



EUROPEAN Geographical Studies

Issued since 2014
E-ISSN 2413-7197
2025. 12(1). Issued once a year

EDITORIAL BOARD

Rybak Oleg – Scientific Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Sochi, Russian Federation (Editor-in-Chief)

Elizbarashvili Elizbar – Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia (Deputy Editor-in-Chief)

Alexandrino Carlos – Institute of Science Engineering and Technology, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Teófilo Otoni, Brazil

Abdrakhmatov Kanat – Institute of seismology NAS, Bishkek, Kyrgyzstan

Barmin Aleksandr – Astrakhan State University, Astrakhan, Russian Federation

Basilashvili Tsisana – Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia

Chincharashvili Iza – Iakob Gogebashvili Telavi State University, Telavi, Georgia

Deene Shivakumar – Central University of Karnataka, Karnataka, India

Kalinichenko Valerii – Don State Agrarian University, Persianovsky, Russian Federation

Rajović Goran – Cherkas Global University, Washington, USA

Tikunov Vladimir – Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Journal is indexed by: **CiteFactor** (USA), **CrossRef** (UK), **EBSCOhost Electronic Journals Service** (USA), **Electronic scientific library** (Russia), **Open Academic Journals Index** (USA), **Sherpa Romeo** (Spain), **Universal Impact Factor** (Australia).

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

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

Postal Address: 13906, Polarstone Ct., Houston,
TX, USA 77044

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

Founder and Editor: Cherkas Global
University

Release date 15.12.25.
Format 21 × 29,7/4.

Headset Georgia.

Order № 122.

European Geographical Studies

2025

Is. 1

CONTENTS

Articles

The Role of Telemetric Systems in Improving the Efficiency of Managing Technical Objects in the Digital Economy O.A. Akishin, O.M. Perminova	3
Technical Notes on the Applicability of SEM And EPMA (Microprobe Analysis) for Reconstructing Biogeographical and Paleoclimatic Factors of Taphonomic Alterations of Elasmobranch Teeth P.L. Alexandrov, M.K. Filippov, Th.K. Orekhov	9
The Plastisphere as an Evolutionarily New Geospheric Shell and a “Biogeochemical Reactor” of the Technosphere (Introductory Methodological Review) O.V. Gradov, Yu.V. Zhulanov, P.Yu. Makaveev, M.K. Filippov	26
Geoinformation Technologies as a Tool for Managing Natural and Economic Systems in the Cryolithozone: from the First Maps to Digital Doubles B.Yu. Krotenko	57

Letters to the Editorial Office

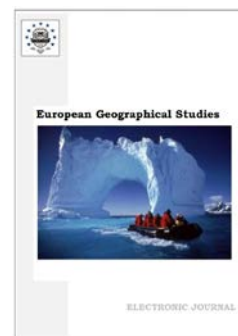
Time-Resolved Scanning Electron Microscopy for Sand Saltation Measurements O.V. Gradov, I.A. Maklakova, A.I. Sergeev	62
---	----

Copyright © 2025 by Cherkas Global University



Published in the USA
European Geographical Studies
Issued since 2013.
E-ISSN: 2413-7197
2025. 12(1): 3-8

DOI: 10.13187/egs.2025.1.3
<https://egs.cherkasgu.press>



Articles

The Role of Telemetric Systems in Improving the Efficiency of Managing Technical Objects in the Digital Economy

Oleg A. Akishin ^a, Olga M. Perminova ^{a, *}

^a MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation

Abstract

This article examines the role of telemetry systems in improving the efficiency of technical asset management in the digital economy. Key factors in telemetry development are highlighted and the results of monitoring system implementation are summarized. It is shown that the integration of telemetry into technical systems management strategies is becoming a core component of digital transformation, with maximum efficiency achieved through end-to-end integration: from sensors and communication channels to storage, analytics, and organizational response procedures. Telemetry is transforming into a core digital management tool, ensuring a seamless process from assessing actual conditions to taking timely actions, surpassing the capabilities of one-time measurements. The use of time series storage and analytical modules transforms telemetry data flows into management decisions, increasing operational sustainability and cost-effectiveness.

Keywords: telemetry, monitoring, data analysis, digital transformation, predictive analytics, efficiency, reliability.

1. Введение

Цифровая трансформация экономики кардинально меняет подходы к управлению сложными техническими объектами, предъявляя новые требования к скорости, точности и обоснованности принимаемых решений. В условиях роста сложности систем и динамичности их рабочих режимов традиционные методы, основанные на разовых измерениях и регламентном обслуживании, становятся недостаточно эффективными. Это обуславливает необходимость перехода к непрерывному мониторингу и управлению на основе данных, где центральное место занимают телеметрические системы. Актуальность телеметрии подчеркивается ее растущим межотраслевым применением – от промышленности и энергетики до транспорта и умной городской инфраструктуры. Современная телеметрия эволюционировала от простого инструмента сбора данных до опорного элемента архитектуры управления, формирующего замкнутый цикл «измерение – передача – анализ – действие». Несмотря на признаваемую пользу, систематизация факторов, усиливающих ее значимость, и комплексная оценка практических результатов внедрения остаются задачами, требующими решения. Целью исследования является анализ роли телеметрических систем в повышении эффективности управления техническими

* Corresponding author
E-mail addresses: perminova@mirea.ru (O.M. Perminova)

объектами, выявление ключевых факторов их развития, определение роли технологии как стратегического актива, обеспечивающего устойчивость, надежность и экономическую целесообразность эксплуатации в условиях цифровой экономики.

2. Материалы и методы

В работе использованы: теоретический и сравнительный анализы, синтез и систематизация, нормативно-регламентный и структурно-функциональный анализ, анализ количественных и качественных результатов.

3. Обсуждение

Современная технологическая среда переживает период интенсивной цифровизации (Manyika et al., 2015). Сложность объектов и скорость изменения их состояний возрастают, что снижает эффективность разовых измерений и делает критически важным непрерывный сбор данных. В результате управление перестраивается с регламентно-интуитивной логики на модель на основе фактических параметров. Телеметрия из вспомогательного инструмента превращается в опорный элемент архитектуры управления, позволяя фиксировать динамику процессов и принимать своевременные решения на основе объективной информации, именно этот контекст определяет актуальность систем дистанционного измерения и передачи данных (World Economic Forum, 2024; World Economic Forum, 2025).

4. Результаты

В настоящее время возникла устойчивая потребность не только видеть текущее состояние, но и отслеживать закономерности временных рядов, предсказывать отклонения и предотвращать сбои. В таких условиях телеметрия обеспечивает связку измерение – передача – хранение – анализ – действие, и становится основой практического применения методов аналитики и автоматизации. Для обоснования актуальности использования телеметрии как системного инструмента повышения устойчивости и эффективности, понимания ее востребованности в технических сферах проведен сравнительный анализ факторов, представленный в Таблице 1, составленной на основе: ИЕС 61508:2010 (ГОСТ Р МЭК 61508-1-2012); технических регламентов эксплуатации оборудования и экспертных интервью (ISO 13374-4:2015). Как видно из нее, существует необходимость пересмотра подходов к управлению в пользу непрерывного наблюдения и аналитики. Телеметрия выступает связующим звеном между фактическим состоянием системы и управленческими действиями, создавая базу для предиктивного и проактивного управления (Chang, 2015), (Chang, 2019). Анализ распространения телеметрии в технических сферах показывает повторяемую логику эффектов, обобщенную в Таблице 2, составленной на основе: ИЕС 61508:2010; технических регламентов эксплуатации оборудования и экспертных интервью.

Таблица 1. Факторы и цифровые инструменты, усиливающие значимость телеметрии

Факторы и тенденции	Технологическое содержание	Инструменты и технологии	Управленческий эффект
Усложнение технических систем	Рост числа контролируемых параметров и узлов	Датчики, контроллеры, шины полевого уровня	Повышение точности контроля
Цифровизация процессов управления	Переход к решениям на основе данных	Платформы мониторинга, базы временных рядов	Снижение субъективности решений
Развитие IoT	Массовое внедрение датчиков	Low-power сенсоры, edge-аналитика	Масштабируемость мониторинга
Требования к безопасности и надежности	Неприемлемость задержек и потерь данных	Резервирование каналов, контроль целостности	Снижение риска аварий

Факторы и тенденции	Технологическое содержание	Инструменты и технологии	Управленческий эффект
Необходимость контроля в реальном времени	Критичность своевременного обнаружения отклонений	Потоковая телеметрия, MQTT, OPC UA, 4G/5G	Ускорение реакции
Экономическое давление на издержки	Дороговизна простоев и ремонтов	Предиктивная аналитика, ML для отказов	Сокращение затрат

Таблица 2. Элементы телеметрии и результаты их применения

Элемент	Функция	Риски при слабом звене	Результат при корректной работе
Датчики	Преобразование физических величин в данные	Шум, смещение, ложные тревоги	Достоверная первичная информация
Блоки сбора	Фильтрация, агрегация, буферизация	Потери пакетов, перегрузка	Стабильный поток данных
Каналы связи	Передача в реальном времени	Задержки, разрывы	Минимум слепых интервалов
Хранилища временных рядов	Структурирование истории	Потеря историчности	Анализ динамики и трендов
Аналитика	Поиск закономерностей и аномалий	Нереализованная ценность данных	Обоснованные решения
Визуализация	Понятная подача информации	Замедленная реакция оператора	Быстрые управленческие действия

Внедрение телеметрии носит межотраслевой характер, однако конкретные реализации адаптируются к особенностям доменной области. В промышленности доминируют задачи предотвращения аварий и сокращения простоев, в транспорте востребованы потоки геопараметров, нагрузок и диагностик, в инженерной подготовке акцент делается на объективной оценке действий оператора и разборе траекторий, но при этом, во всех случаях телеметрия повышает устойчивость процессов, делает решения измеримыми и воспроизводимыми (Gartner, 2024).

Внедрение телеметрии в стратегию управления техническими системами приобретает статус базового компонента цифровой трансформации. Проведенное исследование дало возможность наглядно показать преимущества использования телеметрии. Так, на [Рисунке 1](#) представлено три подхода к управлению техническими системами по трем метрикам: скорость реакции, точность корректировок, устойчивость к внешним нагрузкам.

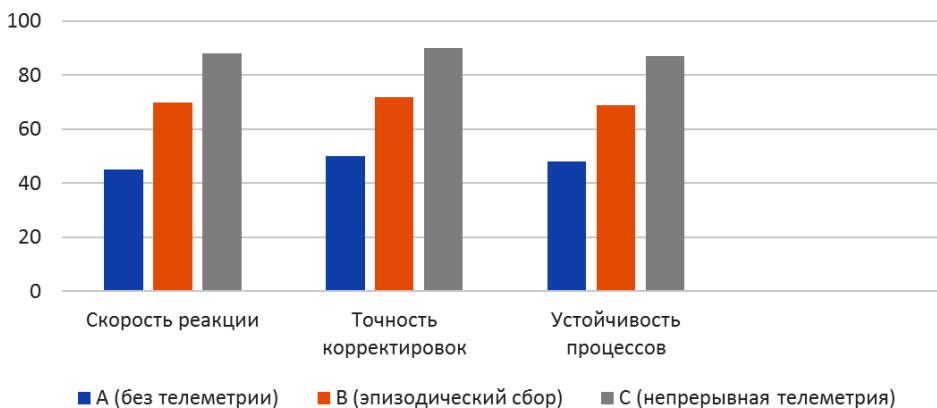


Рис. 1. Сравнительная эффективность инструментов управления

Как видно, непрерывный телеметрический мониторинг является наиболее эффективным способом. На [Рисунке 2](#) показано индексное изменение показателей относительно базового уровня через некоторое время после внедрения по показателям: стабильность работы оборудования, уровень эксплуатационных затрат, частота внеплановых вмешательств. Проведенный опрос по мотивам внедрения телеметрии, представленный на [Рисунке 3](#) показывает, что телеметрия повышает надежность и безопасность и снижает простои и затраты.

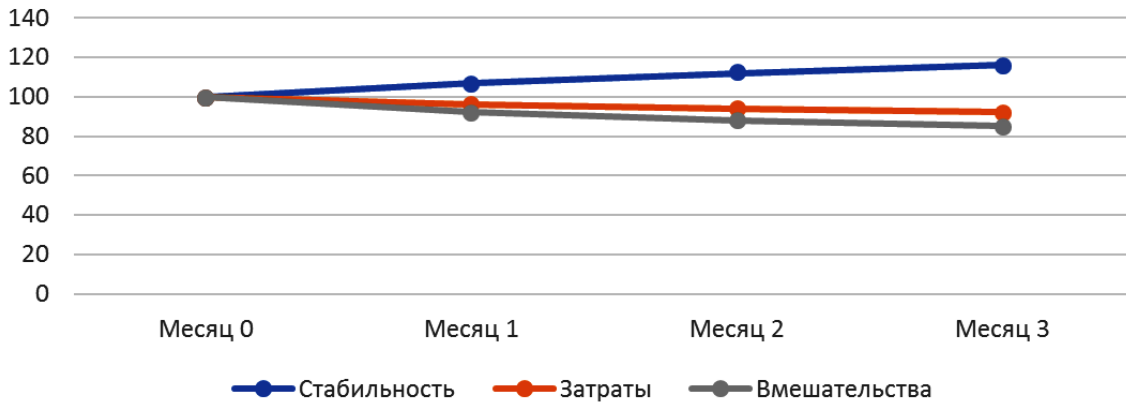


Рис. 2. Динамика ключевых показателей после внедрения телеметрии

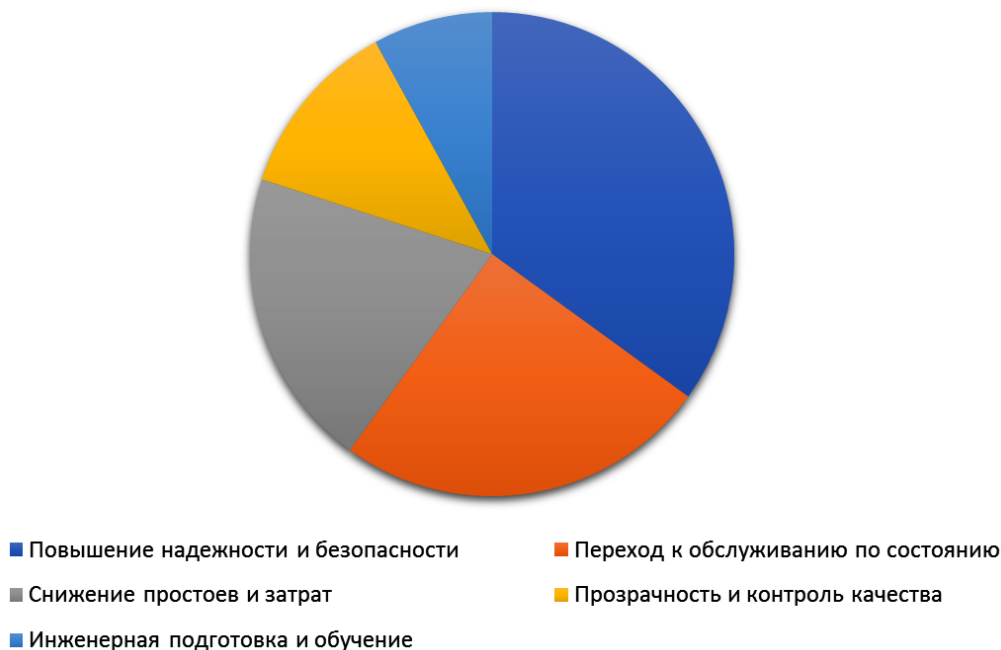


Рис. 3. Структура мотивов внедрения телеметрии

5. Заключение

Таким образом, внедрение телеметрии в стратегию управления техническими системами приобретает статус базового компонента цифровой трансформации, при этом максимальная отдача достигается при сквозной интеграции: от датчика и канала связи до хранилища, аналитики и оргпроцедур реакции. Телеметрия трансформируется в опорный инструмент цифрового управления и обеспечивает непрерывность процесса от оценки фактического состояния к своевременным действиям, что превосходит возможности разовых измерений. Использование хранилищ временных рядов и аналитических модулей превращают информационные потоки телеметрии в управленческие решения, повышая устойчивость и экономичность эксплуатации.

Литература

[Chang, 2015](#) – Chang W.L. NIST Big Data Interoperability Framework: Volume 7, Standards Roadmap (NIST SP 1500-7). 2015. [Electronic resource]. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.1500-7.pdf>

[Chang, 2019](#) – Chang W.L. NIST Big Data Interoperability Framework: Volume 6, Reference Architecture (NIST SP 1500-6r2). 2019. [Electronic resource]. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.1500-6r2.pdf>

[Gartner, 2024](#) – Gartner. Hype Cycle for Emerging Technologies Highlights Autonomous AI, Total Experience, and Security. 2024. [Electronic resource]. URL: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2024-08-21-gartner-2024-hype-cycle-for-emerging-technologies-highlights-developer-productivity-total-experience-ai-and-security>

[Manyika et al., 2015](#) – Manyika J., Chui M., Bisson P., Woetzel J., Dobbs R., Aharon D. The Internet of Things: Mapping the Value Beyond the Hype. McKinsey Global Institute. 2015. [Electronic resource]. URL: <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/technology%20media%20and%20telecommunications/high%20tech/our%20insights/the%20internet%20of%20things%20the%20value%20of%20digitizing%20the%20physical%20world/the-internet-of-things-mapping-the-value-beyond-the-hype.pdf>

[World Economic Forum, 2024](#) – World Economic Forum. Unleashing the Full Potential of Industrial Clusters. 2024. [Electronic resource]. URL: https://reports.weforum.org/docs/WEF_Unleashing_the_Potential_of_Industrial_Clusters_2025.pdf

[World Economic Forum, 2025](#) – World Economic Forum. Top 10 Emerging Technologies of 2025. [Electronic resource]. URL: https://reports.weforum.org/docs/WEF_Top_10_Emerging_Technologies_of_2025.pdf

References

[Chang, 2015](#) – Chang, W.L. (2015). NIST Big Data Interoperability Framework: Volume 7, Standards Roadmap (NIST SP 1500-7). [Electronic resource]. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.1500-7.pdf>

[Chang, 2019](#) – Chang, W.L. (2019). NIST Big Data Interoperability Framework: Volume 6, Reference Architecture (NIST SP 1500-6r2). [Electronic resource]. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.1500-6r2.pdf>

[Gartner, 2024](#) – Gartner. Hype Cycle for Emerging Technologies Highlights Autonomous AI, Total Experience, and Security. 2024. [Electronic resource]. URL: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2024-08-21-gartner-2024-hype-cycle-for-emerging-technologies-highlights-developer-productivity-total-experience-ai-and-security>

[Manyika et al., 2015](#) – Manyika, J., Chui, M., Bisson, P., Woetzel, J., Dobbs, R., Aharon, D. (2015). The Internet of Things: Mapping the Value Beyond the Hype. McKinsey Global Institute. [Electronic resource]. URL: <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/technology%20media%20and%20telecommunications/high%20tech/our%20insights/the%20internet%20of%20things%20the%20value%20of%20digitizing%20the%20physical%20world/the-internet-of-things-mapping-the-value-beyond-the-hype.pdf>

[World Economic Forum, 2024](#) – World Economic Forum. Unleashing the Full Potential of Industrial Clusters. 2024. [Electronic resource]. URL: https://reports.weforum.org/docs/WEF_Unleashing_the_Potential_of_Industrial_Clusters_2025.pdf

[World Economic Forum, 2025](#) – World Economic Forum. Top 10 Emerging Technologies of 2025. [Electronic resource]. URL: https://reports.weforum.org/docs/WEF_Top_10_Emerging_Technologies_of_2025.pdf

Роль телеметрических систем в повышении эффективности управления техническими объектами в условиях цифровой экономики

Олег Александрович Акишин ^a, Ольга Михайловна Перминова ^{a, *}

^a МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассмотрена роль телеметрических систем в повышении эффективности управления техническими объектами в условиях цифровой экономики. Выделены ключевые факторы развития телеметрии и обобщены результаты применения систем мониторинга. Показано, что внедрение телеметрии в стратегию управления техническими системами приобретает статус базового компонента цифровой трансформации, при этом максимальная отдача достигается при сквозной интеграции: от датчика и канала связи до хранилища, аналитики и организационных процедур реакции. Телеметрия трансформируется в опорный инструмент цифрового управления и обеспечивает непрерывность процесса от оценки фактического состояния к своевременным действиям, что превосходит возможности разовых измерений. Использование хранилищ временных рядов и аналитических модулей превращают информационные потоки телеметрии в управленческие решения, повышая устойчивость и экономичность эксплуатации.

Ключевые слова: телеметрия, мониторинг, анализ данных, цифровая трансформация, предиктивная аналитика, эффективность, надежность.

* Корреспондирующий автор

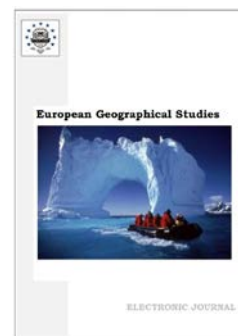
Адреса электронной почты: perminova@mirea.ru (О.М. Перминова)

Copyright © 2025 by Cherkas Global University



Published in the USA
European Geographical Studies
Issued since 2013.
E-ISSN: 2413-7197
2025. 12(1): 9-25

DOI: 10.13187/egs.2025.1.9

<https://egs.cherkasgu.press>


Technical Notes on the Applicability of SEM And EPMA (Microprobe Analysis) for Reconstructing Biogeographical and Paleoclimatic Factors of Taphonomic Alterations of Elasmobranch Teeth

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

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

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

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

Abstract

Fossil elasmobranch teeth collected from multiple geographic regions, contrasting depositional settings, and different palaeo-oceans/palaeoclimates offer valuable archives of past marine conditions, but they pose a general analytical challenge for us: ensuring comparability among samples affected by locality-specific diagenesis. Primary biological and environmental signatures in enameloid and dentine can be partially overprinted by recrystallisation, mineral replacement, and post-burial elemental uptake. To discriminate these signals reliably, an integrated microstructural–geochemical workflow is required in which scanning electron microscopy is combined with electron-probe microanalysis with energy-dispersive (EDS) and wavelength-dispersive (WDS) X-ray spectroscopy. Deposits formed in different basins, palaeocontinents and palaeo-oceans commonly experienced contrasting diagenetic histories (chemistry, burial temperature, sedimentation time and substitution, redox state of the environment). These factors can overprint tooth tissues in ways that mimic or obscure primary biological/environmental signals. SEM provides the necessary taphonomic and microstructural context prior to geochemical interpretation. Backscattered-electron imaging and high-resolution secondary-electron imaging allow direct assessment of sample preservation states. SEM also resolves diagnostic enameloid ultrastructure, enabling the distinction between preserved biogenic fabrics and diagenetic mosaics that may mimic original biogenic features.

Keywords: biogeography, taphonomy, elasmobranchs, diagenesis, biomineralization, enameloid, SEM, EPMA, WDS, EDS, backscattered electron detector (BSE).

1. Introduction

A fundamental feature that underpins biogeographers' interest in studying fossil shark (elasmobranch) teeth is their ubiquitous occurrence across highly spatially separated regions, countries, and different continents, in particular:

1. In Australia and New Zealand (Daymond, 1999; Rees et al., 2024), as well as on the islands of the Malay Archipelago (e.g., Borneo), known in Western literature as Insulindia or the Indo-Australian Archipelago (Kocsis, 2024);

2. In Asia, specifically in:

* Corresponding author

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

- 2.1. India (Prasad et al., 2004; Prasad et al., 2017).
- 2.2. Taiwan (Lin et al., 2022).
- 2.3. Thailand (Cappetta et al., 2006).
- 2.4. South Korea (Yun, 2021).
3. In Africa, both in North Africa (Adnet et al., 1990; Boulemia, Adnet, 2023) and in Southern Africa (Smale, 2005).
4. In Antarctica and adjacent islands (such as Seymour Island, also known as Simur, located near the Trinity Peninsula, the northern tip of the Antarctic Peninsula (Long, 1992)).
5. In Europe (Leidner, Thies, 1999), specifically in:
 - 5.1. Austria (Feichtinger et al., 2025).
 - 5.2. Belgium (Iserbyt, De Schutter, 2012).
 - 5.3. The United Kingdom (Paton, 1993).
 - 5.4. Germany (Höltke et al., 2023).
 - 5.5. Western Kazakhstan (it is well known that most of the country's territory belongs to Central Asia, but some parts, including West Kazakhstan Region, lie in Europe, making Kazakhstan a transcontinental state) (Radwański, Marcinowski, 1996).
 - 5.6. Poland (Schultz, 1977).
 - 5.7. The European part of Russia (Mertiniene, 1995).
 - 5.8. Ukraine (Sokolskyi, Guinot, 2021).
6. In North America, specifically in:
 - 6.1. Canada (Beavan, Russell, 1999; Mutter et al, 2007).
 - 6.2. The United States (Schubert, 2013; Shimada et al., 2015; Swinehart et al., 2020).
7. In South America/Latin America, specifically in:
 - 7.1. Argentina (Johns et al, 2014).
 - 7.2. Peru (Landini et al., 2017).
 - 7.3. Chile (Suaez et al., 2004).

The study of fossil elasmobranch teeth requires analytical methods capable of resolving the hierarchical microstructure of enameloid and dentine, and quantifying chemical compositions at spatial scales comparable to growth tissues and diagenetic alteration fronts. Scanning electron microscopy (SEM) combined with electron-probe microanalysis (EPMA) with X-ray microanalysis by wavelength-dispersive (WDS) or energy-dispersive spectroscopy (EDS) provides precisely this pairing of microstructural and microchemical evidence. This integrated approach is particularly necessary because fossil shark teeth are commonly preserved in markedly different biogeographic and taphonomic states, and because enameloid exhibits tissue-specific crystal architectures that can be obscured or mimicked or disrupted by diagenesis and carious (chemo)taphonomic conditions.

