплементируемые в ПО QAVIS, KSAIMAGE и SPECTRUM) (Zinin, 1994; Barchiesi, 1997);

27. Методы акустической многофокусной (или же мультипланарной, конфокальной или "контраптертурной") отражательной микроскопии (Li et al., 2013a, 2013b), заменяющие CLSM и (отчасти, на пределе разрешающей способности) микротомографию;

28. Методы акустооптической микроскопии с акустооптическим дефлектором (или же акустооптическим модулятором), в том числе в микроскопии структурированной

иллюминации/структурированного освещения с варьруемой модуляцией (Fiolka et al., 2008);

29. Рефрактометрические (не на отражение, но на преломление) методы акустической микроскопии (Oravec et al, 1984), замещающие аналогичные подходы в микроголографии (Ma et al., 2016).

5. Почему означенные методы не являются мейнстримом и непопулярны?

Для современного специалиста в области микроанализа твердотельных образцов с физическим образованием вышеприведенные списки являются экзотическими, так как основной массы указанных методов либо *ещё* нет на рынке (или оно стоит миллионы), либо *уже* нет в лабораториях, так как указанный пул методов, судя по статьям, можно делить на две части – «статьи прошлых лет с использованием приборов ранних серий и поколений» и «статьи с использованием несерийных образцов уникальных стендов/установок».

Для пользователя же из культурной среды очевиден парадокс: огромное и вполне достойное по метрологическим характеристикам количество инструментально-технических решений для анализа поверхности минеральных геологических образцов, образцов культурного наследия, палеонтологических объектов, металлографических и керамографических проб, к сожалению, в настоящее время не используется в практике (несмотря на большую информативность и простоту, чем современные продаваемые и навязываемые пользователю инструменты исследования), по коммерческим причинам (несвязанным с метрологией) вытесняясь из массового пользования.

Коммерческие и репутационные причины, относящиеся к «надстройке» общественного сознания ныне действуют не только в массах, но и в психологии современных научных сотрудников, являющихся не творцами, но консьюмерами предлагаемых рынком решений. Обычно, предлагая более метрологически точный метод, не разрекламированный зарубежными фирмами и их дистрибьюторами, инженеры-приборостроители в РФ наталкиваются на реакцию: «а зачем это надо, если за рубежом это никто, кроме единиц не применяет»/«а зачем это надо, если за рубежом это последний раз использовали более 5 лет назад» (отметим противоречивость одновременной апелляции к недостаточно современной и к недостаточно известной «сверхсовременной» технической базе) или «на этом сразу в "Nature" или "Science" не попадёшь – можно даже не пытаться что-то понимать»/«на этом только сами авторы приборов могли что-то серьёзное опубликовать в "Nature" и "Science"» (отметим противоречивость установки на попадание в "Nature" и "Science" без технической грамотности и одновременное пренебрежение к технической науке и лежащей в её основе фундаментальной науке, печатаемой в "Nature" или "Science"). В реальности, всё объясняется намного более примитивными причинами.

К сожалению, современный подход к созданию метрологического оборудования с ограниченной функциональностью, заточенного на решение конкретных практически-значимых задач с использованием коммерчески-доступных опций (красителей, зондов и т.д.) привёл к практической невозможности проведения необходимых исследований, доступных для археометрических объектов, на современной аппаратной базе.

Однако, с точки зрения физики, а не техники, никакой разницы между микроскопом 2020-го и 1980-го года с одинаковыми техническими параметрами нет, если они базируются на единых/одинаковых физических принципах измерения.

Поэтому, в случае адаптации для подобных измерений достаточно старой/существенно более «ручной» и модифицируемой под нестандартные задачи техники, в археометрии возможен технико-методический прорыв, превышающий возможности (и нивелирующей искусственные ограничения) современной техники.

В соответствии с принципами, изложенными в пп. 1.1.-1.4, понимая какие методы используются для каких задач, указанных в п. 1.5, целесообразно рассмотреть работы, использующие современные методы физической археометрии, чтобы убедиться в том, что её возможности для анализа непрозрачных объектов (в частности, очерченные для аннотирования их применимости ранее) не используются даже на 10-20 %, зависимо от отрасли.

При этом, в силу стремления к демонстрации наиболее современной техники, движущего многими энтузиастами направления, наблюдается перекокс в экзотическую сторону корпускулярно-физических методов (таких, как нейтронография), при малом/

недостаточном использовании возможностей более примитивных (и соответствующих масштабам археометрируемых объектов) методов.

Основную массу использующихся методов можно разделить на структурные (анализируется кристаллографические либо фазовые характеристики образца) и субстратные (анализируется химизм образца). Это даёт возможность расценивать дисбаланс тех или иных методов в разных разработках как эвристический акцент в пользу того или иного типа данных, получаемых в рамках данных групп методов (структурных или субстратных).

6. Нейтронография и нейтронно-активационный анализ (и их недостатки).

Существенная доля физико-химических археометрических измерений составлена методами корпускулярного, в частности – нейтронографического имэджинга (Lehman et al., 2010; Szilágyi et al., 2016). Это утверждение касается как ископаемых археологических образцов, так и образцов/объектов культурного наследия (Kockelmann Kirfel, 2006; Pereira et al., 2013).

Зачастую прорабатываются рационализации и аргументы в пользу исследования образцов культурного наследия и археологических образцов непременно методами нейтронографии и нейтронного mappinga (Biro et al., 2011), в числе которых приводится возможность выхода за грань видимого диапазона картирования (для чего в них часто совмещают различные радиографические методы – нейтронные и рентгеновские, в частности (Mannes et al., 2014)). Однако для многих материалов нейтронные пучки являются источниками наведенной радиоактивности. Поэтому, с одной стороны, такие подходы не всегда являются неразрушающими, с другой стороны – могут передвигать изотопию образцов и реперы датировки, с третьей стороны – неочевидно, что данные, полученные с использованием столь экзотических подходов, способны принести что-либо новое с точки зрения анализа данных образцов материальной культуры, хотя мы, в принципе, можем извлечь данные о глубинной структуре материала (уровня раннего развития нейтронной дефектоскопии в системе среднего машиностроения XX века).

В случае, когда ранее образец не изучен более простыми и информативными методами – использование нейтронных методов картирования является данью моде или карьерной активности заявителя, но не отражает основных свойств образца. Рекомендуется ранее использовать химические методы картирования, базирующиеся на более простых, чем нейтронно-активационные (Goren-Inbar et al., 1986; Kasztovszky et al., 2006), принципах работы, таких как рамановское (или же, что тождественно – комбинационное) рассеяние (Shaus et al., 2019), люминесценция, флуоресценция (Pelagotti et al., 2018; Adinolfi et al., 2019), поляризация (Paterson et al., 2017) и т.д. Прецеденты их применения в археометрии достаточно хорошо известны; некоторые из них приведены по ссылкам. При необходимости работ с проникающими излучениями рекомендуется использовать не вызывающие эффекты последствия/наведенной радиоактивности и изотопные изменения в образце пути – в частности, низкоэнергетическое рентгеновское излучение, используемое в техниках спектроскопии вторично-эмиссионного рентгеновского излучения и рентгенофазового/рентгеноструктурного анализа (Müller et al., 2003; Zhu et al., 2016).

7. Лазерные спектральные методы, методы анализа с лазерным возбуждением

Рекомендуется использовать различные спектрально-аналитические и мультиспектральные лазерные методы (с различной мощностью ОКГ), так как оптимальный подбор длины волны и мощности лазерного пучка может диверсифицировать диагностику образцов, не прибегая к методам, требующим использования проникающего излучения. Так: при использовании лазерного излучения с мощностью, достаточной для нагрева образца (в частности – при использовании ирразеров), возможно имплементировать технические и методические принципы «фототермальной» (фототермической) археометрии (Mandelis et al., 1995); при использовании пучка, достаточного для лазерной десорбции-ионизации фрагментов (в особенности – с органическими остатками), возможно сопряжение с LDI либо MALDI MS (Grim Allison, 2004), в том числе – MALDI-картированием (MALDI imaging) химизма образца; при использовании пучка, достаточного только для флуоресцентных измерений,

возможно проведение последних, однако характер наблюдаемых процессов под пучком зависит от продолжительности импульса и скважности (Spitzer-Aronson, 1986) (в ряде случаев при анализе класса пигментов, использовавшихся в тот или иной исторический период, можно применять временное разрешение вплоть до фемтосекундного и пикосекундного, но обычно это неоправдано); при достаточности мощности лазерного импульса для электропробоя до поверхности образца, можно реализовать лазерно-искровую спектроскопию (Müller Stege, 2003; Hemedá, 2013); в полевых условиях можно использовать полосковые лазеры средней мощности с целью идентификации структур, получающихся при культурной обработке и окантовке ряда изделий (Winemiller et al., 2018); возможно применение лазеров в изотопном анализе и точной датировке (Kelley et al., 1994; Leslie et al., 2006). Отдельно стоит масс-спектрометрия и атомно-абсорбционная спектроскопия с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS и ICP-AAS соответственно), получаемой при использовании лазерной абляции. Особенно часто в археометрии используют ICP-MS, применяемую для анализа монет (Bendall et al., 2009; Gentelli, 2019), стеклянных изделий (Then-Obłuska Wagner, 2019), геоминеральных (Moroni Petrelli, 2005; Scharlotta et al., 2011) и биоминерализованных образцов (таких, как кости или зубы (Simonetti et al., 2008)). Часто, если полная расшифровка затруднена, говорят об LA-ICP-MS-фингерпринтинге (с лазерной абляцией) (Mallory-Greenough et al., 1999; Ponting et al., 2003) и дополняют другими (как правило, также лазерными) технологиями анализа вещества, или, иначе, источниками комплементарных дескрипторов – такими, в частности, как лазерная микрофотолюминесценция (Polikreti Christofides, 2010). При этом вышеупомянутые методы нейтронно-активационного анализа используются в качестве комплементарно-дескрипторных крайне редко (Eiselt et al., 2019).

8. Электрохимическая идентификация и электрохимическое датирование

Ещё одним классическим подходом (как правило – неразрушающего контроля) в археометрии является анализ электрохимических и электрофизических характеристик образца (Doménech-Carbó et al., 2009) (см. также удовлетворительные рецензии специализированных журналов (Trojanowicz, 2010; Kuleff, 2012)). Вполне очевидно, что основным его применением является анализ металлов и сплавов археологических коллекций, в том числе – определение стабильности данных объектов во внешней среде и коррозионно-метрические исследования их окисления в ней за прошедший период времени (Doménech-Carbó et al., 2008, 2014). Как правило, используется не аддитивный метод анализа, а с разложением по частотам – например, электроимпедансная спектроскопия или электрохимическая спектроскопия с получением эквивалентных схем образцов. В настоящее время наиболее распространенной областью внедрения электрохимических методов в археометрическую метрографию является анализ монет и украшений или металлических предметов культа (Doménech-Carbó et al., 2017; Di Turo, 2020).

Однако физика/электрохимия твёрдого тела не даёт оснований ограничиваться ими, позволяя продвинуться в более высокоомную/высокоимпедансную область (Costa et al., 2010). Поэтому неудивительно, что в последнее время всё больше работ в археометрии посвящается электроанализу керамических изделий. Ряд наиболее свежих изысканий связан с возможностью применения электрохимических и спектральных электрофизических методов для определения эпох изготовления, типов материала (в том числе – характера глинистого материала, его источников – вплоть до географической зональности добычи) и способов его обработки (вплоть до температур обжига) (Di Turo, 2018).

Существуют методы и подходы археометрической электрохимической датировки материалов и изделий (Doménech-Carbó et al., 2012; Doménech-Carbó, 2017), которые хорошо вписываются в указанный тренд работ; в том числе – в сравнительном (относительном/радиометрическом) анализе древних образцов по концентрациям металлов, электрохимическим активностям (Iliev et al., 2003; Doménech-Carbó et al., 2019). Если говорить о размерных пределах, то на данный момент эти технологии ограничиваются микрочастицами, легко выветриваемыми с поверхности корродируемых образцов (Doménech-Carbó et al., 2011), но, как правило, иммобилизованных в микрорельефе (Doménech-Carbó et al., 2016; Redondo-Marugán et al., 2017). На данный момент уже

существуют применимые в электрохимической археометрии базы данных (ELCHER и др.), пригодные для идентификации микрочастиц пигментов металлов и минеральных веществ естественного происхождения. Как правило, эти данные относятся к методам вольтамперометрии и электроимпедансного анализа, и могут быть применены также в исследовании мезоскопических и макроскопических образцов (Doménech-Carbó et al., 2017b; Di Turo et al., 2017).

Существенным прогрессом в области электрохимического анализа геоминералогических (а значит – и археоминералогических / геоархеологических) образцов является создание установок, интегрирующих воздействие электронным пучком переменной мощности (от 300 В до 20-80 кВ) на образец в вакуумной камере или микрокамере переменной атмосферы. В таком случае удаётся объединить метод активного электрофизического зондирования и способы локального электрохимического анализа с сопоставлением с базами данных вышеуказанного характера и назначения. В РФ такие работы велись группой Градова О.В. в конце 2010-х - начале 2020-х гг. Они стоят особняком от иных методов микропучкового анализа, применявшихся в инструментальной археометрии в тот период времени (см., например: (Agha-Aligol et al., 2017)), будучи основанными на нелинейных принципах запуска процессов в субкамере.

9. Электронная микроскопия

Ещё одним классическим подходом в археометрии является использование ТЭМ/СЭМ – техник трансмиссионной (просвечивающей) и сканирующей (или «растровой») электронной микроскопии. Первая используется для анализа органических структур (в частности, костного материала и дентина или зубной эмали (Reiche et al., 2002)), а также наночастиц, в частности, встречающихся в археометаллургии (Vindel et al., 2018), археологической керамографии (Mata et al., 2002; Giorgetti et al., 2011) (майолики, продуктов гончарного ремесла, изразцов, кровельных материалов и облицовки, в особенности), а также в качестве естественных «нанодопантов», дающих древним изделиям окраску и блеск/ориент (в частности, указывавшихся ранее в обзоре наночастиц, обеспечивающих варьируемую окраску чаши Ликурга и её аналогов (Barber Freestone, 1990)).

Сканирующая электронная микроскопия, как правило, несёт наиболее ценные данные о микроморфологии материала, однако информативность её резко возрастает в случае использования источников комплементарных спектральных дескрипторов – дающих, в комплексе с микроизображением, понимание тонкой структуры и химизма аналитов. Так, в качестве источников комплементарных дескрипторов часто используют методы энергодисперсионной и волнодисперсионной спектроскопии (вторично-эмиссионного рентгеновского излучения), в том числе – с корпускулярным возбуждением (особенно часто используют протонное возбуждение и сфокусированный ионный пучок) (Anderson Formenti, 1996; Kuisma-Kursula Räsänen, 1999), а также Оже-электронной спектроскопии (основанной на эффекте Оже [Auger], то есть эмиссии электрона из атома, происходящей в результате безызлучательного перехода при наличии в атоме вакансии на внутренней электронной оболочке) (Polak et al., 1983).

10. Сочетание электронной микроскопии и методов оптической микроскопии и СЛЕМ-микроспектрометрии

Оба метода, как правило, могут быть колокализованы по точкам сбора-анализа данных (или зонам ROI – region of interest) с зонами электронной микроскопии, и выполняются на едином приборе. Также используют внешние источники комплементарных дескрипторов для спектроскопического отождествления химического состава точек в археометрируемой структуре – такие, в частности, как рамановскую спектроскопию/спектрометрию (Wojcieszak Wadley, 2018) и инфракрасную спектроскопию (IR)/инфракрасную с Фурье-преобразованием (FTIR) спектроскопию (Medhat et al., 2015). Наиболее ценны FTIR-данные в случае сопоставления с химизмом образца, поэтому их часто сочетают не просто с электронной микроскопией, а с энергодисперсионной спектроскопией или электронно-дифракционными методами. Однако для получения комплексного анализа объекта нужно не только получить численные данные (фингерпринты), но и понять их взаимоотношения в процессе формирования образца и установить корреляцию между ними: например,

соотнести спектральные, электрохимические, рентгеноспектральные и электронно-микроскопические данные, что является экзотической задачей в методах хеометрики археологического материала (Doménech et al., 2009) (поскольку хеометрика в археометрии до настоящего времени специализировалась на более простых массивах аналитически-ценных данных – таких, как газовая хроматография/хромато-масс-спектрометрия для аддитивно анализируемых образцов (Hayek et al., 1991)). Таким образом, можно перейти к тезисному изложению фабулы данного комплексного перечисления методов.

11. Заключение

Проблема археометрической хеометрики в свете описанного подхода.

Основной проблемой современной археометрии является не недостаток методов и техник исследования (которые с готовностью могут предоставить естественнонаучные центры), а нехватка понимания принципов конверсии получаемых данных в нужные для анализа образцов культурного наследия дескрипторы, дающие основания для того или иного уровня интерпретации данных. То есть, речь идёт не о «метрологическом»/«физико-техническом» аспекте измерения, а о хеометрическом аспекте анализа этого результата.

Можно позволить себе цитаты из доклада (и тезиса) Кузьмановского (Kuzmanovski et al., 2008): «передовые хеометрические методы в археометрии широко не используются»; «эта публикация демонстрирует важность глубокого анализа археометрических данных», «при правильном использовании некоторых вариантов ранее упомянутых алгоритмов и наиболее сложных хеометрических инструментов таких, как самоорганизующиеся карты и опорные векторные машины». Сравнивая восточноевропейский уровень работ в области археометрии и отечественный уровень, можно сделать вывод о нахождении нашей «хеометрической археометрии» в самой начальной стадии развития. В той же работе указывается, что «в археометрии наиболее часто анализ данных выполняется с использованием диаграмм корреляции» и упоминается «линейный дискриминантный анализ».

Беглый обзор публикаций в отечественных исторических изданиях указывает на практическое отсутствие в большинстве из них не только техник машинного обучения в аналитике объективных химических данных по образцам, но и достаточно убедительных статистических техник, типа указанного выше корреляционного или же дискриминантного анализа (по состоянию на конец 2010-х - начало 2020-х гг., когда писалась эта работа). Поэтому можно заведомо констатировать «уникальность» и актуальность предлагаемого нами мультипараметрического и мультидескрипторного подхода.

Послесловие

Данная работа написана на основе служебной документации ФИЦ ХФ РАН, которая в конце 2010-х гг. разрабатывалась для создания центра коллективного пользования в ФИЦ ХФ РАН для совместного проекта с педагогическими ВУЗами, ведущими выездную учебно-научную работу в области археологии. В силу того, что проект не сложился, а студенты на базу физико-химического института шли неохотно, данная заготовка документов осталась неопубликованной. Впрочем, впоследствии успешные работы в области анализа подобных объектов культурного наследия были реализованы директорским коллективом, имеющим более современную аппаратную базу. Поэтому причин для сожалений о несвоевременном выходе данной работы, по существу, нет, за исключением устаревания некоторых работ и подходов, цитированных в ней. Следует, однако, отметить, что некоторые методики тогда не были ещё внедрены в повсеместную практику археометрии; они цитируются в данном обзоре не по литературе о приложении данных методов в археометрии, а по генеральной методической литературе или по статьям о приложениях в других отраслях. Например, по большей части, в перечислении методов отражательной микроскопии приводятся ссылки на методические статьи от физической химии до биологии (что, в особенности, свойственно для описания модуляционной интерференционной микроскопии и смежных технологий). В силу этого, в подобных случаях уровень устаревания отдельных позиций референсной базы может составлять многие годы. Однако это не элиминирует ценности данного подхода как целого.

Литература

- Градов и др., 2018 – Градов О.В., Насиров Ф.А., Гончарова А.А., Фищенко В.К., Яблоков А.Г. Технологии безлинзовой голографической трихоскопии и трихотрии на чипе: микроинтерференционные, 2d-Фурье-спектральные (интегральные частотные и пространственные) и коррелографические техники в клинической трихологии // *Морфология*. 2018. 12(2): 7-21.
- Градов, 2018 – Градов О.В. Поляризационная корреляционная электронно-оптическая микроскопия (PCLEM). Первое предварительное сообщение // *Морфология*. 2018. 12(3): 146-150.
- Градов, 2019 – Градов О.В. Многоугольная лазерная и электронно-пучковая порозиметрия скафолодов, децеллюляризованных матриц и тканеподобных моделей, в том числе - в ESEM- и CLEM-имплементации // *Гены и клетки*. 2019. 14(Приложение 1). С. 69-70.
- Градов, Орехов, 2019 – Градов О.В., Орехов Ф.К. Лазерная полипроекционная микроскопия в интегрирующей сфере / фотометрическом шаре Ульбрихта с использованием безлинзовых микроскопов с ASP-сенсорами на базе приборов с зарядовой связью или компле-ментарных металл-оксид-полупроводниковых матриц // *Морфология*. 2019. 13(2): 81-93.
- Adinolfi et al., 2019 – Adinolfi G., Carmagnola R., Cataldi M., Marras L., Palleschi V. Recovery of a lost wall painting at the Etruscan Tomb of the Blue Demons in Tarquinia (Viterbo, Italy) by multispectral reflectometry and UV fluorescence imaging // *Archaeometry*. 2019. 61(2): 450-458.
- Agha-Aligol et al., 2017 – Agha-Aligol D., Oliyai P., Moradi M., Lamehi-Rachti M. Micro-beam analysis: powerful tools in archaeometry, restoration and conservation of historical and cultural objects // *Danesh-e-Hefazat va Maremmat*. 2017. 1(2): 35-52.
- Alexakis et al., 2009 – Alexakis D., Sarris A., Astaras T., Albanakis K. Detection of Neolithic settlements in Thessaly (Greece) through multispectral and hyperspectral satellite imagery // *Sensors*. 2009. 9(2): 1167-1187.
- Alshawabkeh El-Khalili, 2013 – Alshawabkeh Y., El-Khalili M. Detection and quantification of material displacements at historical structures using photogrammetry and laser scanning techniques. // *Mediterranean Archaeology Archaeometry*. 2013. 13(2): 57-67.
- Amado et al., 2008 – Amado E., Kerth A., Blume A., Kressler J. Infrared reflection absorption spectroscopy coupled with Brewster angle microscopy for studying interactions of amphiphilic triblock copolymers with phospholipid monolayers // *Langmuir*. 2008. 24(18): 10041-10053.
- Anderson Formenti, 1996 – Anderson P., Formenti F. Exploring the use of abraded obsidian “Cayönu tools” using experimentation, optical and SEM microscopy, and EDA analysis // *Archaeometry*. 1996. 94: 553-566.
- Andreev Indukaev, 2003 – Andreev V.A., Indukaev K.V. The problem of subrayleigh resolution in interference microscopy // *Journal of Russian Laser Research*. 2003. 24(3): 220-236.
- Andreev Indukaev, 2005 – Andreev V.A., Indukaev K.V. Phase modulation microscope MIM-2.1 for measurements of surface microrelief. General principles of design and operation // *Journal of Russian Laser Research*. 2005. 26(5): 380-393.
- Andreev et al., 2005 – Andreev V.A., Indukaev K.V., Ioselev O.K., Legkii A.I., Lazarev G.L., Orlov D.A. Phase modulation microscope MIM-2.1 for measurements of surface microrelief. Results of measurements // *Journal of Russian Laser Research*. 2005. 26(5): 394-401.
- Andreev et al., 2012 – Andreev A.G., Grigoriev S.N., Romash E.V., Bushuev S.V., Ignatiev P.S., Loparev A.V., Indukaev K.V., Osipov P.A. Modulation interference microscope as a tool for measuring the linear dimensions of nanostructures // *Measurement Techniques*. 2012. 55(5): 542-545.
- Ash et al., 2009 – Ash III, W.M., Krzewina L., Kim M.K. Quantitative imaging of cellular adhesion by total internal reflection holographic microscopy // *Applied optics*. 2009. 48(34): H144-H152.
- Ash et al., 2010 – Ash W.M., Clark D., Lo C.M., Kim M.K. Quantitative characterization of cellular adhesions with Total Internal Reflection Holographic Microscopy. In: *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging* (p. DTuA4). Optical Society of America, 2010.
- Atalar, 1978 – Atalar A. An angular-spectrum approach to contrast in reflection acoustic microscopy // *Journal of Applied Physics*. 1978. 49(10): 5130-5139.

[Atalar, 1993](#) – *Atalar A.* An angular-spectrum approach to contrast in reflection acoustic microscopy // *SPIE Milestone Series*. 1993. 53: 73.

[Atia et al., 1995](#) – *Atia W.A., Pilevar S., Güngör A., Davis C.C.* Phase-and-amplitude-reflection near-field scanning optical microscopy. In: *Optical Society of America – Conference on Lasers and Electro-Optics* (p. CWF44), 1995.

[Atkinson et al., 1992](#) – *Atkinson M.R., Dixon A.E., Damaskinos S.* Surface-profile reconstruction using reflection differential phase-contrast microscopy // *Applied optics*. 1992. 31(31): 6765-6771.

[Barber Freestone, 1990](#) – *Barber D.J., Freestone I.C.* An investigation of the origin of the colour of the Lycurgus Cup by analytical transmission electron microscopy // *Archaeometry*. 1990. 32(1): 33-45.

[Barber et al., 1990](#) – *Barber D.J., Freestone I.C.* An investigation of the origin of the colour of the Lycurgus Cup by analytical transmission electron microscopy // *Archaeometry*. 1990. 32(1): 33-45.

[Barchiesi, 1997](#) – *Barchiesi D., Bergossi O., Spajer M., Pieralli C.* Image resolution in reflection scanning near-field optical microscopy using shear-force feedback: characterization with a spline and Fourier spectrum // *Applied optics*. 1997. 36(10): 2171-2177.

[Barchiesi, 2015](#) – *Barchiesi D.* Lycurgus Cup: inverse problem using photographs for characterization of matter // *Journal of the Optical Society of America A*. 2015. 32(8): 1544-1555.

[Barr Bunnell, 2009](#) – *Barr V.A., Bunnell S.C.* Interference reflection microscopy // *CPCB*. 2009. 45(1): 4-23.

[Bartick et al., 1994](#) – *Bartick E.G., Tungol M.W., Reffner J.A.* A new approach to forensic analysis with infrared microscopy: internal reflection spectroscopy // *Analytica chimica acta*. 1994. 288(1-2): 35-42.

[Basu, 1986](#) – *Basu S.* Forensic uses of deflection (Y) modulation and X-ray dot mapping. In: *Electron Microscopy in Forensic, Occupational, and Environmental Health Sciences* (pp. 61-84). Springer, Boston, MA, 1986.

[Bechtel et al., 2009](#) – *Bechtel H.A., Martin M.C., May T.E., Lerch P.* Improved spatial resolution for reflection mode infrared microscopy // *Review of Scientific Instruments*. 2009. 80(12): 126106.

[Bendall et al., 2009](#) – *Bendall C., Wigg-Wolf D., Lahaye Y., Von Kaenel H.M., Brey G.P.* Detecting changes of Celtic gold sources through the application of trace element and Pb isotope laser ablation analysis of Celtic gold coins // *Archaeometry*. 2009. 51(4): 598-625.

[Biro et al., 2011](#) – *Biró K.T., Durkovic É., Farkas-Szöke S., Ancient Charm Collaboration.* Look Into the Objects: Why? Cultural Heritage Motivations of Neutron-Based Imaging Techniques. In: *Proceedings of the 37th International Symposium on Archaeometry, 13th-16th May 2008, Siena, Italy* (pp. 365-370). Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.

[Bisht et al., 2010](#) – *Bisht N.S., Sharma E.K., Kandpal H.C.* Experimental observation of lensless ghost imaging by measuring reflected photons // *Optics and lasers in engineering*. 2010. 48(6): 671-675.

[Bonali et al., 2014](#) – *Bonali E., Pesci A., Casula G., Boschi E.* Deformation of Ancient Buildings inferred by Terrestrial Laser Scanning methodology: the Cantalovo church case study (Northern Italy) // *Archaeometry*. 2014. 56(4): 703-716.

[Bonorden, 1987](#) – *Bonorden S.W.* Initial report on surface and deep structure studies of human bone tissue using reflection-scan-acoustic microscopy (R-SAM). A comparison between light and ultrasonic microscopy imaging // *Deutsche Zeitschrift für Mund-, Kiefer-und Gesichtschirurgie*. 1987. 11(2): 102-107.

[Booker et al., 1967](#) – *Booker G.R., Shaw A.M.B., Whelan M.J., Hirsch P.B.* Some comments on the interpretation of the 'kikuchi-like reflection patterns' observed by scanning electron microscopy // *The Philosophical Magazine: A Journal of Theoretical Experimental and Applied Physics*. 1967. 16(144): 1185-1191.

[Bortchagovsky, 2004](#) – *Bortchagovsky E.G.* Reflection polarized light microscopy and its application to pyrolytic carbon deposits // *Journal of applied physics*. 2004. 95(9): 5192-5199.

[Bouchard Smith, 2001](#) – *Bouchard M., Smith D.C.* Evaluating Raman microscopy for the non-destructive archaeometry of corroded coins: a powerful technique for conservation studies // *Asian Chemical Letters*. 2001. 5(3): 157-170.

Boyd Jones, 1995 – Boyd A., Jones S.J. Mapping and measuring surfaces using reflection confocal microscopy. In: *Handbook of biological confocal microscopy* (pp. 255-266). Springer, Boston, MA, 1995.

Bozhevolnyi et al., 2001 – Bozhevolnyi S.I., Maidykovski A., Vohnsen B., Zwiller V. Reflection second-harmonic microscopy of individual semiconductor microstructures // *Journal of Applied Physics*. 2001. 90(12): 6357-6362.

Brill, 1965 – Brill R.H. The chemistry of the Lycurgus Cup; In: 7th International Congress of Glass; 1965.

Calabuig et al., 2014 – Calabuig A., Matrecano M., Paturzo M., Ferraro P. Common-path configuration in total internal reflection digital holography microscopy // *Optics letters*. 2014. 39(8): 2471-2474.

Caruso et al., 1998 – Caruso F., Furlong D.N., Ariga K., Ichinose I., Kunitake T. Characterization of polyelectrolyte– protein multilayer films by atomic force microscopy, scanning electron microscopy, and Fourier transform infrared reflection - absorption spectroscopy // *Langmuir*. 1998. 14(16): 4559-4565.

Chen et al., 2009 – Chen X.H., Liu Q., Luo K.H., Wu L.A. Lensless ghost imaging with true thermal light // *Optics letters*. 2009. 34(5): 695-697.

Chen et al., 2012 – Chen J., Bai X., Yang K., Ju B.F. Angular measurement of acoustic reflection coefficients by the inversion of V (z,t) data with high frequency time-resolved acoustic microscopy // *Review of Scientific Instruments*. 2012. 83(1): 014901.

Cheng et al., 2010 – Cheng G., Jiang Z., Wang D., Ding M., Cui H. Off-axis reflection digital holographic microscopy for micron structure tomography measurement // *Proc. SPIE*. 2010. 7848: 78482E.

Chiu et al., 2012 – Chiu L.D., Su L., Reichelt S., Amos W.B. Use of a white light supercontinuum laser for confocal interference-reflection microscopy // *Journal of microscopy*. 2012. 246(2): 153-159.

Choi et al., 2014 – Choi Y., Hosseini P., Choi W., Dasari R.R., So P.T., Yaqoob Z. Dynamic speckle illumination wide-field reflection phase microscopy // *Optics letters*. 2014. 39(20): 6062-6065.

Clack, Groves, 2005 – Clack N.G., Groves J.T. Many-particle tracking with nanometer resolution in three dimensions by reflection interference contrast microscopy // *Langmuir*. 2005. 21(14): 6430-6435.

Cogswell et al., 1992 – Cogswell C.J., Hamilton D.K., Sheppard C.J.R. Colour confocal reflection microscopy using red, green and blue lasers // *Journal of Microscopy*. 1992. 165(1): 103-117.

Cohen Ichimiya, 1993 – Cohen P., Ichimiya A. Surface Characterization by LEED, RHEED, REM, STM, and holography. In: Proceedings of the United States – Japan Seminar on Surface Characterization by Electron-Diffraction, Reflection Electron Microscopy, and Holography – Kona, Hawaii, 16-19 March 1993. Preface Pages, 1993.

Costa et al., 2010 – Costa V., Leyssens K., Adriaens A., Richard N., Scholz F. Electrochemistry reveals archaeological materials // *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2010. 14(3): 449.

Cowley et al., 1975 – Cowley J.M., Albain J.L., Hembree G.G., Hojlund-Nielsen P.E., Koch F.A., Landry J.D., Shuman H. System for reflection electron microscopy and electron diffraction at intermediate energies // *Review of Scientific Instruments*. 1975. 46(7): 826-829.

Delaney et al., 2005 – Delaney J.K., Walmsley E., Berrie B.H., Fletcher C.F. Multispectral imaging of paintings in the infrared to detect and map blue pigments. In: *Scientific Examination of Art: Modern Techniques in Conservation and Analysis*. 2005. Pp. 120-136.

Di Turo et al., 2017 – Di Turo F., Montoya N., Piquero-Cilla J., De Vito C., Coletti F., Favero G., Doménech-Carbó A. Archaeometric analysis of Roman bronze coins from the Magna Mater temple using solid-state voltammetry and electrochemical impedance spectroscopy // *Analytica chimica acta*. 2017. 955: 36-47.

Di Turo, 2018 – Di Turo F., Montoya N., Piquero-Cilla J., De Vito C., Coletti F., De Luca I., Doménech-Carbó A. Electrochemical discrimination of manufacturing types of pottery from Magna Mater Temple and Fora of Nerva and Caesar (Rome, Italy) // *Applied Clay Science*. 2018. 162: 305-310.

Di Turo, 2020 – Di Turo F. Limits and perspectives of archaeometric analysis of archaeological metals: A focus on the electrochemistry for studying ancient bronze coins // *Journal of Cultural Heritage*. 2020. 43: 271-281.

Doménech et al., 2009 – Doménech A., Doménech-Carbó M.T., Vázquez de Agredos Pascual M.L. Correlation between spectral, SEM/EDX and electrochemical properties of Maya blue: a chemometric study // *Archaeometry*. 2009. 51(6): 1015-1034.

Doménech-Carbó et al., 2008 – Doménech-Carbó A., Doménech-Carbó M., Martínez-Lázaro I. Electrochemical identification of bronze corrosion products in archaeological artefacts. A case study // *Microchimica Acta*. 2008. 162(3-4): 351-359.

Doménech-Carbó et al., 2009 – Doménech-Carbó A., Doménech-Carbó M.T., Costa V. In: *Electrochemical methods in archaeometry, conservation and restoration*. Springer Science Business Media, 2009.

Doménech-Carbó et al., 2011 – Doménech-Carbó A., Doménech-Carbó M.T., Peiró-Ronda M.A., Osete-Cortina L. Electrochemistry and authentication of archaeological lead using voltammetry of microparticles: application to the Tossal De Sant Miquel Iberian Plate // *Archaeometry*. 2011. 53(6): 1193-1211.

Doménech-Carbó et al., 2012 – Doménech-Carbó A., Doménech-Carbó M.T., Peiró-Ronda M.A., Martínez-Lázaro I., Barrio-Martín J. Application of the voltammetry of microparticles for dating archaeological lead using polarization curves and electrochemical impedance spectroscopy // *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2012. 16(7): 2349-2356.

Doménech-Carbó et al., 2014 – Doménech-Carbó A., Lastras M., Rodríguez F., Cano E., Piquero-Cilla J., Osete-Cortina L. Monitoring stabilizing procedures of archaeological iron using electrochemical impedance spectroscopy // *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2014. 18(2): 399-409.

Doménech-Carbó et al., 2016 – Doménech-Carbó A., Doménech-Carbó M.T., Valle-Algarra F. M., Gimeno-Adelantado J.V., Osete-Cortina L., Bosch-Reig F. On-line database of voltammetric data of immobilized particles for identifying pigments and minerals in archaeometry, conservation and restoration (ELCHER database) // *Analytica chimica acta*. 2016. 927: 1-12.

Doménech-Carbó et al., 2017 – Doménech-Carbó A., Doménech-Carbó M.T., Montagna E., Álvarez-Romero C., Lee Y. Electrochemical discrimination of mints: The last Chinese emperors Kuang Hsü and Hsüan T'ung monetary unification // *Talanta*. 2017. 169: 50-56.

Doménech-Carbó et al., 2017b – Doménech-Carbó A., del Hoyo-Meléndez J.M., Doménech-Carbó M.T., Piquero-Cilla J. Electrochemical analysis of the first Polish coins using voltammetry of immobilized particles // *Microchemical Journal*. 2017. 130: 47-55.

Doménech-Carbó et al., 2019 – Doménech-Carbó A., Scholz F. Electrochemical age determinations of metallic specimens—utilization of the corrosion clock // *Accounts of chemical research*. 2019. 52(2): 400-406.

Doménech-Carbó, 2017 – Domenech-Carbo A. Electrochemical dating: a review // *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2017. 21(7): 1987-1998.

Dos Santos et al., 2016 – Dos Santos M.C., Déturche R., Vézy C., Jaffiol R. Topography of cells revealed by variable-angle total internal reflection fluorescence microscopy // *Biophysical journal*. 2016. 111(6): 1316-1327.

Drsek et al., 2008 – Drsek F., Maire G., Giovannini H., Belkebir K., Chaumet P., Talneau A., Sentenac A. Far field reflection microscopy based on optical diffraction tomography. In: *Biomedical Optics* (p. BMD57). Optical Society of America, 2008.

Dubois, 2004 – Dubois A. Effects of phase change on reflection in phase-measuring interference microscopy // *Applied optics*. 2004. 43(7): 1503-1507.

Edwards et al., 2014 – Edwards C., Bhaduri B., Popescu G., Goddard L.L. Reflection-based Diffraction Phase Microscopy using Broadband Illumination. In: *Frontiers in Optics* (pp. FW2A-3). Optical Society of America, 2014.

Eiselt et al., 2019 – Eiselt B.S., Dudgeon J., Darling J.A., Paucar E.N., Glascock M.D., Woodson M.K. In-situ Sourcing of Hematite Paints on the Surface of Hohokam Red-on-Buff Ceramics Using Laser Ablation–Inductively Coupled Plasma–Mass Spectrometry (LA–ICP–MS) and Instrumental Neutron Activation Analysis // *Archaeometry*. 2019. 61(2): 423-441.

Enoki et al., 2012 – Enoki S., Iino R., Morone N., Kaihatsu K., Sakakihara S., Kato N., Noji H. Label-free single-particle imaging of the influenza virus by objective-type total internal reflection dark-field microscopy // *PLoS ONE*. 2012. 7(11): e49208.

Faez, 2015 – Faez S., Lahini Y., Weidlich S., Garmann R.F., Wondraczek K., Zeisberger M., Schmidt M.A., Orrit M., Manoharan V.N. Fast, label-free tracking of single viruses and weakly scattering nanoparticles in a nanofluidic optical fiber // *ACS Nano*. 2015. 9(12): 12349-12357.

Filler Peuker, 2000 – Filler T.J., Peuker E.T. Reflection contrast microscopy (RCM): a forgotten technique? // *The Journal of Pathology: A Journal of the Pathological Society of Great Britain and Ireland*. 2000. 190(5): 635-638.

Fiolka et al., 2008 – Fiolka R., Beck M., Stemmer A. Structured illumination in total internal reflection fluorescence microscopy using a spatial light modulator // *Optics letters*. 2008. 33(14): 1629-1631.

Fish, 2009 – Fish K.N. Total internal reflection fluorescence (TIRF) microscopy // *Current protocols in cytometry*. 2009. 50(1): 12-18.

Foucault et al., 2019 – Foucault L., Verrier N., Debailleul M., Courbot J. B., Colicchio B., Simon B., Vonna L., Haeblerlé O. Versatile transmission / reflection tomographic diffractive microscopy approach // *Journal of the Optical Society of America A*. 2019. 36(11): C18-C27.

Freestone et al., 2007 – Freestone I., Meeks N., Sax M., Higgitt C. The Lycurgus cup – a roman nanotechnology // *Gold bulletin*. 2007. 40(4): 270-277.

Fujinami et al., 2018 – Fujinami T., Kigami H., Unno N., Taniguchi J., Satake S.I. Three-dimensional particle tracking in concave structures made by ultraviolet nanoimprint via total internal reflection fluorescence microscopy and refractive-index-matching method // *Optical Review*. 2018. 25(3): 437-443.

Gasiński et al., 1978 – Gasiński M.A., Hanusiak A., Tyrankiewicz R. The Y-modulation method in investigations of the structures of microfossils in SEM // *Annales Societatis Geologorum Poloniae*. 1978. 48(3-4): 533-536.

Gentelli, 2019 – Gentelli L. Enhancing Understanding of the Emergence of Global Trade: Analysis of 17th to 19th Century Spanish Coins Recovered from Western Australian Shipwrecks Using Laser Ablation–Inductively Coupled Plasma–Mass Spectrometry (LA–ICP–MS) // *Archaeometry*. 2019. 61(3): 701-719.

Giorgetti et al., 2011 – Giorgetti G., Fortina C., Memmi I. T., Barbone A.S. Sienese “Archaic” Majolica: Characterisation of Enamels and Glazes by Analytical-Transmission Electron Microscopy (AEM–TEM). In: *Proceedings of the 37th International Symposium on Archaeometry, 13th-16th May 2008, Siena, Italy* (pp. 377-381). Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.

Goren-Inbar et al., 1986 – Goren-Inbar N., Perlman I., Heimann A. Chemical mapping of basalt flows at Paleolithic sites // *Archaeometry*. 1986. 28(1): 89-99.

Gradov, 2018 – Gradov O.V. Multi-angle goniometric computer-assisted lab-on-a-chip reading system stage for vacuum-gas chambers based on analytical scanning electron microscopy platform (goniometric CLEM chambers) // *Comput. nanotech*. 2018. (4): 9-16.

Grim Allison, 2004 – Grim D.M., Allison J. Laser desorption mass spectrometry as a tool for the analysis of colorants: the identification of pigments used in illuminated manuscripts // *Archaeometry*. 2004. 46(2): 283-299.