2. Materials and methods.

2.1. Why SEM is necessary.

Elasmobranch tooth enameloid is a highly mineralised, apatite-based tissue whose diagnostic characters reside in micro- to nanoscale organisation: crystallite size and habit, preferred orientation, bundled architectures, and the nature of the enameloid–dentine junction (EDJ). Optical microscopy alone is often insufficient because many of these features are below the diffraction limit, and (sic!) diagenetic overprinting frequently modifies optical properties without preserving original textures.

Different SEM regimes are therefore used to:

1. Characterise enameloid ultrastructure. Secondary-electron imaging can reveal surface relief, permitting discrimination between primary crystallite bundles/orientation patterns and secondary recrystallised mosaics.
2. Identify diagenetic microtextures. Backscattered-electron (BSE) imaging provides compositional contrast (mean atomic number contrast), enabling recognition of infillings, coatings, and replacement phases (e.g., carbonate cement, silica, iron–manganese oxides) that may not be apparent in transmitted light.
3. Map microcracks, porosity, and intergranular boundaries. These are critical because they act as pathways for fluid-mediated element exchange and thus govern the spatial pattern of chemical alteration.

4. SEM allows analysts to select minimally altered regions of enameloid and dentine and target specific structural units (enameloid vs dentine).

SEM provides the microstructural context required to interpret any chemical data as either biogenic (primary) or diagenetic (secondary).

2.2. Why EPMA is necessary

EPMA (electron microprobe) offers quantitative, spatially resolved major- and minor-element analysis at the micrometre scale, which matches the scale of tooth tissues and many alteration halos. This is essential because elasmobranch teeth comprise compositionally distinct components (enameloid vs dentine), and diagenesis can create steep chemical gradients over tens of micrometres. EPMA is used to:

1. Quantify apatite stoichiometry and substitutions. Measuring Ca, P, and minor elements (e.g., F, Na, Mg, S, Cl, Sr) constrains the degree and type of ionic substitution in bioapatite, which in turn reflects both original biomineralisation and diagenetic modification (e.g., fluoridation, carbonate substitution proxies, coupled substitutions).

2. Distinguish tissue-specific signatures. Enameloid and dentine often differ in minor-element budgets and alteration susceptibility; quantitative traverses can reveal whether chemical contrasts are primary or have been homogenised by recrystallisation.

3. Resolve microchemical heterogeneity. Preservation is rarely uniform; EPMA maps and line scans can identify diffusion fronts, secondary mineral microdomains, and compositional zonation associated with cracks or pore spaces.

4. Provide robust comparability across specimens of differing preservation. Quantitative microprobe data permit objective comparison when macroscopic appearance is misleading.

2.3. Why both WDS and EDS are needed

Although both WDS and EDS detect characteristic X-rays generated under the electron beam, they differ in spectral resolution, sensitivity, and analytical reliability. Fossil teeth frequently contain complex, mixed-phase assemblages (apatite plus diagenetic precipitates), making spectral interferences and low-level substitutions a routine problem. Employing both techniques is therefore scientifically justified. EDS (energy-dispersive spectroscopy) is used to:

- a) Rapidly screen phases and heterogeneities. EDS is well suited for reconnaissance mapping to locate diagenetic phases (e.g., Fe-rich coatings, Mn oxides, silica infill, carbonate cement) and to prioritise domains for quantitative work.

- b) Provide broad-area compositional maps quickly. This is valuable for documenting preservation variability within a single tooth, and for identifying “least altered” regions for subsequent WDS/EPMA.

However, EDS has limitations relevant to enameloid studies: lower energy resolution increases the risk of peak overlaps; detection limits are typically poorer for trace-to-minor elements; and quantification of light elements (notably F, Na, Mg) can be less reliable in complex matrices. WDS (wavelength-dispersive spectroscopy) is used to:

- a) Obtain high-precision, interference-resolved quantification. WDS provides superior spectral resolution, reducing misidentification and improving accuracy where peak overlaps matter.

- b) Measure minor and light elements critical to apatite chemistry. In fossil enameloid, elements such as F, Na, Mg, S, and Cl can be pivotal for distinguishing primary mineralisation from diagenetic fluoridation or contamination; WDS typically delivers the precision and lower detection limits needed for these interpretations.

- c) Support defensible comparisons among differently preserved specimens. Because WDS is more robust for subtle compositional differences, it is preferable for testing hypotheses about diagenetic overprint versus retained biogenic signals.

Thus, EDS is most effective for efficient phase recognition and spatial reconnaissance, whereas WDS is essential for rigorous, publication-grade quantification of key elements in apatite and associated alteration products.

2.4. Biogeographical aspects of SEM visualization and EPMA/WDS/EDS analysis of elasmobranch teeth.

When fossil shark teeth are collected from different geographic regions, deposits with contrasting geochemical regimes, different continents, and different palaeo-oceans and

palaeoclimates, the main scientific challenge is comparability: you must separate (i) original biological and environmental signals recorded in enameloid/dentine from (ii) locality-specific diagenetic overprint (replacement, recrystallisation, elemental uptake). The combined use of SEM, EPMA, WDS and EDS is justified because it links microstructure to chemistry at the same spatial scale where both primary growth features and diagenetic alteration occur.

EPMA or SEM with WDS and/or EDS provides the microstructural and taphonomic “context” needed before any geochemical interpretation can be trusted.

a) Assess preservation and diagenesis directly: SEM imaging (especially BSE) reveals recrystallisation textures, secondary cements/infillings, microcracks, and porosity networks that control fluid access. These features vary strongly between deposits and between palaeoceanographic regimes.

b) Resolve enameloid ultrastructure: Shark enameloid has diagnostic crystallite structures (orientation, bundles, layering) that can be partially destroyed or mimicked by diagenetic mosaics. SEM with WDS and/or EDS can distinguish preserved ultrastructure from replacement textures and their chemical mapping.

c) Define where to analyse: Because alteration is often patchy within a single tooth, SEM is essential for selecting minimally altered enameloid/dentine domains and avoiding contaminated margins or crack-hosted precipitates. Without microanalysis (such as EPMA), chemical differences could simply reflect unequal preservation, not real palaeoenvironmental variation. EPMA provides quantitative, micrometre-scale element concentrations, which is the appropriate scale for tooth tissues and alteration fronts.

d) Quantify apatite chemistry and substitutions: Measuring Ca and P plus minor elements (e.g., F, Na, Mg, S, Cl, Sr) helps determine whether the tissue remains close to biogenic apatite or has been chemically transformed (e.g., ion exchange which can be correlated with different geochemical and paleogeographical conditions). EPMA therefore underpins any attempt to compare fossils from different basins, continents, and palaeoclimatic zones.

EDS (energy-dispersive X-ray spectroscopy) advantages are:

- Fast phase identification and screening: Quickly shows where Fe/Mn-rich coatings, silica infillings, carbonate cements, or clay contamination occur—features that can differ systematically between deposits and continents.

- Rapid compositional mapping: Useful for documenting heterogeneity across many specimens/localities and for choosing targets for precise analyses.

WDS (wavelength-dispersive X-ray spectroscopy) advantages are:

- Higher spectral resolution and fewer peak-overlap problems: Critical in apatite-rich materials where interferences can bias results, especially when comparing subtle differences between regions.

- Better precision and lower detection limits for key minor/light elements: Elements such as F, Na, Mg, S and Cl are central for diagnosing diagenetic alteration versus primary signals; WDS is typically required for defensible measurements.

- Stronger basis for inter-site comparisons: When interpreting differences between palaeo-oceans/palaeoclimates, you often expect small but meaningful shifts in composition; WDS provides the analytical confidence to test those hypotheses.

Why this complex integrated approach is essential for multi-continent, multi-basin palaeoenvironmental interpretation? Different deposits and palaeo-oceans impose different diagenetic pathways (fluid chemistry, temperature, burial history, redox conditions), which can overprint teeth in different ways. The combined SEM–EPMA–EDS/WDS workflow allows you to:

a) Distinguish primary (biogenic/environmental) signals from secondary (diagenetic) signals by tying chemistry to microtextures and alteration pathways.

b) Identify and exclude altered domains so comparisons between continents are not driven by uneven preservation.

c) Document deposit-specific diagenetic signatures (e.g., crack-hosted Fe–Mn enrichments, fluoridation halos, cement infiltration), preventing false palaeoclimatic or palaeoceanographic conclusions.

d) Produce reproducible, standardised datasets suitable for large-scale geographic and stratigraphic comparisons.

2.5. Old SEM automation

2.5.1. Reprogramming of the SEM Registration System Based on DIGIC III Processor.

For SEM image and video registration a DIY system was adapted with a Canon A590IS CCD sensor (maximum resolution 3264 x 2448 pixels in static mode; maximum video recording resolution 640x480 with a maximum video frame rate of 30 frames per second when using the MJPEG video codec) and a Canon DIGIC III image processor, synchronized directly from the control system of the electron microscope through a special cable based on a universal bus cable. The registration system was mounted on a 3D-printed module, compatible in size with the Canon A590IS mount. The key requirement for the image registration system implemented on the DIGIC processor was supporting of CHDK - a resident program that expands the control functions of Canon digital cameras. CHDK program was installed to the SD card as follows:

1. On a PC with pre-installed JAVA, the installer of CHDK ("STICK") was unpacked and one of its files – either STICK.BAT or STICK.CMD was started (one of them may not provide a successful CHDK installation).
2. Testing was performed using a random SEM image.
3. After completion, the flag on the memory card was transferred to the "Lock" position.
4. Using the camera buttons <Print> and <Menu> CHDK menu was entered.
5. Pressing <Set> allowed to enter the <Enhanced photo operations> section.
6. Using the <Set>, <Up> and <Down> buttons, the following camera parameters were set:
 - a. Disable overrides – No
 - b. Override TV type – long exp
 - c. Long exp value – the exposure required by the SEM (in the case of Jeol JSM-T330A it is 38 seconds for scanning)
 - d. Override AV, Override ISO, Subj dist – the following values for aperture, ISO and focal length were applied: 20, 12 and 250. After setting the numerical values of the above parameters, checkboxes should appear to the left of the values, confirming the values entered
 - e. Disable overrides on start – the corresponding checkmark should be removed, since this option makes CHDK save the values entered after the camera is turned off.
7. Double clicking <Menu> returns to the main menu, and then using <Set>, <Up>, <Down> find "CHDK settings" section, "Remote parameters" subsection.
8. "Enable remote", "Switch type – one push", "Control mode – normal" parameters were set.

2.5.2. Synchronization Line Upgrade.

A new synchronization line was developed to control the photoregistration procedure. To synchronize with SEM, pulses with a voltage of 3-5 V and a current of up to 10 milliamperes were used, supplied through the power lines of the USB input of the camera with the standard polarity. The appearance of the signal is equivalent to a partial pressing the photographing button, and the disappearance of the signal is equivalent to pressing the button completely (i.e., starting the photographing). When creating a synchronization line between Jeol JSM-T330A and Canon A590IS using a USB-A - mini-USB-B cable, the following operations were performed:

1. USB-A connector was cut off, after which it was required to free, strip and tin the black and red wires (color marking is standard for the universal serial bus), the white and green wires can be cut off.
2. The cap on the right side of the front panel of the electron microscope was removed and the screws for fixing the strip with the <Shutter> button were unscrewed.
3. The ground and power lines were found on the board nearest to the <Shutter> button using easily detectable designations on the pinout of any microcircuit: ground is designated as Gnd, power as Vcc. The <Shutter> button has two switch contact groups, one of which is not used. To the latter unused normally open pair of contacts the red wire of the USB cable and the power line found in accordance with the above instructions were soldered.
4. The black wire was soldered to the ground line.
5. The criterion for correctness during testing of the system was that when the cable was connected to the camera and the <Shutter> button was pressed, shooting automatically starts.

The advantages of Canon A590IS include the ability to simultaneously connect a USB cable, a power supply and an analog video signal transduction cable. Therefore, we also implemented an

image output to the analog monitor from the analog signal transmission cable. It is also possible to use a camera that does not have an additional power input and video output, but it is less convenient.

2.5.3. Creating an Adapter for Optical Registration Tract from the SEM CRT.

A special adapter was created for optical connection of the camera to the microscope screen. Its parameters depend on the system used. For the case of the Jeol JSM-T330A – Canon A590IS system, the following model was used: <https://www.tinkercad.com/things/2i7MgsxqgKt-sem> (Figure 1). The model was printed on a standard type 3D printer with black PLA filament FDplast. There are no specific requirements for the surface treatment of such products. However, when preparing a 3D model for printing, it is necessary to make sure that no supports are added inside the side tube. The rest of the settings are standard.

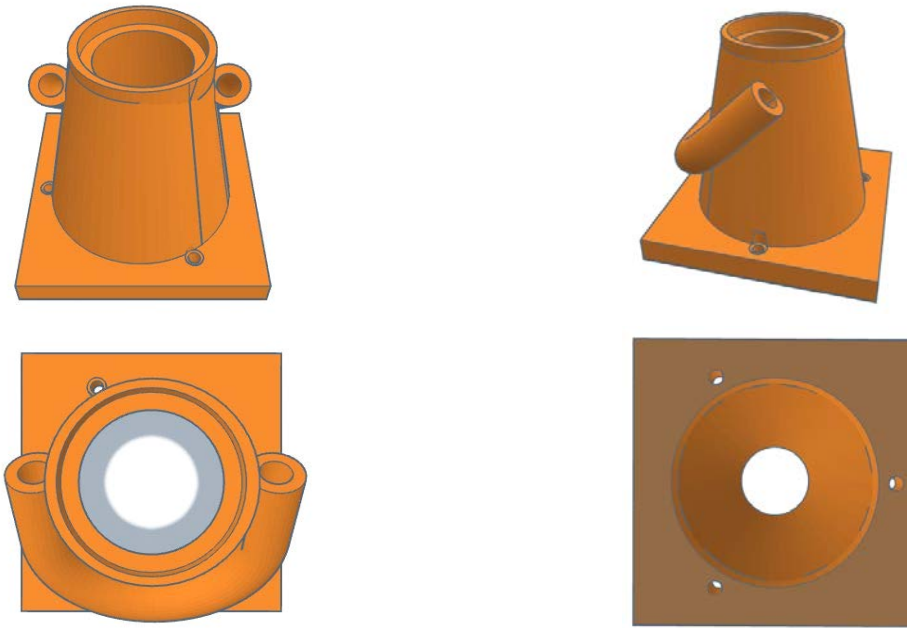


Fig. 1. 3D printable adapter for optical registration tract from the CRT of the JEOL SEM

The adapter is attached to the film camera mounting system of the microscope, and the Canon A590IS is attached using a cable tie that goes through the side tube (Figure 2).



Fig. 2. Canon A590IS fixation on the 3D printable adapter for optical registration tract from the CRT

2.5.4. Power Supply Optimization.

A power supply unit (3 V, plus in the center) was connected to the registration system, allowing it to operate without using batteries or accumulators. In this case, automatic shutdown was disabled in the camera settings, and the screen was turned off in the CHDK settings (<Print> -> <Menu> -> "CHDK settings", then "Disable LCD off" is selected and using the <Set> button is switched to the "always on" mode).

2.5.5. Output To An External Liquid Crystal Or Plasma Monitor.

It is also possible to improve the view of the small screen of the microscope by connecting to the camera a TV with analog video input via AVC-BC300 or STV-250N cable or a standard camcorder cable (see the scheme below) or the Scart input (via the same cable and Video-Scart adapter). The above scheme is shown in details in Fig. 3, and the resulting view of the system after upgrade is shown in Figure 4.



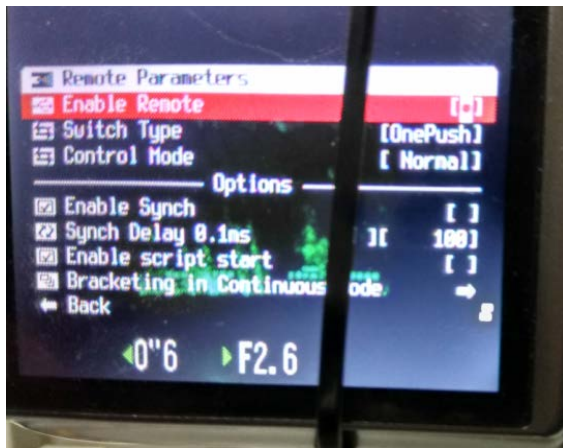
Fig. 3. Contact scheme for the Canon A590IS



Fig. 4. General view of the installation after upgrade



a



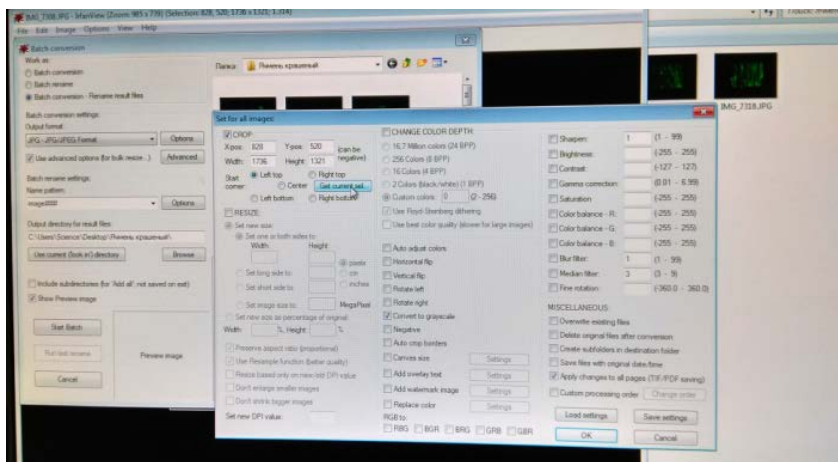
b

Fig. 5. Installation configuring on the Canon A590IS panel for the SEM image registration

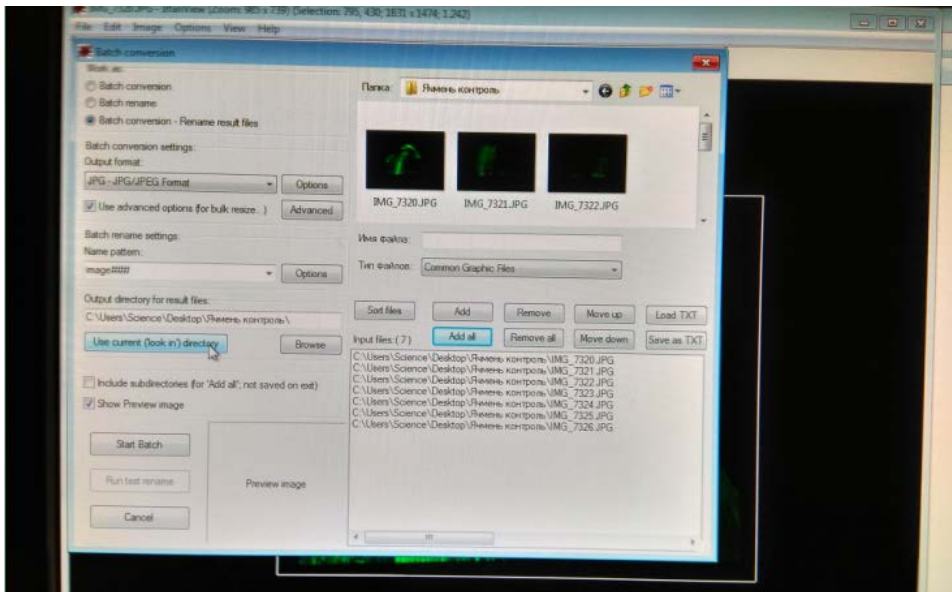
2.5.6. Photography Process After Upgrade.

a) The following procedures are required to obtain digital SEM images from Jeol JSM-T330A:

1. Adjustment of the image parameters is carried out as usual using the knobs and buttons on the electron microscope control panel.
2. The minimum Spot size is set, brightness and contrast are matched.
3. The exposure time of frames is adjusted (in the case of Jeol JSM-T330A press the “Quick” key located to the left of the “Shutter” button).
4. The photocamera cover is closed.
5. The camera turns on. In the case of Canon A590IS, the camera should be in “M” (manual) mode and manual focus should be selected (approximately 20-25).
6. For Jeol JSM-T330A, it is necessary to achieve blanking of the screen persistence. For this, the “Slow 1” key is dropped first; without releasing it, one needs to wait 3-4 seconds; after that the “Shutter” key is lowered, the “Slow 1” key is released, then the “Shutter” key is also released (Figure 5).
7. If everything has been done correctly, the camera takes a frame from the microscope screen during the exposure time, then during the same time it takes a dark frame, subtracts the latter from the former, and saves it at the SD card.
8. The images obtained can be conveniently processed by IrfanView software in the following algorithm: “File → Batch conversion/rename → Advanced”. In particular, monochromatization, cropping, contrasting (if necessary) can be carried out through this algorithm in batch processing of the entire image series stereotypically (Figure 6).

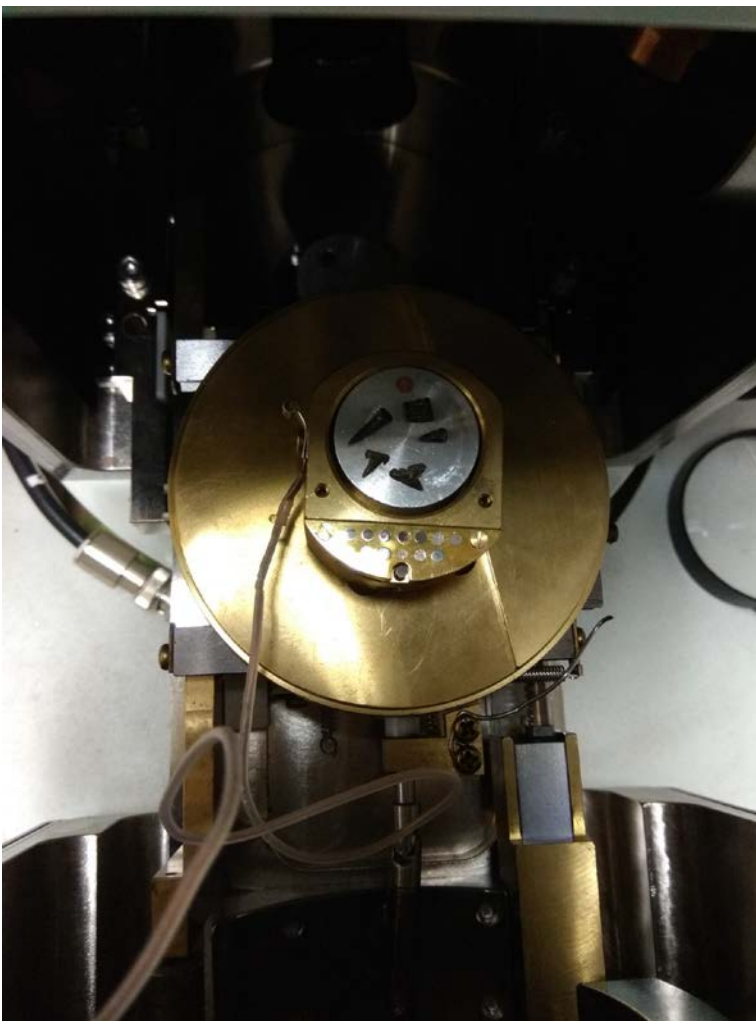


a



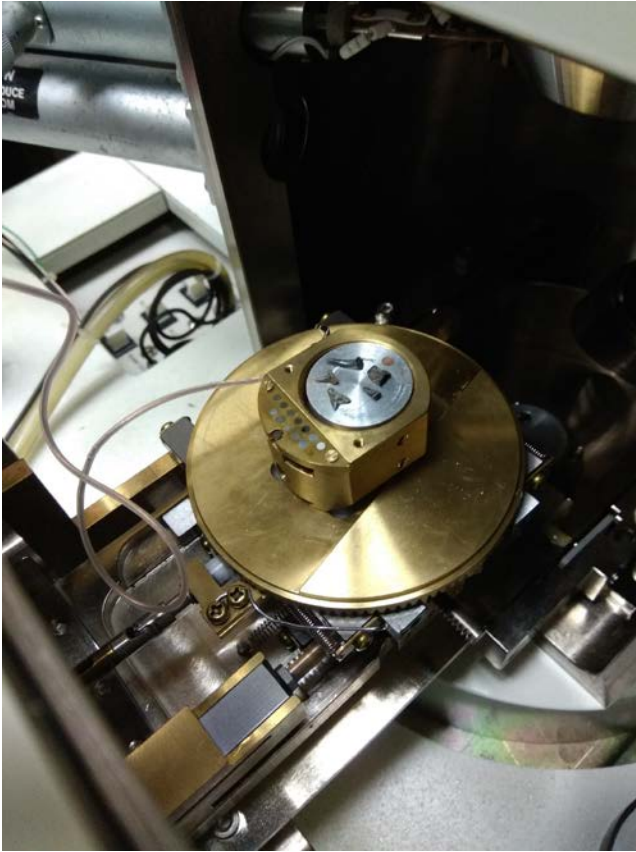
b

Fig. 6. Basic SEM image processing configuration for IrfanView software



a

Fig. 7. Elasmobranch tooth samples on the rotating SEM stage (standpoint A)



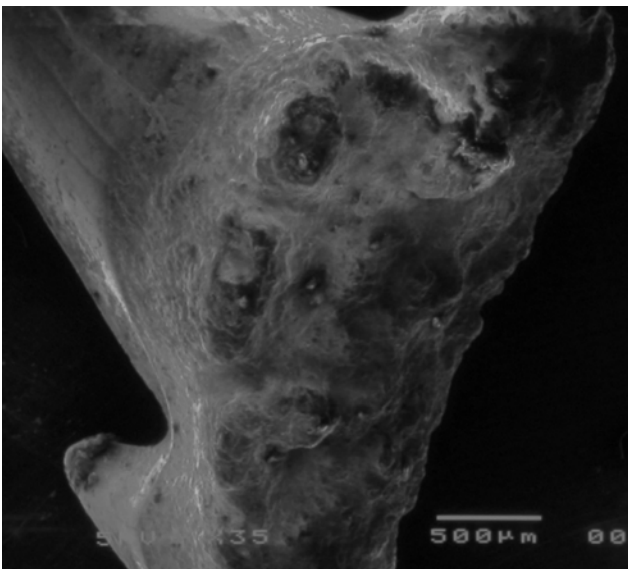
b

Fig. 7. Elasmobranch tooth samples on the rotating SEM stage (standpoint B).

3. Results

Results – SEM micrograph images of fossilized elasmobranchs/fossil shark teeth at different magnifications in the image series below (for small teeth which can be analyzed on the rotating stage of the SEM – see [Figure 7a](#), [Figure 7b](#) – and on the Rowland circle):

[Figure 8](#). General view of the tooth at 35x, scale bar – 500 μm . Acceleration voltage – 5 kV. [Figure 8a](#) shows the micrograph of the final product; [Figure 8b](#) shows its colorization using artificial intelligence.



a



b

Fig. 8. General view of the tooth at 35x magnification (a – original micrograph; b – its colorization using artificial intelligence), scale bar/scale bar – 500 μm. Acceleration voltage – 5 kV

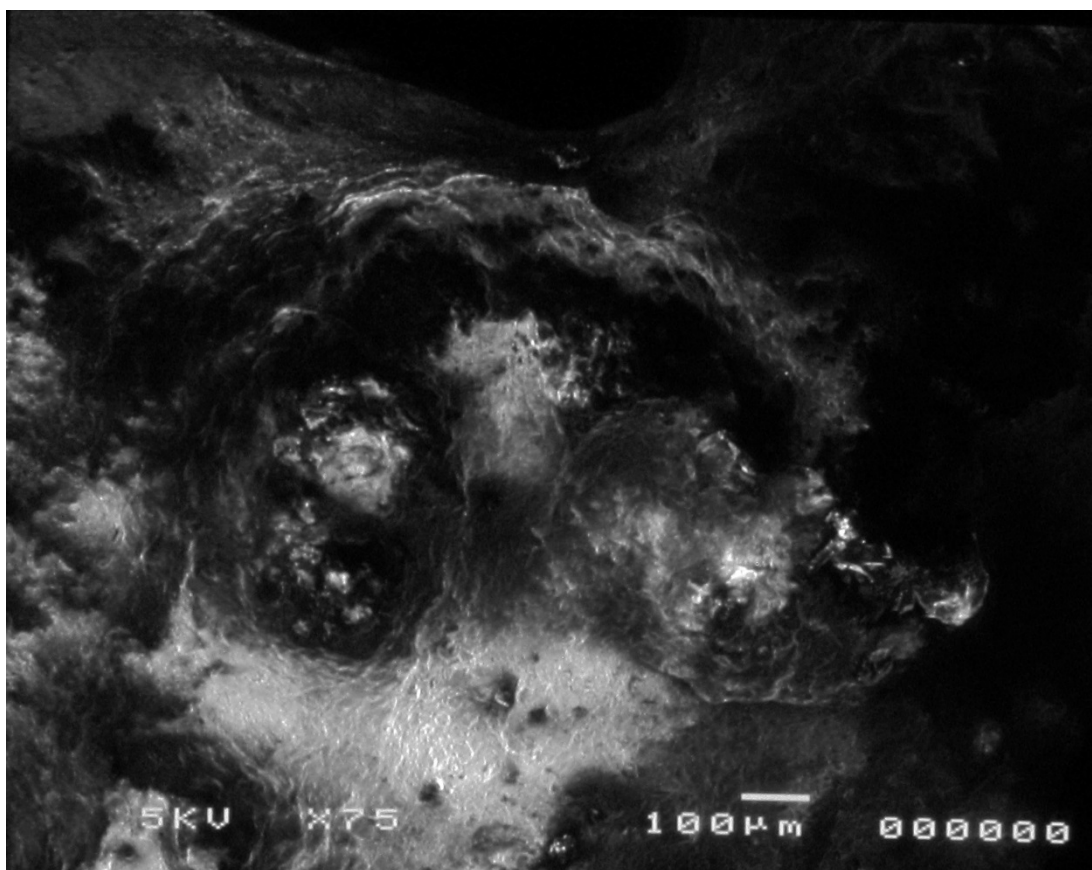


Fig. 9. The same sample. Magnification 75x, scalebar 100 μm, accelerating voltage 5 kV

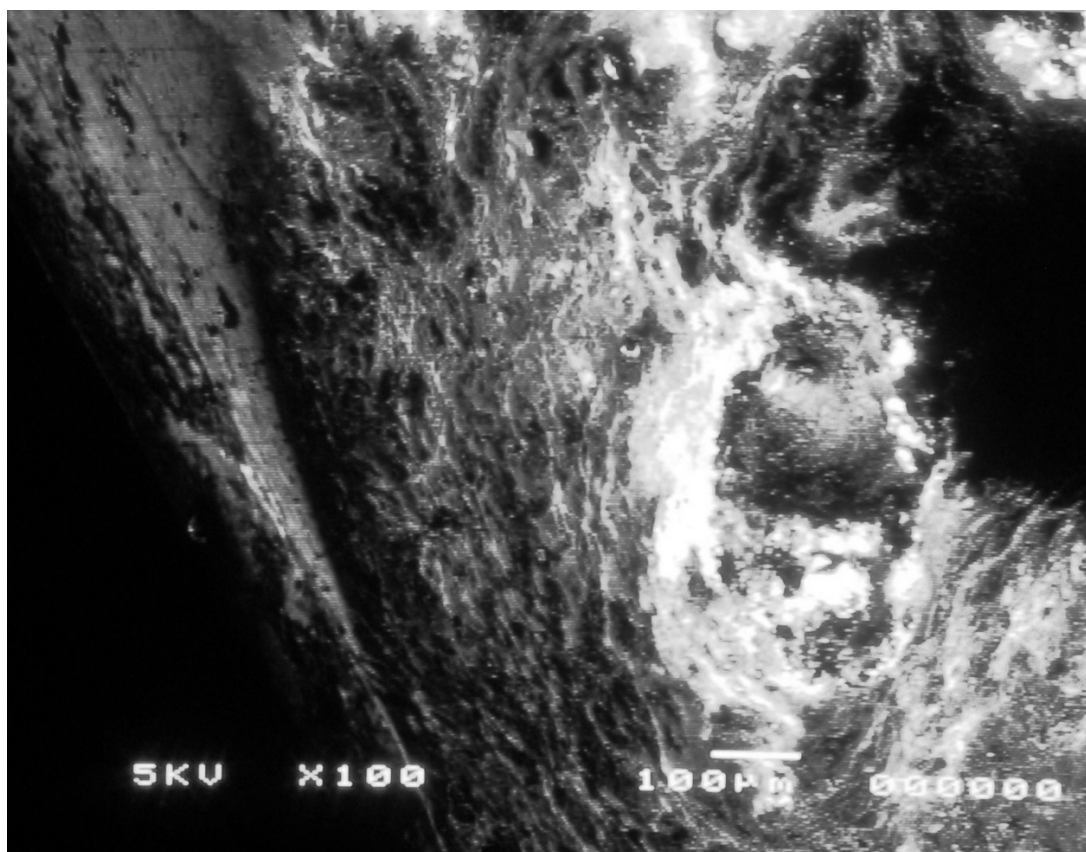


Fig. 10. The same sample. Magnification 100x, scalebar 100 µm, accelerating voltage 5 kV

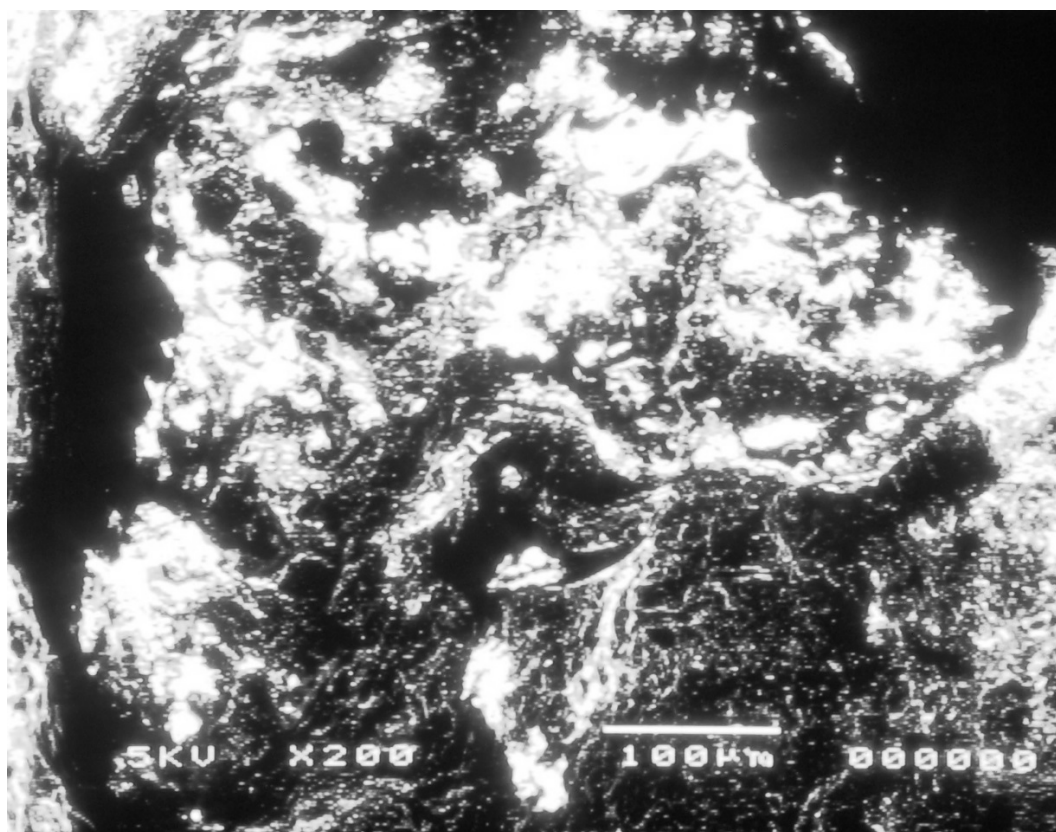


Fig. 11. The same sample. Magnification 200x, scalebar 100 µm, accelerating voltage 5 kV

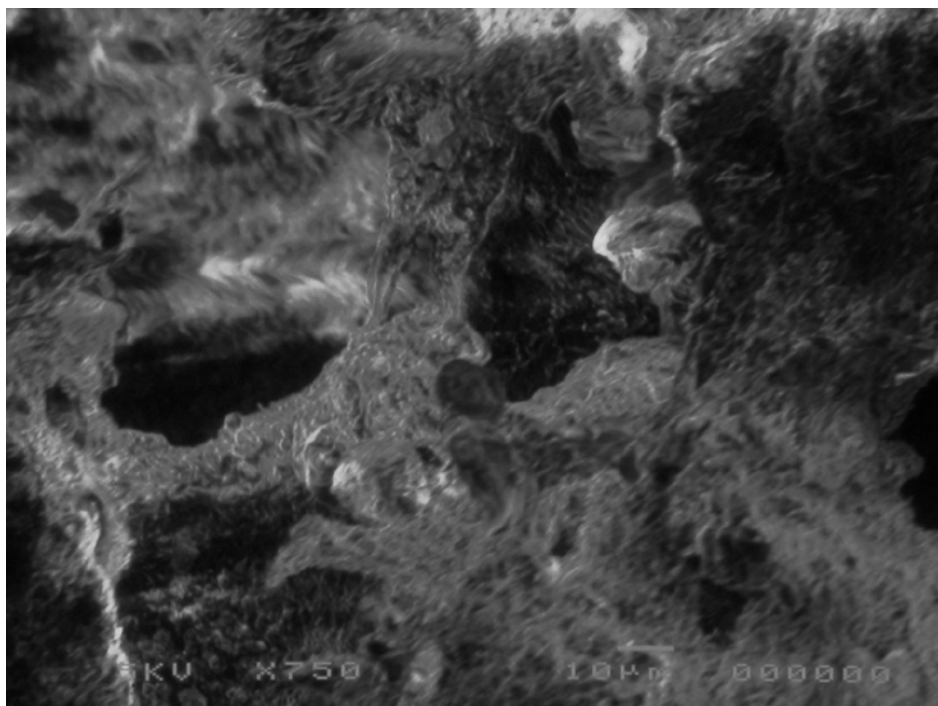


Fig. 12. The same sample. Magnification 750x, scalebar 10 µm, accelerating voltage 5 kV

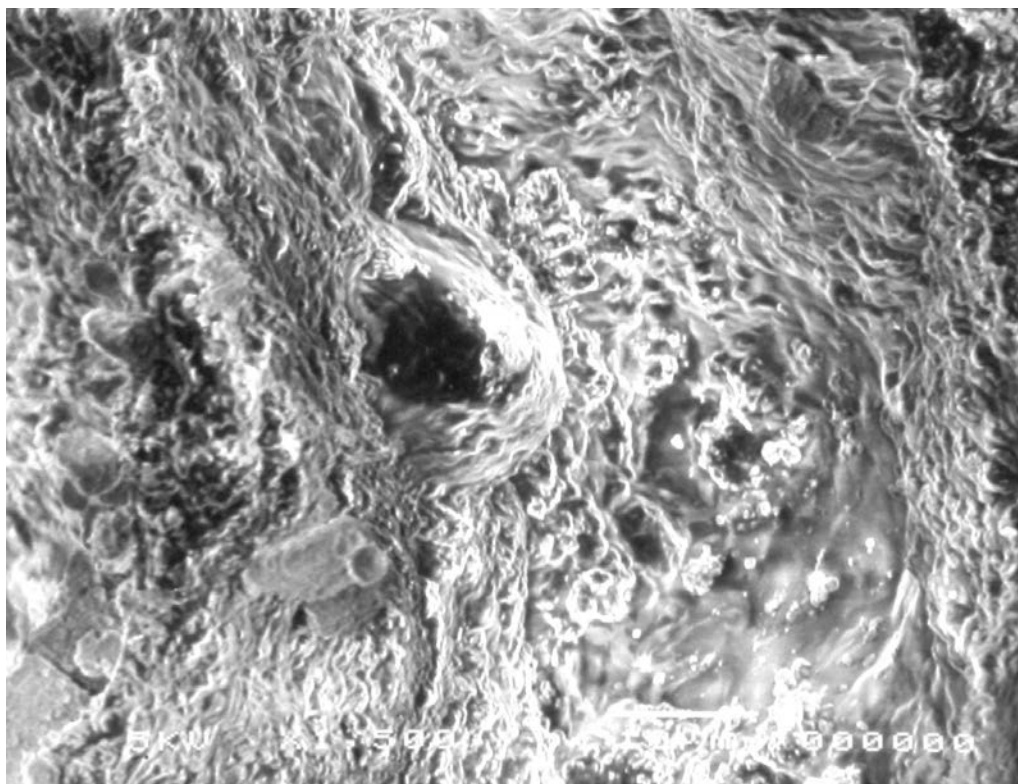


Fig. 13. The same sample. Magnification 1500x, scalebar 10 µm, accelerating voltage 5 kV

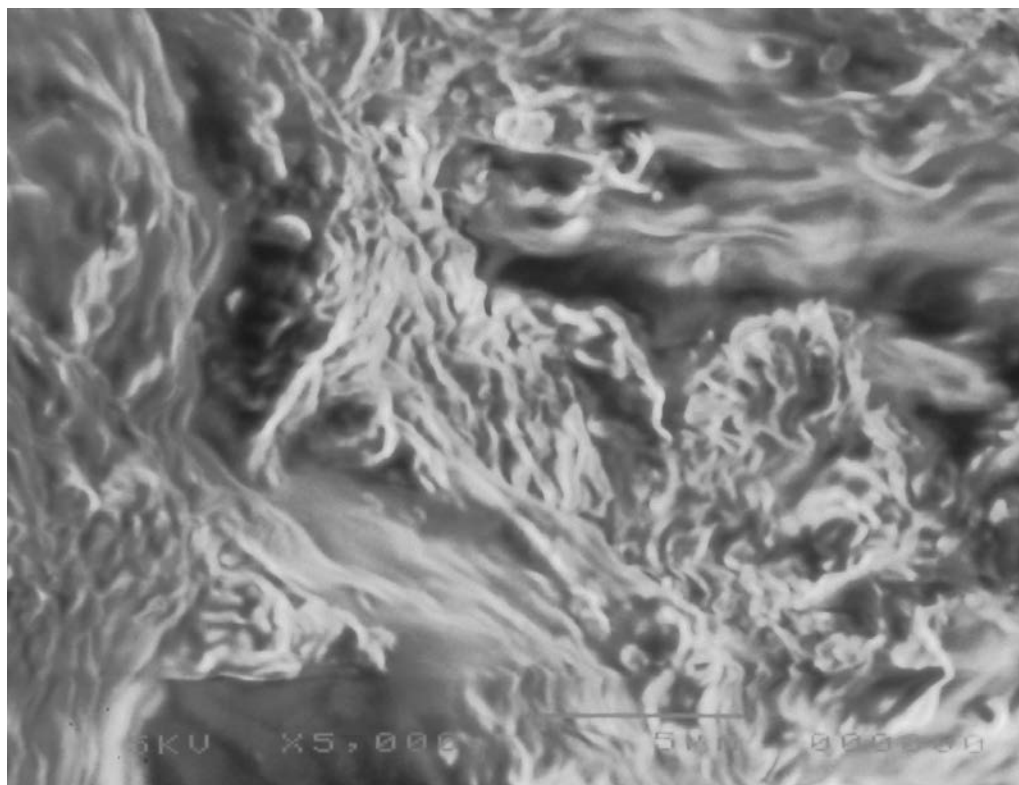


Fig. 14a. The same sample. Magnification 5000x, accelerating voltage 5 kV

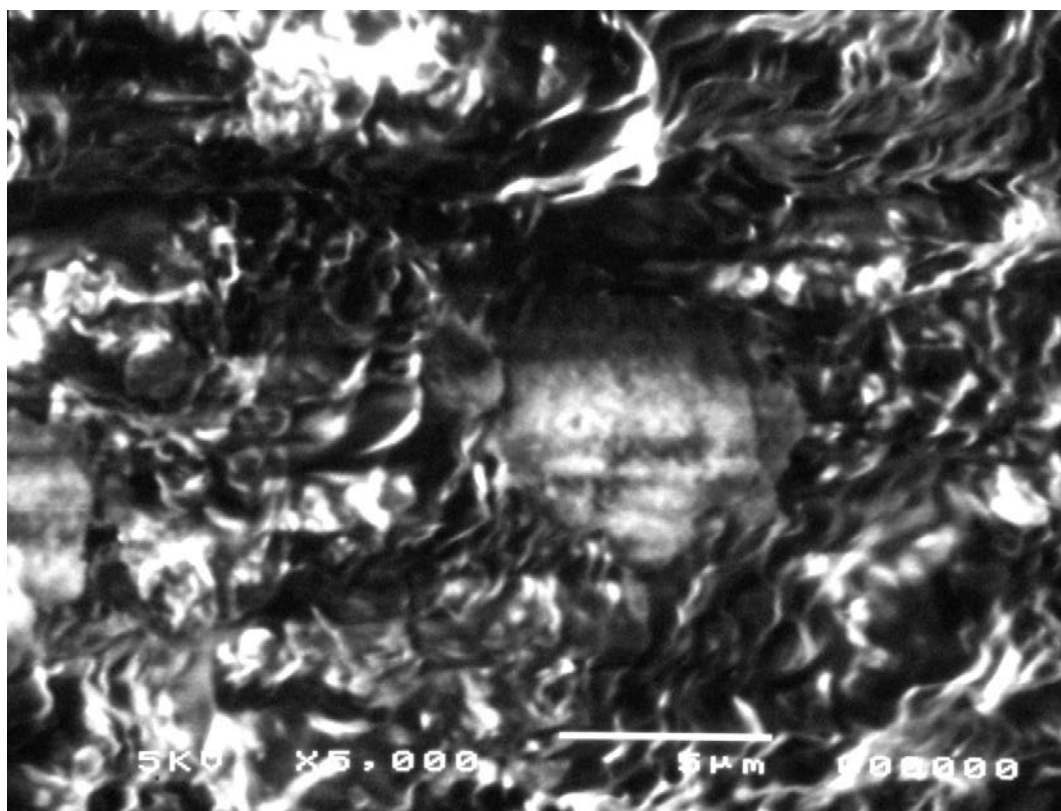


Fig. 14b. The same sample. Magnification 5000x, accelerating voltage 5 kV (another ROI)

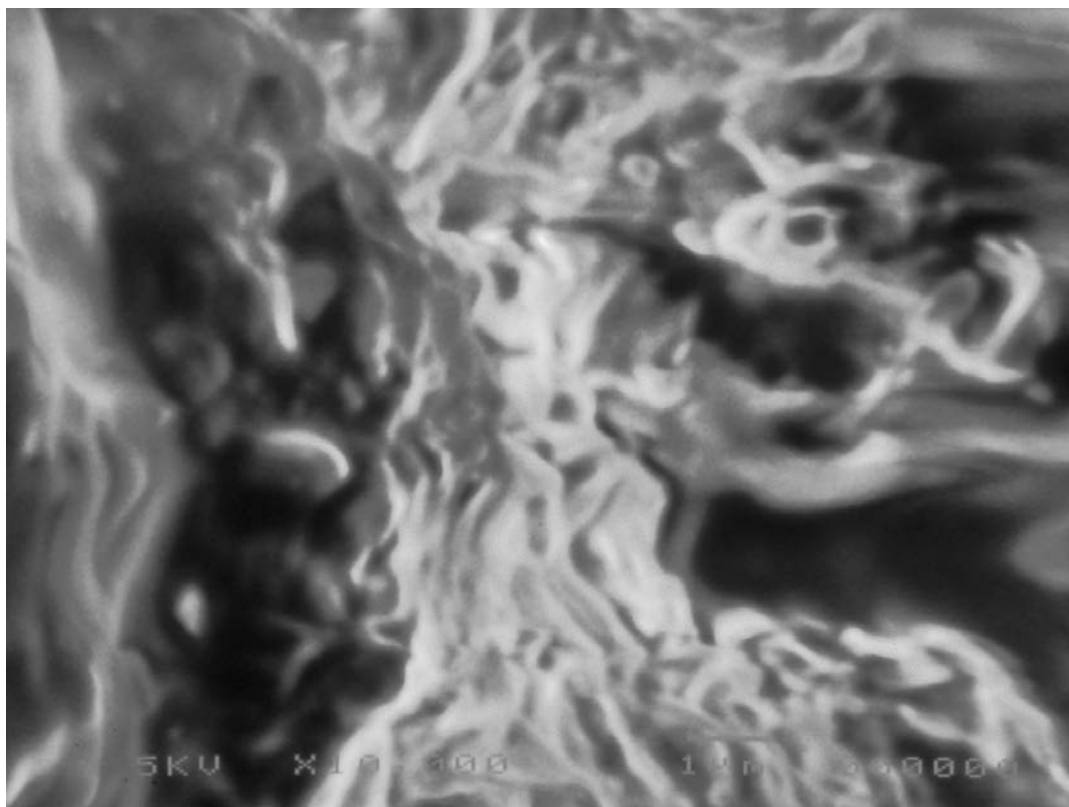


Fig. 15. The same sample. Magnification 10,000x, accelerating voltage 5 kV

4. Conclusion

Fossil elasmobranch teeth collected from multiple geographic regions, contrasting depositional settings, and different palaeo-oceans/palaeoclimates offer valuable archives of past marine conditions, but they pose a general analytical challenge for us: ensuring comparability among samples affected by locality-specific diagenesis. Primary biological and environmental signatures in enameloid and dentine can be partially overprinted by recrystallisation, mineral replacement, and post-burial elemental uptake. To discriminate these signals reliably, an integrated microstructural–geochemical workflow is required in which scanning electron microscopy is combined with electron-probe microanalysis with energy-dispersive (EDS) and wavelength-dispersive (WDS) X-ray spectroscopy. Deposits formed in different basins, palaeo-continentes and palaeo-oceans commonly experienced contrasting diagenetic histories (chemistry, burial temperature, sedimentation time and substitution, redox state of the environment). These factors can overprint tooth tissues in ways that mimic or obscure primary biological/environmental signals. SEM provides the necessary taphonomic and microstructural context prior to geochemical interpretation. Backscattered-electron imaging and high-resolution secondary-electron imaging allow direct assessment of sample preservation states. SEM also resolves diagnostic enameloid ultrastructure, enabling the distinction between preserved biogenic fabrics and diagenetic mosaics that may mimic original biogenic features.

5. Author's contribution

1. Pavel L. Alexandrov – Automation of the electron microscope. Fabrication of an adapter for a camera. Designing and soldering circuits and connecting cables. Collection of elasmobranch teeth. Production of microphotographs of fossil teeth of elasmobranchs in the magnification range from 35 x to 10 000 x. Writing the "Materials and Methods" section and user manuals for users of the electron microscope digitized and upgraded by him.

2. Mikhail K. Filippov – Restorations of the vacuum systems, cleaning of the electron microscope column, commissioning of a new power supply source, replacement of technical oils.

3. Theodor K. Orekhov – Digital image processing using artificial intelligence. Writing a review on the applications of spectral methods and microprobe analysis (also using artificial intelligence and interactively). Working with open access spectral databases for mineral identification in fossil diagenesis and biomineralization processes.

6. Acknowledgements

The authors express their gratitude to the organizers of the Electron Microscopy Center of the Institute of Chemical Physics and the Institute of Energy Problems of Chemical Physics (2018–2019) for support of the research and to the participants of the joint project on biomedical engineering for funding the upgrade and restoration of the first electron microscope.

Statement on the Use of Artificial Intelligence

Artificial intelligence (AI) was used for this short technical note in English to refine the arguments supporting the feasibility of implementing electron microscopy, microprobe analysis, and X-ray spectroscopy methods by the last author (in 2025–2026).