Hahn, 2010 – Hahn O. (2010). Analyses of iron gall and carbon inks by means of X-ray fluorescence analysis: a non-destructive approach in the field of archaeometry and conservation science // *Restaurator*. 2010. 31(1): 41-64.

Halliday, 1955 – Halliday J.S. Surface examination by reflection electron microscopy / *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 1955. 169(1): 777-787.

Han et al., 2020 – Han D., Ma L., Ma S., Zhang J. The digital restoration of painted patterns on the No. 2 Qin bronze chariot based on hyperspectral imaging // *Archaeometry*. 2020. 62(1): 200-212.

Hartman et al., 1980 – Hartman J.S., Gordon R.L., Lessor D.L. Quantitative surface topography determination by Nomarski reflection microscopy. 2: Microscope modification, calibration, and planar sample experiments // *Applied optics*. 1980. 19(17): 2998-3009.

Hayek et al., 1991 – Hayek E.W., Krenmayr P., Lohninger H., Jordis U., Sauter F., Moche W. GC/MS and chemometrics in archaeometry // *Fresenius' journal of analytical chemistry*. 1991. 340(3): 153-156.

Heinricht Bostanjoglo, 1992 – Heinricht F., Bostanjoglo O. Laser ablation processes imaged by high-speed reflection electron microscopy // *Applied surface science*. 1992. 54: 244-254.

Hemeda, 2013 – Hemeda S. Laser induced breakdown spectroscopy and other analytical techniques applied on construction materials at Kom El-Dikka, Alexandria, Egypt // *Mediterranean Archaeology Archaeometry*. 2013. 13(2): 103-119.

Hsu Cowley, 1983 – Hsu T., Cowley J.M. Reflection electron microscopy (REM) of fcc metals // *Ultramicroscopy*. 1983. 11(4): 239-250.

Huerre et al., 2016 – Huerre A., Jullien M.C., Theodoly O., Valignat M.P. Absolute 3D reconstruction of thin films topography in microfluidic channels by interference reflection microscopy // *Lab on a Chip*. 2016. 16(5): 911-916.

Hyeon et al., 2019 – Hyeon M.G., Yang T.D., Park J.S., Park K., Kang Y.G., Kim B.M., Choi Y. Reflection phase microscopy by successive accumulation of interferograms // *ACS Photonics*. 2019. 6(3): 757-766.

Ignat'ev et al., 2011 – Ignat'ev P.S., Loparev A.V., Indukaev K.V., Osipov P.A. Investigating the optical properties of nanostructures by modulation interference microscopy // *Journal of Optical Technology*. 2011. 78(1): 19-24.

Ignat'ev et al., 2015 – Ignat'ev P.S., Kol'ner L. S., Indukaev K.V., Teleshevskii V.I. Laser modulation interference microscopy as a means of controlling the form and roughness of optical surfaces // *Measurement Techniques*. 2015. 58(7): 772-776.

Iliev et al., 2003 – Iliev I., Kuleff I., Adam J., Pernicka E. Electrochemical lead separation from copper, copper alloy, silver and silver alloy for isotope ratio determination in archaeometric investigations // *Analytica chimica acta*. 2003. 497(1-2): 227-233.

Indukaev Andreev, 2005 – Indukaev K.V., Andreev V.A. The problem of sub-Rayleigh resolution in interference microscopy // *Proc. SPIE*. 2005. 5067: 240-252.

Islam et al., 2002 – Islam M.N., Okano T., Kato T. Surface Phase Behavior of a Mixed System of Anionic–Nonionic Surfactants Studied by Brewster Angle Microscopy and Polarization Modulation Infrared Reflection–Absorption Spectroscopy // *Langmuir*. 2002. 18(26): 10068-10074.

Jalocha Van Hulst, 1995 – Jalocha A., Van Hulst N.F. Polarization contrast in fluorescence scanning near-field optical reflection microscopy // *Journal of the Optical Society of America B*. 1995. 12(9): 1577-1580.

Jamhawi et al., 2016 – Jamhawi M., Alshawabkeh Y., Freewan A., Al-Gharaibeh R. Combined laser scanner and dense stereo matching techniques for 3D modelling of heritage sites: Dar Es-Saraya museum // *Mediterranean Archaeology Archaeometry*. 2016. 16(3): 185-192.

Kang et al., 2009 – Kang D., Suter M.J., Boudoux C., Yachimski P.S., Nishioka N.S., Mino-Kenudson M., Lauwers G.Y., Bouma B.E., Tearney G.J. Combined Reflection Confocal Microscopy and Optical Coherence Tomography Imaging of Esophageal Biopsy // *Gastrointestinal Endoscopy*. 2009. 69(5): AB368.

Kasztovszky et al., 2006 – Kasztovszky Z., Belgya T. From PGAA to PGAI: from bulk analysis to elemental mapping // *Archaeometriai Műhely*. 2006. 2: 16-21.

Kelley et al., 1994 – Kelley S., Williams-Thorpe O., Thorpe R.S. Laser argon dating and geological provenancing of a stone axe from the Stonehenge environs // *Archaeometry*. 1994. 36(2): 209-216.

Kelly et al., 1969 – Kelly T.K., Lindqvist W.F., Muir M.D. Y-modulation: an improved method of revealing surface detail using the scanning electron microscope // *Science*. 1969. 165(3890): 283-285.

Kockelmann Kirfel, 2006 – Kockelmann W., Kirfel A. Neutron diffraction imaging of cultural heritage objects // *Archeometriai Műhely*. 2006. 2: 1-15.

Krakow et al., 1976 – Krakow W., Siegel B.M. The investigation of multi-reflection images from small crystallites using dark-field electron microscopy // *Journal of Applied Crystallography*. 1976. 9(4): 325-334.

Kühn et al., 2009 – Kühn J., Montfort F., Colomb T., Rappaz B., Moratal C., Pavillon N., Marquet P., Depeursinge C. Submicrometer tomography of cells by multiple-wavelength digital holographic microscopy in reflection // *Optics letters*. 2009. 34(5): 653-655.

Kuisma-Kursula Räisänen, 1999 – *Kuisma-Kursula P., Räisänen J.* Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive Spectrometry and Proton Induced X-ray Emission Analyses of Medieval Glass from Koroinen (Finland) // *Archaeometry*. 1999. 41(1): 71-79.

Kuleff, 2012 – *Kuleff I.* Електрохимични методи в археометрията, консервацията и реставрацията. Рецензия на: А. Doménech-Carbó, МТ Doménech-Carbó and V. Costa. *Electrochemical Methods in Archaeometry, Conservation and Restoration*. 2009, Springer // *Българско е-Списание за Археология*. 2012. 2(2): 137-140.

Kuzmanovski et al., 2008 – *Kuzmanovski I.* (2008). Chemometrics in archaeometry. In: *Science Meets Archaeology and Art History – Balkan Symposium on Archaeometry Ohrid, Republic of Macedonia, 18th–20th September 2008*. [Electronic resource]. URL: <http://www.archaeometry.ukim.edu.mk/abstracts/igor%20kuzmanovski-ohrid.pdf>

Lahrech et al., 1996 – *Lahrech A., Bachelot R., Gleyzes P., Boccara A.C.* Infrared-reflection-mode near-field microscopy using an apertureless probe with a resolution of $\lambda/600$ // *Optics letters*. 1996. 21(17): 1315-1317.

Landry et al., 2004 – *Landry S., McGhee P.L., Girardin R.J., Keeler W.J.* Monitoring live cell viability: Comparative study of fluorescence, oblique incidence reflection and phase contrast microscopy imaging techniques // *Optics express*. 2004. 12(23): 5754-5759.

Langouët, 1988 – *Langouët L.* U. Leute, *Archaeometry, an introduction to physical methods in archaeology and history of art* // *ArchéoSciences, revue d'Archéométrie*. 1988. 12(1): 101-102.

Lee et al., 2011 – *Lee M., Yaglidere O., Ozcan A.* Field-portable reflection and transmission microscopy based on lensless holography // *Biomedical optics express*. 2011. 2(9): 2721-2730.

Lee et al., 2018 – *Lee B., Jeong J., Lee D., Lee B.* LED based Off-axis Reflection Digital Holographic Microscopy using Holographic Optical Element. In: *Laser Applications to Chemical, Security and Environmental Analysis* (pp. JTU4A-6). Optical Society of America, 2018.

Lehman et al., 2010 – *Lehmann E.H., Hartmann S., Speidel M.O.* Investigation of the content of ancient Tibetan metallic Buddha statues by means of neutron imaging methods // *Archaeometry*. 2010. 52(3): 416-428.

Leonhardt, 2007 – *Leonhardt U.* Optical metamaterials: Invisibility cup // *Nature photonics*. 2007. 1(4): 207.

Leslie et al., 2006 – *Leslie K.A., Freestone I.C., Lowry D., Thirlwall M.* The provenance and technology of Near Eastern glass: oxygen isotopes by laser fluorination as a complement to strontium // *Archaeometry*. 2006. 48(2): 253-270.

Lessor et al., 1979 – *Lessor D.L., Hartman J.S., Gordon R.L.* Quantitative surface topography determination by Nomarski reflection microscopy. I. Theory // *Journal of the Optical Society of America*. 1979. 69(2): 357-366.

Leute, 1992 – *Leute U.* *Archaeometry. An Introduction of Physical Methods in Archaeology and the History of Art* // *Praehistorische Zeitschrift*. 1992. 67(1): 115-116.

Leuthe Riegler, 1992 – *Leuthe A., Riegler H.* Thermal behaviour of Langmuir-Blodgett films. II. X-ray and polarized reflection microscopy studies on coexisting polymorphism, thermal annealing and epitaxial layer growth of behenic acid multilayers // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1992. 25(12): 1786.

Li et al., 2013a – *Li G., Maslov K.I., Wang L.V.* Reflection-mode multifocal optical-resolution photoacoustic microscopy // *Journal of biomedical optics*. 2013. 18(3): 030501.

Li et al., 2013b – *Li G., Maslov K.I., Wang L.V.* Multifocal optical-resolution photoacoustic microscopy in reflection mode // *Proc. SPIE*. 2013. 8581: 858126.

Liu et al., 2019 – *Liu Q., Chen Y., Liu W., Han Y., Cao R., Zhang Z., Kuang C., Liu X.* Total internal reflection fluorescence pattern-illuminated Fourier ptychographic microscopy // *Optics and Lasers in Engineering*. 2019. 123: 45-52.

Longoni et al., 1998 – *Longoni A., Fiorini C., Leutenegger P., Sciuti S., Fronterotta G., Strüder L., Lechner P.* A portable XRF spectrometer for non-destructive analyses in archaeometry // *Nuclear instruments and methods in Physics research Section A: Accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment*. 1998. 409(1-3): 407-409.

Loparev et al., 2012 – *Loparev A.V., Romash E.V., Zenzinov A.B., Ignat'ev P.S., Indukaev K.V., Osipov P.A.* Laser-based modulation-interference microscopy of optical surfaces // *Journal of Optical Technology*. 79(6): 366-370.

Ma et al., 2016 – Ma C., Di J., Zhang J., Li Y., Xi T., Li E., Zhao J. Simultaneous measurement of refractive index distribution and topography by integrated transmission and reflection digital holographic microscopy // *Applied optics*. 2016. 55(33): 9435-9439.

Maidikovski et al., 2006 – Maidikovski A., Yongseok J., Magnitskiy S., Nagorsky N., Ejov A., Sychev F., Aktsipetrov O.A. Reflection second-harmonic microscopy of porous silicon structures. In: *Frontiers in Optics* (p. FWE3). Optical Society of America, 2006.

Maire et al., 2013 – Maire G., Ruan Y., Zhang T., Chaumet P.C., Giovannini H., Sentenac D., Talneau A., Belkebir K., Sentenac A. High-resolution tomographic diffractive microscopy in reflection configuration // *Journal of the Optical Society of America A*. 2013. 30(10): 2133-2139.

Mallory-Greenough et al., 1999 – Mallory-Greenough L.M., Greenough J.D., Dobosi G., Owen J.V. (1999). Fingerprinting ancient Egyptian quarries: Preliminary results using laser ablation microprobe-inductively coupled plasma-mass spectrometry // *Archaeometry*. 1999. 41(2): 227-238.

Mandelis et al., 1995 – Mandelis A., McAllister K., Christofides C., Xenophontos C. A pilot study in non-contact laser photothermal archaeometry of ancient statuary pedestal stones from Cyprus // *Archaeometry*. 1995. 37(2): 257-270.

Mandracchia et al., 2017 – Mandracchia B., Gennari O., Marchesano V., Paturzo M., Ferraro P. Label free imaging of cell-substrate contacts by holographic total internal reflection microscopy // *Journal of biophotonics*. 2017. 10(9): 1163-1170.

Mannes et al., 2014 – Mannes D., Benoît C., Heinzelmann D., Lehmann E. Beyond the Visible: Combined Neutron and X-ray Imaging of an Altar Stone from the Former Augustinian Church in Fribourg, Switzerland // *Archaeometry*. 2014. 56(5): 717-727.

Mara et al., 2009 – Mara H., Breuckmann B., Lang-Auinger C. Multi-spectral high-resolution 3D-acquisition for rapid archaeological documentation and analysis. In: *2009 17th European Signal Processing Conference* (pp. 1205-1209). IEEE, 2009.

Maslov et al., 2005 – Maslov K., Stoica G., Wang L.V. In vivo dark-field reflection-mode photoacoustic microscopy // *Optics letters*. 2005. 30(6): 625-627.

Mata et al., 2002 – Mata M.P., Peacor D.R., Gallart-Martí M.D. Transmission electron microscopy (TEM) applied to ancient pottery // *Archaeometry*. 2002. 44(2): 155-176.

Matlock et al., 2018 – Matlock A., Sentenac A., Yi J., Tian L. First Born model for reflection-mode Fourier ptychographic microscopy. In: *Mathematics in Imaging* (pp. MM3D-2). Optical Society of America, 2018.

Matlock et al., 2020 – Matlock A., Sentenac A., Chaumet P.C., Yi J., Tian, L. Inverse scattering for reflection intensity phase microscopy // *Biomedical Optics Express*. 2020. 11(2): 911-926.

Matrecano et al., 2014 – Matrecano M., Calabuig A., Paturzo M., Ferraro P. Common-path configuration in total internal reflection digital holography microscopy / *Proc. SPIE*. 2014. 9132: 91321I.

Maurstad et al., 2008 – Maurstad G., Mørch Y.A., Bausch A.R., Stokke B.T. Polyelectrolyte layer interpenetration and swelling of alginate–chitosan multilayers studied by dual wavelength reflection interference contrast microscopy // *Carbohydrate polymers*. 2008. 71(4): 672-681.

Medhat et al., 2015 – Medhat A., Ali M., Abdel-Ghani M. Analytical investigation on a Coptic wooden icon from the 18th century using SEM-EDX microscopy and FTIR spectroscopy // *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*. 2015. 15: 151-161.

Milazzo, 2004 – Milazzo M. (2004). Radiation applications in art and archaeometry: X-ray fluorescence applications to archaeometry. Possibility of obtaining non-destructive quantitative analyses // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2004. 213: 683-692.

Miljković Gajski, 2016 – Miljković V., Gajski D. (2016). Adaptation of industrial hyperspectral line scanner for archaeological applications // *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci*. 2016. 5: 343-345.

Mohamed et al., 2011 – Mohamed E.A., Kamanyi A., von Buttler M., Wannemacher R., Hillmann K., Ngwa W., Grill W. Ultra-high resolution thin film thickness delineation using reflection phase-sensitive acoustic microscopy. In: *Acoustical Imaging* (pp. 125-134). Springer, Dordrecht, 2011.

[Moroni Petrelli, 2005](#) – *Moroni B., Petrelli M.* Geochemical characterization of flint artifacts by inductively coupled plasma-mass spectrometry with laser sampling (LA-ICP-MS): results and prospects // *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*. 2005. 5(2): 49-62.

[Müller Stege, 2003](#) – *Müller K., Stege H.* Evaluation of the analytical potential of laser-induced breakdown spectrometry (LIBS) for the analysis of historical glasses // *Archaeometry*. 2003. 45(3): 421-433.

[Müller et al., 2003](#) – *Müller M., Papiz M.Z., Clarke D.T., Roberts M.A., Murphy B.M., Burghammer M., Gunneweg J.* Identification of the textiles from Khirbet Qumran using microscopy and synchrotron radiation X-ray fibre diffraction // *Archaeological Excavations at Khirbet Qumran and Ain Feshka-Studies in Archaeometry and Anthropology*. 2003. 2: 277-286.

[Nikoonahad et al., 1983](#) – *Nikoonahad M., Sivaprakasapillai P., Ash E.A.* Rayleigh wave suppression in reflection acoustic microscopy // *Electronics Letters*. 1983. 19(22): 906-908.

[Okoro et al., 2018](#) – *Okoro C., Kelkar V., Sivaguru M., Emmadi R., Toussaint K.C.* Second-harmonic patterned polarization-analyzed reflection confocal microscopy of stromal collagen in benign and malignant breast tissues // *Scientific reports*. 2018. 8(1): 16243.

[Olveczky et al., 1997](#) – *Olveczky B.P., Periasamy N., Verkman A.S.* Mapping fluorophore distributions in three dimensions by quantitative multiple angle-total internal reflection fluorescence microscopy // *Biophysical journal*. 1997. 73(5): 2836-2847.

[Oravec et al., 1984](#) – *Oravec M., Vorres C., Kessler L.W.* Acoustical Imaging/NDE of Complex Geometries Using Refraction and Reflection Transmission Techniques in Acoustic Microscopy. In: *Acoustical imaging* (pp. 89-89). Springer, Boston, MA, 1984.

[Park Park, 1989](#) – *Park K., Park H.* Application of video-enhanced interference reflection microscopy to the study of platelet-surface interactions // *Scanning microscopy*. (Supplement 3). 1989. Pp. 137-45.

[Paterson et al., 2017](#) – *Paterson R.A., Lowe B.J., Smith C.A., Lord J.M., Ngarimu-Cameron R.* Polarized light microscopy: an old technique casts new light on Māori textile plants // *Archaeometry*. 2017. 59(5): 965-979.

[Pelagotti et al., 2018](#) – *Pelagotti A., Pronti L., Massa E., Galeotti M., Felici A. C.* Multispectral Reflectance and UV Fluorescence Microscopy to study painting's cross sections / *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. 364: 012064.

[Peng Cowley, 1987](#) – *Peng L.M., Cowley J.M.* Diffraction contrast in reflection electron microscopy—I. Screw dislocation // *Micron and Microscopica Acta*. 1987. 18(3): 171-178.

[Peng et al., 1987](#) – *Peng L.M., Cowley J.M., Hsu T.* Diffraction contrast in reflection electron microscopy—II. Surface steps and dislocations under the surface // *Micron and Microscopica Acta*. 1987. 18(3): 179-186.

[Pereira et al., 2013](#) – *Pereira M.S., Marques J.G., Santos J.P., Burbidge C.I., Dias M.I., Prudêncio M.I.* Neutron imaging techniques applied to studies in the archaeological and cultural heritage fields // *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*. 2013. 13(3): 137-143.

[Pettinelli et al., 2012](#) – *Pettinelli E., Barone P.M., Di Matteo A., Mattei E., Lauro S.E.* Mapping the undiscovered ruins of Pompeii (Naples, Italy) using ground penetrating radar. *Archaeometry*. 2012. 54(1): 203-212.

[Polak et al., 1983](#) – *Polak M., Baram J., Pelleg J.* Auger electron microscopy applied to the analysis of archaeological artifacts // *Archaeometry*. 1983. 25(1): 59-67.

[Polikreti Christofides, 2010](#) – *Polikreti K., Christofides C.* Composition profiles and time evolution of buried marble patinas by LA-ICP-MS and laser-induced micro-photo-luminescence // *Archaeometry*. 52(6): 937-948.

[Ponting et al., 2003](#) – *Ponting M., Evans J.A., Pashley V.* Fingerprinting of Roman mints using laser-ablation MC-ICP-MS lead isotope analysis // *Archaeometry*. 2003. 45(4): 591-597.

[Prieve Frej, 1990](#) – *Prieve D.C., Frej N.A.* Total internal reflection microscopy: a quantitative tool for the measurement of colloidal forces // *Langmuir*. 1990. 6(2): 396-403.

[Radpour, 2019](#) – *Radpour R.* Advanced Imaging Spectroscopy and Chemical Sensing in Archaeometry and Archaeological Forensics (Doctoral dissertation, UCLA), 2019.

[Raedler Sackmann, 1992](#) – *Raedler, J., Sackmann, E.* On the measurement of weak repulsive and frictional colloidal forces by reflection interference contrast microscopy // *Langmuir*. 1992. 8(3): 848-853.

[Raepsaet, 1989](#) – *Raepsaet G.* Ulrich Leute, Archaeometry. An Introduction to Physical Methods in Archaeology and the History of Art // *L'Antiquité Classique*. 1989. 58(1): 510.

[Redondo-Marugán et al., 2017](#) – *Redondo-Marugán J., Piquero-Cilla J., Doménech-Carbó M.T., Ramírez-Barat B., Al Sekhaneh W., Capelo S., Doménech-Carbó A.* Characterizing archaeological bronze corrosion products intersecting electrochemical impedance measurements with voltammetry of immobilized particles // *Electrochimica Acta*. 2017. 246: 269-279.