Declaration of Absence of Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest between them.

References

- [Adnet et al., 1990](#) – Adnet, S., Marivaux, L., Cappetta, H., Charruault, A.L., El Mabrouk, E., Jiquel, S., Ammar, H.K., Marandat, B., Marzougui, W., Merzeraud, G., Temani, R. (2020). Diversity and renewal of tropical elasmobranchs around the Middle Eocene Climatic Optimum (MECO) in North Africa: New data from the lagoonal deposits of Djebel el Kébar, Central Tunisia. *Palaeontologia Electronica*. 23(2): a38.
- [Beavan, Russell, 1999](#) – Beavan, N.R., Russell, A.P. (1999). An elasmobranch assemblage from the terrestrial-marine transitional lethbridge coal zone (Dinosaur Park Formation: Upper Campanian), Alberta, Canada. *Journal of Paleontology*. 73(3): 494-503.
- [Boulembia, Adnet, 2023](#) – Boulembia, S., Adnet, S. (2023). A new Palaeogene elasmobranch fauna (Tebessa region, eastern Algeria) and the importance of Algerian-Tunisian phosphates for the North African fossil record. *Annales de Paléontologie*. 109(3): 102632.
- [Cappetta et al., 2006](#) – Cappetta, H., Buffetaut, E., Cuny, G., Suteethorn, V. (2006). A new elasmobranch assemblage from the Lower Cretaceous of Thailand. *Palaeontology*. 49(3): 547-555.
- [Daymond, 1999](#) – Daymond, S.M. (1999). Gondwanodus irwinensis gen. et sp. nov., a new elasmobranch from the Early Permian (Late Sakmarian) Fossil Cliff Member of the Holmwood Shale, Perth Basin, Western Australia. *Records – Western Australian Museum*. 19(4): 371-378.
- [Feichtinger et al., 2025](#) – Feichtinger, I., Weinmann, A.E., Harzhauser, M., Schwarzhans, W., Golebiowski, R., Pollerspöck, J. (2025). Deep-marine elasmobranchs from the Badenian (Langhian, Middle Miocene) of the Central Paratethys of Austria. *Austrian Journal of Earth Sciences*. 118(1): 205-217.
- [Höltke et al., 2023](#) – Höltke, O., Salvador, R.B., Rasser, M.W. (2023). Trophic relationships in the Early Miocene Upper Marine Molasse of Baden-Württemberg, Southwest Germany, with special emphasis on the elasmobranch fauna. *Palaeontologia Electronica*. 26(3): 1-38.
- [Iserbyt, De Schutter, 2012](#) – Iserbyt, A., De Schutter, P.J. (2012). Quantitative analysis of Elasmobranch assemblages from two successive Ypresian (early Eocene) facies at Marke, western Belgium. *Geologica belgica*. 15(3): 146-155.
- [Johns et al., 2014](#) – Johns, M.J., Albanesi, G.L., Voldman, G.G. (2014). Freshwater shark teeth (Family Lonchidiidae) from the Middle-Upper Triassic (Ladinian-Carnian) Paramillo Formation in the Mendoza Precordillera, Argentina. *Journal of Vertebrate Paleontology*. 34(3): 512-523.
- [Kocsis, 2024](#) – Kocsis, L. (2024). The elasmobranch fossil record of the Indo-Australian Archipelago since the Miocene: a literature review and new discoveries from Northern Borneo. *Diversity*. 16(6): 323.
- [Landini et al., 2017](#) – Landini, W., Collareta, A., Pesci, F., Di Celma, C., Urbina, M., Bianucci, G. (2017). A secondary nursery area for the copper shark *Carcharhinus brachyurus* from the late Miocene of Peru. *Journal of South American Earth Sciences*. 78: 164-174.

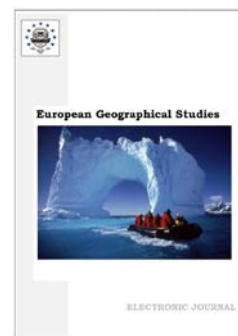
- [Leidner, Thies, 1999](#) – *Leidner, A., Thies, D.* (1999). Placoid scales and oral teeth of Late Jurassic elasmobranchs from Europe. *Mesozoic fishes*. 2: 29-40.
- [Lin et al., 2022](#) – *Lin, C.Y., Lin, C.H., Shimada, K.* (2022). A previously overlooked, highly diverse early Pleistocene elasmobranch assemblage from southern Taiwan. *PeerJ*. 10: e14190.
- [Long, 1992](#) – *Long, D.J.* (1992). Sharks from the La Meseta Formation (Eocene), Seymour Island, Antarctic Peninsula. *Journal of Vertebrate Paleontology*. 12(1): 11-32.
- [Mertiniene, 1995](#) – *Mertiniene, R.* (1995). The teeth of *Symmorium reniforme* cope from the Upper Carboniferous of the Moscow area (Russia). *Geobios*. 28: 147-150.
- [Mutter et al, 2007](#) – *Mutter, R.J., De Blanger, K., Neuman, A.G.* (2007). Elasmobranchs from the Lower Triassic Sulphur Mountain Formation near Wapiti Lake (BC, Canada). *Zoological Journal of the Linnean Society*. 149(3): 309-337.
- [Paton, 1993](#) – *Paton, R.L.* (1993). Elasmobranch fishes from the Viséan of East Kirkton, West Lothian, Scotland. *Earth and Environmental Science Transactions of The Royal Society of Edinburgh*. 84(3-4): 329-330.
- [Prasad et al., 2004](#) – *Prasad, G.V., Manhas, B. K., Arratia, G.* (2004). Elasmobranch and actinopterygian remains from the Jurassic and Cretaceous of India. *Mesozoic fishes*. 3: 625-638.
- [Prasad et al., 2017](#) – *Prasad, G.V., Verma, V., Sahni, A., Lourembam, R.S., Rajkumari, P.* (2017). Elasmobranch fauna from the upper most part of the Cretaceous Bagh Group, Narmada valley, India. *Island Arc*. 26(5): e12200.
- [Radwański, Marcinowski, 1996](#) – *Radwański, A., Marcinowski, R.* (1996). Elasmobranch teeth from the mid-Cretaceous sequence of the Mangyshlak Mountains, Western Kazakhstan. *Acta Geologica Polonica*. 46(1-2): 165-169.
- [Rees et al., 2024](#) – *Rees, J., Campbell, H.J., Simes, J.E.* (2024). The first Triassic elasmobranch teeth from the Southern Hemisphere (Canterbury, New Zealand). *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*. 67(4): 426-433.
- [Schubert, 2013](#) – *Schubert, J.* (2013). Elasmobranch and osteichthyan fauna of the Rattlesnake Mountain Sandstone, Aguja Formation (Upper Cretaceous; Campanian), West Texas (Doctoral dissertation).
- [Schultz, 1977](#) – *Schultz, O.* (1977). Elasmobranch and teleost fish remains from the Korytnica Clays (Middle Miocene; Holy Cross Mountains, Poland). *Acta Geologica Polonica*. 27(2): 201-210.
- [Shimada et al., 2015](#) – *Shimada, K., Popov, E.V., Siversson, M., Welton, B.J., Long, D.J.* (2015). A new clade of putative plankton-feeding sharks from the Upper Cretaceous of Russia and the United States. *Journal of Vertebrate Paleontology*. 35(5): e981335.
- [Smale, 2005](#) – *Smale, M.J.* (2005). The diet of the ragged-tooth shark *Carcharias taurus* Rafinesque 1810 in the Eastern Cape, South Africa. *African Journal of Marine Science*. 27(1): 331-335.
- [Sokolskyi, Guinot, 2021](#) – *Sokolskyi, T., Guinot, G.* (2021). Elasmobranch (chondrichthyes) assemblages from the Albion (lower Cretaceous) of Ukraine. *Cretaceous Research*. 117: 104603.
- [Suaez et al., 2004](#) – *Suaez, M., Encinas, A., Ward, D.* (2004). An Early Miocene elasmobranch fauna from the Navidad Formation, Central Chile, South America. *Cainozoic Research*. 4(1/2): 3-18.
- [Swinehart et al., 2020](#) – *Swinehart, A.L., Hoenig, M.M., Ginter, M.* (2020). A new addition to the Devonian elasmobranch fauna of Michigan, USA. *The American midland naturalist*. 184(1): 109-115.
- [Yun, 2021](#) – *Yun, C.G.* (2021). First deep-sea shark fossil teeth from the Miocene of South Korea. *Zoodiversity*. 55(3): 225-232.

Copyright © 2025 by Cherkas Global University



Published in the USA
European Geographical Studies
Issued since 2013.
E-ISSN: 2413-7197
2025. 12(1): 26-56

DOI: 10.13187/egs.2025.1.26
<https://egs.cherkasgu.press>



The Plastisphere as an Evolutionarily New Geospheric Shell and a “Biogeochemical Reactor” of the Technosphere (Introductory Methodological Review)

Oleg V. Gradov ^{a, *}, Yurii V. Zhulanov ^b, Pavel Yu. Makaveev ^b, Mikhail K. Filippov ^a

^a Semenov Institute of Chemical Physics RAS, Moscow, Russian Federation

^b Karpov Institute of Physical Chemistry, Moscow, Russian Federation

Abstract

In this brief introductory review, we provide a basic understanding level/basic principles of the biogeography, geoecology/hydroecology, and geochemical role of the plastisphere and the species diversity of microorganisms in the plastisphere. The final section of the article presents a number of experimental approaches and photographs of the instruments used to study it. The technical part of this review is based on the groundwork of a 2018 workshop on microplastic analysis methods, prepared for demonstration at the Institute of Physical Chemistry/Physicochemical Institute in Moscow (however, without using outdated references). Unfortunately, this work could not be implemented due to the closure of the Moscow base of this institute. However, the general philosophy of this research not only remains relevant today (given the increasing technical capabilities of modern science) but is also becoming increasingly relevant as microplastic pollution of the biosphere increases and the microbiota evolves in the face of climate change. In shortened and terminologically simplified version, this elementary review may be useful to readers, starting with junior students.

Keywords: plastisphere, microplastic, technosphere, geomicrobiology, geoecology, hydroecology, micro-particle analyzer, EPMA.

1. Пластисфера как новая эволюционная геосферная оболочка планетарного масштаба.

Общеизвестно, что пластисфера является очередной геосферной «оболочкой» планетарного масштаба, в которой на инертном плохо разлагаемом органическом веществе существуют микроорганизмы (био пленки (Di Pippo et al., 2022; Yu et al., 2023)) и целые экологические сообщества. Ключевым понятием в развитии пластисферы является микробиологическая колонизация поверхности пластика (“microbial colonization”, “bacterial colonization” (Agostini et al., 2021; Kelly et al., 2022; Stevenson et al., 2023; Zhai et al., 2023; Silva et al., 2023)). Разнообразие сообществ и взаимодействий на колонизированных поверхностях пластика и с окружающей средой позволяет говорить об экологии пластисферы (Amaral-Zettler et al., 2020; Nguyen et al., 2023). Стабильность по составу подложек – пластиков приводит к возможности проявления постоянства трендов эволюции микроорганизмов в данной среде, в силу чего для каждого типа сред нахождения соответствующего пластика формируется стабильная ниша (Yokoyama et al., 2023), в которой процессы эволюции микроорганизмов идут в одном направлении, закрепляя в отборе

* Corresponding author

E-mail addresses: geochemicalphysics@gmail.com (O.V. Gradov)

комплексно формирующиеся особенности физиологии микроорганизмов, оптимальные для разложения данного пластика (Delacuvellerie et al., 2022; Chen et al., 2024). Вместе с тем, идёт дивергенция между специализированными для разных химически составов пластика линиями микроорганизмов.

Одним из классических примеров эволюции в пластисфере является изменение и, как правило, усиление антибиотикорезистентности микроорганизмов пластисферы (Junaid et al., 2022). Отсюда понятно, что методы анализа и контроля/мониторинга данных сообществ относятся не к геномике отдельных видов, а к метагеномике всего сообщества и к метатранскриптомике пластисферы (Wu et al., 2022) (относительно применимости нанопоровых технологий секвенирования для метагеномов мы писали в (Maklakova et al., 2021; Adamovich, Gradov, 2024)). Кроме того, они должны учитывать факторы среды, по отношению к которым идет отбор, в том числе абиотические и ксенобиотические, к которым относятся, если трактовать термин широко, перманентные токсикологические и фармакологические загрязнения (например – органические факторы эвтрофикации или постоянно аккумулируемые в биосфере антропогенные органические стоки (Lin et al., 2024)).

2. Биоразнообразие и биогеографическое разнообразие пластисферы

Следует отметить, что в состав пластисферы входят не только бактерии на пластике в почве или гидросфере (Luo et al., 2022). Нужно анализировать пластисферу как геосферную оболочку во всей полноте сообществ, межвидовых и межтаксонных взаимодействий (Amaral-Zettler et al., 2021; Žuna Pfeiffer et al., 2022).

В составе пластисферы в гидросфере находят фитопланктон и зоопланктон (Cheng et al., 2021; Balkić et al., 2022). В последнее время всё громче звучат призывы учета диатомовых водорослей пластисферы и макроскопических беспозвоночных (Taurozzi et al., 2023). В состав почвенной пластисферы входят также обитатели ризосферы (Ran et al., 2024), не исключая (но и не ограничиваясь ими) клубеньковых бактерий-азотфиксаторов и простейших, обитающих на интерфейсе между пластиком и средой в межвидовых сообществах на поверхности мульчи (Luo et al., 2022; Wang et al., 2023; Li et al., 2024). Одни таксоны организмов могут считаться специфическими только для почвенной или только для водной пластисферы, а другие могут быть и водными, и наземными. Например, различные грибы и слизевики в пластисфере встречаются не только в почве, но и в речной и прибрежной зоне (Pietrelli et al., 2017; Xue et al., 2021). Очевидно, что вирусы и плазмиды, встречаясь у разных бактерий (не только бактериофаги), могут встречаться в пластисфере пресноводных, соленоводных, почвенных, эдафологических и других мест обитания (Li et al., 2022; Kutralam-Muniasamy et al., 2024) (почвенная пластисфера – «soil plastisphere» – с биогеографических позиций, представляет собой частный случай наземной пластисферы – «terrestrial plastisphere» (MacLean et al., 2021; Rillig et al., 2024)).

В настоящее время часто выделяют следующие типы или биотопы водных пластисфер (в силу различий, как биохимических, так и биогеохимических, между микробными сообществами пресноводных и морских экосистем (Wen et al., 2020; Dey et al., 2022)):

- Пресноводная пластисфера (freshwater plastisphere) (Barros, Seena, 2021; Song et al., 2023; Xu et al., 2024; Bocci et al., 2024), в том числе речная пластисфера (Zadjelovic et al., 2023; Xu et al., 2023; Silva et al., 2024) и специфически выделяемая из-за антропогенного загрязнения речная пластисфера урбанизированных местностей (Zhu et al., 2023).

- Пластисфера дождевой воды и воздействия дождевых вод на пластисферу рек, озер, морей и океанов, искусственных водохранилищ и т.д. (см., напр. (Wu et al., 2023)).

- Морская пластисфера (Zettler et al., 2013; Du et al., 2022; Barbe et al., 2024; Lacerda et al., 2024) (в которой отдельно выделяют пластисферу мелководья (Tigreros-Benavides et al., 2024), а в принципе можно было бы выделить также пластисферу пелагиали, пластисферу абиссали и т.д.).

- Озёрная пластисфера и пластисфера озёрных отложений (Yang et al., 2023).

- Пластисфера эстуариев (Forero-López et al., 2022; Sosa, Chen, 2022; Su et al., 2022; Sérvulo et al., 2023).

- Пластисфера побережий и пляжей (Chaimusik et al., 2024).

И т. д.

К гибридным дисперсным или soft mater carrier based «биотопам» пластисферы относят

- Седиментологические формы пластисферы, в том числе на пластиковом дебрисе в пределах маршевых отложений (Rosato et al., 2022; Koh et al., 2023)).

- Пластисферу техногенных и антропогенных муниципальных стоков и пластисферу свалок твердых бытовых отходов (Lin et al., 2023; Ye et al., 2024).

- Пластисферу заболоченных местностей (эдафологическая пластиомика – недоизведанная отрасль, но в целом ряде заболоченных и антропогенно загрязненных местностей на территории Евразии она может найти себе применение).

Как дорожную карту развития исследований в области пластисферы, различных по биогеографической локализации исследований можно использовать не более десятка современных пропозициональных работ (в качестве примера можно привести (Dąbrowska, 2021)).

В действительности, определение биотопов пластисферы требует учета биогеографических условий, так как биотопы арктических морей неэквивалентны южным морским или средиземноморским биотопам, равно как и наземные биотопы пластисферы в области вечной мерзлоты и таликов отличаются от биотопов криозоны в области Антарктиды. Микробы, деградирующие пластик, в Арктике и в Альпах существенно отличаются (Rüthi et al., 2023). Морские биотопы пластисферы зависят от солености воды и нередко бывают в большей степени похожи на пресноводные биотопы. В то же время в некоторых солевых озерах галофильные виды делают формирующиеся микробные сообщества похожими на морские. Известно явление зависимости биodeградируемости микропластика от местоположения на линии «пресные воды – морские воды» (Zhou et al., 2023).

В то же время, известно влияние климата на формирование биотопов пластисферы. Глобальное потепление климата как тренд, несомненно, влияет на изменение видового состава биопленок и биотопов пластисферы, а также на состав выделяемых при биоразложении пластика в соответствующих условиях летучих и нелетучих продуктов (Ji et al., 2022). Однако и одиночные климатические события (ураганы, снежные заносы, экстремальная жара, наводнения) рассматривают как немаловажный фактор для эволюции пластисферы (Karkanorachaki et al., 2023). Примером таковых событий, имеющих чётко прослеживаемые механизмы воздействия на микробиоту пластисферы, может быть активируемое турбулентностью тайфуна перераспределение микропластика, приводящее к реформированию микробных сообществ пластисферы (Chen et al., 2021). В рамках теории катастроф можно обобщить этот результат на многие и разноплановые по происхождению факторы, в результате которых или после которых микробное сообщество проходит точку бифуркации и качественно изменяет свой метаболический и микрoэкологический профиль.

3. Геохимическая и аэрохимическая активность пластисферы

Геохимическая и аэрохимическая активность пластисферы включает в себя азотный метаболизм микробов и биогеохимические циклы азота (Huang et al., 2024), фосфора (Song et al., 2024), углерода (Kirstein et al., 2019; Cornejo-D'Ottone et al., 2020; Shan et al., 2023)), а также биоаккумуляцию металлов в пластисфере (Tarchi et al., 2023; Lenoble et al., 2024). В силу наличия активности в области микрочастиц металлов, включая железо, логично говорить о возможности протекания фото-фентон-процессов на поверхности микропластика и иных элементов пластисферы при открытом их экспонировании, в том числе в океане (Lu et al., 2024). Точнее геохимическая активность пластисферы может быть рассмотрена через призму активности ионных каналов (Gradov, 2016a; Александров, Градов, 2017; Gradov, 2018) или анализ расширенного фенотипа микроорганизмов соответствующих местообитаний (Gradov, 2016b).

4. Константна ли граница биodeградируемых и небiodeградируемых пластиков в пластисфере?

Известны биопленки и другие проявления пластисферы на таких широко распространенных пластиках (как продуктах нефтехимического синтеза (Pang et al., 2023), так и биопластиках, сгенерированных микроорганизмами, таких как полигидроксibuтират), как:

- полиэтилен (Delacuvellerie et al., 2019; Joshi et al., 2022; Wang et al., 2023; Zhang et al., 2023);
- полипропилен (Sun et al., 2023);
- полиэтилентерефталат (Wright et al., 2021);
- полистирол (Poeta et al., 2017);
- полиуретан (Park et al., 2023);
- полибутилен сукцинат и сукцинат-ко-адипат полибутилена (Kimura et al., 2023; Tanunchai et al., 2023);
- полигидроксиалканоаты, в частности – полигидроксибутират (Vannini et al., 2021);
- полибутиленадипаттерефталат и его бленды с полилактидом (Chen et al., 2023);
- нейлон (Collins et al., 2023).

Можно видеть, что речь идёт как о биodeградируемых полимерах, так и об обычных пластиках (Jacquin et al., 2019; Behera, Das, 2023).

Впрочем в данном случае вопрос принадлежности пластиков пластисферы следует относить к числу нерешенных. И каждое новое сообщение о нахождении новых ферментов, способствующих биodeградации пластика в пластисфере (Frey et al., 2024), дальше сдвигает границу этой неопределенности или расширенной трактовки (особо, если исходить впоследствии из метагеномики, позволяющей понять потенциал биоразложения конкретных многовидовых сообществ, сложившихся в конкретных условиях (Saleem et al., 2023)). Сдвигает границы между неразлагаемыми и биоразлагаемыми материалами в пластисфере также и пластиомика ("plastiomics") – наука о пластиоме ("plastiome" = plastisphere-enriched mobile resistome (Guruge et al., 2024)); одна из новых мультиомиксных наук, приводящих в перспективе к полному анализу микробного разнообразия пластисферы и мультиомиксной характеристике биodeградации и связанной с ней сукцессии в многовидовых сообществах (Wright et al., 2021a; Tiwari et al., 2022). Как известно, в пластики часто закладывают компоненты, резистентные по отношению к биоразложению или антимикробные по сути. В результате же эволюции, упомянутой в начале статьи, происходит отбор микроорганизмов пластисферы по критерию резистентности к данным факторам (Stevenson et al., 2024) и выработка совокупности генов резистентности к данным добавкам – (т.н. "resistome"). Поэтому в настоящее время адаптация микроорганизмов к распространению в пластисфере обычно также рассматривается как путь к появлению в окружающей среде резистентных штаммов (Zagui et al., 2022). В частности, из этого следует, что следующие поколения и новые штаммы микроорганизмов будут разлагать резистентные к более ранним формам и габитусам (как коррелятам экониш и изменяющихся условий среды (Xie et al., 2023)) тех же микроорганизмов материалы! Таксономические границы биоразложения будут стремительно меняться с эволюцией пластисферы, отдельных штаммов и видов микроорганизмов и микробных сообществ в ней.

5. Пластисфера почв

Теперь перейдём к почве и действию микрофлоры из почвенной пластисферы на биоразложение пластиков в ней. Мы не будем ограничиваться бактериями – так как в биоразложении принимают существенное участие и почвенные грибы. В наших ранних работах с использованием лабораторий на чипе или оптофлюидных сенсоров с полимерным покрытием, погружаемым в почву, мы установили, что в ходе биоразложения качество изображения на погружном сенсоре меняется, в силу разложения полимера или воздействия микроорганизмов и среды на полимер. Позже мы пытались подойти к задаче исследования этого эффекта с позиций масс-спектрометрического (для обеспечения "omics approach") или иного локализованного химического анализа (Jablokov et al., 2017; Jablokov et al., 2018; Orekhov, Gradov, 2022; Orekhov, Gradov, 2023), однако же нами была допущена ошибка в конструкции чипа – оказалось, что полимер в гибридных чипах ионизируется под лазерным пучком и искажает результаты эксперимента. Поэтому необходимо создание чипов, которые в своей конструкции не содержат никаких иных полимеров (ни в форме адгезивов, ни в форме герметиков, ни в форме красящих или защитных покрытий), если мы хотим точно исследовать именно биodeградацию либо почвенно-геохимическую деградацию конкретных полимеров в почвенной пластисфере.

Пластисфера почв, вероятно, является наиболее изученной частью глобальной пластисферы (Rillig et al., 2024). Для неё найдены оптимальные методы исследования, выявлены воздействия различных факторов и экологических условий, реализована полная или почти полная биогеохимическая расшифровка механизмов организующих и обеспечивающих функциональность микробиоты пластисферы в почве, исследованы видовые роли и распределения различных по функциональности организмов-деструкторов на интерфейсах абиогенного и биокосного вещества (rare and abundant microorganisms between plastisphere and soils) (Sun et al., 2022; Wanget al., 2022). Изучены редокс-процессы и эффекты pH и Eh on shaping plastisphere bacterial communities in soil, в том числе в зависимости от содержания микроэлементов и химических контаминантов в почве (Li et al., 2021).

В случае почвенной пластисферы исследованы множественные эффекты действия тяжелых металлов и дезинфектантов на антибиотикорезистентность почвенных микроорганизмов и сообществ пластисферы (Xiang et al., 2022; Ni et al., 2024). Они исследованы не только для микроорганизмов, но и для мезофауны почвы. В связи с этим, данные эффекты могут считаться наиболее предсказуемыми, по отношению к биогеохимическим эффектам для экзотических биотопов, а почва может считаться естественной лабораторией или биополигоном для отработки навыков работы с экологическими, биогеохимическими и материаловедческими (биodeградация) аспектами пластисферы (если не принимать во внимание размывающие смысл концептуальные обобщения уровня "continental-scale microcosm" (Sun et al., 2024)).

В конкретных случаях, имеющих практическое значение, в почве разлагаются вполне конкретные полимеры или композиты известного происхождения – от техногенного (т. е., по умолчанию, исходно не содержащего патогенной микрофлоры) до антропогенного генеза (например, накопившиеся за время пандемии COVID в почве маски и респираторы, потенциально содержащие бактерии из выдоха человека (Li et al., 2023; Cheng et al., 2024; Gradov, 2025), а также специальные фильтры инфекционных медучреждений). Пористые и волокнистые, в том числе нетканые материалы являются в этом аспекте сборщиками для микробиома почвенной пластисферы (Rohrbach et al., 2023), но их эффективность сильно зависит от свойств материала, включая измеримую пористость (Grigorieva et al., 2021; Grigorieva et al., 2022; Grigorieva et al., 2023; Grigorieva et al., 2025; Maklakova et al., 2021), так как размеры пор должны соответствовать размерам микроорганизмов и быть не меньше их.