[Reiche et al., 2002](#) – *Reiche I., Vignaud C., Menu, M.* The crystallinity of ancient bone and dentine: new insights by transmission electron microscopy // *Archaeometry*. 2002. 44(3): 447-459.

[Rentz Dupuis et al., 2008](#) – *Rentz Dupuis J., Needham J., Özkumur E., Bergstein D.A., Goldberg B.B., Engel J.R., Carlson D.L., Ünlü M.S.* Hyperspectral Fourier transform spectrometer for reflection spectroscopy and spectral self-interference fluorescence microscopy // *Applied Optics*. 2008. 47: 1223-1234.

[Richards et al., 2001](#) – *Richards R.G., Stiffanic M., Owen G.R., Riehle M., Ap Gwynn I., Curtis A.S.G.* Immunogold labelling of fibroblast focal adhesion sites visualised in fixed material using scanning electron microscopy, and living, using internal reflection microscopy // *Cell biology international*. 2001. 25(12): 1237-1249.

[Rosa-Molinar et al., 1984](#) – *Rosa-Molinar E., Howard G., Williams C. S.* Notes on the use of Y-modulation imaging in studies of cuticular surfaces of larval (Philometridae) nematodes // *Journal of Electron Microscopy Technique*. 1984. 1(3): 311-312.

[Roy et al., 2011](#) – *Roy S., Parks D., Seu K.A., Su R., Turner J.J., Chao W., Cabrini S., Kevan S.D.* Lensless X-ray imaging in reflection geometry // *Nature Photonics*. 2011. 5(4): 243.

[Santos et al., 2009](#) – *Santos J.O., Munita C.S., Toyota R.G., Vergne C., Silva R.S., Oliveira P.M.S.* (2009). The archaeometry study of the chemical and mineral composition of pottery from Brazil's Northeast // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2009. 281(2): 189-192.

[Sarmis et al., 2010](#) – *Sarmis M., Simon B., Debailleul M., Colicchio B., Georges V., Delaunay J.J., Haeberle O.* High resolution reflection tomographic diffractive microscopy // *Journal of Modern Optics*. 2010. 57(9): 740-745.

[Sauter et al., 2002](#) – *Sauter F., Varmuza K., Werther W., Stadler P.* Studies in organic archaeometry V: Chemical analysis of organic material found in traces on an Neolithic terracotta idol statuette excavated in lower Austria // *ARKIVOC*. 2002. 1: 54-60.

[Scharlotta et al., 2011](#) – *Scharlotta I., Gilstrap W., Neff H.* No Stone Unburned: A Compositional Analysis of Obsidian Microdebitage by Laser Ablation TOF-ICP-MS // *Archaeometry*. 2011. 53(5): 873-889.

[Schilling et al., 2004](#) – *Schilling J., Sengupta K., Goennenwein S., Bausch A.R., Sackmann E.* Absolute interfacial distance measurements by dual-wavelength reflection interference contrast microscopy // *Physical Review E*. 2004. 69(2): 021901.

[Scott, 1995](#) – *Scott G.D.* A study of the Lycurgus Cup // *Journal of Glass Studies*. 1995. 37: 51-64.

[Seaberg, 2014](#) – *Seaberg M.D.* Nanoscale EUV microscopy on a tabletop: a general transmission and reflection mode microscope based on coherent diffractive imaging with high harmonic illumination (Doctoral dissertation, University of Colorado), 2014.

[Shaus et al., 2019](#) – *Shaus A., Sober B., Tzang O., Ioffe Z., Cheshnovsky O., Finkelstein I., Piasezky E.* Raman Binary Mapping of Iron Age Ostrakon in an Unknown Material Composition and High-Fluorescence Setting – A Proof of Concept // *Archaeometry*. 2019. 61(2): 459-469.

[Simmert et al., 2018](#) – *Simmert S., Abdosamadi M.K., Hermsdorf G., Schäffer E.* LED-based interference-reflection microscopy combined with optical tweezers for quantitative three-dimensional microtubule imaging // *Optics express*. 2018. 26(11): 14499-14513.

[Simonetti et al., 2008](#) – *Simonetti A., Buzon M.R., Creaser R.A.* In-situ elemental and Sr isotope investigation of human tooth enamel by laser ablation-(MC)-ICP-MS: Successes and pitfalls // *Archaeometry*. 2008. 50(2): 371-385.

[Smith, 2003](#) – *Smith D.C.* In situ mobile subaquatic archaeometry evaluated by non-destructive Raman microscopy of gemstones lying under impure waters // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2003. 59(10): 2353-2369.

Somers et al., 2005 – Somers L., Linford N., Penn W., David A., Urry L., Walker R. Fixed-frequency radio-wave imaging of subsurface archaeological features: a minimally invasive technique for studying archaeological sites // *Archaeometry*. 2005. 47(1): 159-173.

Song et al., 2008 – Song L., Maslov K.I., Bitton R., Shung K.K., Wang L.V. Fast 3-D dark-field reflection-mode photoacoustic microscopy in vivo with a 30-MHz ultrasound linear array // *Journal of biomedical optics*. 2008. 13(5): 054028.

Song et al., 2016 – Song W., Xu Q., Zhang Y., Zhan Y., Zheng W., Song L. Fully integrated reflection-mode photoacoustic, two-photon, and second harmonic generation microscopy in vivo // *Scientific reports*. 2016. 6: 32240.

Spitzer-Aronson, 1986 – Spitzer-Aronson M. Laser, X-ray microfluorescence and microscopic studies of metallic luster on ancient overglazed ceramics. In: *Proceedings of the 24th International Archaeometry Symposium* (pp. 419-429), 1986.

Stemp et al., 2018 – Stemp W.J., Lerner H.J., Kristant E.H. (2018). Testing Area-Scale Fractal Complexity (Asfc) and Laser Scanning Confocal Microscopy (LSCM) to Document and Discriminate Microwear on Experimental Quartzite Scrapers // *Archaeometry*. 60(4): 660-677.

Suci et al., 2001 – Suci P.A., Geesey G.G., Tyler B.J. Integration of Raman microscopy, differential interference contrast microscopy, and attenuated total reflection Fourier transform infrared spectroscopy to investigate chlorhexidine spatial and temporal distribution in *Candida albicans* biofilms // *Journal of microbiological methods*. 2001. 46(3): 193-208.

Sun Shen, 2003 – Sun W.X., Shen Z.X. Apertureless near-field scanning Raman microscopy using reflection scattering geometry // *Ultramicroscopy*. 2003. 94(3-4): 237-244.

Suzuki, 1998 – Suzuki S. Reflection type high-speed holographic microscopy to photograph crack bifurcation. In: *Experimental Mechanics, Advances in design, testing and analysis (Proc. 11th Int. Conf on Experimental Mechanics, 1998)*, pp. 583-588. Balkema, 1998.

Szilágyi et al., 2016 – Szilágyi V., Kis Z., Szentmiklósi L. Neutron imaging for archaeometry // *Archeometriai Muhely*. 2016. 13(3): 157-172.

Takeo et al., 2008 – Takeo S., Koike M., Tanaka H., Kinno T., Tomita M., Uesugi F. Forbidden reflection based dark field transmission electron microscopy for the evaluation of local lattice distortion in epitaxial thin films // *Surface and Interface Analysis*. 2008. 40(13): 1655-1659.

Temple, 1981 – Temple P.A. (1981). Total internal reflection microscopy: a surface inspection technique // *Applied optics*. 1981. 20(15): 2656-2664.

Then-Obłuska Wagner, 2019 – Then-Obłuska J., Wagner B. Glass beads and pendants from Meroitic and Nobadian Lower Nubia, Sudan: Chemical compositional analysis using laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry // *Archaeometry*. 2019. 61(4): 856-873.

Treacy et al., 1999 – Treacy M.M., Krishnan A., Dujardin E., Yianilos P., Ebbesen T. "Y Contrast" Of Single Shell Carbon Nanotubes: Determination Of Young's Modulus By Observing Thermal Vibrations // *Microscopy and Microanalysis*. 1999. 5(2): 676-677.

Trojanowicz, 2008 – Trojanowicz M. Modern chemical analysis in archaeometry // *Analytical and bioanalytical chemistry*. 2008. 391(3): 915-918.

Trojanowicz, 2010 – Trojanowicz M. Antonio Doménech-Carbó, Maria Teresa Doménech-Carbó, Virginia Costa: Electrochemical methods in archaeometry, conservation and restoration // *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2010. 397(7): 2623-2624.

Vaughan, 2008 – Vaughan A. Raman nanotechnology-the Lycurgus Cup // *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2008. 24(6): 4.

Verhoeven et al., 2012 – Verhoeven G., Taelman D., Vermeulen F. Computer vision-based orthophoto mapping of complex archaeological sites: The ancient quarry of Pitaranha (Portugal-Spain) // *Archaeometry*. 2012. 54(6): 1114-1129.

Vindel et al., 2018 – Vindel E., García J., Gumiel C., López-Acevedo V., Hernando M. The contribution of transmission electron microscopy (TEM) to understanding pre-columbian goldwork technology // *Archaeometry*. 2018. 60(2): 342-349.

von Olshausen Rohrbach, 2013 – von Olshausen P., Rohrbach A. Coherent total internal reflection dark-field microscopy: label-free imaging beyond the diffraction limit // *Optics letters*. 2013. 38(20): 4066-4069.

von Olshausen, 2012 – von Olshausen P. Total Internal Reflection Microscopy: Super-resolution Imaging of Bacterial Dynamics and Dark Field Imaging: Totalreflexionsmikroskopie:

Superauflösende Mikroskopie Von Dynamik in Bakterien und Dunkelfeld Mikroskopie (Doctoral dissertation, Universität of Freiburg), 2012.

[Weymouth, 1990](#) – *Weymouth J.* Archaeometry: An Introduction to Physical Methods in Archaeology and the History of Art. Ulrich Leute. VCH Publishers, New York, 1987. xi+ 176 pp., appendix, literature, index. \$25.00 (cloth) // *American Antiquity*. 1990. 55(1): 189-190.

[Wickramasinghe, 1978](#) – *Wickramasinghe H.K.* Contrast in reflection acoustic microscopy // *Electronics Letters*. 1978. 14(10): 305-306.

[Wiegand 1998](#) – *Wiegand G., Neumaier K.R., Sackmann E.* Microinterferometry: three-dimensional reconstruction of surface microtopography for thin-film and wetting studies by reflection interference contrast microscopy (RICM) // *Applied optics*. 1998. 37(29): 6892-6905.

[Winemiller et al., 2018](#) – *Winemiller T.L., Ochoa-Winemiller V., Ludwig J.* Assessing Surface Correspondence and Trade of Maya Figurines and Moulds Using Multi-Stripe Laser Technology and Metrology // *Archaeometry*. 2018. 60(5): 1002-1017.

[Wojcieszak Wadley, 2018](#) – *Wojcieszak M., Wadley L.* Raman spectroscopy and scanning electron microscopy confirm ochre residues on 71 000-year-old bifacial tools from Sibudu, South Africa // *Archaeometry*. 2018. 60(5): 1062-1076.

[Wu et al., 1998](#) – *Wu F., Gericke A., Flach C.R., Mealy T.R., Seaton B.A., Mendelsohn R.* Domain structure and molecular conformation in annexin V/1, 2-dimyristoyl-sn-glycero-3-phosphate/Ca²⁺ aqueous monolayers: a Brewster angle microscopy/infrared reflection-absorption spectroscopy study // *Biophysical journal*. 1998. 74(6): 3273-3281.

[Wu et al., 2001](#) – *Wu F., Corsico B., Flach C.R., Cistola D.P., Storch J., Mendelsohn R.* Deletion of the helical motif in the intestinal fatty acid-binding protein reduces its interactions with membrane monolayers: Brewster angle microscopy, IR reflection-absorption spectroscopy, and surface pressure studies // *Biochemistry*. 2001. 40(7): 1976-1983.

[Xiao, 1997](#) – *Xiao M.* Polarization effects in reflection scanning near field optical microscopy // *Optics communications*. 1997. 136(3-4): 213-218.

[Yafei et al., 2016](#) – *Yafei L., Wenbin Z., Tianxu X., Yongzhi T., Maotian G., Erjun L., Fengying M.* (2016). Study on In-Line Incoherent Digital Holographic Microscopy in Reflection Configuration // *Chinese Journal of Lasers*. 2016. (11): 29.

[Yagi, 1987](#) – *Yagi K.* Reflection electron microscopy. *Journal of applied crystallography* // 1987. 20(3): 147-160.

[Yaqoob et al., 2011](#) – *Yaqoob Z., Yamauchi T., Choi W., Fu D., Dasari R.R., Feld M.S.* Single-shot full-field reflection phase microscopy // *Optics express*. 2011. 19(8): 7587-7595.

[Yuan et al., 2007](#) – *Yuan C., Zhai H., Wang X., Wu L.* Lensless digital holography with short-coherence light source for three-dimensional surface contouring of reflecting micro-object // *Optics communications*. 2007. 270(2): 176-179.

[Zand Albrecht-Buehler, 1989](#) – *Zand M.S., Albrecht-Buehler G.* Long-term observation of cultured cells by interference-reflection microscopy: Near-infrared illumination and Y-contrast image processing // *Cell motility and the cytoskeleton*. 1989. 13(2): 94-103.

[Zhang et al., 2012](#) – *Zhang C., Maslov K.I., Hu S., Wang L.V., Chen R., Zhou Q., Shung K.K.* Reflection-mode submicron-resolution in vivo photoacoustic microscopy // *Journal of biomedical optics*. 2012. 17(2): 020501.

[Zhang, 2015](#) – *Zhang B.* EUV Microscopy with a Tabletop High Harmonic Generation Source: Generalizing Coherent Diffractive Imaging to Extended Samples in Transmission, Reflection, and Hyperspectral Modalities (Doctoral dissertation, University of Colorado), 2015.

[Zhu et al., 2016](#) – *Zhu T.Q., Zhang Y.C., Xiong H., Feng Z.Y., Li Q., Cao B.L.* Comparison of the Different Types of Qinghua Porcelain from Jingdezhen in the Yuan Dynasty of China (ad 1271–1368) by Micro X-ray Fluorescence Spectroscopy (μ -XRF) and Microscopy // *Archaeometry*. 2016. 58(6): 966-978.

[Zilker et al., 1987](#) – *Zilker A., Engelhardt H., Sackmann E.* Dynamic reflection interference contrast (RIC-) microscopy: a new method to study surface excitations of cells and to measure membrane bending elastic moduli // *Journal De Physique*. 1987. 48(12): 2139-2151.

[Zinin, 1994](#) – *Zinin P., Weise W., Lobkis O., Kolosov O., Boseck S.* Fourier optics analysis of spherical-particles image-formation in reflection acoustic microscopy // *Optik*. 1994. 98(2): 45-60.

References

- [Adinolfi et al., 2019](#) – *Adinolfi, G., Carmagnola, R., Cataldi, M., Marras, L., Palleschi, V.* (2019). Recovery of a lost wall painting at the Etruscan Tomb of the Blue Demons in Tarquinia (Viterbo, Italy) by multispectral reflectometry and UV fluorescence imaging. *Archaeometry*. 61(2): 450-458.
- [Agha-Aligol et al., 2017](#) – *Agha-Aligol, D., Oliaiy, P., Moradi, M., Lamehi-Rachti, M.* (2017). Micro-beam analysis: powerful tools in archaeometry, restoration and conservation of historical and cultural objects. *Danesh-e-Hefazat va Maremmat*. 1(2): 35-52.
- [Alexakis et al., 2009](#) – *Alexakis, D., Sarris, A., Astaras, T., Albanakis, K.* (2009). Detection of Neolithic settlements in Thessaly (Greece) through multispectral and hyperspectral satellite imagery. *Sensors*. 9(2): 1167-1187.
- [Alshawabkeh El-Khalili, 2013](#) – *Alshawabkeh, Y., El-Khalili, M.* (2013). Detection and quantification of material displacements at historical structures using photogrammetry and laser scanning techniques. *Mediterranean Archaeology Archaeometry*. 13(2): 57-67.
- [Amado et al., 2008](#) – *Amado, E., Kerth, A., Blume, A., Kressler, J.* (2008). Infrared reflection absorption spectroscopy coupled with Brewster angle microscopy for studying interactions of amphiphilic triblock copolymers with phospholipid monolayers. *Langmuir*. 24(18): 10041-10053.
- [Anderson, Formenti, 1996](#) – *Anderson, P., Formenti, F.* (1996). Exploring the use of abraded obsidian “Cayönu tools” using experimentation, optical and SEM microscopy, and EDA analysis. *Archaeometry*. 94: 553-566.
- [Andreev et al., 2005](#) – *Andreev, V.A., Indukaev, K.V., Ioselev, O.K., Legkii, A.I., Lazarev, G.L., Orlov, D.A.* (2005). Phase modulation microscope MIM-2.1 for measurements of surface microrelief. Results of measurements. *Journal of Russian Laser Research*. 26(5): 394-401.
- [Andreev et al., 2012](#) – *Andreev, A.G., Grigoriev, S.N., Romash, E.V., Bushuev, S.V., Ignatiev, P.S., Loparev, A.V., Indukaev K.V., Osipov, P.A.* (2012). Modulation interference microscope as a tool for measuring the linear dimensions of nanostructures. *Measurement Techniques*. 55(5): 542-545.
- [Andreev Indukaev, 2005](#) – *Andreev, V.A., Indukaev, K.V.* (2005). Phase modulation microscope MIM-2.1 for measurements of surface microrelief. General principles of design and operation. *Journal of Russian Laser Research*. 26(5): 380-393.
- [Andreev, Indukaev, 2003](#) – *Andreev, V.A., Indukaev, K.V.* (2003). The problem of sub-Rayleigh resolution in interference microscopy. *Journal of Russian Laser Research*. 24(3): 220-236.
- [Ash et al., 2009](#) – *Ash III, W.M., Krzewina, L., Kim, M.K.* (2009). Quantitative imaging of cellular adhesion by total internal reflection holographic microscopy. *Applied optics*. 48(34): H144-H152.
- [Ash et al., 2010](#) – *Ash, W.M., Clark, D., Lo, C. M., Kim, M.K.* (2010, April). Quantitative characterization of cellular adhesions with Total Internal Reflection Holographic Microscopy. In: *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging* (p. DTuA4). Optical Society of America.
- [Atalar, 1978](#) – *Atalar, A.* (1978). An angular-spectrum approach to contrast in reflection acoustic microscopy. *Journal of Applied Physics*. 49(10): 5130-5139.
- [Atalar, 1993](#) – *Atalar, A.* (1993). An angular-spectrum approach to contrast in reflection acoustic microscopy. *SPIE Milestone Series*. 53: 73.
- [Atia et al., 1995](#) – *Atia, W.A., Pilevar, S., Güngör, A., Davis, C.C.* (1995, May). Phase-and-amplitude-reflection near-field scanning optical microscopy. In: *Optical Society of America – Conference on Lasers and Electro-Optics* (p. CWF44).
- [Atkinson et al., 1992](#) – *Atkinson, M. R., Dixon, A. E., Damaskinos, S.* (1992). Surface-profile reconstruction using reflection differential phase-contrast microscopy. *Applied optics*. 31(31): 6765-6771.
- [Barber et al., 1990](#) – *Barber, D.J., Freestone, I.C.* (1990). An investigation of the origin of the colour of the Lycurgus Cup by analytical transmission electron microscopy. *Archaeometry*. 32(1): 33-45.
- [Barber Freestone, 1990](#) – *Barber, D.J., Freestone, I.C.* (1990). An investigation of the origin of the colour of the Lycurgus Cup by analytical transmission electron microscopy. *Archaeometry*. 32(1): 33-45.

Barchiesi, 1997 – Barchiesi, D., Bergossi, O., Spajer, M., Pieralli, C. (1997). Image resolution in reflection scanning near-field optical microscopy using shear-force feedback: characterization with a spline and Fourier spectrum. *Applied optics*. 36(10): 2171-2177.

Barchiesi, 2015 – Barchiesi, D. (2015). Lycurgus Cup: inverse problem using photographs for characterization of matter. *Journal of the Optical Society of America A*. 32(8): 1544-1555.

Barr Bunnell, 2009 – Barr, V.A., Bunnell, S.C. (2009). Interference reflection microscopy. *CPCB*. 45(1): 4-23.

Bartick et al., 1994 – Bartick, E.G., Tungol, M.W., Reffner, J.A. (1994). A new approach to forensic analysis with infrared microscopy: internal reflection spectroscopy. *Analytica chimica acta*. 288(1-2): 35-42.

Basu, 1986 – Basu, S. (1986). Forensic uses of deflection (Y) modulation and X-ray dot mapping. In: *Electron Microscopy in Forensic, Occupational, and Environmental Health Sciences* (pp. 61-84). Springer, Boston, MA.

Bechtel et al., 2009 – Bechtel, H.A., Martin, M.C., May, T.E., Lerch, P. (2009). Improved spatial resolution for reflection mode infrared microscopy. *Review of Scientific Instruments*. 80(12): 126106.