Нередко в почве после мульчирования находятся небиodeградируемые фрагменты микропластика (Li et al., 2024). В некоторых случаях даже потенциально биоразлагаемые компоненты не смогут быть разложены, в силу несоответствия размерам возможной колониеобразующей единицы размеров остающегося стабильного островка полимера или композита (Zhao et al., 2023). В некоторых случаях в почве могут обнаружиться (или быть в нее специально заложены в ходе удобрения почв) также фрагменты, способные к постепенному высвобождению определенных химических агентов (Tian et al., 2024).

6. Важность имэджинговых и мэппинговых исследований и методов микроскопии для характеристики объектов пластисферы

Из вышеизложенного следует, что характеризацию объектов пластисферы следует производить дискретно и с геодезической привязкой в биолого-географическом аспекте и с пространственно-временной метрикой в ходе исследования климатических и метеорологических влияний на пластисферу. Более того, из вышеизложенных теоретических и библиографических предпосылок следует необходимость внедрения микроскопических или, корректнее, микроаналитических методов высокого разрешения (включая MALDI imaging или конфокальную рамановскую микроскопию) в исследования пластисферы и продуктов её биологической и/или экологической активности.

Действительно, ещё пять лет назад в классической статье задан вопрос: «Кто есть где в пластисфере?» («Who is where in the Plastisphere?») (Arias-Andres et al., 2020). Ответить на него без высокоразрешающих (или же позиционно-чувствительных) биогеографических и химико-экологических карт (беспрецедентного для других биотопов разрешения – из-за малости объектов исследования и их локализации, например - на частицах микропластика) не представлялось бы возможным.

Если говорить о микропластике и иных объектах пластисферы, то нужно также понять когда он выступает как ресурс для роста (то есть биodeградируется), а когда выступает только лишь как подложка, на которой растут микроорганизмы, питаясь совсем другими ресурсами окружающей среды (вопрос «Пищевой ресурс или только бесплатное средство для путешествий» – "Food or just a free ride?" – актуальный как для одиночных частиц либо фрагментированных пленок пластика, так и для пластисферы в целом (Wright et al., 2021b)).

Известное явление пространственного перекрытия областей жизни или ареалов основных и случайных таксонов в пластисфере также затрудняет возможность точной позиционно-чувствительной идентификации функций/биохимических ролей микроорганизмов в микробном сообществе и многослойных пленках пластисферы (Zhang et al., 2022). Происходящая в пространстве-времени сукцессия видов в многовидовом микробном сообществе, сообразно изменяющимся условиям среды (климатическим или субстратным, в том числе по мере трансформации при биоразложении многослойных или многокомпонентных композитов, в том числе - фрагментов ламинатов и армированных небiodeградируемыми компонентами биопластиков), требует пространственно-временного и кепстрального анализа микробных сообществ пластисферы и их потенциала для биodeградации пластиков (Miao et al., 2023). В последнем случае в популяциях или микробных сообществах могут происходить как дивергентные процессы, так и процессы конвергенции в процессе сукцессии и перекрытия областей существования/микроареалов (Wu et al., 2024; Zhang et al., 2024).

По этой причине в последнее время много авторов выступают за картирование и изджинг микроскопических микробных сообществ на пластике, в частности на морском пластике для установления пространственной структуры пластисферы (Schlundt et al., 2020).

7. Низкобюджетные методы.

По аналогии с анализом вклада геоморфологии и ландшафта в эволюцию на макроскопическом уровне, в случае микробных сообществ представляется возможным анализ вклада геометрии поверхности/микрорельефа/микрошероховатости и/или наношероховатости микропластика на эволюцию микробных сообществ (Dąbrowska et al., 2021). Многие авторы (как правило, с лучшим техническим оснащением лабораторий) говорят не только об имиджинге образцов пластисферы, но и о микроанализе, вплоть до локального стабильно-изотопного анализа and nanoSIMS single-cell imaging для определения колонизаторов пластисферы, по крайней мере, в почвенных условиях (Xiang et al., 2024).

Большим, как правило, коллаборативным (то есть "межведомственным") коллективам автором доступны не только исследования одиночных образцов на микроуровне, но и создание баз данных, соотносящих подобные исследования микрообразцов с географическими картами их локализации и метагеномными репрезентациями эволюции микробных сообществ. Высшим пилотажем считается анализ воздействия микробных сообществ с пластисферы на результаты поглощения микропластика другими видами живых организмов, различающихся по динамической локализации и картам миграций, биогеографическим и трофическим характеристикам. Как пример последнего подхода можно предложить новейшую работу по вкладу микропластика и ассоциированной с ним микробиоты пластисферы на физиологические и биохимические характеристики, а также паттерны экспрессии генов фильтрующих морскую воду ланцетников (Cheng et al., 2023). Очевидно, что подобные работы возможны также и для всех организмов-фильтраторов. Со временем таких работ, очевидно, будет появляться всё больше и больше. Но утверждение это верно только для лабораторий, имеющих достаточно современное оснащение.

Большинство российских и постсоветских лабораторий не обладает высокоуровневой техникой для данных целей. Возникает вопрос: как организовать анализ микропластика и микроорганизмов пластисферы на нем в низкобюджетных условиях? Очевидно, что в этом случае надо задействовать возможности конструкторских бюро (где они еще остались на территории институтов), мастерских (где они еще остались на территории институтов) и центров коллективного пользования (где они еще остались на территории институтов). В качестве примера предлагается proposal, который позволял производить подобные работы еще до «вхождения в моду» тематик по исследованию пластисферы в 2010-е гг. в НИФХИ

(московская база которого была ликвидирована и утилизирована на рубеже 2010–2020-х гг., а некоторые здания уже снесены).

Нами предлагалась для этого интеграция методов:

1. Лазерного анализа микропластика и наннопланктона в жидкости в проточных кюветах, предназначавшихся изначально для океанографических экспедиций (данная техника была разработана в конце прошлого века Ю.В. Жулановым с соавторами), как это показано на [Рисунке 1\(а-е\)](#) (впоследствии предлагалась и почти дошла до имплементации её адаптация для цитометрии ([Zhulanov et al., 2018](#)));

2. Сканирующей электронной микроскопии с анализом микрочастиц пластика и биогенных структур (в том числе известкового наннопланктона) на микрозонде на базе JEOL JSM-35CF с анализатором микрочастиц с «бинаризатором», то есть дискриминатором видеосигнала по амплитуде для выделения контуров и определения геометрических границ частиц микропластика (см. [Рисунок 2](#)); при этом уже в начале 2019 года (то есть незадолго до закрытия московской базы НИФХИ) предлагалось использовать для оцифровки систему П.Л. Александрова ([Alexandrov et al., 2025](#));

3. Корреляционно-спектрального анализа изображений микрочастиц пластика и наннопланктона для различения первых от вторых, а также анализа текстуры поверхности микропластика методами корреляционно-спектрального анализа (это было впоследствии реализовано не на JEOL JSM-35CF и опубликовано в недавних статьях, аргументационная часть которых перекрывается с настоящей просветительской статьёй ([Aleksandrov et al., 2025](#); [Gradov et al., 2024](#); [Gradov et al., 2025](#))).



Рис. 1а. Пример проточной кюветы макета лазерного счетчика-анализатора океанских гидрозоль (взвесей) конструкции Ю.В. Жуланова



Рис. 16. Пример проточной кюветы макета лазерного счетчика-анализатора океанских гидрозоей (взвесей) конструкции Ю.В. Жуланова



Рис. 17. Пример проточной кюветы макета лазерного счетчика-анализатора океанских гидрозоей (взвесей) конструкции Ю.В. Жуланова.



Рис. 1г. Пример проточной кюветы макета лазерного счетчика-анализатора океанских гидрозолей (взвесей) конструкции Ю.В. Жуланова

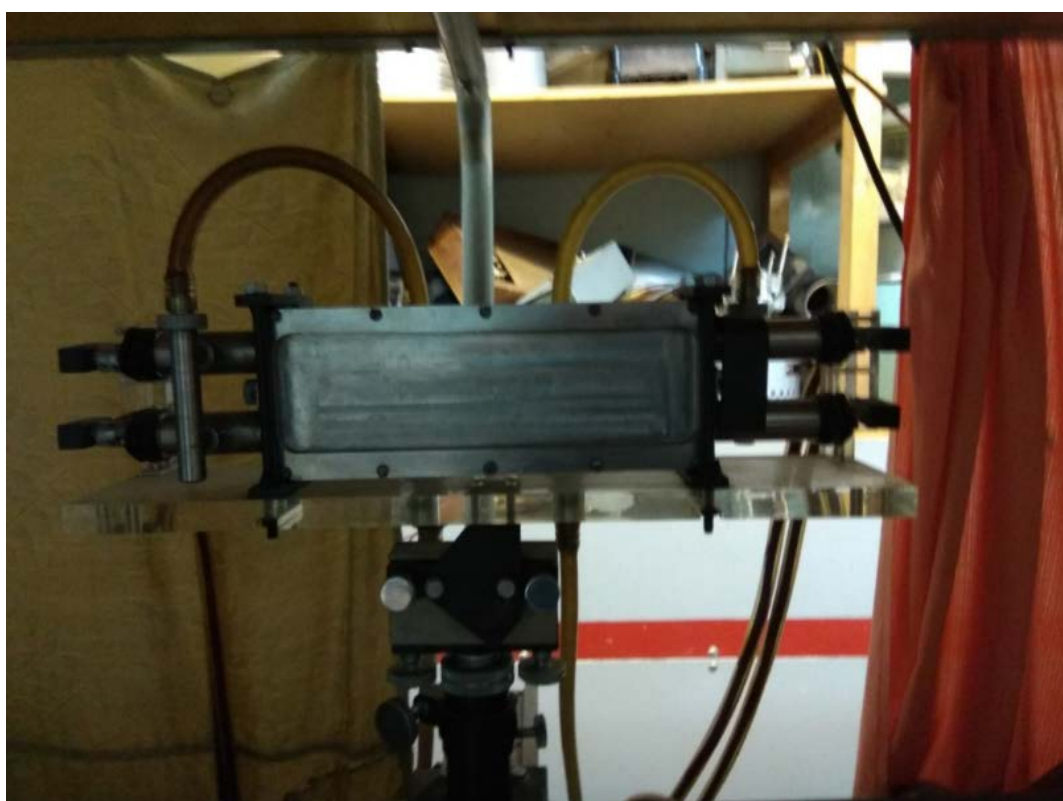


Рис. 1д. Пример проточной кюветы макета лазерного счетчика-анализатора океанских гидрозолей (взвесей) конструкции Ю.В. Жуланова



Рис. 1е. Пример проточной кюветы макета лазерного счетчика-анализатора океанских гидрозоей (взвесей) конструкции Ю.В. Жуланова



Рис. 2а. Анализатор микрочастиц JEOL MICRO-PARTICLE ANALYZER с настраиваемыми уровнями аналогового видеосигнала (VIDEO LEVEL) и дискриминации (DISCRIMINATOR). Он выдает таблицу (кнопка TABL) распределения микрочастиц по размерам и гистограмму (кнопка HIST) распределения микрочастиц по размерам. Измерение запускается кнопкой MEAS. Изображение изначально (до предлагавшейся группой О.В. Градова оцифровки) идёт через BNC-разъём на видеомонитор SM10A



Рис. 2б. Колонна электронного микроскопа JEOL JSM-35CF и ввод светового микроскопа, который используется для позиционирования образца для рентгеноспектрального анализа на круге Роуланда. В версии модернизации, предлагавшейся группой Градова, указанный микроскоп становился основой для CLEM – корреляционной световой и электронной микроскопии (см. (Gradov, 2019; Gradov, 2023; Градов, 2023)).



Рис. 2в



Рис. 2г

Рисунок 2в: Пульта управления JEOL. Желтая и белая кнопки – управление фокусировкой. В верхней части кадра видно посадочное гнездо для фотоаппарата,

адаптируемое также и для цифровых фотоаппаратов с перепрошивкой CDHK по технологии Александрова (Alexandrov et al., 2025).

Рисунок 2г: Пульт управления JEOL. Генератор развертки/управление режимом сканирования (SCAN GENERATOR) и степени увеличения (модуль MAGNIFICATION). Управление детектора вторичных электронов (SEI – Secondary Electron Imaging)/детектора Эверхарта-Торнли (модуль SEI COLLECTION) для регистрации низкоэнергетических электронов (2–50 эВ).

Обсуждение

К сожалению, данные работы не удалось реализовать, в силу закрытия московской базы указанного института на рубеже 2010-х-2020-х гг. и утилизации оборудования. Однако общая идеология данных исследований не только остается актуальной по настоящее время (с учетом современных возрастающих технических возможностей науки), но и становится все более актуальной по мере увеличения загрязнения биосферы микропластиком. Большой вклад в эволюцию микробиоты в условиях изменения климата вносит термоиндуцируемый сдвиг активности ферментативных систем для биоразложения и колонизации пластика. В настоящее время мы можем полностью подтвердить прогноз по актуализации исследований в области микропластика (перекрывающей прирост публикаций по большой номенклатуре техногенных загрязнений, включая дымовые уносы), сделанный первым автором данного обзора в период недолгой работы в Лаборатории биологического воздействия наноструктур. Однако реализация данных исследований под силу только высокотехнологичным группам с наиболее современным оборудованием. Современные исследования экосистем пластисферы немыслимы без секвенирования метабеномов, масс-спектрометрического MALDI имэджинга и дорогостоящих флуоресцентных методов со специализированными метками/зондами. На данный момент для РФ данные методы являются недоступными, в силу санкций. Поэтому в настоящее время мы можем констатировать неизбежность отставания российской экологии, геомикробиологии и биогеографии в области исследований пластисферы на годы вперед. И множественные российские работы по микропластику последнего времени подтверждают в полной мере эти выводы, так как микробиологический акцент высокого уровня не удаётся (в одиночку, без привлечения зарубежных соавторов) поддерживать большинству групп.

Авторский вклад

Градов О.В. – полный библиографический обзор (2024 год), подготовка семинара 2018 года по анализу микропластика для НИФХИ;

Жуланов Ю.В., Макавеев П.Ю. – разработка и изготовление аппаратуры аэрозольных и гидрозольных измерений размеров частиц;

Филиппов М.К. – ремонт и реконструкция электронных микроскопов и микрозондов.

Литература

Александров, Градов, 2017 – Александров П.Л., Градов О.В. Роль ионных каналов в биогеохимической эволюции таксонов и фенологическая систематика с использованием библиотеки ключей, основанной на фингерпринтинге баз регистрограмм патч-кламп-спектроскопии в условиях, моделирующих геохимическую среду. Часть 1 // *Труды БИОГЕЛ*. 2017. 26: 85-101. DOI: 10.31223/osf.io/jse57

Градов, 2023 – Градов О.В. Криоконвейерные протоколы в корреляционной световой и электронной микроскопии: от многоуровневой визуализации до моделирования биофизических эффектов и криотераностики // *Вестник Московского университета. Серия 16: Биология*. 2023. 78(3S): 57-62. DOI: 10.55959/MSU0137-0952-16-78-3S-10

Adamovich, Gradov, 2024 – Adamovich E.D., Gradov O.V. Nanopore technologies for molecular biotechnology: From nanopore sequencing to nanopore-based resistive-pulse sensing techniques (a brief review) // *European Journal of Molecular Biotechnology*. 2024. 12(1): 13-32.

Agostini et al., 2021 – Agostini L., Moreira J.C.F., Bendia A.G., Kmit M.C.P., Waters L.G., Santana M.F.M., Sumida P.Y.G., Turra A., Pellizari V.H. Deep-sea plastisphere: long-term colonization by plastic-associated bacterial and archaeal communities in the Southwest Atlantic Ocean // *Science of the Total Environment*. 2021. 793: 148335. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148335

Aleksandrov et al., 2025 – Aleksandrov P.L., Buryanskaya E.L., Gradov O.V., Gradova M.A., Maklakova I.A., Popov A.A., Ratnovskaya A.V., Shelenkov, P.G. (2025). Real-time 2D FFT correlation-spectral microroughness/nanoroughness evaluation of structured biomaterials for programming of biocompatibility and cell blasting assessment: Morphological descriptors for qualimetry and certification of biomaterials. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 1560: 405-422. DOI: 10.1007/978-3-032-00239-6_28

Aleksandrov, Gradov, 2017 – Aleksandrov P.L., Gradov O.V. Rol' ionnykh kanalov v biogeokhimicheskoi evolyutsii taksonov i feneticheskaya sistematika s ispol'zovaniem biblioteki klyuchey, osnovannoi na fingerprintinge baz registrogramm patch-klamp-spektroskopii v usloviyakh, modeliruyushchikh geokhimicheskuyu sredu. Chast' 1. *Trudy BIOGEL*. 2017. 26: 85-101. DOI: 10.31223/osf.io/jse57

Alexandrov et al., 2025 – Alexandrov P.L., Filippov M.K., Orekhov T.K. Methodological Notes on the Possibility of Electron Microscopic Study of Fossil Elasmobranch Teeth in Ultra-Low-Budget Laboratories // *Russian Journal of Biological Research*. 2017. 12(1): 34-59. DOI: 10.13187/ejbr.2025.1.34

Amaral-Zettler et al., 2020 – Amaral-Zettler L.A., Zettler E.R., Mincer T.J. Ecology of the plastisphere // *Nature Reviews Microbiology*. 2020. 18(3): 139-151. DOI: 10.1038/s41579-019-0308-0

Amaral-Zettler et al., 2021 – Amaral-Zettler L.A., Ballerini T., Zettler E.R., Asbun A.A., Adame A., Casotti R., Dumontet B., Donnarumma V., Engelmann J.C., Frere L., Mansui J. Diversity and predicted inter-and intra-domain interactions in the Mediterranean Plastisphere // *Environmental Pollution*. 2021. 286: 117439. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117439

Arias-Andres et al., 2020 – Arias-Andres M. Who is where in the Plastisphere, and why does it matter? // *Molecular Ecology Resources*. 2020. 20(3): 617-619. DOI: 10.1111/1755-0998.13161

Balkić et al., 2022 – Balkić A.G., Pfeiffer T.Ž., Čmelar K., Maronić D.Š., Stević F., Bek N., Martinović A., Nikolašević R. Footprint of the plastisphere on freshwater zooplankton // *Environmental research*. 2022. 212: 113563. DOI: 10.1016/j.envres.2022.113563

Barbe et al., 2024 – Barbe V., Jacquin J., Bouzon M., Wolinski A., Derippe G., Cheng J., Cruaud C., Roche D., Fouteau S., Petit J.L., Conan P. Bioplastic degradation and assimilation processes by a novel bacterium isolated from the marine plastisphere // *Journal of Hazardous Materials*. 2024. 466: 133573. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.133573

Barros, Seena, 2021 – Barros J., Seena S. Plastisphere in freshwaters: an emerging concern // *Environmental Pollution*. 2021. 290: 118123. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.118123

Behera, Das, 2023 – Behera S., Das S. Environmental impacts of microplastic and role of plastisphere microbes in the biodegradation and upcycling of microplastic // *Chemosphere*. 2023. 334: 138928. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.138928

Bocci et al., 2024 – Bocci V., Galafassi S., Levantesi C., Crognale S., Amalfitano S., Congestri R., Matturro B., Rossetti S., Di Pippo F. Freshwater plastisphere: a review on biodiversity, risks, and biodegradation potential with implications for the aquatic ecosystem health // *Frontiers in Microbiology*. 2024. 15: 1395401. DOI: 10.3389/fmicb.2024.1395401

Chaimusik et al., 2024 – Chaimusik N., Sombuttra N., Nakaramontri Y., Sompongchaiyakul P., Charoenpong C., Intra B., Euanorasetr J. The comparative plastisphere microbial community profile at Kung Wiman beach unveils potential plastic-specific degrading microorganisms // *PeerJ*. 2024. 12: e17165.

Chen et al., 2021 – Chen L., Li J., Tang Y., Wang S., Lu X., Cheng Z., Zhang X., Wu P., Chang X., Xia Y. Typhoon-induced turbulence redistributed microplastics in coastal areas and reformed plastisphere community // *Water Research*. 2021. 204: p.117580. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117580

Chen et al., 2023 – Chen W., Feng Z., Chang Y., Xu S., Zhou K., Shi X., Wang Z., Zhang L., Wei Y. Li J. Comparing the bacterial composition, succession and assembly patterns in plastisphere and kitchen waste composting with PLA/PBAT blends // *Journal of Hazardous Materials*. 2023. 454: 131405. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.131405

Chen et al., 2024 – Chen Y., Yan Z., Zhou Y., Zhang Y., Jiang R., Wang M., Yuan S., Lu G. Dynamic evolution of antibiotic resistance genes in plastisphere in the vertical profile of urban rivers // *Water research*. 2024. 249: 120946. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120946

Cheng et al., 2021 – Cheng J., Jacquin J., Conan P., Pujo-Pay M., Barbe V., George M., Fabre P., Bruzaud S., Ter Halle A., Meistertzheim A.L., Ghiglione J.F. Relative influence of plastic

debris size and shape, chemical composition and phytoplankton-bacteria interactions in driving seawater plastisphere abundance, diversity and activity // *Frontiers in Microbiology*. 2021. 11: 610231. DOI: 10.3389/fmicb.2020.610231

[Cheng et al., 2023](#) – Cheng J., Meistertzheim A.L., Leistenschneider D., Philip L., Jacquin J., Escande M.L., Barbe V., Ter Halle A., Chapron L., Lartaud F., Bertrand S., Escriva H., Ghiglione J.F. Impacts of microplastics and the associated plastisphere on physiological, biochemical, genetic expression and gut microbiota of the filter-feeder amphioxus // *Environment International*. 2023. 172: 107750. DOI: 10.1016/j.envint.2023.107750

[Cheng et al., 2024](#) – Cheng J., Wang P., Ghiglione J. F., Cai Z., Zhou J., Zhu X. Bacterial pathogens associated with the plastisphere of surgical face masks and their dispersion potential in the coastal marine environment // *Journal of Hazardous Materials*. 2024. 462: 132741. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.132741

[Collins et al., 2023](#) – Collins H.I., Griffin T.W., Holohan B.A., Ward J.E. Nylon microfibers develop a distinct plastisphere but have no apparent effects on the gut microbiome or gut tissue status in the blue mussel, *Mytilus edulis* // *Environmental Microbiology*. 2023. 25(12): 2792-2806. DOI: 10.1111/1462-2920.16496

[Cornejo-D'Ottone et al., 2020](#) – Cornejo-D'Ottone M., Molina V., Pavez J., Silva N. Greenhouse gas cycling by the plastisphere: The sleeper issue of plastic pollution // *Chemosphere*. 2020. 246: 125709. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.125709

[Dąbrowska et al., 2021](#) – Dąbrowska A., Gniadek M., Machowski P. The proposal and necessity of the numerical description of nano-and microplastics' surfaces (plastisphere) // *Polymers*. 2021. 13(14): 2255. DOI: 10.3390/polym13142255.

[Dąbrowska, 2021](#) – Dąbrowska A. A roadmap for a Plastisphere // *Mar. Pollut. Bull.* 2021. 167(112322): 10-1016. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112322

[Delacuvellerie et al., 2019](#) – Delacuvellerie A., Cyriaque V., Gobert S., Benali S., Wattiez R. The plastisphere in marine ecosystem hosts potential specific microbial degraders including *Alcanivorax borkumensis* as a key player for the low-density polyethylene degradation // *Journal of hazardous materials*. 2019. 380: 120899. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.120899

[Delacuvellerie et al., 2022](#) – Delacuvellerie A., Ballerini T., Frère L., Matallana-Surget S., Dumontet B., Wattiez R. From rivers to marine environments: A constantly evolving microbial community within the plastisphere // *Marine Pollution Bulletin*. 2022. 179: 113660. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2022.113660

[Dey et al., 2022](#) – Dey S., Rout A.K., Behera B.K., Ghosh K. Plastisphere community assemblage of aquatic environment: plastic-microbe interaction, role in degradation and characterization technologies // *Environmental microbiome*. 2022. 17(1): 32. DOI: 10.1186/s40793-022-00430-4

[Di Pippo et al., 2022](#) – Di Pippo F., Crognale S., Levantesi C., Vitanza L., Sighicelli M., Pietrelli L., Di Vito S., Amalfitano S., Rossetti S. Plastisphere in lake waters: microbial diversity, biofilm structure, and potential implications for freshwater ecosystems // *Environmental Pollution*. 2022. 310: 119876. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.119876

[Du et al., 2022](#) – Du Y., Liu X., Dong X., Yin Z. A review on marine plastisphere: biodiversity, formation, and role in degradation // *Computational and Structural Biotechnology Journal*. 2022. 20: 975-988. DOI: 10.1016/j.csbj.2022.02.008

[Forero-López et al., 2022](#) – Forero-López A.D., Brugnoli L.I., Abasto B., Rimondino G.N., Lassalle V.L., Arduoso M.G., Nazzarro M.S., Martinez A.M., Spetter C.V., Biancalana F. (Plastisphere on microplastics: in situ assays in an estuarine environment // *Journal of Hazardous Materials*. 2022. 440: 129737. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.129737

[Frey et al., 2024](#) – Frey B., Aiesi M., Rast B.M., Rüthi J., Julmi J., Stierli B., Qi W., Brunner I. (2024). Searching for new plastic-degrading enzymes from the plastisphere of alpine soils using a metagenomic mining approach // *Plos one*. 2024. 19(4): e0300503. DOI: 10.1371/journal.pone.0300503

[Gradov et al., 2024](#) – Gradov O.V., Gradova M.A., Maklakova I.A., Popov A.A., Varian I. (Applications of composite microfluidic systems and micro total analysis systems (μ TAS) for monitoring the state of natural soils, swamps or wetlands: Biodegradable polymers of the μ TAS chip moldings as sensor layers for weathering estimations // *Advances in Transdisciplinary Engineering*. 2024. 62: 1439-1448. DOI: 10.3233/atde241145

[Gradov et al., 2025](#) – Gradov O.V., Gradova M.A., Maklakova I.A., Popov A.A., Varian I. Polymer bio-weathering and biodegradation induced by soil plastisphere: Real time 2D FFT-based comparative SEM-ISC study of biodegraded plastic surfaces // *Journal of Polymer Science and Engineering*. 2025. 8(2): 11801. DOI: 10.24294/jpse11801

[Gradov, 2016a](#) – Gradov O.V. Isotope channelomics of chemoautotrophs as the predictor and regulator of the metal deposit formation and the weathering factor / *The Seventeenth International Conference Physical-Chemical and Petrophysical Studies in the Earth Sciences (Proceesings of Conferene)*. 2016. Pp. 76-77. DOI: 10.54985/peeref.2505a5206386

[Gradov, 2016b](#) – Gradov O.V. The extended phenotype of chemolithoautotrophs as an object of physical geochemistry and structural biogeochemistry in the framework of v.i. vernadsky concepts / *Moscow International School of Earth Sciences — 2016. Abstracts of International conference*. 2016. P. 60. DOI: 10.13140/RG.2.1.1552.8565

[Gradov, 2018](#) – Gradov O.V. Isotopic bioinorganic chemistry of chemoautotrophs as a predictor-regulator for formation of metal deposits and factor of weathering [editorial] // *Modern Approaches in Oceanography and Petrochemical Sciences*, MAOPS.MS.ID.000103. 2018. DOI: 10.32474/MAOPS.2018.01.000103

[Gradov, 2019](#) – Gradov O.V. Novel perspectives for CLEM techniques in multiparametric morphology protocols // *International Journal of Biomedicine*. 2019. 9(Suppl. 1): 39. DOI: 10.21103/IJBM.9.Suppl_1.P39

[Gradov, 2023](#) – Gradov O.V. Cryoconveyor protocols in correlative light and electron microscopy: From multilevel imaging to modeling of biophysical effects and “cryotheranostics” // *Moscow University Biological Sciences Bulletin*. 2023. 78(Suppl. 1): S64-S68. DOI: 10.3103/S0096392523700244

[Gradov, 2025](#) – Gradov O.V. Soil plastisphere species and infectious diseases / *European Congress on Infectious Diseases and Microbiology (April 14-15, 2025; Rome, Italy)*. 2025. P. 49. C2P Rome, Italy. DOI: 10.54985/peeref.2505a1467782

[Grigorieva et al., 2021](#) – Grigorieva E.A., Olkhov A.A., Gradov O.V., Gradova M.A. Thermal behavior of the porous polymer composites based on LDPE and natural fillers studied by real time thermal microscopy // *Key Engineering Materials*. 2021. 899: 644-659. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.899.644

[Grigorieva et al., 2022](#) – Grigorieva E., Gradov O., Gradova M., Maklakova I. Towards multi-angle multispectral optical 3D porometry and lens-less porometry of civil engineering composites and geocomposites including biodegradable ones // *Advances in Transdisciplinary Engineering*. 2022. 31: 101-113. DOI: 10.3233/atde220857

[Grigorieva et al., 2023](#) – Grigorieva E.A., Gradov O.V., Gradova M.A., Maklakova I.A. Towards multi-angle multi-channel optical porometry and scanning electron microscopic porometry of ldpe composites including geotechnical biodegradable ones // *Advanced Structured Materials*. 2023. 195: 105-118. DOI: 10.1007/978-3-031-28744-2_6

[Grigorieva et al., 2025](#) – Grigorieva E., Gradov O., Maklakova I., Popov A., Ratnovskaya A. Time-resolved correlation microporometry (TRCMP) and melting point correlation-spectral microporometry (MPCSP) of gas-filled polymer composites formed under the action of various pore-forming agents // *Dynamics of Discrete and Continuum Structures and Media*. 2025. Pp. 361-375. Switzerland. Springer Nature. DOI: 10.1007/978-3-031-75626-9_15

[Guruge et al., 2024](#) – Guruge K.S., Goswami P., Kanda K., Abeynayaka A., Kumagai M., Watanabe M., Tamamura-Andoh Y. Plastiome: Plastisphere-enriched mobile resistome in aquatic environments // *Journal of Hazardous Materials*. 2024. 471: 134353. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.134353

[Huang et al., 2024](#) – Huang J.N., Xu L., Wen B., Gao J.Z., Chen Z.Z. Reshaping the plastisphere upon deposition: Promote N2O production through affecting sediment microbial communities in aquaculture pond // *Journal of Hazardous Materials*. 2024. 465: 133290. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.133290

[Jablokov et al., 2017](#) – Jablokov A.G., Skrynnik A.A., Orekhov F.K., Nasirov P.A., Gradov O.V. "MALDI-FLIP-on-a-chip" and "MALDI-FRAP-on-a-flap": Novel Techniques for Soil Microbiology and Environmental Biogeochemistry. I-MALDI Chip Fingerprinting // *Biogeosystem Technique*. 2017. 4(2): 140-188. DOI: 10.13187/bgt.2017.2.140

Jablokov et al., 2018 – Jablokow A.G., Nasirov P.A., Orekhov F.K., Gradov O.V. "MALDI-FLIP-on-a-chip" and "MALDI-FRAP-on-a-flap": Novel Techniques for Soil Microbiology and Environmental Biogeochemistry. II-Polymer Chip Prototyping // *Biogeosystem Technique*. 2018. 5(1): 3-56. DOI: 10.13187/bgt.2018.1.3

Jacquin et al., 2019 – Jacquin J., Cheng J., Odobel C., Pandin C., Conan P., Pujo-Pay M., Barbe V., Meistertzheim A.L., Ghiglione J.F. Microbial ecotoxicology of marine plastic debris: a review on colonization and biodegradation by the "Plastisphere" // *Frontiers in microbiology*. 2019. 10: 865. DOI: 10.3389/fmicb.2019.00865

Ji et al., 2022 – Ji L., Tanunchai B., Wahdan S.F.M., Schädler M., Purahong W. Future climate change enhances the complexity of plastisphere microbial co-occurrence networks, but does not significantly affect the community assembly // *Science of The Total Environment*. 2022. 844: 157016. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157016

Joshi et al., 2022 – Joshi G., Goswami P., Verma P., Prakash G., Simon P., Vinithkumar N.V., Dharani G. Unraveling the plastic degradation potentials of the plastisphere-associated marine bacterial consortium as a key player for the low-density polyethylene degradation // *Journal of hazardous materials*. 2022. 425: 128005. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.128005

Junaid et al., 2022 – Junaid M., Liu S., Liao H., Liu X., Wu Y., Wang J. Wastewater plastisphere enhances antibiotic resistant elements, bacterial pathogens, and toxicological impacts in the environment // *Science of the Total Environment*. 2022. 841: 156805. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.156805

Karkanorachaki et al., 2023 – Karkanorachaki K., Syranidou E., Kalogerakis N. Extreme weather events as an important factor for the evolution of plastisphere but not for the degradation process // *Water Research*. 2023. 246: 120687. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120687

Kelly et al., 2022 – Kelly M.R., Whitworth P., Jamieson A., Burgess J.G. Bacterial colonisation of plastic in the Rockall Trough, North-East Atlantic: An improved understanding of the deep-sea plastisphere // *Environmental Pollution*. 2022. 305: 119314. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.119314

Kimura et al., 2023 – Kimura Y., Fukuda Y., Otsu R., Yu J., Mino S., Misawa S., Maruyama S., Ikeda Y., Miyamachi R., Noguchi H., Kato S. A lesson from polybutylene succinate plastisphere to the discovery of novel plastic degrading enzyme genes in marine vibrios // *Environmental microbiology*. 2023. 25(12): 2834-2850. DOI: 10.1111/1462-2920.16512

Kirstein et al., 2019 – Kirstein I.V., Wichels A., Gullans E., Krohne G., Gerdt G. The plastisphere-uncovering tightly attached plastic "specific" microorganisms // *PloS one*. 2019. 14(4): e0215859. DOI: 10.1371/journal.pone.0215859

Koh et al., 2023 – Koh J., Bairolia S., Salta M., Cho Z.T., Fong J., Neo M.L., Cragg S. Cao B. (2023). Sediment-driven plastisphere community assembly on plastic debris in tropical coastal and marine environments // *Environment International*. 2023. 179: p.108153. DOI: 10.1016/j.envint.2023.108153

Kutralam-Muniasamy et al., 2024 – Kutralam-Muniasamy G., Shruti V.C., Pérez-Guevara F. (2024). Plastisphere-hosted viruses: A review of interactions, behavior, and effects // *Journal of Hazardous Materials*. 2024. 472: 134533. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.134533

Lacerda et al., 2024 – Lacerda A.L., Frias J., Pedrotti M.L. Tardigrades in the marine plastisphere: New hitchhikers surfing plastics // *Marine Pollution Bulletin*. 2024. 200: 116071. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2024.116071

Lenoble et al., 2024 – Lenoble V., Cindrić A.M., Briand J.F., Pedrotti M.L., Lacerda A.L., Muniategui-Lorenzo S., Fernández-González V., Moscoso-Pérez C.M., Andrade-Garda J.M., Casotti R., Murano C. Bioaccumulation of trace metals in the plastisphere: Awareness of environmental risk from a European perspective // *Environmental pollution*. 2024. 348: 123808. DOI: 10.1016/j.envpol.2024.123808

Li et al., 2021 – Li H.Q., Shen Y.J., Wang W.L., Wang H.T., Li H., Su J.Q. Soil pH has a stronger effect than arsenic content on shaping plastisphere bacterial communities in soil // *Environmental Pollution*. 2021. 287: 117339. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117339. Epub 2021 May 10. PMID: 34000668

Li et al., 2022 – Li R., Zhu L., Cui L., Zhu Y.G. Viral diversity and potential environmental risk in microplastic at watershed scale: Evidence from metagenomic analysis of plastisphere // *Environment international*. 2022. 161: 107146. DOI: 10.1016/j.envint.2022.107146

- Li et al., 2023 – Li J., Zhang T., Shan X., Zheng W., Zhang Z., Ouyang Z., Liu P., Guo X. Abandoned disposable masks become hot substrates for plastisphere, whether in soil, atmosphere or water // *Journal of Hazardous Materials*. 2023. 452: 131321. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.131321
- Li et al., 2024 – Li K., Xu L., Bai X., Zhang G., Zhang M., Huang Y. Potential environmental risks of field bio/non-degradable microplastic from mulching residues in farmland: evidence from metagenomic analysis of plastisphere // *Journal of Hazardous Materials*. 2024. 465: 133428. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.133428
- Lin et al., 2023 – Lin X., Wang S., Ni R., Song L. New insights on municipal solid waste (MSW) landfill plastisphere structure and function // *Science of The Total Environment*. 2023. 888: 163823. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163823
- Lin et al., 2024 – Lin D., Xu J.Y., Wang L., Du S., Zhu D. Long-term application of organic fertilizer prompting the dispersal of antibiotic resistance genes and their health risks in the soil plastisphere // *Environment International*. 2024. 183: 108431. DOI: 10.1016/j.envint.2024.108431
- Lu et al., 2024 – Lu, J., Qiu, Y., Zhang, L., Wang, J., Li, C., Wang, P., Ren, L. (2024). Effects of Fe₃O₄ NMs based Fenton-like reactions on biodegradable plastic bags in compost: New insight into plastisphere community succession, co-composting efficiency and free radical in situ aging theory. *Journal of Hazardous Materials*. 467: 133689. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.133689
- Luo et al., 2022 – Luo G., Jin T., Zhang H., Peng J., Zuo N., Huang Y., Han Y., Tian C., Yang Y., Peng K., Fei J. (2022). Deciphering the diversity and functions of plastisphere bacterial communities in plastic-mulching croplands of subtropical China // *Journal of Hazardous Materials*. 2022. 422: 126865. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.126865
- MacLean et al., 2021 – MacLean J., Mayanna S., Benning L.G., Horn F., Bartholomäus A., Wiesner Y., Wagner D., Liebner S. The terrestrial plastisphere: diversity and polymer-colonizing potential of plastic-associated microbial communities in soil // *Microorganisms*. 2021. 9(9): 1876. DOI: 10.3390/microorganisms9091876
- Maklakova et al., 2021 – Maklakova I.A., Gradov O.V., Gradova M.A., Aleksandrov P.L. Comparison of SEM-assisted nanoporometric and microporometric morphometric techniques applied for the ultramicroporous polymer films // *Key Engineering Materials*. 2021. 899: 660-674. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.899.660
- Miao et al., 2023 – Miao L., Li W., Adyel T.M., Yao Y., Deng Y., Wu J., Zhou Y., Yu Y., Hou J. Spatio-temporal succession of microbial communities in plastisphere and their potentials for plastic degradation in freshwater ecosystems // *Water Research*. 2023. 229: 119406. DOI: 10.1016/j.watres.2022.119406
- Nguyen et al., 2023 – Nguyen D., Masasa M., Ovadia O., Guttman L. Ecological insights into the resilience of marine plastisphere throughout a storm disturbance // *Science of the Total Environment*. 2023. 858: 159775. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159775
- Ni et al., 2024 – Ni B., Zhang T. L., Cai T. G., Xiang Q., Zhu D. Effects of heavy metal and disinfectant on antibiotic resistance genes and virulence factor genes in the plastisphere from diverse soil ecosystems // *Journal of Hazardous Materials*. 2024. 465: 133335. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.133335
- Orekhov, Gradov, 2022 – Orekhov F.K., Gradov O.V. Automated Soil Microbiology Using Lensless and LDI MS Imaging with Buried Slides // *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2022. 247: 471-479. DOI: 10.1007/978-981-16-3844-2_43
- Orekhov, Gradov, 2023 – Orekhov F.K., Gradov O.V. Target chip based single-cell biotyping and telemetric bioluminescence lensless microscopy of the buried sandwich-slides as a novel way for measurement, mapping and molecular imaging of biodegradation/biofouling of plastic surfaces in real soils // *Advances in Transdisciplinary Engineering*. 2023. 38: 417-425. DOI: 10.3233/ATDE230317
- Pang et al., 2023 – Pang G., Li X., Ding M., Jiang S., Chen P., Zhao Z., Gao R., Song B., Xu X., Shen Q., Cai F.M. The distinct plastisphere microbiome in the terrestrial-marine ecotone is a reservoir for putative degraders of petroleum-based polymers // *Journal of Hazardous Materials*. 2023. 453: 131399. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.131399
- Park et al., 2023 – Park W.J., Hwangbo M., Chu K.H. Plastisphere and microorganisms involved in polyurethane biodegradation // *Science of The Total Environment*. 2023. 886: 163932. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163932

- Pietrelli et al., 2017 – Pietrelli L., Di Gennaro A., Menegoni P., Lecce F., Poeta G., Acosta A.T., Battisti C., Iannilli V.. Pervasive plastisphere: first record of plastics in egagropiles (Posidonia spheroids) // *Environmental pollution*. 2017. 229: 1032-1036. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.07.098
- Poeta et al., 2017 – Poeta G., Fanelli G., Pietrelli L., Acosta A.T., Battisti C. Plastisphere in action: evidence for an interaction between expanded polystyrene and dunal plants // *Environmental Science and Pollution Research*. 2017. 24(12): 11856-11859. DOI: 10.1007/s11356-017-8887-7
- Ran et al., 2024 – Ran T., Liao H., Zhao Y., Li J. Soil plastisphere interferes with soil bacterial community and their functions in the rhizosphere of pepper (*Capsicum annuum* L.) // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2024. 270: 115946. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2024.115946
- Rillig et al., 2024 – Rillig M.C., Kim S.W., Zhu Y.G.. The soil plastisphere // *Nature Reviews Microbiology*. 2024. 22(2): 64-74. DOI: 10.1038/s41579-023-00967-2
- Rohrbach et al., 2023 – Rohrbach S., Gkoutselis G., Hink L., Weig A.R., Obst M., Diekmann A., Ho A., Rambold G., Horn M.A. Microplastic polymer properties as deterministic factors driving terrestrial plastisphere microbiome assembly and succession in the field // *Environmental Microbiology*. 2023. 25(12): 2681-2697. DOI: 10.1111/1462-2920.16234
- Rosato et al., 2022 – Rosato A., Barone M., Negroni A., Brigidi P., Fava F., Biagi E., Candela M., Zanaroli G. Bacterial colonization dynamics of different microplastic types in an anoxic salt marsh sediment and impact of adsorbed polychlorinated biphenyls on the plastisphere // *Environmental Pollution*. 2022. 315: 120411. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.120411
- Rüthi et al., 2023 – Rüthi J., Cerri M., Brunner I., Stierli B., Sander M., Frey B. Discovery of plastic-degrading microbial strains isolated from the alpine and Arctic terrestrial plastisphere // *Frontiers in Microbiology*. 2023. 14: 1178474. DOI: 10.3389/fmicb.2023.1178474
- Saleem et al., 2023 – Saleem M., Yahya S., Razzak S.A., Khawaja S., Ali A. Shotgun metagenomics and computational profiling of the plastisphere microbiome: unveiling the potential of enzymatic production and plastic degradation // *Archives of Microbiology*. 2023. 205(11): 359. DOI: 10.1007/s00203-023-03701-x
- Schlundt et al., 2020 – Schlundt C., Mark Welch J.L., Knochel A.M., Zettler E.R., Amaral-Zettler L.A. Spatial structure in the “Plastisphere”: molecular resources for imaging microscopic communities on plastic marine debris // *Molecular ecology resources*. 2020. 20(3): 620-634. DOI: 10.1111/1755-0998.13119
- Sérvulo et al., 2023 – Sérvulo T., Taylor J.D., Proietti M.C., dS Rodrigues L., Puertas I.P., Barutot R.A., Lacerda, A.L. Plastisphere composition in a subtropical estuary: Influence of season, incubation time and polymer type on plastic biofouling // *Environmental Pollution*. 2023. 332: 121873. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121873
- Shan et al., 2023 – Shan E., Zhang X., Li J., Sun C., Teng J., Hou C., Zhao J., Sun S., Wang Q. Alteration of microbial mediated carbon cycle and antibiotic resistance genes during plastisphere formation in coastal area // *Chemosphere*. 2023. 344: 140420. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.140420
- Silva et al., 2023 – Silva V., Pérez V., Gillanders B.M. Short-term plastisphere colonization dynamics across six plastic types // *Environmental Microbiology*. 2023. 25(12): 2732-2745. DOI: 10.1111/1462-2920.16445
- Silva et al., 2024 – Silva I., Tacão M., Henriques I.. Hidden threats in the plastisphere: Carbapenemase-producing Enterobacterales colonizing microplastics in river water // *Science of The Total Environment*. 2024. 922: 171268. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171268
- Song et al., 2023 – Song X., Ding J., Tian W., Xu H., Zou H., Wang Z. Effects of plastisphere on phosphorus availability in freshwater system: critical roles of polymer type and colonizing habitat // *Science of the Total Environment*. 2023. 870: 161990. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.161990
- Song et al., 2024 – Song X., Zou H., Zhang Y., Yang J., Ding J.. Microplastics alter the microbiota-mediated phosphorus profiles at sediment-water interface: Distinct microbial effects between sediment and plastisphere // *Science of The Total Environment*. 2024. 933: 173048. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.173048
- Sosa, Chen, 2022 – Sosa A., Chen F. An in situ study to understand community structure of estuarine microbes on the plastisphere // *Microorganisms*. 2022. 10(8): 1543. DOI: 10.3390/microorganisms10081543

- Stevenson et al., 2023 – Stevenson E.M., Buckling A., Cole M., Lindeque P.K., Murray A.K. Culturing the Plastisphere: comparing methods to isolate culturable bacteria colonising microplastics // *Frontiers in Microbiology*. 2023. 14: 1259287. DOI: 10.3389/fmicb.2023.1259287
- Stevenson et al., 2024 – Stevenson E.M., Buckling A., Cole M., Lindeque P.K., Murray A.K. Selection for antimicrobial resistance in the plastisphere // *Science of The Total Environment*. 2024. 908: 168234. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168234
- Su et al., 2022 – Su X., Yang L., Yang K., Tang Y., Wen T., Wang Y., Rillig M.C., Rohe L., Pan J., Li H., Zhu Y.G. Estuarine plastisphere as an overlooked source of N₂O production // *Nature Communications*. 2022. 13(1): 3884. DOI: 10.1038/s41467-022-31584-x
- Sun et al., 2022 – Sun Y., Shi J., Wang X., Ding C., Wang J. Deciphering the mechanisms shaping the plastisphere microbiota in soil // *Msystems*. 2022. 7(4): e00352-22. DOI: 10.1128/msystems.00352-22
- Sun et al., 2023 – Sun Y., Zhang Y., Hao X., Zhang X., Ma Y., Niu Z. A novel marine bacterium *Exiguobacterium marinum* a-1 isolated from in situ plastisphere for degradation of additive-free polypropylene // *Environmental Pollution*. 2023. 336: 122390. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.122390
- Sun et al., 2024 – Sun Y., Wu M., Xie S., Zang J., Wang X., Yang Y., Li C., Wang J. Homogenization of bacterial plastisphere community in soil: a continental-scale microcosm study // *ISME communications*. 2024. 4(1): ycad012. DOI: 10.1093/ismeco/ycad012
- Tanunchai et al., 2023 – Tanunchai B., Ji L., Schröder O., Gawol S.J., Geissler A., Wahdan S.F.M., Buscot F., Kalkhof S., Schulze E.D., Noll M., Purahong W. Fate of a biodegradable plastic in forest soil: Dominant tree species and forest types drive changes in microbial community assembly, influence the composition of plastisphere, and affect poly (butylene succinate-co-adipate) degradation // *Science of the Total Environment*. 2023. 873: 162230. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.162230
- Tarchi et al., 2023 – Tarchi M., Zaaboub N., Alsubih M., Brik B., Martins M.V.A., Aleya L., Trabelsi L. Microalgae colonization and trace element accumulation on the plastisphere of marine plastic debris in Monastir Bay (Eastern Tunisia) // *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. 30(12): 32427-32451. DOI: 10.1007/s11356-022-23930-9
- Taurozzi et al., 2023 – Taurozzi D., Cesarini G., Scalici M. New ecological frontiers in the plastisphere: Diatoms and macroinvertebrates turnover assessment by a traits-based approach // *Science of the Total Environment*. 2023. 887: 164186. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.164186
- Tian et al., 2024 – Tian H., Wang L., Zhu X., Zhang M., Li L., Liu Z., Abolfathi S. Biodegradation of microplastics derived from controlled release fertilizer coating: Selective microbial colonization and metabolism in plastisphere // *Science of The Total Environment*. 2024. 920: 170978. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170978
- Tiguerros-Benavides et al., 2024 – Tiguerros-Benavides P., Garzón-Rodríguez L., Herrera-Villarraga G., Ochoa-Mogollón J., Sarmiento-Sánchez C., Rodríguez-Vargas L.H., Rozo-Torres G., Guayán-Ruíz, P., Sanjuan-Muñoz A., Franco-Herrera A. Microplastics and plastisphere at surface waters in the Southwestern Caribbean sea // *Journal of Environmental Management*. 2024. 358: 120745. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.120745
- Tiwari et al., 2022 – Tiwari N., Bansal M., Santhiya D., Sharma JG. Insights into microbial diversity on plastisphere by multi-omics. *Arch Microbiol*. 2022 Mar 22. 204(4): 216. DOI: 10.1007/s00203-022-02806-z PMID: 35316402
- Vannini et al., 2021 – Vannini C., Rossi A., Vallerini F., Menicagli V., Seggiani M., Cinelli P., Lardicci C., Balestri E. Microbial communities of polyhydroxyalkanoate (PHA)-based biodegradable composites plastisphere and of surrounding environmental matrix: a comparison between marine (seabed) and coastal sediments (dune sand) over a long-time scale // *Science of The Total Environment*. 2021. 764: 142814. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142814
- Wang et al., 2022 – Wang C., Wang L., Ok Y.S., Tsang D.C., Hou D. Soil plastisphere: exploration methods, influencing factors, and ecological insights // *Journal of Hazardous Materials*. 2022. 430: 128503. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.128503
- Wang et al., 2023 – Wang P., Liu J., Han S., Wang Y., Duan Y., Liu T., Hou L., Zhang Z., Li L., Lin Y. Polyethylene mulching film degrading bacteria within the plastisphere: Co-culture of plastic degrading strains screened by bacterial community succession // *Journal of Hazardous Materials*. 2023. 442: 130045. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.130045