Bendall et al., 2009 – Bendall, C., Wigg-Wolf, D., Lahaye, Y., Von Kaenel, H.M., Brey, G.P. (2009). Detecting changes of Celtic gold sources through the application of trace element and Pb isotope laser ablation analysis of Celtic gold coins. *Archaeometry*. 51(4): 598-625.

Biro et al., 2011 – Biró, K. T., Durkovic, É., Farkas-Szöke, S., Ancient Charm Collaboration. (2011). Look Into the Objects: Why? Cultural Heritage Motivations of Neutron-Based Imaging Techniques. In: *Proceedings of the 37th International Symposium on Archaeometry, 13th-16th May 2008, Siena, Italy* (pp. 365-370). Springer, Berlin, Heidelberg.

Bisht et al., 2010 – Bisht, N.S., Sharma, E.K., Kandpal, H.C. (2010). Experimental observation of lensless ghost imaging by measuring reflected photons. *Optics and lasers in engineering*. 48(6): 671-675.

Bonali et al., 2014 – Bonali, E., Pesci, A., Casula, G., Boschi, E. (2014). Deformation of Ancient Buildings inferred by Terrestrial Laser Scanning methodology: the Cantalovo church case study (Northern Italy). *Archaeometry*. 56(4): 703-716.

Bonorden, 1987 – Bonorden, S.W. (1987). Initial report on surface and deep structure studies of human bone tissue using reflection-scan-acoustic microscopy (R-SAM). A comparison between light and ultrasonic microscopy imaging. *Deutsche Zeitschrift für Mund-, Kiefer-und Gesichtschirurgie*. 11(2): 102-107.

Booker et al., 1967 – Booker, G.R., Shaw, A.M.B., Whelan, M.J., Hirsch, P.B. (1967). Some comments on the interpretation of the 'kikuchi-like reflection patterns' observed by scanning electron microscopy. *The Philosophical Magazine: A Journal of Theoretical Experimental and Applied Physics*. 16(144): 1185-1191.

Bortchagovsky, 2004 – Bortchagovsky, E.G. (2004). Reflection polarized light microscopy and its application to pyrolytic carbon deposits. *Journal of applied physics*. 95(9): 5192-5199.

Bouchard Smith, 2001 – Bouchard, M., Smith, D.C. (2001). Evaluating Raman microscopy for the non-destructive archaeometry of corroded coins: a powerful technique for conservation studies. *Asian Chemical Letters*. 5(3): 157-170.

Boyd Jones, 1995 – Boyd, A., Jones, S.J. (1995). Mapping and measuring surfaces using reflection confocal microscopy. In: *Handbook of biological confocal microscopy* (pp. 255-266). Springer, Boston, MA.

Bozhevolnyi et al., 2001 – Bozhevolnyi, S. I., Maidykovski, A., Vohnsen, B., Zwiller, V. (2001). Reflection second-harmonic microscopy of individual semiconductor microstructures. *Journal of Applied Physics*. 90(12): 6357-6362.

Brill, 1965 – Brill, R.H. (1965). The chemistry of the Lycurgus Cup; In: 7th International Congress of Glass; 1965.

Calabuig et al., 2014 – Calabuig, A., Matrecano, M., Paturzo, M., Ferraro, P. (2014). Common-path configuration in total internal reflection digital holography microscopy. *Optics letters*. 39(8): 2471-2474.

Caruso et al., 1998 – Caruso, F., Furlong, D. N., Ariga, K., Ichinose, I., Kunitake, T. (1998). Characterization of polyelectrolyte-protein multilayer films by atomic force microscopy, scanning

electron microscopy, and Fourier transform infrared reflection - absorption spectroscopy. *Langmuir*. 14(16): 4559-4565.

Chen et al., 2009 – Chen, X.H., Liu, Q., Luo, K.H., Wu, L.A. (2009). Lensless ghost imaging with true thermal light. *Optics letters*. 34(5): 695-697.

Chen et al., 2012 – Chen, J., Bai, X., Yang, K., Ju, B.F. (2012). Angular measurement of acoustic reflection coefficients by the inversion of V (z,t) data with high frequency time-resolved acoustic microscopy. *Review of Scientific Instruments*. 83(1): 014901.

Cheng et al., 2010 – Cheng, G., Jiang, Z., Wang, D., Ding, M., Cui, H. (2010). Off-axis reflection digital holographic microscopy for micron structure tomography measurement. *Proc. SPIE*. 7848: 78482E.

Chiu et al., 2012 – Chiu, L.D., Su, L., Reichelt, S., Amos, W.B. (2012). Use of a white light supercontinuum laser for confocal interference-reflection microscopy. *Journal of microscopy*. 246(2): 153-159.

Choi et al. 2014 – Choi, Y., Hosseini, P., Choi, W., Dasari, R.R., So, P. T., Yaqoob, Z. (2014). Dynamic speckle illumination wide-field reflection phase microscopy. *Optics letters*. 39(20): 6062-6065.

Clack Groves, 2005 – Clack, N.G., Groves, J.T. (2005). Many-particle tracking with nanometer resolution in three dimensions by reflection interference contrast microscopy. *Langmuir*. 21(14): 6430-6435.

Cogswell et al., 1992 – Cogswell, C.J., Hamilton, D.K., Sheppard, C.J.R. (1992). Colour confocal reflection microscopy using red, green and blue lasers. *Journal of Microscopy*. 165(1): 103-117.

Cohen Ichimiya, 1993 – Cohen, P., Ichimiya, A. (1993). Surface Characterization by LEED, RHEED, REM, STM, and holography. In: Proceedings of the United States – Japan Seminar on Surface Characterization by Electron-Diffraction, Reflection Electron Microscopy, and Holography – Kona, Hawaii, 16-19 March 1993. Preface Pages.

Costa et al., 2010 – Costa, V., Leyssens, K., Adriaens, A., Richard, N., Scholz, F. (2010). Electrochemistry reveals archaeological materials. *Journal of Solid State Electrochemistry*. 14(3): 449.

Cowley et al., 1975 – Cowley, J.M., Albain, J.L., Hembree, G.G., Ho/jlund-Nielsen, P.E., Koch, F.A., Landry, J.D., Shuman, H. (1975). System for reflection electron microscopy and electron diffraction at intermediate energies. *Review of Scientific Instruments*. 46(7): 826-829.

Delaney et a., 2005 – Delaney, J.K., Walmsley, E., Berrie, B.H., Fletcher, C.F. (2005). Multispectral imaging of paintings in the infrared to detect and map blue pigments. In: *Scientific Examination of Art: Modern Techniques in Conservation and Analysis*. 120-136.

Di Turo et al., 2017 – Di Turo, F., Montoya, N., Piquero-Cilla, J., De Vito, C., Coletti, F., Favero, G., Doménech-Carbó, A. (2017). Archaeometric analysis of Roman bronze coins from the Magna Mater temple using solid-state voltammetry and electrochemical impedance spectroscopy. *Analytica chimica acta*. 955: 36-47.

Di Turo, 2018 – Di Turo, F., Montoya, N., Piquero-Cilla, J., De Vito, C., Coletti, F., De Luca, I., Doménech-Carbó, A. (2018). Electrochemical discrimination of manufacturing types of pottery from Magna Mater Temple and Fora of Nerva and Caesar (Rome, Italy). *Applied Clay Science*. 162: 305-310.

Di Turo, 2020 – Di Turo, F. (2020). Limits and perspectives of archaeometric analysis of archaeological metals: A focus on the electrochemistry for studying ancient bronze coins. *Journal of Cultural Heritage*. 43: 271-281.

Doménech et al., 2009 – Doménech, A., Doménech-Carbó, M. T., Vázquez de Agredos Pascual, M.L. (2009). Correlation between spectral, SEM/EDX and electrochemical properties of Maya blue: a chemometric study. *Archaeometry*. 51(6): 1015-1034.

Doménech-Carbó et al., 2008 – Doménech-Carbó, A., Doménech-Carbó, M., Martínez-Lázaro, I. (2008). Electrochemical identification of bronze corrosion products in archaeological artefacts. A case study. *Microchimica Acta*. 162(3-4): 351-359.

Doménech-Carbó et al., 2009 – Doménech-Carbó, A., Doménech-Carbó, M. T., Costa, V. (2009). In: *Electrochemical methods in archaeometry, conservation and restoration*. Springer Science Business Media.

[Doménech-Carbó et al., 2011](#) – Doménech-Carbó, A., Doménech-Carbó, M. T., Peiró-Ronda, M. A., Osete-Cortina, L. (2011). Electrochemistry and authentication of archaeological lead using voltammetry of microparticles: application to the Tossal De Sant Miquel Iberian Plate. *Archaeometry*. 53(6): 1193-1211.

[Doménech-Carbó et al., 2012](#) – Doménech-Carbó, A., Doménech-Carbó, M. T., Peiró-Ronda, M. A., Martínez-Lázaro, I., Barrio-Martín, J. (2012). Application of the voltammetry of microparticles for dating archaeological lead using polarization curves and electrochemical impedance spectroscopy. *Journal of Solid State Electrochemistry*. 16(7): 2349-2356.

[Doménech-Carbó et al., 2014](#) – Doménech-Carbó, A., Lastras, M., Rodríguez, F., Cano, E., Piquero-Cilla, J., Osete-Cortina, L. (2014). Monitoring stabilizing procedures of archaeological iron using electrochemical impedance spectroscopy. *Journal of Solid State Electrochemistry*. 18(2): 399-409.

[Doménech-Carbó et al., 2016](#) – Doménech-Carbó, A., Doménech-Carbó, M. T., Valle-Algarra, F.M., Gimeno-Adelantado, J.V., Osete-Cortina, L., Bosch-Reig, F. (2016). On-line database of voltammetric data of immobilized particles for identifying pigments and minerals in archaeometry, conservation and restoration (ELCHER database). *Analytica chimica acta*. 927: 1-12.

[Doménech-Carbó et al., 2017](#) – Doménech-Carbó, A., Doménech-Carbó, M.T., Montagna, E., Álvarez-Romero, C., Lee, Y. (2017). Electrochemical discrimination of mints: The last Chinese emperors Kuang Hsü and Hsüan T'ung monetary unification. *Talanta*. 169: 50-56.

[Doménech-Carbó et al., 2017b](#) – Doménech-Carbó, A., del Hoyo-Meléndez, J.M., Doménech-Carbó, M.T., Piquero-Cilla, J. (2017). Electrochemical analysis of the first Polish coins using voltammetry of immobilized particles. *Microchemical Journal*. 130: 47-55.

[Doménech-Carbó et al., 2019](#) – Doménech-Carbó, A., Scholz, F. (2019). Electrochemical age determinations of metallic specimens—utilization of the corrosion clock. *Accounts of chemical research*. 52(2): 400-406.

[Doménech-Carbó, 2017](#) – Domenech-Carbo, A. (2017). Electrochemical dating: a review. *Journal of Solid State Electrochemistry*. 21(7): 1987-1998.

[Dos Santos et al., 2016](#) – Dos Santos, M. C., Déturche, R., Vézy, C., Jaffiol, R. (2016). Topography of cells revealed by variable-angle total internal reflection fluorescence microscopy. *Biophysical journal*. 111(6): 1316-1327.

[Drsek et al., 2008](#) – Drsek, F., Maire, G., Giovannini, H., Belkebir, K., Chaumet, P., Talneau, A., Sentenac, A. (2008, March). Far field reflection microscopy based on optical diffraction tomography. In: *Biomedical Optics* (p. BMD57). Optical Society of America.

[Dubois, 2004](#) – Dubois, A. (2004). Effects of phase change on reflection in phase-measuring interference microscopy. *Applied optics*. 43(7): 1503-1507.

[Edwards et al., 2014](#) – Edwards, C., Bhaduri, B., Popescu, G., Goddard, L. L. (2014, October). Reflection-based Diffraction Phase Microscopy using Broadband Illumination. In: *Frontiers in Optics* (pp. FW2A-3). Optical Society of America.

[Eiselt et al., 2019](#) – Eiselt, B.S., Dudgeon, J., Darling, J.A., Paucar, E.N., Glascock, M.D., Woodson, M.K. (2019). In-situ Sourcing of Hematite Paints on the Surface of Hohokam Red-on-Buff Ceramics Using Laser Ablation–Inductively Coupled Plasma–Mass Spectrometry (LA–ICP–MS) and Instrumental Neutron Activation Analysis. *Archaeometry*. 61(2): 423-441.

[Enoki et al., 2012](#) – Enoki, S., Iino, R., Morone, N., Kaihatsu, K., Sakakihara, S., Kato, N., Noji, H. (2012). Label-free single-particle imaging of the influenza virus by objective-type total internal reflection dark-field microscopy. *PLoS ONE*. 7(11): e49208.

[Faez, 2015](#) – Faez, S., Lahini, Y., Weidlich, S., Garmann, R.F., Wondraczek, K., Zeisberger, M., Schmidt, M.A., Orrit, M., Manoharan, V.N. (2015). Fast, label-free tracking of single viruses and weakly scattering nanoparticles in a nanofluidic optical fiber. *ACS Nano*. 9(12): 12349-12357.

[Filler Peuker, 2000](#) – Filler, T.J., Peuker, E.T. (2000). Reflection contrast microscopy (RCM): a forgotten technique? *The Journal of Pathology: A Journal of the Pathological Society of Great Britain and Ireland*. 190(5): 635-638.

[Fiolka et al., 2008](#) – Fiolka, R., Beck, M., Stemmer, A. (2008). Structured illumination in total internal reflection fluorescence microscopy using a spatial light modulator. *Optics letters*. 33(14): 1629-1631.

Fish, 2009 – Fish, K.N. (2009). Total internal reflection fluorescence (TIRF) microscopy. *Current protocols in cytometry*. 50(1): 12-18.

Foucault et al., 2019 – Foucault, L., Verrier, N., Debailleul, M., Courbot, J. B., Colicchio, B., Simon, B., Vonna, L. Haeberlé, O. (2019). Versatile transmission/reflection tomographic diffractive microscopy approach. *Journal of the Optical Society of America A*. 36(11): C18-C27.

Freestone et al., 2007 – Freestone, I., Meeks, N., Sax, M., Higgitt, C. (2007). The Lycurgus cup – a roman nanotechnology. *Gold bulletin*. 40(4): 270-277.

Fujinami et al., 2018 – Fujinami, T., Kigami, H., Unno, N., Taniguchi, J., Satake, S.I. (2018). Three-dimensional particle tracking in concave structures made by ultraviolet nanoimprint via total internal reflection fluorescence microscopy and refractive-index-matching method. *Optical Review*. 25(3): 437-443.

Gasiński et al., 1978 – Gasiński, M.A., Hanusiak, A., Tyrankiewicz, R. (1978). The Y-modulation method in investigations of the structures of microfossils in SEM. *Annales Societatis Geologorum Poloniae*. 48(3-4): 533-536.

Gentelli, 2019 – Gentelli, L. (2019). Enhancing Understanding of the Emergence of Global Trade: Analysis of 17th to 19th Century Spanish Coins Recovered from Western Australian Shipwrecks Using Laser Ablation–Inductively Coupled Plasma–Mass Spectrometry (LA–ICP–MS). *Archaeometry*. 61(3): 701-719.

Giorgetti et al., 2011 – Giorgetti, G., Fortina, C., Memmi, I.T., Barbone, A.S. (2011). Sieneese “Archaic” Majolica: Characterisation of Enamels and Glazes by Analytical-Transmission Electron Microscopy (AEM–TEM). In: *Proceedings of the 37th International Symposium on Archaeometry, 13th-16th May 2008, Siena, Italy* (pp. 377-381). Springer, Berlin, Heidelberg.

Goren-Inbar et al., 1986 – Goren-Inbar, N., Perlman, I., Heimann, A. (1986). Chemical mapping of basalt flows at Paleolithic sites. *Archaeometry*. 28(1): 89-99.

Gradov i dr., 2018 – Gradov, O.V., Nasirov, F.A., Goncharova, A.A., Fishchenko, V.K., Yablokov, A.G. (2018). Tekhnologii bezlinzovoi golograficheskoi trikhoskopii i trikhometrii na chipe: mikrointerferentsionnye, 2d-Fur'e-spektral'nye (integral'nye chastotnye i prostranstvennye) i korrelograficheskie tekhniki v klinicheskoi trikhologii [On-chip lens-less holographic trichoscopy/trichometry technologies: microinterferometric, Fourier spectral and correlographic techniques for clinical trichology]. *Morfologiya*. 12(2): 7-21. [in Russian]

Gradov, 2018 – Gradov, O.V. (2018). Multi-angle goniometric computer-assisted lab-on-a-chip reading system stage for vacuum-gas chambers based on analytical scanning electron microscopy platform (goniometric CLEM chambers). *Comput. nanotech.* (4): 9–16.

Gradov, 2018 – Gradov, O.V. (2018). Poliarizatsionnaya korrelyatsionnaya elektronno-opticheskaya mikroskopiya (PCLEM). Pervoe predvaritel'noe soobshchenie [Towards Polarizing Correlative Light-Electron Microscopy (PCLEM)]. *Morfologiya*. 12(3): 146-150. [in Russian]

Gradov, 2019 – Gradov, O.V. (2019). Mnouguglovaya lazernaya i elektronno-puchkovaya porozimetriya skaffolodov, detsellyulyarizovannykh matriksov i tkanepodobnykh modelei, v tom chisle - v ESEM- i CLEM-implementatsii [Multiangle laser porosimetry and electron beam porosimetry for scaffolds, decellularized extracellular matrix samples and tissue-like models, including ESEM-based CLEM-based realizations]. *Geny i kletki*. 14(Prilozhenie 1). Pp. 69-70. [in Russian]

Gradov, Orekhov, 2019 – Gradov, O.V., Orekhov, F.K. (2019). Lazernaya poliproektsionnaya mikroskopiya v integriruyushchei sfere/fotometricheskom share Ul'brikhta s ispol'zovaniem bezlinzovykh mikroskopov s ASP-sensorami na baze priborov s zaryadovoi svyaz'yu ili komplementarnykh metall-oksid-poluprovodnikovyykh matrits [Multiple Projection Laser Microscopy in the Ulbricht Integrating Sphere (MPLM-UIS) using lens-less microscopes with CCD and CMOS (active-pixel) sensors, including angle sensitive ones]. *Morfologiya*. 13(2): 81-93. [in Russian]

Grim Allison, 2004 – Grim, D.M., Allison, J. (2004). Laser desorption mass spectrometry as a tool for the analysis of colorants: the identification of pigments used in illuminated manuscripts. *Archaeometry*. 46(2): 283-299.

Hahn, 2010 – Hahn, O. (2010). Analyses of iron gall and carbon inks by means of X-ray fluorescence analysis: a non-destructive approach in the field of archaeometry and conservation science. *Restaurator*. 31(1): 41-64.

Halliday, 1955 – Halliday, J.S. (1955). Surface examination by reflection electron microscopy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 169(1): 777-787.

Han et al., 2020 – Han, D., Ma, L., Ma, S., Zhang, J. (2020). The digital restoration of painted patterns on the No. 2 Qin bronze chariot based on hyperspectral imaging. *Archaeometry*. 62(1): 200-212.

Hartman et al., 1980 – Hartman, J.S., Gordon, R.L., Lessor, D.L. (1980). Quantitative surface topography determination by Nomarski reflection microscopy. 2: Microscope modification, calibration, and planar sample experiments. *Applied optics*. 19(17): 2998-3009.

Hayek et al., 1991 – Hayek, E. W., Krenmayr, P., Lohninger, H., Jordis, U., Sauter, F., Moche, W. (1991). GC/MS and chemometrics in archaeometry. *Fresenius' journal of analytical chemistry*. 340(3): 153-156.

Heinrich Bostanjoglo, 1992 – Heinrich, F., Bostanjoglo, O. (1992). Laser ablation processes imaged by high-speed reflection electron microscopy. *Applied surface science*. 54: 244-254.

Hemeda, 2013 – Hemeda, S. (2013). Laser induced breakdown spectroscopy and other analytical techniques applied on construction materials at Kom El-Dikka, Alexandria, Egypt. *Mediterranean Archaeology Archaeometry*. 13(2): 103-119.

Hsu Cowley, 1983 – Hsu, T., Cowley, J.M. (1983). Reflection electron microscopy (REM) of fcc metals. *Ultramicroscopy*. 11(4): 239-250.

Huerre et al., 2016 – Huerre, A., Jullien, M. C., Theodoly, O., Valignat, M. P. (2016). Absolute 3D reconstruction of thin films topography in microfluidic channels by interference reflection microscopy. *Lab on a Chip*. 16(5): 911-916.

Hyeon et al., 2019 – Hyeon, M.G., Yang, T.D., Park, J.S., Park, K., Kang, Y.G., Kim, B.M., Choi, Y. (2019). Reflection phase microscopy by successive accumulation of interferograms. *ACS Photonics*. 6(3): 757-766.

Ignat'ev et al., 2011 – Ignat'ev, P.S., Loparev, A.V., Indukaev, K.V., Osipov, P.A. (2011). Investigating the optical properties of nanostructures by modulation interference microscopy. *Journal of Optical Technology*. 78(1): 19-24.