- Wen et al., 2020 – Wen B., Liu J.H., Zhang Y., Zhang H.R., Gao J.Z., Chen Z.Z. Community structure and functional diversity of the plastisphere in aquaculture waters: does plastic color matter? // *Science of the total environment*. 2020. 740: 140082. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140082
- Wright et al., 2021 – Wright R.J., Bosch R., Langille M.G., Gibson M.I., Christie-Oleza J.A. A multi-OMIC characterisation of biodegradation and microbial community succession within the PET plastisphere // *Microbiome*. 2021. 9(1): 141. DOI: 10.1186/s40168-021-01054-5
- Wright et al., 2021a – Wright R.J., Bosch R., Langille M.G., Gibson M.I., Christie-Oleza J.A. A multi-OMIC characterisation of biodegradation and microbial community succession within the PET plastisphere // *Microbiome*. 2021. 9(1): 141. DOI: 10.1186/S40168-021-01054-5
- Wright et al., 2021b – Wright R.J., Langille M.G., Walker T.R. Food or just a free ride? A meta-analysis reveals the global diversity of the Plastisphere // *The ISME Journal*. 2021. 15(3): 789-806. DOI: 10.1038/s41396-020-00814-9
- Wu et al., 2022 – Wu X., Liu Z., Li M., Bartlam M., Wang Y. Integrated metagenomic and metatranscriptomic analysis reveals actively expressed antibiotic resistomes in the plastisphere // *Journal of hazardous materials*. 2022. 430: 128418. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.128418
- Wu et al., 2023 – Wu J., Ye Q., Sun L., Liu J., Huang M., Wang T., Wu P., Zhu N. Impact of persistent rain on microplastics distribution and plastisphere community: A field study in the Pearl River, China // *Science of The Total Environment*. 2023. 879: 163066. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163066
- Wu et al., 2024 – Wu Z., Sun J., Xu L., Zhou H., Cheng H., Chen Z., Wang Y., Yang J. (2024). Depth significantly affects plastisphere microbial evenness, assembly and co-occurrence pattern but not richness and composition // *Journal of Hazardous Materials*. 2024. 463: 132921. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.132921
- Xiang et al., 2022 – Xiang Q., Chen Q.L., Yang X.R., Li G., Zhu D. Soil mesofauna alter the balance between stochastic and deterministic processes in the plastisphere during microbial succession // *Science of The Total Environment*. 2022. 849: 157820. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157820
- Xiang et al., 2024 – Xiang Q., Stryhanyuk H., Schmidt M., Kümmel S., Richnow H.H., Zhu Y.G., Cui L., Musat N. Stable isotopes and nanoSIMS single-cell imaging reveals soil plastisphere colonizers able to assimilate sulfamethoxazole // *Environmental Pollution*. 2024. 355: 124197. DOI: 10.1016/j.envpol.2024.124197
- Xie et al., 2023 – Xie M., Lv M., Zhao Z., Li L., Jiang H., Yu Y., Zhang X., Liu P., Chen J. Plastisphere characterization in habitat of the highly endangered *Shinisaurus crocodilurus*: bacterial composition, assembly, function and the comparison with surrounding environment // *Science of The Total Environment*. 2023. 900: 165807. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.165807
- Xu et al., 2023 – Xu L., Li K., Zhang M., Guo J., Jia W., Bai X., Tian X., Huang Y. Plastic substrate and residual time of microplastics in the urban river shape the composition and structure of bacterial communities in plastisphere // *Journal of Environmental Management*. 2023. 345: 118710. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118710
- Xu et al., 2024 – Xu C., Hu C., Lu J., Yang T., Shen C., Li F., Wang J. Lake plastisphere as a new biotope in the Anthropocene: potential pathogen colonization and distinct microbial functionality // *Journal of Hazardous Materials*. 2024. 461: 132693. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.132693
- Xue et al., 2021 – Xue N., Fang Q., Pan X., Zhang D. Distinct fungal plastisphere across different river functional zones: a watershed scale study // *Science of the Total Environment*. 2021. 752: 141879. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141879
- Yang et al., 2023 – Yang Y., Suyamud B., Liang S., Liang X., Wan W., Zhang W. Distinct spatiotemporal succession of bacterial generalists and specialists in the lacustrine plastisphere // *Environmental Microbiology*. 2023. 25(12): 2746-2760. DOI: 10.1111/1462-2920.16400
- Ye et al., 2024 – Ye J., Zhu Y., Chen H., Zhao X., Tang J., Zhang J., Chen Y., Guo Y., Tan Y., Zhang T. High-throughput absolute quantification sequencing reveals the adaptive succession and assembly pattern of plastisphere communities in municipal sewer systems: Influence of environmental factors and microplastic polymer types // *Environmental Pollution*. 2024. 342: 123136. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.123136
- Yokoyama et al., 2023 – Yokoyama D., Takamura A., Tsuboi Y., Kikuchi J. Large-scale omics dataset of polymer degradation provides robust interpretation for microbial niche and succession on different plastisphere // *ISME communications*. 2023. 3(1): 67. DOI: 10.1038/s43705-023-00275-z

- Yu et al., 2023 – Yu Y., Miao L., Adyel T.M., Waldschläger K., Wu J., Hou J.. Aquatic plastisphere: interactions between plastics and biofilms // *Environmental Pollution*. 2023. 322: 121196. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121196
- Zadjelovic et al., 2023 – Zadjelovic V., Wright R.J., Borsetto C., Quartey J., Cairns T.N., Langille M.G., Wellington E.M., Christie-Oleza J.A. Microbial hitchhikers harbouring antimicrobial-resistance genes in the riverine plastisphere // *Microbiome*. 2023. 11(1): 225. DOI: 10.1186/s40168-023-01662-3
- Zagui et al., 2022 – Zagui G.S., Andrade L.N., Sierra J., Rovira J., Darini A.L.C., Segura-Muñoz S. Plastisphere as a pathway for antimicrobial-resistant bacteria spread to the environment: New challenge and open questions // *Environmental research*. 2022. 214(Pt 4): 114156. DOI: 10.1016/j.envres.2022.114156
- Zettler et al., 2013 – Zettler E.R., Mincer T.J., Amaral-Zettler L.A. Life in the “plastisphere”: microbial communities on plastic marine debris // *Environmental science & technology*. 2013. 47(13): 7137-7146. DOI: 10.1021/es401288x
- Zhai et al., 2023 – Zhai X., Zhang X.H., Yu M. Microbial colonization and degradation of marine microplastics in the plastisphere: A review // *Frontiers in Microbiology*. 2023. 14: 1127308. DOI: 10.3389/fmicb.2023.1127308
- Zhang et al., 2022 – Zhang W., Jiang C., Chen L., Bhagwat G., Thava P., Yang Y. Spatial turnover of core and occasional bacterial taxa in the plastisphere from a plateau river, China // *Science of The Total Environment*. 2022. 838: 156179. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.156179
- Zhang et al., 2023 – Zhang C., Mu Y., Li T., Jin F.J., Jin C.Z., Oh H.M., Lee H.G., Jin L. Assembly strategies for polyethylene-degrading microbial consortia based on the combination of omics tools and the “Plastisphere” // *Frontiers in microbiology*. 2023. 14: 1181967. DOI: 10.3389/fmicb.2023.1181967
- Zhang et al., 2024 – Zhang W., Liang S., Grossart H.P., Christie-Oleza J.A., Gadd G.M., Yang Y. Convergence effect during spatiotemporal succession of lacustrine plastisphere: loss of priority effects and turnover of microbial species // *ISME communications*. 2024. 4(1): ycae056. DOI: 10.1093/ismeco/ycae056
- Zhao et al., 2023 – Zhao Z.Y., Wang P.Y., Xiong X.B., Zhou R., Li F.M., Cheng Z.G., Wang W., Mo F., Cheruiyot K.W., Wang W.Y., Uzamurera A.G. Plant biomass mediates the decomposition of polythene film-sourced pollutants in soil through plastisphere bacteria island effect // *Environment International*. 2023. 178: 108114. DOI: 10.1016/j.envint.2023.108114
- Zhou et al., 2023 – Zhou Q., Zhang J., Fang Q., Zhang M., Wang X., Zhang D., Pan X. Microplastic biodegradability dependent responses of plastisphere antibiotic resistance to simulated freshwater-seawater shift in onshore marine aquaculture zones // *Environmental Pollution*. 2023. 331: 121828. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121828
- Zhu et al., 2023 – Zhu M., Qi X., Yuan Y., Zhou H., Rong X., Dang Z., Yin H. Deciphering the distinct successional patterns and potential roles of abundant and rare microbial taxa of urban riverine plastisphere // *Journal of Hazardous Materials*. 2023. 450: 131080. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.131080
- Zhulanov et al., 2018 – Zhulanov Y.V., Makaveev P.Y., Gradov O.V. Towards the aerosol cytometry and hydrosol cytometry based on laser aerosol spectrometers // *IEEE DataPort*. 2018. DOI: 10.21227/njak-qr29
- Žuna Pfeiffer et al., 2022 – Pfeiffer T.Ž., Maronić D.Š., Stević F., Balkić A.G., Bek N., Martinović A., Mandir T., Nikolašević R., Janjić D. Plastisphere development in relation to the surrounding biotic communities // *Environmental pollution*. 2022. 306: 119380. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.119380

References

- Adamovich, Gradov, 2024 – Adamovich, E.D., Gradov, O.V. (2024). Nanopore technologies for molecular biotechnology: From nanopore sequencing to nanopore-based resistive-pulse sensing techniques (a brief review). *European Journal of Molecular Biotechnology*. 12(1): 13-32.
- Agostini et al., 2021 – Agostini, L., Moreira, J.C.F., Bendia, A.G., Kmit, M.C.P., Waters, L.G., Santana, M.F.M., Sumida, P.Y.G., Turra, A., Pellizari, V.H. (2021). Deep-sea plastisphere: long-term colonization by plastic-associated bacterial and archaeal communities in the Southwest Atlantic Ocean. *Science of the Total Environment*. 793: 148335. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148335

[Aleksandrov et al., 2025](#) – Aleksandrov, P.L., Buryanskaya, E.L., Gradov, O.V., Gradova, M.A., Maklakova, I.A., Popov, A.A., Ratnovskaya, A.V., Shelenkov, P.G. (2025). Real-time 2D FFT correlation-spectral microroughness/nanoroughness evaluation of structured biomaterials for programming of biocompatibility and cell blasting assessment: Morphological descriptors for qualimetry and certification of biomaterials. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 1560: 405-422. DOI: 10.1007/978-3-032-00239-6_28

[Aleksandrov, Gradov, 2017](#) – Aleksandrov, P.L., Gradov, O.V. (2017). Rol' ionnykh kanalov v biogeokhimicheskoi evolyutsii taksonov i feneticheskaya sistematika s ispol'zovaniem biblioteki klyuchey, osnovannoi na fingerprintinge baz registrogramm patch-klamp-spektroskopii v usloviyakh, modeliruyushchikh geokhimicheskuyu sredu. Chast' 1 [The role of ion channels in the biogeochemical evolution of taxa and phenetic systematics using a key library based on fingerprinting of patch-clamp spectroscopy register databases under conditions simulating a geochemical environment. Part 1]. *Trudy BIOGEL*. 26: 85-101. DOI: 10.31223/osf.io/jse57 [in Russian]

[Alexandrov et al., 2025](#) – Alexandrov, P.L., Filippov, M.K., Orekhov, T.K. (2025). Methodological Notes on the Possibility of Electron Microscopic Study of Fossil Elasmobranch Teeth in Ultra-Low-Budget Laboratories. *Russian Journal of Biological Research*. 12(1): 34-59. DOI: 10.13187/ejbr.2025.1.34

[Amaral-Zettler et al., 2020](#) – Amaral-Zettler, L.A., Zettler, E.R., Mincer, T.J. (2020). Ecology of the plastisphere. *Nature Reviews Microbiology*. 18(3): 139-151. DOI: 10.1038/s41579-019-0308-0

[Amaral-Zettler et al., 2021](#) – Amaral-Zettler, L.A., Ballerini, T., Zettler, E.R., Asbun, A.A., Adame, A., Casotti, R., Dumontet, B., Donnarumma, V., Engelmann, J.C., Frere, L., Mansui, J. (2021). Diversity and predicted inter-and intra-domain interactions in the Mediterranean Plastisphere. *Environmental Pollution*. 286: 117439. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117439

[Arias-Andres et al., 2020](#) – Arias-Andres, M. (2020). Who is where in the Plastisphere, and why does it matter? *Molecular Ecology Resources*. 20(3): 617-619. DOI: 10.1111/1755-0998.13161

[Balkić et al., 2022](#) – Balkić, A.G., Pfeiffer, T.Ž., Čmelar, K., Maronić, D.Š., Stević, F., Bek, N., Martinović, A., Nikolašević, R. (2022). Footprint of the plastisphere on freshwater zooplankton. *Environmental research*. 212: 113563. DOI: 10.1016/j.envres.2022.113563

[Barbe et al., 2024](#) – Barbe, V., Jacquin, J., Bouzon, M., Wolinski, A., Derippe, G., Cheng, J., Cruaud, C., Roche, D., Fouteau, S., Petit, J.L., Conan, P. (2024). Bioplastic degradation and assimilation processes by a novel bacterium isolated from the marine plastisphere. *Journal of Hazardous Materials*. 466: 133573. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.133573

[Barros, Seena, 2021](#) – Barros, J., Seena, S. (2021). Plastisphere in freshwaters: an emerging concern. *Environmental Pollution*. 290: 118123. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.118123

[Behera, Das, 2023](#) – Behera, S., Das, S. (2023). Environmental impacts of microplastic and role of plastisphere microbes in the biodegradation and upcycling of microplastic. *Chemosphere*. 334: 138928. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.138928

[Bocci et al., 2024](#) – Bocci, V., Galafassi, S., Levantesi, C., Crognale, S., Amalfitano, S., Congestri, R., Matturro, B., Rossetti, S., Di Pippo, F. (2024). Freshwater plastisphere: a review on biodiversity, risks, and biodegradation potential with implications for the aquatic ecosystem health. *Frontiers in Microbiology*. 15: 1395401. DOI: 10.3389/fmicb.2024.1395401

[Chaimusik et al., 2024](#) – Chaimusik, N., Sombuttra, N., Nakaramontri, Y., Sompongchaiyakul, P., Charoenpong, C., Intra, B., Euanorasetr, J. (2024). The comparative plastisphere microbial community profile at Kung Wiman beach unveils potential plastic-specific degrading microorganisms. *PeerJ*. 12: e17165.

[Chen et al., 2021](#) – Chen, L., Li, J., Tang, Y., Wang, S., Lu, X., Cheng, Z., Zhang, X., Wu, P., Chang, X., Xia, Y. (2021). Typhoon-induced turbulence redistributed microplastics in coastal areas and reformed plastisphere community. *Water Research*. 204: p.117580. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117580

[Chen et al., 2023](#) – Chen, W., Feng, Z., Chang, Y., Xu, S., Zhou, K., Shi, X., Wang, Z., Zhang, L., Wei, Y., Li, J. (2023). Comparing the bacterial composition, succession and assembly patterns in plastisphere and kitchen waste composting with PLA/PBAT blends. *Journal of Hazardous Materials*. 454: 131405. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.131405

- Chen et al., 2024 – Chen, Y., Yan, Z., Zhou, Y., Zhang, Y., Jiang, R., Wang, M., Yuan, S., Lu, G. (2024). Dynamic evolution of antibiotic resistance genes in plastisphere in the vertical profile of urban rivers. *Water research*. 249: 120946. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120946
- Cheng et al., 2021 – Cheng, J., Jacquin, J., Conan, P., Pujo-Pay, M., Barbe, V., George, M., Fabre, P., Bruzard, S., Ter Halle, A., Meistertzheim, A.L., Ghiglione, J.F. (2021). Relative influence of plastic debris size and shape, chemical composition and phytoplankton-bacteria interactions in driving seawater plastisphere abundance, diversity and activity. *Frontiers in Microbiology*. 11: 610231. DOI: 10.3389/fmicb.2020.610231
- Cheng et al., 2023 – Cheng, J., Meistertzheim, A.L., Leistenschneider, D., Philip, L., Jacquin, J., Escande, M.L., Barbe, V., Ter Halle, A., Chapron, L., Lartaud, F., Bertrand, S., Escriva, H., Ghiglione, J.F. (2023). Impacts of microplastics and the associated plastisphere on physiological, biochemical, genetic expression and gut microbiota of the filter-feeder amphioxus. *Environment International*. 172: 107750. DOI: 10.1016/j.envint.2023.107750
- Cheng et al., 2024 – Cheng, J., Wang, P., Ghiglione, J. F., Cai, Z., Zhou, J., Zhu, X. (2024). Bacterial pathogens associated with the plastisphere of surgical face masks and their dispersion potential in the coastal marine environment. *Journal of Hazardous Materials*. 462: 132741. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.132741
- Collins et al., 2023 – Collins, H.I., Griffin, T.W., Holohan, B.A., Ward, J.E. (2023). Nylon microfibers develop a distinct plastisphere but have no apparent effects on the gut microbiome or gut tissue status in the blue mussel, *Mytilus edulis*. *Environmental Microbiology*. 25(12): 2792-2806. DOI: 10.1111/1462-2920.16496
- Cornejo-D'Ottone et al., 2020 – Cornejo-D'Ottone, M., Molina, V., Pavez, J., Silva, N. (2020). Greenhouse gas cycling by the plastisphere: The sleeper issue of plastic pollution. *Chemosphere*. 246: 125709. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.125709
- Dąbrowska et al., 2021 – Dąbrowska, A., Gniadek, M., Machowski, P. (2021). The proposal and necessity of the numerical description of nano-and microplastics' surfaces (plastisphere). *Polymers*. 13(14): 2255. DOI: 10.3390/polym13142255.
- Dąbrowska, 2021 – Dąbrowska, A. (2021). A roadmap for a Plastisphere. *Mar. Pollut. Bull.* 167(112322): 10-1016. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112322
- Delacuvellerie et al., 2019 – Delacuvellerie, A., Cyriaque, V., Gobert, S., Benali, S., Wattiez, R. (2019). The plastisphere in marine ecosystem hosts potential specific microbial degraders including *Alcanivorax borkumensis* as a key player for the low-density polyethylene degradation. *Journal of hazardous materials*. 380: 120899. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.120899
- Delacuvellerie et al., 2022 – Delacuvellerie, A., Ballerini, T., Frère, L., Matallana-Surget, S., Dumontet, B., Wattiez, R. (2022). From rivers to marine environments: A constantly evolving microbial community within the plastisphere. *Marine Pollution Bulletin*. 179: 113660. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2022.113660
- Dey et al., 2022 – Dey, S., Rout, A.K., Behera, B.K., Ghosh, K. (2022). Plastisphere community assemblage of aquatic environment: plastic-microbe interaction, role in degradation and characterization technologies. *Environmental microbiome*. 17(1): 32. DOI: 10.1186/s40793-022-00430-4
- Di Pippo et al., 2022 – Di Pippo, F., Crognale, S., Levantesi, C., Vitanza, L., Sighicelli, M., Pietrelli, L., Di Vito, S., Amalfitano, S., Rossetti, S. (2022). Plastisphere in lake waters: microbial diversity, biofilm structure, and potential implications for freshwater ecosystems. *Environmental Pollution*. 310: 119876. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.119876
- Du et al., 2022 – Du, Y., Liu, X., Dong, X., Yin, Z. (2022). A review on marine plastisphere: biodiversity, formation, and role in degradation. *Computational and Structural Biotechnology Journal*. 20: 975-988. DOI: 10.1016/j.csbj.2022.02.008
- Forero-López et al., 2022 – Forero-López, A.D., Brugnoli, L.I., Abasto, B., Rimondino, G.N., Lassalle, V.L., Arduoso, M.G., Nazzarro, M.S., Martinez, A.M., Spetter, C.V., Biancalana, F. (2022). Plastisphere on microplastics: in situ assays in an estuarine environment. *Journal of Hazardous Materials*. 440: 129737. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.129737
- Frey et al., 2024 – Frey, B., Aiesi, M., Rast, B.M., Rüthi, J., Julmi, J., Stierli, B., Qi, W., Brunner, I. (2024). Searching for new plastic-degrading enzymes from the plastisphere of alpine soils using a metagenomic mining approach. *Plos one*. 19(4): e0300503. DOI: 10.1371/journal.pone.0300503

[Gradov et al., 2024](#) – Gradov, O.V., Gradova, M.A., Maklakova, I.A., Popov, A.A., Varian, I. (2024). Applications of composite microfluidic systems and micro total analysis systems (μ TAS) for monitoring the state of natural soils, swamps or wetlands: Biodegradable polymers of the μ TAS chip moldings as sensor layers for weathering estimations. *Advances in Transdisciplinary Engineering*. 62: 1439-1448. DOI: 10.3233/atde241145

[Gradov et al., 2025](#) – Gradov, O.V., Gradova, M.A., Maklakova, I.A., Popov, A.A., Varian, I. (2025). Polymer bio-weathering and biodegradation induced by soil plastisphere: Real time 2D FFT-based comparative SEM-ISC study of biodegraded plastic surfaces. *Journal of Polymer Science and Engineering*. 8(2): 11801. DOI: 10.24294/jpse11801

[Gradov, 2016a](#) – Gradov, O.V. (2016). Isotope channelomics of chemoautotrophs as the predictor and regulator of the metal deposit formation and the weathering factor. *The Seventeenth International Conference Physical-Chemical and Petrophysical Studies in the Earth Sciences (Proceedings of Conferene)*. Pp. 76-77. DOI: 10.54985/peeref.2505a5206386

[Gradov, 2016b](#) – Gradov, O.V. (2016). The extended phenotype of chemolithoautotrophs as an object of physical geochemistry and structural biogeochemistry in the framework of v.i. vernadsky concepts. *Moscow International School of Earth Sciences — 2016. Abstracts of International conference*. P. 60. DOI: 10.13140/RG.2.1.1552.8565

[Gradov, 2018](#) – Gradov, O.V. (2018). Isotopic bioinorganic chemistry of chemoautotrophs as a predictor-regulator for formation of metal deposits and factor of weathering [editorial]. *Modern Approaches in Oceanography and Petrochemical Sciences*, MAOPS.MS.ID.000103. DOI: 10.32474/MAOPS.2018.01.000103

[Gradov, 2019](#) – Gradov, O.V. (2019). Novel perspectives for CLEM techniques in multiparametric morphology protocols. *International Journal of Biomedicine*. 9(Suppl. 1): 39. DOI: 10.21103/IJBM.9.Suppl_1.P39

[Gradov, 2023](#) – Gradov, O.V. (2023). Cryoconveyor protocols in correlative light and electron microscopy: From multilevel imaging to modeling of biophysical effects and “cryotheranostics”. *Moscow University Biological Sciences Bulletin*. 78(Suppl. 1): S64-S68. DOI: 10.3103/S0096392523700244

[Gradov, 2023](#) – Gradov, O.V. (2023). Kriokonveiernye protokoly v korrelyatsionnoi svetovoi i elektronnoi mikroskopii: ot mnogourovnevoi vizualizatsii do modelirovaniya biofizicheskikh effektov i krioteranostiki [Cryoconveyor protocols in correlative light and electron microscopy: from multilevel visualization to modeling of biophysical effects and cryotheranostics]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 16: Biologiya*. 78(3S): 57-62. DOI: 10.55959/MSU0137-0952-16-78-3S-10 [in Russian]

[Gradov, 2025](#) – Gradov, O.V. (2025). Soil plastisphere species and infectious diseases. *European Congress on Infectious Diseases and Microbiology (April 14-15, 2025; Rome, Italy)*. P. 49. C2P Rome, Italy. DOI: 10.54985/peeref.2505a1467782

[Grigorieva et al., 2021](#) – Grigorieva, E.A., Olkhov, A.A., Gradov, O.V., Gradova, M.A. (2021). Thermal behavior of the porous polymer composites based on LDPE and natural fillers studied by real time thermal microscopy. *Key Engineering Materials*. 899: 644-659. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.899.644

[Grigorieva et al., 2022](#) – Grigorieva, E., Gradov, O., Gradova, M., Maklakova, I. (2022). Towards multi-angle multispectral optical 3D porometry and lens-less porometry of civil engineering composites and geocomposites including biodegradable ones. *Advances in Transdisciplinary Engineering*. 31: 101-113. DOI: 10.3233/atde220857

[Grigorieva et al., 2023](#) – Grigorieva, E.A., Gradov, O.V., Gradova, M.A., Maklakova, I.A. (2023). Towards multi-angle multi-channel optical porometry and scanning electron microscopic porometry of ldpe composites including geotechnical biodegradable ones. *Advanced Structured Materials*. 195: 105-118. DOI: 10.1007/978-3-031-28744-2_6

[Grigorieva et al., 2025](#) – Grigorieva, E., Gradov, O., Maklakova, I., Popov, A., Ratnovskaya, A. (2025). Time-resolved correlation microporometry (TRCMP) and melting point correlation-spectral microporometry (MPCSM) of gas-filled polymer composites formed under the action of various pore-forming agents. *Dynamics of Discrete and Continuum Structures and Media*. Pp. 361-375. Switzerland. Springer Nature. DOI: 10.1007/978-3-031-75626-9_15

[Guruge et al., 2024](#) – Guruge, K.S., Goswami, P., Kanda, K., Abeynayaka, A., Kumagai, M., Watanabe, M., Tamamura-Andoh, Y. (2024). Plastiome: Plastisphere-enriched mobile resistome in

aquatic environments. *Journal of Hazardous Materials*. 471: 134353. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.134353

Huang et al., 2024 – Huang, J.N., Xu, L., Wen, B., Gao, J.Z., Chen, Z.Z. (2024). Reshaping the plastisphere upon deposition: Promote N₂O production through affecting sediment microbial communities in aquaculture pond. *Journal of Hazardous Materials*. 465: 133290. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.133290

Jablokov et al., 2017 – Jablokow, A.G., Skrynnik, A.A., Orekhov, F.K., Nasirov, P.A., Gradov, O.V. (2017). "MALDI-FLIP-on-a-chip" and "MALDI-FRAP-on-a-flap": Novel Techniques for Soil Microbiology and Environmental Biogeochemistry. I-MALDI Chip Fingerprinting. *Biogeosystem Technique*. 4(2): 140-188. DOI: 10.13187/bgt.2017.2.140

Jablokov et al., 2018 – Jablokow, A.G., Nasirov, P.A., Orekhov, F.K., Gradov, O.V. (2018). "MALDI-FLIP-on-a-chip" and "MALDI-FRAP-on-a-flap": Novel Techniques for Soil Microbiology and Environmental Biogeochemistry. II-Polymer Chip Prototyping. *Biogeosystem Technique*. 5(1): 3-56. DOI: 10.13187/bgt.2018.1.3

Jacquin et al., 2019 – Jacquin, J., Cheng, J., Odobel, C., Pandin, C., Conan, P., Pujo-Pay, M., Barbe, V., Meistertzheim, A.L., Ghiglione, J.F. (2019). Microbial ecotoxicology of marine plastic debris: a review on colonization and biodegradation by the "Plastisphere". *Frontiers in microbiology*. 10: 865. DOI: 10.3389/fmicb.2019.00865

Ji et al., 2022 – Ji, L., Tanunchai, B., Wahdan, S.F.M., Schädler, M., Purahong, W. (2022). Future climate change enhances the complexity of plastisphere microbial co-occurrence networks, but does not significantly affect the community assembly. *Science of The Total Environment*. 844: 157016. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157016