Ignat'ev et al., 2015 – Ignat'ev, P.S., Kol'ner, L.S., Indukaev, K.V., Teleshevskii, V.I. (2015). Laser modulation interference microscopy as a means of controlling the form and roughness of optical surfaces. *Measurement Techniques*. 58(7): 772-776.

Iliev et al., 2003 – Iliev, I., Kuleff, I., Adam, J., Pernicka, E. (2003). Electrochemical lead separation from copper, copper alloy, silver and silver alloy for isotope ratio determination in archaeometric investigations. *Analytica chimica acta*. 497(1-2): 227-233.

Indukaev Andreev, 2005 – Indukaev, K.V., Andreev, V.A. (2003). The problem of sub-Rayleigh resolution in interference microscopy. *Proc. SPIE*. 5067: 240-252.

Islam et al., 2002 – Islam, M.N., Okano, T., Kato, T. (2002). Surface Phase Behavior of a Mixed System of Anionic– Nonionic Surfactants Studied by Brewster Angle Microscopy and Polarization Modulation Infrared Reflection– Absorption Spectroscopy. *Langmuir*. 18(26): 10068-10074.

Jalocha Van Hulst, 1995 – Jalocha, A., Van Hulst, N.F. (1995). Polarization contrast in fluorescence scanning near-field optical reflection microscopy. *Journal of the Optical Society of America B*. 12(9): 1577-1580.

Jamhawi et al., 2016 – Jamhawi, M., Alshawabkeh, Y., Freewan, A., Al-Gharaibeh, R. (2016). Combined laser scanner and dense stereo matching techniques for 3D modelling of heritage sites: Dar Es-Saraya museum. *Mediterranean Archaeology Archaeometry*. 16(3): 185-192.

Kang et al., 2009 – Kang, D., Suter, M.J., Boudoux, C., Yachimski, P.S., Nishioka, N.S., Mino-Kenudson, M., Lauwers G.Y., Bouma B.E., Tearney, G.J. (2009). Combined Reflection Confocal Microscopy and Optical Coherence Tomography Imaging of Esophageal Biopsy. *Gastrointestinal Endoscopy*. 69(5): AB368.

Kasztovszky et al., 2006 – Kasztovszky, Z., Belgya, T. (2006). From PGAA to PGAI: from bulk analysis to elemental mapping. *Archaeometriai Műhely*. 2: 16-21.

Kelley et al., 1994 – Kelley, S., Williams-Thorpe, O., Thorpe, R.S. (1994). Laser argon dating and geological provenancing of a stone axe from the Stonehenge environs. *Archaeometry*. 36(2): 209-216.

Kelly et al., 1969 – Kelly, T.K., Lindqvist, W.F., Muir, M.D. (1969). Y-modulation: an improved method of revealing surface detail using the scanning electron microscope. *Science*. 165(3890): 283-285.

Kockelmann Kirfel, 2006 – Kockelmann, W., Kirfel, A. (2006). Neutron diffraction imaging of cultural heritage objects. *Archeometriai Műhely*. 2: 1-15.

Krakow et al., 1976 – Krakow, W., Siegel, B.M. (1976). The investigation of multi-reflection images from small crystallites using dark-field electron microscopy. *Journal of Applied Crystallography*. 9(4): 325-334.

Kühn et al., 2009 – Kühn, J., Montfort, F., Colomb, T., Rappaz, B., Moratal, C., Pavillon, N., Marquet, P., Depeursinge, C. (2009). Submicrometer tomography of cells by multiple-wavelength digital holographic microscopy in reflection. *Optics letters*. 34(5): 653-655.

Kuisma-Kursula Räisänen, 1999 – Kuisma-Kursula, P., Räisänen, J. (1999). Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive Spectrometry and Proton Induced X-ray Emission Analyses of Medieval Glass from Koroinen (Finland). *Archaeometry*. 41(1): 71-79.

Kuleff, 2012 – Kuleff, I. (2012). Електрохимични методи в археометрията, консервацията и реставрацията. Рецензия на: A. Doménech-Carbó, MT Doménech-Carbó and V. Costa. *Electrochemical Methods in Archaeometry, Conservation and Restoration*. 2009, Springer. *Българско е-Списание за Археология*. 2(2): 137-140.

Kuzmanovski et al., 2008 – Kuzmanovski, I. (2008). Chemometrics in archaeometry. In: *Science Meets Archaeology and Art History – Balkan Symposium on Archaeometry Ohrid, Republic of Macedonia, 18th–20th September 2008*. [Electronic resource]. URL: <http://www.archaeometry.ukim.edu.mk/abstracts/igor%20kuzmanovski-ohrid.pdf>

Lahrech et al., 1996 – Lahrech, A., Bachelot, R., Gleyzes, P., Boccara, A.C. (1996). Infrared-reflection-mode near-field microscopy using an apertureless probe with a resolution of $\lambda/600$. *Optics letters*. 21(17): 1315-1317.

Landry et al., 2004 – Landry, S., McGhee, P.L., Girardin, R.J., Keeler, W.J. (2004). Monitoring live cell viability: Comparative study of fluorescence, oblique incidence reflection and phase contrast microscopy imaging techniques. *Optics express*. 12(23): 5754-5759.

Langouët, 1988 – Langouët, L. (1988). U. Leute, *Archaeometry, an introduction to physical methods in archaeology and history of art*. *ArchéoSciences, revue d'Archéométrie*. 12(1): 101-102.

Lee et al., 2011 – Lee, M., Yaglidere, O., Ozcan, A. (2011). Field-portable reflection and transmission microscopy based on lensless holography. *Biomedical optics express*. 2(9): 2721-2730.

Lee et al., 2018 – Lee, B., Jeong, J., Lee, D., Lee, B. (2018, June). LED based Off-axis Reflection Digital Holographic Microscopy using Holographic Optical Element. In: *Laser Applications to Chemical, Security and Environmental Analysis* (pp. JTU4A-6). Optical Society of America.

Lehman et al., 2010 – Lehmann, E.H., Hartmann, S., Speidel, M.O. (2010). Investigation of the content of ancient Tibetan metallic Buddha statues by means of neutron imaging methods. *Archaeometry*. 52(3): 416-428.

Leonhardt, 2007 – Leonhardt, U. (2007). Optical metamaterials: Invisibility cup. *Nature photonics*. 1(4): 207.

Leslie et al., 2006 – Leslie, K.A., Freestone, I.C., Lowry, D., Thirlwall, M. (2006). The provenance and technology of Near Eastern glass: oxygen isotopes by laser fluorination as a complement to strontium. *Archaeometry*. 48(2): 253-270.

Lessor et al., 1979 – Lessor, D.L., Hartman, J.S., Gordon, R.L. (1979). Quantitative surface topography determination by Nomarski reflection microscopy. I. Theory. *Journal of the Optical Society of America*. 69(2): 357-366.

Leute, 1992 – Leute, U. (1992). *Archaeometry. An Introduction of Physical Methods in Archaeology and the History of Art*. *Praehistorische Zeitschrift*. 67(1): 115-116.

Leuthe Riegler, 1992 – Leuthe, A., Riegler, H. (1992). Thermal behaviour of Langmuir-Blodgett films. II. X-ray and polarized reflection microscopy studies on coexisting polymorphism, thermal annealing and epitaxial layer growth of behenic acid multilayers. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 25(12): 1786.

Li et al., 2013a – Li, G., Maslov, K.I., Wang, L.V. (2013). Reflection-mode multifocal optical-resolution photoacoustic microscopy. *Journal of biomedical optics*. 18(3): 030501.

Li et al., 2013b – Li, G., Maslov, K.I., Wang, L.V. (2013). Multifocal optical-resolution photoacoustic microscopy in reflection mode. *Proc. SPIE*. 8581: 858126.

Liu et al., 2019 – Liu, Q., Chen, Y., Liu, W., Han, Y., Cao, R., Zhang, Z., Kuang C. Liu, X. (2019). Total internal reflection fluorescence pattern-illuminated Fourier ptychographic microscopy. *Optics and Lasers in Engineering*. 123: 45-52.

Longoni et al., 1998 – Longoni, A., Fiorini, C., Leutenegger, P., Sciuti, S., Fronterotta, G., Strüder, L., Lechner, P. (1998). A portable XRF spectrometer for non-destructive analyses in

archaeometry. *Nuclear instruments and methods in Physics research Section A: Accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment*. 409(1-3): 407-409.

[Loparev et al., 2012](#) – Loparev, A.V., Romash, E.V., Zenzinov, A.B., Ignat'ev, P.S., Indukaev, K.V., Osipov, P.A. (2012). Laser-based modulation-interference microscopy of optical surfaces. *Journal of Optical Technology*. 79(6): 366-370.

[Ma et al., 2016](#) – Ma, C., Di, J., Zhang, J., Li, Y., Xi, T., Li, E., Zhao, J. (2016). Simultaneous measurement of refractive index distribution and topography by integrated transmission and reflection digital holographic microscopy. *Applied optics*. 55(33): 9435-9439.

[Maidikovski et al., 2006](#) – Maidikovski, A., Yongseok, J., Magnitskiy, S., Nagorsky, N., Ejov, A., Sychev, F., Aktsipetrov, O.A. (2006, October). Reflection second-harmonic microscopy of porous silicon structures. In: *Frontiers in Optics* (p. FWE3). Optical Society of America.

[Maire et al., 2013](#) – Maire, G., Ruan, Y., Zhang, T., Chaumet, P. C., Giovannini, H., Sentenac, D., Talneau, A., Belkebir K., Sentenac, A. (2013). High-resolution tomographic diffractive microscopy in reflection configuration. *Journal of the Optical Society of America A*. 30(10): 2133-2139.

[Mallory-Greenough et al., 1999](#) – Mallory-Greenough, L.M., Greenough, J.D., Dobosi, G., Owen, J.V. (1999). Fingerprinting ancient Egyptian quarries: Preliminary results using laser ablation microprobe-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Archaeometry*. 41(2): 227-238.

[Mandelis et al., 1995](#) – Mandelis, A., McAllister, K., Christofides, C., Xenophontos, C. (1995). A pilot study in non-contact laser photothermal archaeometry of ancient statuary pedestal stones from Cyprus. *Archaeometry*. 37(2): 257-270.

[Mandracchia et al., 2017](#) – Mandracchia, B., Gennari, O., Marchesano, V., Paturzo, M., Ferraro, P. (2017). Label free imaging of cell-substrate contacts by holographic total internal reflection microscopy. *Journal of biophotonics*. 10(9): 1163-1170.

[Mannes et al., 2014](#) – Mannes, D., Benoît, C., Heinzelmann, D., Lehmann, E. (2014). Beyond the Visible: Combined Neutron and X-ray Imaging of an Altar Stone from the Former Augustinian Church in Fribourg, Switzerland. *Archaeometry*. 56(5): 717-727.

[Mara et al., 2009](#) – Mara, H., Breuckmann, B., Lang-Auinger, C. (2009). Multi-spectral high-resolution 3D-acquisition for rapid archaeological documentation and analysis. In: *2009 17th European Signal Processing Conference* (pp. 1205-1209). IEEE.

[Maslov et al., 2005](#) – Maslov, K., Stoica, G., Wang, L.V. (2005). In vivo dark-field reflection-mode photoacoustic microscopy. *Optics letters*. 30(6): 625-627.

[Mata et al., 2002](#) – Mata, M.P., Peacor, D.R., Gallart-Martí, M.D. (2002). Transmission electron microscopy (TEM) applied to ancient pottery. *Archaeometry*. 44(2): 155-176.

[Matlock et al., 2018](#) – Matlock, A., Sentenac, A., Yi, J., Tian, L. (2018, June). First Born model for reflection-mode Fourier ptychographic microscopy. In: *Mathematics in Imaging* (pp. MM3D-2). Optical Society of America.

[Matlock et al., 2020](#) – Matlock, A., Sentenac, A., Chaumet, P.C., Yi, J., Tian, L. (2020). Inverse scattering for reflection intensity phase microscopy. *Biomedical Optics Express*. 11(2): 911-926.

[Matrecano et al., 2014](#) – Matrecano, M., Calabuig, A., Paturzo, M., Ferraro, P. (2014, May). Common-path configuration in total internal reflection digital holography microscopy. *Proc. SPIE*. 9132: 91321I.

[Maurstad et al., 2008](#) – Maurstad, G., Mørch, Y.A., Bausch, A.R., Stokke, B.T. (2008). Polyelectrolyte layer interpenetration and swelling of alginate–chitosan multilayers studied by dual wavelength reflection interference contrast microscopy. *Carbohydrate polymers*. 71(4): 672-681.

[Medhat et al., 2015](#) – Medhat, A., Ali, M., Abdel-Ghani, M. (2015). Analytical investigation on a Coptic wooden icon from the 18th century using SEM-EDX microscopy and FTIR spectroscopy. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*. 15: 151-161.

[Milazzo, 2004](#) – Milazzo, M. (2004). Radiation applications in art and archaeometry: X-ray fluorescence applications to archaeometry. Possibility of obtaining non-destructive quantitative analyses. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 213: 683-692.

[Miljković Gajski, 2016](#) – Miljković, V., Gajski, D. (2016). Adaptation of industrial hyperspectral line scanner for archaeological applications. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 5: 343-345.

Mohamed et al., 2011 – Mohamed, E.A., Kamanyi, A., von Buttlar, M., Wannemacher, R., Hillmann, K., Ngwa, W., Grill, W. (2011). Ultra-high resolution thin film thickness delineation using reflection phase-sensitive acoustic microscopy. In: *Acoustical Imaging* (pp. 125-134). Springer, Dordrecht.

Moroni Petrelli, 2005 – Moroni, B., Petrelli, M. (2005). Geochemical characterization of flint artifacts by inductively coupled plasma-mass spectrometry with laser sampling (LA-ICP-MS): results and prospects. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*. 5(2): 49-62.

Müller et al., 2003 – Müller, M., Papiz, M.Z., Clarke, D.T., Roberts, M.A., Murphy, B.M., Burghammer, M., Gunneweg, J. (2003). Identification of the textiles from Khirbet Qumran using microscopy and synchrotron radiation x-ray fibre diffraction. *Archaeological Excavations at Khirbet Qumran and Ain Feshka-Studies in Archaeometry and Anthropology*. 2: 277-286.

Müller Stege, 2003 – Müller, K., Stege, H. (2003). Evaluation of the analytical potential of laser-induced breakdown spectrometry (LIBS) for the analysis of historical glasses. *Archaeometry*. 45(3): 421-433.

Nikoonahad et al., 1983 – Nikoonahad, M., Sivaprakasapillai, P., Ash, E.A. (1983). Rayleigh wave suppression in reflection acoustic microscopy. *Electronics Letters*. 19(22): 906-908.

Okoro et al., 2018 – Okoro, C., Kelkar, V., Sivaguru, M., Emmadi, R., Toussaint, K.C. (2018). Second-harmonic patterned polarization-analyzed reflection confocal microscopy of stromal collagen in benign and malignant breast tissues. *Scientific reports*. 8(1): 16243.

Olveczky et al., 1997 – Olveczky, B.P., Periasamy, N., Verkman, A.S. (1997). Mapping fluorophore distributions in three dimensions by quantitative multiple angle-total internal reflection fluorescence microscopy. *Biophysical journal*. 73(5): 2836-2847.

Oravec et al., 1984 – Oravec, M., Vorres, C., Kessler, L.W. (1984). Acoustical Imaging/NDE of Complex Geometries Using Refraction and Reflection Transmission Techniques in Acoustic Microscopy. In: *Acoustical imaging* (pp. 89-89). Springer, Boston, MA.

Park Park, 1989 – Park, K., Park, H. (1989). Application of video-enhanced interference reflection microscopy to the study of platelet-surface interactions. *Scanning microscopy*. (Supplement 3): 137-45.

Paterson et al., 2017 – Paterson, R.A., Lowe, B.J., Smith, C.A., Lord, J.M., Ngarimu-Cameron, R. (2017). Polarized light microscopy: an old technique casts new light on Māori textile plants. *Archaeometry*. 59(5): 965-979.

Pelagotti et al., 2018 – Pelagotti, A., Pronti, L., Massa, E., Galeotti, M., Felici, A.C. (2018, June). Multispectral Reflectance and UV Fluorescence Microscopy to study painting's cross sections. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 364: 012064.

Peng Cowley, 1987 – Peng, L.M., Cowley, J.M. (1987). Diffraction contrast in reflection electron microscopy—I. Screw dislocation. *Micron and Microscopica Acta*. 18(3): 171-178.

Peng et al., 1987 – Peng, L.M., Cowley, J.M., Hsu, T. (1987). Diffraction contrast in reflection electron microscopy—II. Surface steps and dislocations under the surface. *Micron and Microscopica Acta*. 18(3): 179-186.

Pereira et al., 2013 – Pereira, M.S., Marques, J.G., Santos, J.P., Burbidge, C.I., Dias, M.I., Prudêncio, M.I. (2013). Neutron imaging techniques applied to studies in the archaeological and cultural heritage fields. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*. 13(3): 137-143.

Pettinelli et al., 2012 – Pettinelli, E., Barone, P. M., Di Matteo, A., Mattei, E., Lauro, S.E. (2012). Mapping the undiscovered ruins of Pompeii (Naples, Italy) using ground penetrating radar. *Archaeometry*. 54(1): 203-212.

Polak et al., 1983 – Polak, M., Baram, J., Pelleg, J. (1983). Auger electron microscopy applied to the analysis of archaeological artifacts. *Archaeometry*. 25(1): 59-67.

Polikreti Christofides, 2010 – Polikreti, K., Christofides, C. (2010). Composition profiles and time evolution of buried marble patinas by LA-ICP-MS and laser-induced micro-photo-luminescence. *Archaeometry*. 52(6): 937-948.

Ponting et al., 2003 – Ponting, M., Evans, J. A., Pashley, V. (2003). Fingerprinting of Roman mints using laser-ablation MC-ICP-MS lead isotope analysis. *Archaeometry*. 45(4): 591-597.

Prieve Frej, 1990 – Prieve, D.C., Frej, N.A. (1990). Total internal reflection microscopy: a quantitative tool for the measurement of colloidal forces. *Langmuir*. 6(2): 396-403.

Radpour, 2019 – Radpour, R. (2019). Advanced Imaging Spectroscopy and Chemical Sensing in Archaeometry and Archaeological Forensics (Doctoral dissertation, UCLA).

Raedler Sackmann, 1992 – Raedler, J., Sackmann, E. (1992). On the measurement of weak repulsive and frictional colloidal forces by reflection interference contrast microscopy. *Langmuir*. 8(3): 848-853.

Raepsaet, 1989 – Raepsaet, G. (1989). Ulrich Leute, Archaeometry. An Introduction to Physical Methods in Archaeology and the History of Art. *L'Antiquité Classique*. 58(1): 510-510.

Redondo-Marugán et al., 2017 – Redondo-Marugán, J., Piquero-Cilla, J., Doménech-Carbó, M.T., Ramírez-Barat, B., Al Sekhaneh, W., Capelo, S., Doménech-Carbó, A. (2017). Characterizing archaeological bronze corrosion products intersecting electrochemical impedance measurements with voltammetry of immobilized particles. *Electrochimica Acta*. 246: 269-279.

Reiche et al., 2002 – Reiche, I., Vignaud, C., Menu, M. (2002). The crystallinity of ancient bone and dentine: new insights by transmission electron microscopy. *Archaeometry*. 44(3): 447-459.

Rentz Dupuis et al., 2008 – Rentz Dupuis, J., Needham, J., Özkumur, E., Bergstein, D.A., Goldberg, B.B., Engel, J.R., Carlson, D.L., Ünlü, M.S. (2008). Hyperspectral Fourier transform spectrometer for reflection spectroscopy and spectral self-interference fluorescence microscopy. *Applied Optics*. 47: 1223-1234.

Richards et al., 2001 – Richards, R.G., Stiffanic, M., Owen, G.R., Riehle, M., Ap Gwynn, I., Curtis, A.S.G. (2001). Immunogold labelling of fibroblast focal adhesion sites visualised in fixed material using scanning electron microscopy, and living, using internal reflection microscopy. *Cell biology international*. 25(12): 1237-1249.

Rosa-Molinar et al., 1984 – Rosa-Molinar, E., Howard, G., Williams, C.S. (1984). Notes on the use of Y-modulation imaging in studies of cuticular surfaces of larval (Philometridae) nematodes. *Journal of Electron Microscopy Technique*. 1(3): 311-312.

Roy et al., 2011 – Roy, S., Parks, D., Seu, K. A., Su, R., Turner, J. J., Chao, W., Cabrini S., Kevan, S.D. (2011). Lensless X-ray imaging in reflection geometry. *Nature Photonics*. 5(4): 243.

Santos et al., 2009 – Santos, J.O., Munita, C.S., Toyota, R.G., Vergne, C., Silva, R.S., Oliveira, P.M.S. (2009). The archaeometry study of the chemical and mineral composition of pottery from Brazil's Northeast. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 281(2): 189-192.

Sarmis et al., 2010 – Sarmis, M., Simon, B., Debailleul, M., Colicchio, B., Georges, V., Delaunay, J.J., Haeberle, O. (2010). High resolution reflection tomographic diffractive microscopy. *Journal of Modern Optics*. 57(9): 740-745.

Sauter et al., 2002 – Sauter, F., Varmuza, K., Werther, W., Stadler, P. (2002). Studies in organic archaeometry V: Chemical analysis of organic material found in traces on an Neolithic terracotta idol statuette excavated in lower Austria. *ARKIVOC*. 1: 54-60.

Scharlotta et al., 2011 – Scharlotta, I., Gilstrap, W., Neff, H. (2011). No Stone Unburned: A Compositional Analysis of Obsidian Microdebitage by Laser Ablation TOF-ICP-MS. *Archaeometry*. 53(5): 873-889.

Schilling et al., 2004 – Schilling, J., Sengupta, K., Goennenwein, S., Bausch, A.R., Sackmann, E. (2004). Absolute interfacial distance measurements by dual-wavelength reflection interference contrast microscopy. *Physical Review E*. 69(2): 021901.

Scott, 1995 – Scott, G.D. (1995). A study of the Lycurgus Cup. *Journal of Glass Studies*. 37: 51-64.

Seaberg, 2014 – Seaberg, M.D. (2014). Nanoscale EUV microscopy on a tabletop: a general transmission and reflection mode microscope based on coherent diffractive imaging with high harmonic illumination (Doctoral dissertation, University of Colorado).

Shaus et al., 2019 – Shaus, A., Sober, B., Tzang, O., Ioffe, Z., Cheshnovsky, O., Finkelstein, I., Piasetzky, E. (2019). Raman Binary Mapping of Iron Age Ostrakon in an Unknown Material Composition and High-Fluorescence Setting – A Proof of Concept. *Archaeometry*. 61(2): 459-469.

Simmert et al., 2018 – Simmert, S., Abdosamadi, M. K., Hermsdorf, G., Schäffer, E. (2018). LED-based interference-reflection microscopy combined with optical tweezers for quantitative three-dimensional microtubule imaging. *Optics express*. 26(11): 14499-14513.

Simonetti et al., 2008 – Simonetti, A., Buzon, M.R., Creaser, R.A. (2008). In-situ elemental and Sr isotope investigation of human tooth enamel by laser ablation-(MC)-ICP-MS: Successes and pitfalls. *Archaeometry*. 50(2): 371-385.

Smith, 2003 – *Smith, D.C.* (2003). In situ mobile subaquatic archaeometry evaluated by non-destructive Raman microscopy of gemstones lying under impure waters. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 59(10): 2353-2369.

Somers et al., 2005 – *Somers, L., Linford, N., Penn, W., David, A., Urry, L., Walker, R.* (2005). Fixed-frequency radio-wave imaging of subsurface archaeological features: a minimally invasive technique for studying archaeological sites. *Archaeometry*. 47(1): 159-173.

Song et al, 2008 – *Song, L., Maslov, K.I., Bitton, R., Shung, K.K., Wang, L.V.* (2008). Fast 3-D dark-field reflection-mode photoacoustic microscopy in vivo with a 30-MHz ultrasound linear array. *Journal of biomedical optics*. 13(5): 054028.

Song et al., 2016 – *Song, W., Xu, Q., Zhang, Y., Zhan, Y., Zheng, W., Song, L.* (2016). Fully integrated reflection-mode photoacoustic, two-photon, and second harmonic generation microscopy in vivo. *Scientific reports*. 6: 32240.

Spitzer-Aronson, 1986 – *Spitzer-Aronson, M.* (1986). Laser, X-ray microfluorescence and microscopic studies of metallic luster on ancient overglazed ceramics. In: *Proceedings of the 24th International Archaeometry Symposium* (pp. 419-429).

Stemp et al., 2018 – *Stemp, W.J., Lerner, H.J., Kristant, E.H.* (2018). Testing Area-Scale Fractal Complexity (Asfc) and Laser Scanning Confocal Microscopy (LSCM) to Document and Discriminate Microwear on Experimental Quartzite Scrapers. *Archaeometry*. 60(4): 660-677.

Suci et al., 2001 – *Suci, P.A., Geesey, G.G., Tyler, B.J.* (2001). Integration of Raman microscopy, differential interference contrast microscopy, and attenuated total reflection Fourier transform infrared spectroscopy to investigate chlorhexidine spatial and temporal distribution in *Candida albicans* biofilms. *Journal of microbiological methods*. 46(3): 193-208.

Sun Shen, 2003 – *Sun, W.X., Shen, Z.X.* (2003). Apertureless near-field scanning Raman microscopy using reflection scattering geometry. *Ultramicroscopy*. 94(3-4): 237-244.

Suzuki, 1998 – *Suzuki, S.* (1998). Reflection type high-speed holographic microscopy to photograph crack bifurcation. In: *Experimental Mechanics, Advances in design, testing and analysis (Proc. 11th Int. Conf on Experimental Mechanics, 1998)*, pp. 583-588. Balkema.

Szilágyi et al., 2016 – *Szilágyi, V., Kis, Z., Szentmiklósi, L.* (2016). Neutron imaging for archaeometry. *Archeometriai Muhely*. 13(3): 157-172.

Takeno et al., 2008 – *Takeno, S., Koike, M., Tanaka, H., Kinno, T., Tomita, M., Uesugi, F.* (2008). Forbidden reflection based dark field transmission electron microscopy for the evaluation of local lattice distortion in epitaxial thin films. *Surface and Interface Analysis*. 40(13): 1655-1659.

Temple, 1981 – *Temple, P.A.* (1981). Total internal reflection microscopy: a surface inspection technique. *Applied optics*. 20(15): 2656-2664.

Then-Obluska Wagner, 2019 – *Then-Obluska, J., Wagner, B.* (2019). Glass beads and pendants from Meroitic and Nobadian Lower Nubia, Sudan: Chemical compositional analysis using laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. *Archaeometry*. 61(4): 856-873.

Treacy et al., 1999 – *Treacy, M. M., Krishnan, A., Dujardin, E., Yianilos, P., Ebbesen, T.* (1999). "Y Contrast" Of Single Shell Carbon Nanotubes: Determination Of Young's Modulus By Observing Thermal Vibrations. *Microscopy and Microanalysis*. 5(2): 676-677.

Trojanowicz, 2008 – *Trojanowicz, M.* (2008). Modern chemical analysis in archaeometry. *Analytical and bioanalytical chemistry*. 391(3): 915-918.

Trojanowicz, 2010 – *Trojanowicz, M.* (2010). Antonio Doménech-Carbó, Maria Teresa Doménech-Carbó, Virginia Costa: Electrochemical methods in archaeometry, conservation and restoration. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 397(7): 2623-2624.

Vaughan, 2008 – *Vaughan, A.* (2008). Raman nanotechnology-the Lycurgus Cup. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 24(6): 4.

Verhoeven et al., 2012 – *Verhoeven, G., Taelman, D., Vermeulen, F.* (2012). Computer vision-based orthophoto mapping of complex archaeological sites: The ancient quarry of Pitaranha (Portugal–Spain). *Archaeometry*. 54(6): 1114-1129.

Vindel et al., 2018 – *Vindel, E., García, J., Gumiel, C., López-Acevedo, V., Hernando, M.* (2018). The contribution of transmission electron microscopy (TEM) to understanding pre-columbian goldwork technology. *Archaeometry*. 60(2): 342-349.

von Olshausen Rohrbach, 2013 – *von Olshausen, P., Rohrbach, A.* (2013). Coherent total internal reflection dark-field microscopy: label-free imaging beyond the diffraction limit. *Optics letters*. 38(20): 4066-4069.

von Olshausen, 2012 – von Olshausen, P. (2012). Total Internal Reflection Microscopy: Super-resolution Imaging of Bacterial Dynamics and Dark Field Imaging: Totalreflexionsmikroskopie: Superauflösende Mikroskopie Von Dynamik in Bakterien und Dunkelfeld Mikroskopie (Doctoral dissertation, Universität of Freiburg).

Weymouth, 1990 – Weymouth, J. (1990). Archaeometry: An Introduction to Physical Methods in Archaeology and the History of Art. Ulrich Leute. VCH Publishers, New York, 1987. xi+176 pp., appendix, literature, index. \$25.00 (cloth). *American Antiquity*. 55(1): 189-190.

Wickramasinghe, 1978 – Wickramasinghe, H.K. (1978). Contrast in reflection acoustic microscopy. *Electronics Letters*. 14(10): 305-306.

Wiegand, 1998 – Wiegand, G., Neumaier, K. R., Sackmann, E. (1998). Microinterferometry: three-dimensional reconstruction of surface microtopography for thin-film and wetting studies by reflection interference contrast microscopy (RICM). *Applied optics*. 37(29): 6892-6905.

Winemiller et al., 2018 – Winemiller, T.L., Ochoa-Winemiller, V., Ludwig, J. (2018). Assessing Surface Correspondence and Trade of Maya Figurines and Moulds Using Multi-Stripe Laser Technology and Metrology. *Archaeometry*. 60(5): 1002-1017.

Wojcieszak Wadley, 2018 – Wojcieszak, M., Wadley, L. (2018). Raman spectroscopy and scanning electron microscopy confirm ochre residues on 71 000-year-old bifacial tools from Sibudu, South Africa. *Archaeometry*. 60(5): 1062-1076.

Wu et al., 1998 – Wu, F., Gericke, A., Flach, C. R., Mealy, T. R., Seaton, B. A., Mendelsohn, R. (1998). Domain structure and molecular conformation in annexin V/1, 2-dimyristoyl-sn-glycero-3-phosphate/Ca²⁺ aqueous monolayers: a Brewster angle microscopy/infrared reflection-absorption spectroscopy study. *Biophysical journal*. 74(6): 3273-3281.

Wu et al., 2001 – Wu, F., Corsico, B., Flach, C. R., Cistola, D. P., Storch, J., Mendelsohn, R. (2001). Deletion of the helical motif in the intestinal fatty acid-binding protein reduces its interactions with membrane monolayers: Brewster angle microscopy, IR reflection-absorption spectroscopy, and surface pressure studies. *Biochemistry*. 40(7): 1976-1983.

Xiao, 1997 – Xiao, M. (1997). Polarization effects in reflection scanning near field optical microscopy. *Optics communications*. 136(3-4): 213-218.

Yafei et al., 2016 – Yafei, L., Wenbin, Z., Tianxu, X., Yongzhi, T., Maotian, G., Erjun, L., Fengying, M. (2016). Study on In-Line Incoherent Digital Holographic Microscopy in Reflection Configuration. *Chinese Journal of Lasers*. (11): 29.

Yagi, 1987 – Yagi, K. (1987). Reflection electron microscopy. *Journal of applied crystallography*. 20(3): 147-160.

Yaqoob et al., 2011 – Yaqoob, Z., Yamauchi, T., Choi, W., Fu, D., Dasari, R. R., Feld, M.S. (2011). Single-shot full-field reflection phase microscopy. *Optics express*. 19(8): 7587-7595.

Yuan et al., 2007 – Yuan, C., Zhai, H., Wang, X., Wu, L. (2007). Lensless digital holography with short-coherence light source for three-dimensional surface contouring of reflecting micro-object. *Optics communications*. 270(2): 176-179.

Zand Albrecht-Buehler, 1989 – Zand, M.S., Albrecht-Buehler, G. (1989). Long-term observation of cultured cells by interference-reflection microscopy: Near-infrared illumination and Y-contrast image processing. *Cell motility and the cytoskeleton*. 13(2): 94-103.

Zhang et al., 2012 – Zhang, C., Maslov, K.I., Hu, S., Wang, L.V., Chen, R., Zhou, Q., Shung, K.K. (2012). Reflection-mode submicron-resolution in vivo photoacoustic microscopy. *Journal of biomedical optics*. 17(2): 020501.

Zhang, 2015 – Zhang, B. (2015). EUV Microscopy with a Tabletop High Harmonic Generation Source: Generalizing Coherent Diffractive Imaging to Extended Samples in Transmission, Reflection, and Hyperspectral Modalities (Doctoral dissertation, University of Colorado).

Zhu et al., 2016 – Zhu, T.Q., Zhang, Y.C., Xiong, H., Feng, Z.Y., Li, Q., Cao, B.L. (2016). Comparison of the Different Types of Qinghua Porcelain from Jingdezhen in the Yuan Dynasty of China (ad 1271–1368) by Micro X-ray Fluorescence Spectroscopy (μ -XRF) and Microscopy. *Archaeometry*. 58(6): 966-978.

Zilker et al., 1987 – Zilker, A., Engelhardt, H., Sackmann, E. (1987). Dynamic reflection interference contrast (RIC-) microscopy: a new method to study surface excitations of cells and to measure membrane bending elastic moduli. *Journal De Physique*. 48(12): 2139-2151.

Zinin, 1994 – Zinin, P., Weise, W., Lobkis, O., Kolosov, O., Boseck, S. (1994). Fourier optics analysis of spherical-particles image-formation in reflection acoustic microscopy. *Optik*. 98(2): 45-60.

Экзотические многоканальные и позиционно-чувствительные методы высокого разрешения для физико-химической археометрии

Олег Валерьевич Градов^{a, *}, Андрей Анатольевич Скрынник^b

^a ФИЦ ХФ РАН, Российская Федерация

^b ИНЭПХФ РАН, Российская Федерация

Аннотация. Целью данного обзора является обоснование принципиальной возможности НИР, связанных с археологическим и антропологическим материалом, на инфраструктуре, на которой ранее производились работы в области физической химии, химической и биохимической физики. Оценка возможностей базируется на анализе литературы в области археометрии и археологической аналитики, а также структурного анализа для геоархеологических и археоминералогических приложений. На этой основе выдвинут план нескольких направлений работ – в которых могут быть задействованы и обучены не только специалисты физико-химического профиля, но и историки/археологи (etc.), поскольку пользовательская простота современной имплементации данных методов, в принципе, позволяет освоить их при различных (не физико-химических) направлениях специальной подготовки, начиная с раннего студенческого периода. Не являясь столь сложным в имплементации, проведение работ позволит не только достигнуть уровня прогрессивных зарубежных археометрических лабораторий, но и сделать вклад в DIY-science/гражданскую науку (citizen science), привлекая обучающихся в гуманитарных областях к решению ставящихся ими проблем методами строгой науки более высокой технико-методической организации, публикуемой в высокоуровневых изданиях, в том числе – повышая методический уровень некоторых археологических изданий.

Ключевые слова: многоканальная археометрия, мультиспектральная археометрия, спектральная археометрия, позиционно-чувствительные методы, физико-химическая археометрия, микроскопия, картирование.

* Корреспондирующий автор

Адреса электронной почты: o.v.gradov@gmail.com (О.В. Градов),
retromicroscopy@gmail.com (А.А. Скрынник)

Copyright © 2024 by Cherkas Global University



Published in the USA
 European Reviews of Chemical Research
 Issued since 2014.
 E-ISSN: 2413-7243
 2024. 11(1): 50-57

DOI: 10.13187/erchr.2024.1.50
<https://erchr.cherkasgu.press>



History of Science

Sergey Vasilyevich Lebedev (1874–1934): a Biographical Essay to the 150th Anniversary of the Birth of the Russian Chemist

Anvar M. Mamadaliev ^{a,*}

^a East European Historical Society, Russian Federation

Abstract

The biographical sketch is dedicated to the 150th anniversary of the birth of the Russian chemist Sergei Vasilyevich Lebedev (1874–1934). The material was biographical research on the life path and scientific heritage of the Soviet academician. The methodology consists of the content analysis method, the synthesis method, etc.

Lebedev became famous for his research in the field of synthesis of new polymers. In 1927, he received the world's first industrial synthetic rubber; this discovery played a crucial role in the development of industry in general, and the development of synthetic materials in particular. His work marked the beginning of many modern technologies that are used in the production of rubber and other polymer materials.

The scientist actively participated in scientific public life, publishing the results of his research in a number of scientific publications. Lebedev also engaged in pedagogical activities, teaching future generations of chemists and researchers.

Sergey Vasilyevich Lebedev became a pioneer in his field of knowledge, and his scientific achievements are widely used to this day. His name has become synonymous with innovations in chemistry and industry.

Keywords: Sergey Vasilyevich Lebedev, 1874–1934, chemistry, Russian science, rubber, industrial method for producing rubber, synthesis of rubbers, “Lebedev's reaction”, ethanol dehydration.

1. Введение

Сергей Васильевич Лебедев (1874–1934) – выдающийся российский ученый дореволюционного и советского периодов, основоположник и пионер в области полимерных наук. Его жизнь и научная карьера оставили глубокий след в химической науке, особенно в области синтетических материалов. Он получил образование в Московском университете, где затем начал свою научную карьеру. Лебедев активно работал в области органической химии, сосредоточив свои усилия на изучении свойств и синтеза полимеров.

Данная работа посвящена 150-летию юбилею со дня рождения Сергея Васильевича Лебедева.

* Corresponding author

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

2. Материалы и методы

Материалом послужили работы самого Лебедева и биографические исследования о нем. Из его исследований получили известность статьи о полимеризации двуэтиленовых углеводородов (Лебедев, 1909), этиленовых соединений (Лебедев, 1922), особенностям производства и свойствам синтетического каучука (Лебедев, 1935) и полимеризации фенил-1-бутадиена-1,3 как предшественника синтетического каучука при промышленном изготовлении (Лебедев, Иванов, 1916) и др. Диссертационное исследование на соискание ученой степени доктора наук по химии также было посвящено исследованию полимеризации двуэтиленовых углеводородов (Лебедев, 1913) и защищено в 1913-м году.

В качестве биографических материалов были использованы труды А.Е. Арбузова (Арбузов, 1954; Арбузов, 1944), А.П. Остроумовой-Лебедевой (Остроумова-Лебедева, 1954), Ю.А. Горина и К.Б. Пиотровского (Горин, 1954; Горин, Пиотровский, 1949; Пиотровский, 1968), С.Р. Сергиенко (Сергиенко, 1954; Сергиенко, 1953), А.И. Якубчик (Якубчик, 1954), Г.В. Григорян, Н.П. Борейко (Григорян, Борейко, 2014), Г.С. Ильиной (Ильина, 2023), Е.Е. Щадиловой (Щадилова, 2015), В.А. Волкова (Волков и др., 1991) и др.

Методами исследования послужили такие научные методы как контент-анализ (применен для изучения историографического комплекса по биографии и наследию Лебедева), метод синтеза (для формулирования результатов и выводов данной рукописи) и др.

3. Обсуждение

Историографию биографических исследований удобно разделить на советскую и современного периода. Что касается дореволюционных исследований, то таковых практически нет, так как в это время Лебедев был еще молод и мало известен. Зато в это время сам ученый весьма активно публиковался в научных изданиях.

Среди советских исследований отметим фундаментальный 264-страничный труд академика А.Е. Арбузова и его соавторов «Академик Сергей Васильевич Лебедев: к 80-летию со дня рождения» (Арбузов, 1954), в котором авторы делают глубокий биографический анализ личности Лебедева, его научные достижения, общественную и трудовую деятельность в системе социалистических отношений и пр. Авторству Арбузова также принадлежит доклад на конференции «Успехи химии», по результатам которой был сформирован соответствующий сборник научных трудов (Арбузов, 1944).

Другим фундаментальным биографическим трудом является монография К.Б. Пиотровского «Лебедев в Петербурге – Петрограде – Ленинграде» (Пиотровский, 1968).

Значительный интерес представляет и сборник трудов Лебедева в области синтеза искусственного каучука, изданный Ю.А. Гориним и К.Б. Пиотровским (Горин, Пиотровский, 1949).

В 1954 году выходит сборник трудов «Академик Сергей Васильевич Лебедев», изданный под грифом Академии наук СССР, в котором публикуются статьи о достижениях С.В. Лебедева. Одними из таких является глубокое биографическое исследование Анны Петровны Остроумовой-Лебедевой о своем супруге, с которым она прожила почти 30 лет до самой смерти академика (Остроумова-Лебедева, 1954), работа Ю.А. Горина об исследованиях Лебедева синтеза 2-винила из этанола (Горин, 1954), статья С.Р. Сергиенко о значении теоретических изысканий А.М. Бутлерова в практических достижениях Лебедева (Сергиенко, 1954), труд А.И. Якубчик, которая сделала анализ исследований Лебедевым строения синтетических каучуков (Якубчик, 1954) и др.

В советское время был также опубликован ряд статей в периодических изданиях, посвященных биографии С.В. Лебедева (см., в частности, Сергиенко, 1953).

Современные биографические исследования личности С.В. Лебедева и его научных достижений представляют собой статьи в периодических изданиях. Среди таковых отметим работу Г.В. Григорян, Н.П. Борейко о научном наследии Лебедева (Григорян, Борейко, 2014), Г.С. Ильиной о масштабах вклада академика в развитие органической химии (Ильина, 2023), а также биографическую статью Е.Е. Щадиловой об основных вехах пути ученого (Щадилова, 2015). Особняком стоит работа Ю.М. Пирютко, посвященная надгробным памятникам известных людей, в том числе и С.В. Лебедева (Пирютко, 2011).

Нельзя не отметить и различные энциклопедические издания; помимо Большой советской энциклопедии, материал о Лебедеве содержится и в тематическом

энциклопедическом издании «Выдающиеся химики мира», выполненный В.А. Волковым и соавторами (Волков и др., 1991).

Указанный библиографический перечень не является полным, однако представляется достаточным, учитывая цели данной рукописи.

4. Результаты

Сергей Васильевич Лебедев (Рисунок 1) родился в 1874 году в Российской империи в г. Люблин, который сегодня находится в Польше. Некоторые биографические тонкости известны благодаря второй супруге Лебедева – Анне Павловне Остроумовой, которая приходилась ему кузиной (двоюродной сестрой); именно она весьма подробно описала детство и юность ученого (Остроумова-Лебедева, 1954: 19-59). Родители достаточно рано связали себя узами брака, а сама семья была верующей (отец Сергея впоследствии и вовсе принял священный сан), многодетной и небогатой. Финансовое положение особенно ухудшилось после смерти от туберкулеза главы семьи, когда Сергею было 8 лет; вместе с матерью, дети переехали в Варшаву к ее родителям (Остроумова-Лебедева, 1954: 19-20).

Как указывает А.П. Остроумова-Лебедева, ее муж с юности проявлял одаренность, обладал красотой, отличался хорошим здоровьем и воспитанием, «...в нем ярко проявлялась большая одаренность, нравственная чистота, правдивость и благородство души. Был он молчалив и серьезен, с примесью насмешки, легкого сарказма и молодого скептицизма» (Остроумова-Лебедева, 1954: 20).



Рис. 1. Сергей Васильевич Лебедев (1874–1934)

Стесненность в средствах заставила молодого варшавского гимназиста заниматься подработками, в частности, репетиторством. Однако свою будущую деятельность Лебедев уже относительно четко представлял, поступив на физмат Санкт-Петербургского университета. Увлечение на старших курсах университета социалистическими идеями и участие в забастовочном и общественном движении в 1899 году, которые были предтечей Первой русской революции, привели к тому, что Лебедева арестовывают и изгоняют из столицы. Он вынужден переехать к родственникам в село недалеко от Петербурга, однако позднее смог получить разрешение продолжить обучение и в следующем году получил диплом о высшем образовании (Остроумова-Лебедева, 1954: 21).

В начале 1900-х годов живет тем, что работает лаборантом в лабораториях различных предприятий, попутно преподавая в гимназиях и других средне-технических учебных заведениях. Желая посмотреть мир, перебирается в г. Париж в Сорбонну, работая у французского химика русского происхождения Виктора Алексеевича Анри.

В личной жизни также произошли изменения: Сергей Васильевич развелся с первой женой, на которой женился еще будучи студентом, и связал себя браком со своей двоюродной сестрой Анной, которая была старше его на три года и благодаря которой мы знаем многие биографические моменты ученого.

Знакомство с учеником прославленного русского химика-органика А. Бутлерова, профессором А.Е. Фаворским, у которого Лебедев когда-то работал в университетской лаборатории, привело будущего советского академика к серьезному изучению полимеризации органики. В 1908-м году он делает доклад о полимеризации эфиров пропеновой кислоты перед лучшими учеными-химиками Российской империи на собрании Русского физико-химического общества, а в 1909-м году публикует свою первую статью «О полимеризации двуэтиленовых углеводородов», опубликованную в двух выпусках (№ 41-42) «Журнала русского химического общества» (Лебедев, 1909).

В 1913 году Лебедев защищает докторскую диссертацию по химии с получением премии и золотой медали от Петербургской академии наук, многие положения которой станут важными постулатами органической химии, в частности: «большинство непредельных органических соединений, может быть заполимеризовано лишь при помощи энергично действующих агентов, так сказать насильственно... ..Поэтому особенную теоретическую ценность должны представлять те процессы полимеризации, которые протекают самопроизвольно при невысоких температурах, когда исследователь может иметь в руках в неизменном виде те формы, в которые складываются молекулы и совокупность которых рисует картину процесса» (Лебедев, 1913: 19, 32).

С началом войны вполне естественно, что ведущий химик страны был задействован в военном производстве, заведя лабораторией по выпуску взрывчатых веществ. Напряженный график, вредные производственные условия и невнимание к собственному здоровью привели к заболеванию туберкулезом, к которому был склонен ученый, поэтому Лебедев был вынужден уехать на юг, где лечился в течение нескольких месяцев. Преподавал в Женском педагогическом институте, позднее стал заведующим кафедрой Военно-медицинской академии, продолжая при этом заниматься химической наукой и выступать с докладами (Арбузов, 1954).

Жизнь после буржуазной, а впоследствии социалистической революции 1917-го года сложилась для Лебедева весьма плодотворно и удачно; как уже было сказано выше, он всецело разделял социалистические идеи.

Всемирную известность Лебедеву принесло открытие промышленного способа изготовления синтетического каучука, которым человечество пользуется вплоть до сегодняшнего дня.

В 1925–1927 годах он экспериментировал с переработкой нефти и побочными продуктами нефтеперегонки, даже создав лабораторию нефтепереработки при Ленинградском университете. В конце 1926 года правительство объявляет конкурс на лучший метод по созданию искусственного каучука. Лебедев переименовывает лабораторию нефтепереработки в лабораторию синтетического каучука и с помощью коллег по университету открывает способ синтеза каучука из спирта, отправив полученный двухкилограммовый образец в Москву на экспертизу. Результаты эксперимента признали весьма ценными. Нельзя в этой связи не согласиться с академиком А.Е. Арбузовым, что «...надо было быть таким искусным экспериментатором, каким был С.В. Лебедев, чтобы в короткий срок, почти без всяких помощников, провести сложнейшую предварительную работу и синтезировать десятки капризных неустойчивых соединений...» (Арбузов, 1944: 253).

В 1930 году начинается строительство экспериментального завода по производству синтетического каучука* под руководством С.В. Лебедева. Первоначально был получен

* В настоящее время – «Научно-исследовательский институт синтетического каучука имени С.В. Лебедева».

дивинил, из которого 30 декабря 1930 года (Якубчик, 1954: 210)* был синтезирован блок каучука – однородного качества, в большом количестве (блок весил 260 кг) и при невысокой стоимости производства. Это открытие сделало революцию в мировой промышленности, одновременно дав значительный скачок массовому автомобилестроению.

Советское правительство не оставило без внимания и социальной поддержки великого ученого: ему подарили автомобиль – большую роскошь в те времена в мире, особенно в СССР, представили к высшей государственной награде Советского Союза – Ордену Ленина, он стал членом Академии наук, а также имел возможность уезжать в отпуск и выходные в арендованную в пригороде (в Детском (бывш. Царском) Селе, в настоящее время – г. Пушкин) квартиру, чтобы побыть в уединении наедине с прекрасной царско-сельской природой и архитектурой, позабыв городскую суету.

Однако постоянные командировки и плотный график привели к большому истощению подорванного в молодости здоровья: в одной из командировок Лебедев заразился сыпным тифом, от которого умер в 1934 году в зените славы. Был похоронен в Ленинграде в Некрополе мастеров искусств рядом с могилами композиторов А. Чайковского, А. Бородина, Н. Римского-Корсакова (Пирютко, 2011).

Перейдем к краткому освещению основных научных достижений ученого.

Лебедев принадлежал к школе теории химического строения Бутлерова; он глубоко изучал реакции полимеризации органических материалов, процессы полимеризации и деполимеризации в работах «О полимеризации двуэтиленовых углеводородов» (Лебедев, 1909), «Исследование в области полимеризации. Полимеризация фенил-1-бутадиена-1,3» (Лебедев, Иванов, 1916), «К вопросу о полимеризации этиленовых соединений» (Лебедев, 1922) и др. В магистерской диссертации он разработал метод получения синтетического каучука из дивинила (или бутадиена 1.3 – бесцветного газа, одного из побочных углеводородов, получаемых при переработке нефти), так называемого «бутадиенового каучука». Многочисленными опытами, выявил степень влияния неопределенности и замещения соответствующих органических молекул на их скорость и направление в процессе насыщения водой с использованием катализатора. Доработал теоретические изыскания профессоров В.В. Морковникова и А.Е. Фаворского в уточнении и развитии теории строения органических соединений А.М. Бутлерова (Сергиенко, 1954: 185-196).

Лебедев первым использовал озонирующий метод для исследования структуры термополимера дивинила и его гомологов. Данный метод подробно описан в статье «Синтетический каучук», опубликованной в «Технической энциклопедии», которая вышла уже после смерти академика (Лебедев, 1935). Он установил существование так называемого «зерна» в макромолекулах термополимеров, аналогичного зерну природного каучука. С помощью широкомасштабных экспериментов выявил продукты разложения каучука (Якубчик, 1954: 198-212).

Революцию в промышленном производстве произвела реакция синтеза дивинила из этилового спирта с большим выходом первого (или дегидратация этанола), которая получила название «реакции Лебедева» и формула которой выглядит как:



Первоначально для получения бутадиена, спирт был синтезирован из картофеля и теоретически для производства одной автомобильной покрышки потребовалось бы 500 кг картофеля. Однако впоследствии, картофель удалось заменить продуктами нефтепереработки, что многократно удешевило производство дивинила – главного «ингредиента» для получения синтетического каучука. Именно «реакция Лебедева» легла в основу промышленного синтеза каучука в Советском Союзе (Горин, 1954: 213-234).

В годы Первой мировой войны (1914–1918) и в конце 1920-х годов, Лебедев активно проводил эксперименты по получению толуола при помощи пиролиза нефти и результатом которых стало строительство в г. Баку пиролизного завода по производству взрывчатых веществ. Активно занимался и процессами гидрогенизации органических веществ, а именно установил закономерности, позволяющие контролировать процесс насыщений водой непредельных углеводородов (Горин, 1954: 235-244).

* По другим данным – в начале 1931 года (см., например, Сергиенко, 1953; Щадилова, 2015 и др.)

³ C₄H₆ – дивинил или бутадиен – основной компонент для синтеза каучука.

5. Заключение

1. Лебедев стал известен благодаря своим исследованиям в области синтеза новых полимеров. В 1927 году он разработал первый в мире промышленный синтетический каучук; это открытие сыграло важнейшую роль в развитии промышленности в целом, и развитии синтетических материалов, в частности. Его работы положили начало многим современным технологиям, которые используются в производстве резины и других полимерных материалов.

2. Ученый активно участвовал в научной общественной жизни, публикуя результаты своих исследований в ряде научных изданий. Лебедев также занимался педагогической деятельностью, обучая будущие поколения химиков и исследователей.

3. Сергей Васильевич Лебедев стал пионером в своей отрасли знаний, а его научные достижения повсеместно используются и до сегодняшнего дня. Его имя стало синонимом инноваций в химии и промышленности.

Литература

Арбузов, 1944 – Арбузов А.Е. // *Успехи химии*. 1944. Т. XIII. Вып. 4.

Арбузов, 1954 – Арбузов А.Е. и др. Академик Сергей Васильевич Лебедев: к 80-летию со дня рождения / Отв. ред. акад. А.Е. Арбузов и проф. С.Р. Сергиенко. М.: Издательство Академии наук СССР, 1954.

Волков и др., 1991 – Волков В.А. и др. Лебедев Сергей Васильевич / *Выдающиеся химики мира*. М.: Высшая школа, 1991.

Горин, 1954 – Горин Ю.А. Исследования С.В. Лебедева в области синтеза дивинила из этилового спирта и их дальнейшее развитие / Академик Сергей Васильевич Лебедев. М.: Издательство Академии наук СССР, 1954.

Горин, Пиотровский, 1949 – Горин Ю.А., Пиотровский К.Б. Труды академика С.В. Лебедева в области синтетического каучука. Л., 1949.

Григорян, Борейко, 2014 – Григорян Г.В., Борейко Н.П. Наследие С.В. Лебедева // *Каучук и резина*. 2014. № 3.

Ильина, 2023 – Ильина Г.С. Вклад Сергея Васильевича Лебедева в органическую химию / *Методические и педагогические аспекты в организации проектной деятельности в рамках реализации ФГОС*. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Краснодар, 2023.

Лебедев, 1909 – Лебедев С.В. О полимеризации двуэтиленовых углеводородов // *ЖРХО*. 1909. № 41, № 42.

Лебедев, 1913 – Лебедев С.В. Исследования в области полимеризации двуэтиленовых углеводородов. Диссертация доктора по химии. СПб.: Санкт-Петербургский университет, 1913.

Лебедев, 1922 – Лебедев С.В. К вопросу о полимеризации этиленовых соединений / *Труды III Менделеевского съезда*. М., 1922.

Лебедев, 1935 – Лебедев С.В. Синтетический каучук / *Техническая энциклопедия*. 1935. № 20 (815).

Лебедев, Иванов, 1916 – Лебедев С.В., Иванов А.А. Исследование в области полимеризации. Полимеризация фенил-1-бутадиена-1,3. // *ЖРХО*. 1916. № 48.

Остроумова-Лебедева, 1954 – Остроумова-Лебедева А.П. Сергей Васильевич Лебедев / Академик Сергей Васильевич Лебедев. М.: Издательство Академии наук СССР, 1954.

Пиотровский, 1968 – Пиотровский К.Б. Лебедев в Петербурге – Петрограде – Ленинграде. Лениздат, 1968.

Пирютко, 2011 – Пирютко Ю.М. Некрополь мастеров искусств / *Исторические кладбища Санкт-Петербурга* / Под ред. А.В. Кобак, Ю.М. Пирютко. Изд. 2-е, дораб. и испр. М.: Центрполиграф, 2011.

Сергиенко, 1953 – Сергиенко С.Р. Творец синтеза каучука С.В. Лебедев // *Труды по истории техники*. 1953. Вып. 3. М.

Сергиенко, 1954 – Сергиенко С.Р. Развитие основных положений теории химического строения А.М. Бутлерова в исследованиях С.В. Лебедева / Академик Сергей Васильевич Лебедев. М.: Издательство Академии наук СССР, 1954.

Щадилова, 2015 – Щадилова Е.Е. Сергей Васильевич Лебедев. Основные вехи жизненного пути // *Молодой ученый*. 2015. № 13-2 (93).

Якубчик, 1954 – Якубчик А.И. Развитие исследований С.В. Лебедева по изучению строения синтетических каучуков / Академик Сергей Васильевич Лебедев. М.: Издательство Академии наук СССР, 1954.

References

Arbuzov, 1944 – Arbuzov, A.E. (1944). *Uspekhi khimii*. T. KhIII. Vyp. 4. [in Russian]

Arbuzov, 1954 – Arbuzov A.E. i dr. (1954). Akademik Sergei Vasil'evich Lebedev: k 80-letiyu so dnya rozhdeniya [Academician Sergei Vasilievich Lebedev: on the 80th anniversary of his birth]. Otv. red. akad. A.E. Arbuzov i prof. S.R. Sergienko. M.: Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR. [in Russian]

Gorin, 1954 – Gorin, Yu.A. (1954). Issledovaniya S.V. Lebedeva v oblasti sinteza divinila iz etilovogo spirta i ikh dal'neishee razvitie [Research by S.V. Lebedev in the field of divinyl synthesis from ethyl alcohol and their further development]. Akademik Sergei Vasil'evich Lebedev. M.: Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR. [in Russian]

Gorin, Piotrovskii, 1949 – Gorin, Yu.A., Piotrovskii, K.B. (1949). Trudy akademika S.V. Lebedeva v oblasti sinteticheskogo kauchuka [Works of Academician S.V. Lebedev in the field of synthetic rubber]. L. [in Russian]

Grigoryan, Boreiko, 2014 – Grigoryan, G.V., Boreiko, N.P. (2014). Nasledie S.V. Lebedeva [Legacy of S.V. Lebedev]. *Kauchuk i rezina*. 3. [in Russian]

Il'ina, 2023 – Il'ina, G.S. (2023). Vklad Sergeya Vasil'evicha Lebedeva v organicheskuyu khimiyu [Contribution of Sergei Vasilyevich Lebedev to Organic Chemistry]. *Metodicheskie i pedagogicheskie aspekty v organizatsii proektnoi deyatel'nosti v ramkakh realizatsii FGOS*. Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Krasnodar. [in Russian]

Lebedev, 1909 – Lebedev, S.V. (1909). O polimerizatsii duetilenovykh uglevodorodov [On the polymerization of diethylene hydrocarbons]. *ZhRKhO*. № 41, № 42. [in Russian]

Lebedev, 1913 – Lebedev, S.V. (1913). Issledovaniya v oblasti polimerizatsii duetilenovykh uglevodorodov [Research in the field of polymerization of diethylene hydrocarbons. Doctoral dissertation in chemistry]. Dissertatsiya doktora po khimii. SPb.: Sankt-Peterburgskii universitet. [in Russian]

Lebedev, 1922 – Lebedev, S.V. (1922). K voprosu o polimerizatsii etilenovykh soedinenii [To the issue of polymerization of ethylene compounds]. Trudy III Mendeleevskogo s"ezda. M. [in Russian]

Lebedev, 1935 – Lebedev, S.V. (1935). Sinteticheskii kauchuk [Synthetic rubber]. *Tekhnicheskaya entsiklopediya*. № 20 (815). [in Russian]

Lebedev, Ivanov, 1916 – Lebedev, S.V., Ivanov, A.A. (1916). Issledovanie v oblasti polimerizatsii. Polimerizatsiya fenil-1-butadiena-1,3 [Research in the field of polymerization. Polymerization of phenyl-1-butadiene-1,3]. *ZhRKhO*. № 48. [in Russian]

Ostroumova-Lebedeva, 1954 – Ostroumova-Lebedeva, A.P. (1954). Sergei Vasil'evich Lebedev [Sergei Vasilievich Lebedev]. Akademik Sergei Vasil'evich Lebedev. M.: Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR. [in Russian]

Piotrovskii, 1968 – Piotrovskii, K.B. (1968). Lebedev v Peterburge – Petrograde – Leningrade [Lebedev in Petersburg – Petrograd – Leningrad.]. Lenizdat. [in Russian]

Piryutko, 2011 – Piryutko, Yu.M. (2011). Nekropol' masterov iskusstv [Necropolis of art masters]. Istoricheskie kladbishcha Sankt-Peterburga. Pod red. A.V. Kobak, Yu.M. Piryutko. Izd. 2-e, dorab. i ispr. M.: Tsentrpoligraf. [in Russian]

Sergienko, 1953 – Sergienko, S.R. (1953). Tvorets sinteza kauchuka S.V. Lebedev [Creator of rubber synthesis S.V. Lebedev]. *Trudy po istorii tekhniki*. Vyp. 3. M.. [in Russian]

Sergienko, 1954 – Sergienko, S.R. (1954). Razvitie osnovnykh polozhenii teorii khimicheskogo stroeniya A.M. Butlerova v issledovaniyakh S.V. Lebedeva [Development of the main provisions of the theory of chemical structure of A.M. Butlerov in the research of S.V. Lebedev]. Akademik Sergei Vasil'evich Lebedev. M.: Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR. [in Russian]

Shchadilova, 2015 – Shchadilova, E.E. (2015). Sergei Vasil'evich Lebedev. Osnovnye vekhi zhiznennogo puti [Sergei Vasilievich Lebedev. The main milestones in his life]. *Molodoi uchenyi*. 13-2 (93). [in Russian]

Volkov i dr., 1991 – *Volkov, V.A. i dr.* (1991). Lebedev Sergei Vasil'evich [Lebedev Sergei Vasilievich]. *Vydayushchiesya khimiki mira*. M.: Vysshaya shkola. [in Russian]

Yakubchik, 1954 – *Yakubchik, A.I.* (1954). *Razvitie issledovaniy S.V. Lebedeva po izucheniyu stroeniya sinteticheskikh kauchukov* [Development of research of S.V. Lebedev on the study of the structure of synthetic rubbers]. Akademik Sergei Vasil'evich Lebedev. M.: Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR. [in Russian]

Сергей Васильевич Лебедев (1874–1934): биографический очерк к 150-летию со дня рождения российского химика

Анвар Мирзахматович Мамадалиев ^{a,*}

^a Восточно-европейское историческое общество, Российская Федерация

Аннотация. Биографический очерк посвящен 150-летию со дня рождения российского химика Сергея Васильевича Лебедева (1874–1934). Материалом послужили биографические исследования, касающиеся жизненного пути и научного наследия советского академика. Методологию составляют метод контент-анализа, метод синтеза и др.

Лебедев стал известен благодаря своим исследованиям в области синтеза новых полимеров. В 1927 году он получил первый в мире промышленный синтетический каучук; это открытие сыграло важнейшую роль в развитии промышленности в целом, и развитии синтетических материалов, в частности. Его работы положили начало многим современным технологиям, которые используются в производстве резины и других полимерных материалов.

Ученый активно участвовал в научной общественной жизни, публикуя результаты своих исследований в ряде научных изданий. Лебедев также занимался педагогической деятельностью, обучая будущие поколения химиков и исследователей.

Сергей Васильевич Лебедев стал пионером в своей отрасли знаний, а его научные достижения повсеместно используются и до сегодняшнего дня. Его имя стало синонимом инноваций в химии и промышленности.

Ключевые слова: Сергей Васильевич Лебедев, 1874–1934, химия, российская наука, каучук, промышленный способ получения каучука, синтез каучуков, «реакция Лебедева», дегидратация этанола.

* Корреспондирующий автор

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