Joshi et al., 2022 – Joshi, G., Goswami, P., Verma, P., Prakash, G., Simon, P., Vinithkumar, N.V., Dharani, G. (2022). Unraveling the plastic degradation potentials of the plastisphere-associated marine bacterial consortium as a key player for the low-density polyethylene degradation. *Journal of hazardous materials*. 425: 128005. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.128005

Junaid et al., 2022 – Junaid, M., Liu, S., Liao, H., Liu, X., Wu, Y., Wang, J. (2022). Wastewater plastisphere enhances antibiotic resistant elements, bacterial pathogens, and toxicological impacts in the environment. *Science of the Total Environment*. 841: 156805. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.156805

Karkanorachaki et al., 2023 – Karkanorachaki, K., Syranidou, E., Kalogerakis, N. (2023). Extreme weather events as an important factor for the evolution of plastisphere but not for the degradation process. *Water Research*. 246: 120687. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120687

Kelly et al., 2022 – Kelly, M.R., Whitworth, P., Jamieson, A., Burgess, J.G. (2022). Bacterial colonisation of plastic in the Rockall Trough, North-East Atlantic: An improved understanding of the deep-sea plastisphere. *Environmental Pollution*. 305: 119314. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.119314

Kimura et al., 2023 – Kimura, Y., Fukuda, Y., Otsu, R., Yu, J., Mino, S., Misawa, S., Maruyama, S., Ikeda, Y., Miyamachi, R., Noguchi, H., Kato, S. (2023). A lesson from polybutylene succinate plastisphere to the discovery of novel plastic degrading enzyme genes in marine vibrios. *Environmental microbiology*. 25(12): 2834-2850. DOI: 10.1111/1462-2920.16512

Kirstein et al., 2019 – Kirstein, I.V., Wichels, A., Gullans, E., Krohne, G., Gerds, G. (2019). The plastisphere-uncovering tightly attached plastic "specific" microorganisms. *PloS one*. 14(4): e0215859. DOI: 10.1371/journal.pone.0215859

Koh et al., 2023 – Koh, J., Bairoliya, S., Salta, M., Cho, Z.T., Fong, J., Neo, M.L., Cragg, S. Cao, B. (2023). Sediment-driven plastisphere community assembly on plastic debris in tropical coastal and marine environments. *Environment International*. 179: p.108153. DOI: 10.1016/j.envint.2023.108153

Kutralam-Muniasamy et al., 2024 – Kutralam-Muniasamy, G., Shruti, V.C., Pérez-Guevara, F. (2024). Plastisphere-hosted viruses: A review of interactions, behavior, and effects. *Journal of Hazardous Materials*. 472: 134533. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.134533

Lacerda et al., 2024 – Lacerda, A.L., Frias, J., Pedrotti, M.L. (2024). Tardigrades in the marine plastisphere: New hitchhikers surfing plastics. *Marine Pollution Bulletin*. 200: 116071. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2024.116071

Lenoble et al., 2024 – Lenoble, V., Čindrić, A.M., Briand, J.F., Pedrotti, M.L., Lacerda, A.L., Muniategui-Lorenzo, S., Fernández-González, V., Moscoso-Pérez, C.M., Andrade-Garda, J.M., Casotti, R., Murano, C. (2024). Bioaccumulation of trace metals in the plastisphere: Awareness of

environmental risk from a European perspective. *Environmental pollution*. 348: 123808. DOI: 10.1016/j.envpol.2024.123808

[Li et al., 2021](#) – Li, H.Q., Shen, Y.J., Wang, W.L., Wang, H.T., Li, H., Su, J.Q. (2021). Soil pH has a stronger effect than arsenic content on shaping plastisphere bacterial communities in soil. *Environmental Pollution*. 287: 117339. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117339. Epub 2021 May 10. PMID: 34000668

[Li et al., 2022](#) – Li, R., Zhu, L., Cui, L., Zhu, Y.G. (2022). Viral diversity and potential environmental risk in microplastic at watershed scale: Evidence from metagenomic analysis of plastisphere. *Environment international*. 161: 107146. DOI: 10.1016/j.envint.2022.107146

[Li et al., 2023](#) – Li, J., Zhang, T., Shan, X., Zheng, W., Zhang, Z., Ouyang, Z., Liu, P., Guo, X. (2023). Abandoned disposable masks become hot substrates for plastisphere, whether in soil, atmosphere or water. *Journal of Hazardous Materials*. 452: 131321. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.131321

[Li et al., 2024](#) – Li, K., Xu, L., Bai, X., Zhang, G., Zhang, M., Huang, Y. (2024). Potential environmental risks of field bio/non-degradable microplastic from mulching residues in farmland: evidence from metagenomic analysis of plastisphere. *Journal of Hazardous Materials*. 465: 133428. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.133428

[Lin et al., 2023](#) – Lin, X., Wang, S., Ni, R., Song, L. (2023). New insights on municipal solid waste (MSW) landfill plastisphere structure and function. *Science of The Total Environment*. 888: 163823. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163823

[Lin et al., 2024](#) – Lin, D., Xu, J.Y., Wang, L., Du, S., Zhu, D. (2024). Long-term application of organic fertilizer prompting the dispersal of antibiotic resistance genes and their health risks in the soil plastisphere. *Environment International*. 183: 108431. DOI: 10.1016/j.envint.2024.108431

[Lu et al., 2024](#) – Lu, J., Qiu, Y., Zhang, L., Wang, J., Li, C., Wang, P., Ren, L. (2024). Effects of Fe₃O₄ NMs based Fenton-like reactions on biodegradable plastic bags in compost: New insight into plastisphere community succession, co-composting efficiency and free radical in situ aging theory. *Journal of Hazardous Materials*. 467: 133689. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.133689

[Luo et al., 2022](#) – Luo, G., Jin, T., Zhang, H., Peng, J., Zuo, N., Huang, Y., Han, Y., Tian, C., Yang, Y., Peng, K., Fei, J. (2022). Deciphering the diversity and functions of plastisphere bacterial communities in plastic-mulching croplands of subtropical China. *Journal of Hazardous Materials*. 422: 126865. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.126865

[MacLean et al., 2021](#) – MacLean, J., Mayanna, S., Benning, L.G., Horn, F., Bartholomäus, A., Wiesner, Y., Wagner, D., Liebner, S. (2021). The terrestrial plastisphere: diversity and polymer-colonizing potential of plastic-associated microbial communities in soil. *Microorganisms*. 9(9): 1876. DOI: 10.3390/microorganisms9091876

[Maklakova et al., 2021](#) – Maklakova, I.A., Gradov, O.V., Gradova, M.A., Aleksandrov, P.L. (2021). Comparison of SEM-assisted nanoporometric and microporometric morphometric techniques applied for the ultramicroporous polymer films. *Key Engineering Materials*. 899: 660-674. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.899.660

[Miao et al., 2023](#) – Miao, L., Li, W., Adyel, T.M., Yao, Y., Deng, Y., Wu, J., Zhou, Y., Yu, Y., Hou, J. (2023). Spatio-temporal succession of microbial communities in plastisphere and their potentials for plastic degradation in freshwater ecosystems. *Water Research*. 229: 119406. DOI: 10.1016/j.watres.2022.119406

[Nguyen et al., 2023](#) – Nguyen, D., Masasa, M., Ovadia, O., Guttman, L. (2023). Ecological insights into the resilience of marine plastisphere throughout a storm disturbance. *Science of the Total Environment*. 858: 159775. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159775

[Ni et al., 2024](#) – Ni, B., Zhang, T. L., Cai, T. G., Xiang, Q., Zhu, D. (2024). Effects of heavy metal and disinfectant on antibiotic resistance genes and virulence factor genes in the plastisphere from diverse soil ecosystems. *Journal of Hazardous Materials*. 465: 133335. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.133335

[Orekhov, Gradov, 2022](#) – Orekhov, F.K., Gradov, O.V. (2022). Automated Soil Microbiology Using Lensless and LDI MS Imaging with Buried Slides. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 247: 471-479. DOI: 10.1007/978-981-16-3844-2_43

[Orekhov, Gradov, 2023](#) – Orekhov, F.K., Gradov, O.V. (2023). Target chip based single-cell biotyping and telemetric bioluminescence lensless microscopy of the buried sandwich-slides as a novel way for measurement, mapping and molecular imaging of biodegradation/biofouling of

plastic surfaces in real soils. *Advances in Transdisciplinary Engineering*. 38: 417-425. DOI: 10.3233/ATDE230317

[Pang et al., 2023](#) – Pang, G., Li, X., Ding, M., Jiang, S., Chen, P., Zhao, Z., Gao, R., Song, B., Xu, X., Shen, Q., Cai, F.M. (2023). The distinct plastisphere microbiome in the terrestrial-marine ecotone is a reservoir for putative degraders of petroleum-based polymers. *Journal of Hazardous Materials*. 453: 131399. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.131399

[Park et al., 2023](#) – Park, W.J., Hwangbo, M., Chu, K.H. (2023). Plastisphere and microorganisms involved in polyurethane biodegradation. *Science of The Total Environment*. 886: 163932. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163932

[Pietrelli et al., 2017](#) – Pietrelli, L., Di Gennaro, A., Menegoni, P., Lecce, F., Poeta, G., Acosta, A.T., Battisti, C., Iannilli, V. (2017). Pervasive plastisphere: first record of plastics in egagropiles (Posidonia spheroids). *Environmental pollution*. 229: 1032-1036. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.07.098

[Poeta et al., 2017](#) – Poeta, G., Fanelli, G., Pietrelli, L., Acosta, A.T., Battisti, C. (2017). Plastisphere in action: evidence for an interaction between expanded polystyrene and dunal plants. *Environmental Science and Pollution Research*. 24(12): 11856-11859. DOI: 10.1007/s11356-017-8887-7

[Ran et al., 2024](#) – Ran, T., Liao, H., Zhao, Y., Li, J. (2024). Soil plastisphere interferes with soil bacterial community and their functions in the rhizosphere of pepper (*Capsicum annuum* L.). *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 270: 115946. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2024.115946

[Rillig et al., 2024](#) – Rillig, M.C., Kim, S.W., Zhu, Y.G. (2024). The soil plastisphere. *Nature Reviews Microbiology*. 22(2): 64-74. DOI: 10.1038/s41579-023-00967-2

[Rohrbach et al., 2023](#) – Rohrbach, S., Gkoutselis, G., Hink, L., Weig, A.R., Obst, M., Diekmann, A., Ho, A., Rambold, G., Horn, M.A. (2023). Microplastic polymer properties as deterministic factors driving terrestrial plastisphere microbiome assembly and succession in the field. *Environmental Microbiology*. 25(12): 2681-2697. DOI: 10.1111/1462-2920.16234

[Rosato et al., 2022](#) – Rosato, A., Barone, M., Negroni, A., Brigidi, P., Fava, F., Biagi, E., Candela, M., Zanaroli, G. (2022). Bacterial colonization dynamics of different microplastic types in an anoxic salt marsh sediment and impact of adsorbed polychlorinated biphenyls on the plastisphere. *Environmental Pollution*. 315: 120411. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.120411

[Rüthi et al., 2023](#) – Rüthi, J., Cerri, M., Brunner, I., Stierli, B., Sander, M., Frey, B. (2023). Discovery of plastic-degrading microbial strains isolated from the alpine and Arctic terrestrial plastisphere. *Frontiers in Microbiology*. 14: 1178474. DOI: 10.3389/fmicb.2023.1178474

[Saleem et al., 2023](#) – Saleem, M., Yahya, S., Razzak, S.A., Khawaja, S., Ali, A. (2023). Shotgun metagenomics and computational profiling of the plastisphere microbiome: unveiling the potential of enzymatic production and plastic degradation. *Archives of Microbiology*. 205(11): 359. DOI: 10.1007/s00203-023-03701-x

[Schlundt et al., 2020](#) – Schlundt, C., Mark Welch, J.L., Knochel, A.M., Zettler, E.R., Amaral-Zettler, L.A. (2020). Spatial structure in the “Plastisphere”: molecular resources for imaging microscopic communities on plastic marine debris. *Molecular ecology resources*. 20(3): 620-634. DOI: 10.1111/1755-0998.13119

[Sérvulo et al., 2023](#) – Sérvulo, T., Taylor, J.D., Proietti, M.C., dS Rodrigues, L., Puertas, I.P., Barutot, R.A., Lacerda, A.L. (2023). Plastisphere composition in a subtropical estuary: Influence of season, incubation time and polymer type on plastic biofouling. *Environmental Pollution*. 332: 121873. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121873

[Shan et al., 2023](#) – Shan, E., Zhang, X., Li, J., Sun, C., Teng, J., Hou, C., Zhao, J., Sun, S., Wang, Q. (2023). Alteration of microbial mediated carbon cycle and antibiotic resistance genes during plastisphere formation in coastal area. *Chemosphere*. 344: 140420. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.140420

[Silva et al., 2023](#) – Silva, V., Pérez, V., Gillanders, B.M. (2023). Short-term plastisphere colonization dynamics across six plastic types. *Environmental Microbiology*. 25(12): 2732-2745. DOI: 10.1111/1462-2920.16445

[Silva et al., 2024](#) – Silva, I., Tação, M., Henriques, I. (2024). Hidden threats in the plastisphere: Carbapenemase-producing Enterobacterales colonizing microplastics in river water. *Science of The Total Environment*. 922: 171268. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171268

[Song et al., 2023](#) – Song, X., Ding, J., Tian, W., Xu, H., Zou, H., Wang, Z. (2023). Effects of plastisphere on phosphorus availability in freshwater system: critical roles of polymer type and colonizing habitat. *Science of the Total Environment*. 870: 161990. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.161990

[Song et al., 2024](#) – Song, X., Zou, H., Zhang, Y., Yang, J., Ding, J. (2024). Microplastics alter the microbiota-mediated phosphorus profiles at sediment-water interface: Distinct microbial effects between sediment and plastisphere. *Science of The Total Environment*. 933: 173048. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.173048

[Sosa, Chen, 2022](#) – Sosa, A., Chen, F. (2022). An in situ study to understand community structure of estuarine microbes on the plastisphere. *Microorganisms*. 10(8): 1543. DOI: 10.3390/microorganisms10081543

[Stevenson et al., 2023](#) – Stevenson, E.M., Buckling, A., Cole, M., Lindeque, P.K., Murray, A.K. (2023). Culturing the Plastisphere: comparing methods to isolate culturable bacteria colonising microplastics. *Frontiers in Microbiology*. 14: 1259287. DOI: 10.3389/fmicb.2023.1259287

[Stevenson et al., 2024](#) – Stevenson, E.M., Buckling, A., Cole, M., Lindeque, P.K., Murray, A.K. (2024). Selection for antimicrobial resistance in the plastisphere. *Science of The Total Environment*. 908: 168234. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168234

[Su et al., 2022](#) – Su, X., Yang, L., Yang, K., Tang, Y., Wen, T., Wang, Y., Rillig, M.C., Rohe, L., Pan, J., Li, H., Zhu, Y.G. (2022). Estuarine plastisphere as an overlooked source of N₂O production. *Nature Communications*. 13(1): 3884. DOI: 10.1038/s41467-022-31584-x

[Sun et al., 2022](#) – Sun, Y., Shi, J., Wang, X., Ding, C., Wang, J. (2022). Deciphering the mechanisms shaping the plastisphere microbiota in soil. *Msystems*. 7(4): e00352-22. DOI: 10.1128/msystems.00352-22

[Sun et al., 2023](#) – Sun, Y., Zhang, Y., Hao, X., Zhang, X., Ma, Y., Niu, Z. (2023). A novel marine bacterium *Exiguobacterium marinum* a-1 isolated from in situ plastisphere for degradation of additive-free polypropylene. *Environmental Pollution*. 336: 122390. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.122390

[Sun et al., 2024](#) – Sun, Y., Wu, M., Xie, S., Zang, J., Wang, X., Yang, Y., Li, C., Wang, J. (2024). Homogenization of bacterial plastisphere community in soil: a continental-scale microcosm study. *ISME communications*. 4(1): ycad012. DOI: 10.1093/ismeco/ycad012

[Tanunchai et al., 2023](#) – Tanunchai, B., Ji, L., Schröder, O., Gawol, S.J., Geissler, A., Wahdan, S.F.M., Buscot, F., Kalkhof, S., Schulze, E.D., Noll, M., Purahong, W. (2023). Fate of a biodegradable plastic in forest soil: Dominant tree species and forest types drive changes in microbial community assembly, influence the composition of plastisphere, and affect poly (butylene succinate-co-adipate) degradation. *Science of the Total Environment*. 873: 162230. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.162230

[Tarchi et al., 2023](#) – Tarchi, M., Zaaboub, N., Alsubih, M., Brik, B., Martins, M.V.A., Aleya, L., Trabelsi, L. (2023). Microalgae colonization and trace element accumulation on the plastisphere of marine plastic debris in Monastir Bay (Eastern Tunisia). *Environmental Science and Pollution Research*. 30(12): 32427-32451. DOI: 10.1007/s11356-022-23930-9

[Taurozzi et al., 2023](#) – Taurozzi, D., Cesarini, G., Scalici, M. (2023). New ecological frontiers in the plastisphere: Diatoms and macroinvertebrates turnover assessment by a traits-based approach. *Science of the Total Environment*. 887: 164186. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.164186

[Tian et al., 2024](#) – Tian, H., Wang, L., Zhu, X., Zhang, M., Li, L., Liu, Z., Abolfathi, S. (2024). Biodegradation of microplastics derived from controlled release fertilizer coating: Selective microbial colonization and metabolism in plastisphere. *Science of The Total Environment*. 920: 170978. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170978

[Tigreros-Benavides et al., 2024](#) – Tigreros-Benavides, P., Garzón-Rodríguez, L., Herrera-Villarraga, G., Ochoa-Mogollón, J., Sarmiento-Sánchez, C., Rodríguez-Vargas, L.H., Rozo-Torres, G., Guayán-Ruiz, P., Sanjuan-Muñoz, A., Franco-Herrera, A. (2024). Microplastics and plastisphere at surface waters in the Southwestern Caribbean sea. *Journal of Environmental Management*. 358: 120745. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.120745

[Tiwari et al., 2022](#) – Tiwari, N., Bansal, M., Santhiya, D., Sharma, J.G. (2022). Insights into microbial diversity on plastisphere by multi-omics. *Arch Microbiol*. Mar 22. 204(4): 216. DOI: 10.1007/s00203-022-02806-z PMID: 35316402

[Vannini et al., 2021](#) – Vannini, C., Rossi, A., Vallerini, F., Menicagli, V., Seggiani, M., Cinelli, P., Lardicci, C., Balestri, E. (2021). Microbial communities of polyhydroxyalkanoate

(PHA)-based biodegradable composites plastisphere and of surrounding environmental matrix: a comparison between marine (seabed) and coastal sediments (dune sand) over a long-time scale. *Science of The Total Environment*. 764: 142814. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142814

Wang et al., 2022 – Wang, C., Wang, L., Ok, Y.S., Tsang, D.C., Hou, D. (2022). Soil plastisphere: exploration methods, influencing factors, and ecological insights. *Journal of Hazardous Materials*. 430: 128503. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.128503

Wang et al., 2023 – Wang, P., Liu, J., Han, S., Wang, Y., Duan, Y., Liu, T., Hou, L., Zhang, Z., Li, L., Lin, Y. (2023). Polyethylene mulching film degrading bacteria within the plastisphere: Co-culture of plastic degrading strains screened by bacterial community succession. *Journal of Hazardous Materials*. 442: 130045. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.130045

Wen et al., 2020 – Wen, B., Liu, J.H., Zhang, Y., Zhang, H.R., Gao, J.Z., Chen, Z.Z. (2020). Community structure and functional diversity of the plastisphere in aquaculture waters: does plastic color matter? *Science of the total environment*. 740: 140082. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140082

Wright et al., 2021 – Wright, R.J., Bosch, R., Langille, M. G., Gibson, M. I., Christie-Oleza, J.A. (2021). A multi-OMIC characterisation of biodegradation and microbial community succession within the PET plastisphere. *Microbiome*. 9(1): 141. DOI: 10.1186/s40168-021-01054-5

Wright et al., 2021a – Wright, R.J., Bosch, R., Langille, M.G., Gibson, M.I., Christie-Oleza, J.A. (2021). A multi-OMIC characterisation of biodegradation and microbial community succession within the PET plastisphere. *Microbiome*. 9(1): 141. DOI: 10.1186/S40168-021-01054-5

Wright et al., 2021b – Wright, R.J., Langille, M.G., Walker, T.R. (2021). Food or just a free ride? A meta-analysis reveals the global diversity of the Plastisphere. *The ISME Journal*. 15(3): 789-806. DOI: 10.1038/s41396-020-00814-9

Wu et al., 2022 – Wu, X., Liu, Z., Li, M., Bartlam, M., Wang, Y. (2022). Integrated metagenomic and metatranscriptomic analysis reveals actively expressed antibiotic resistomes in the plastisphere. *Journal of hazardous materials*. 430: 128418. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.128418

Wu et al., 2023 – Wu, J., Ye, Q., Sun, L., Liu, J., Huang, M., Wang, T., Wu, P., Zhu, N. (2023). Impact of persistent rain on microplastics distribution and plastisphere community: A field study in the Pearl River, China. *Science of The Total Environment*. 879: 163066. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163066

Wu et al., 2024 – Wu, Z., Sun, J., Xu, L., Zhou, H., Cheng, H., Chen, Z., Wang, Y., Yang, J. (2024). Depth significantly affects plastisphere microbial evenness, assembly and co-occurrence pattern but not richness and composition. *Journal of Hazardous Materials*. 463: 132921. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.132921

Xiang et al., 2022 – Xiang, Q., Chen, Q.L., Yang, X.R., Li, G., Zhu, D. (2022). Soil mesofauna alter the balance between stochastic and deterministic processes in the plastisphere during microbial succession. *Science of The Total Environment*. 849: 157820. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157820

Xiang et al., 2024 – Xiang, Q., Stryhanyuk, H., Schmidt, M., Kümmel, S., Richnow, H.H., Zhu, Y.G., Cui, L., Musat, N. (2024). Stable isotopes and nanoSIMS single-cell imaging reveals soil plastisphere colonizers able to assimilate sulfamethoxazole. *Environmental Pollution*. 355: 124197. DOI: 10.1016/j.envpol.2024.124197

Xie et al., 2023 – Xie, M., Lv, M., Zhao, Z., Li, L., Jiang, H., Yu, Y., Zhang, X., Liu, P., Chen, J. (2023). Plastisphere characterization in habitat of the highly endangered *Shinisaurus crocodilurus*: bacterial composition, assembly, function and the comparison with surrounding environment. *Science of The Total Environment*. 900: 165807. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.165807

Xu et al., 2023 – Xu, L., Li, K., Zhang, M., Guo, J., Jia, W., Bai, X., Tian, X., Huang, Y. (2023). Plastic substrate and residual time of microplastics in the urban river shape the composition and structure of bacterial communities in plastisphere. *Journal of Environmental Management*. 345: 118710. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118710

Xu et al., 2024 – Xu, C., Hu, C., Lu, J., Yang, T., Shen, C., Li, F., Wang, J. (2024). Lake plastisphere as a new biotope in the Anthropocene: potential pathogen colonization and distinct microbial functionality. *Journal of Hazardous Materials*. 461: 132693. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.132693

Xue et al., 2021 – Xue, N., Fang, Q., Pan, X., Zhang, D. (2021). Distinct fungal plastisphere across different river functional zones: a watershed scale study. *Science of the Total Environment*. 752: 141879. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141879

Yang et al., 2023 – Yang, Y., Suyamud, B., Liang, S., Liang, X., Wan, W., Zhang, W. (2023). Distinct spatiotemporal succession of bacterial generalists and specialists in the lacustrine plastisphere. *Environmental Microbiology*. 25(12): 2746-2760. DOI: 10.1111/1462-2920.16400

Ye et al., 2024 – Ye, J., Zhu, Y., Chen, H., Zhao, X., Tang, J., Zhang, J., Chen, Y., Guo, Y., Tan, Y., Zhang, T. (2024). High-throughput absolute quantification sequencing reveals the adaptive succession and assembly pattern of plastisphere communities in municipal sewer systems: Influence of environmental factors and microplastic polymer types. *Environmental Pollution*. 342: 123136. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.123136

Yokoyama et al., 2023 – Yokoyama, D., Takamura, A., Tsuboi, Y., Kikuchi, J. (2023). Large-scale omics dataset of polymer degradation provides robust interpretation for microbial niche and succession on different plastisphere. *ISME communications*. 3(1): 67. DOI: 10.1038/s43705-023-00275-z

Yu et al., 2023 – Yu, Y., Miao, L., Adyel, T.M., Waldschläger, K., Wu, J., Hou, J. (2023). Aquatic plastisphere: interactions between plastics and biofilms. *Environmental Pollution*. 322: 121196. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121196

Zadjelovic et al., 2023 – Zadjelovic, V., Wright, R.J., Borsetto, C., Quartey, J., Cairns, T.N., Langille, M.G., Wellington, E.M., Christie-Oleza, J.A. (2023). Microbial hitchhikers harbouring antimicrobial-resistance genes in the riverine plastisphere. *Microbiome*. 11(1): 225. DOI: 10.1186/s40168-023-01662-3

Zagui et al., 2022 – Zagui, G.S., Andrade, L.N., Sierra, J., Rovira, J., Darini, A.L.C., Segura-Muñoz, S. (2022). Plastisphere as a pathway for antimicrobial-resistant bacteria spread to the environment: New challenge and open questions. *Environmental research*. 214(Pt 4): 114156. DOI: 10.1016/j.envres.2022.114156

Zettler et al., 2013 – Zettler, E.R., Mincer, T.J., Amaral-Zettler, L.A. (2013). Life in the “plastisphere”: microbial communities on plastic marine debris. *Environmental science & technology*. 47(13): 7137-7146. DOI: 10.1021/es401288x

Zhai et al., 2023 – Zhai, X., Zhang, X.H., Yu, M. (2023). Microbial colonization and degradation of marine microplastics in the plastisphere: A review. *Frontiers in Microbiology*. 14: 1127308. DOI: 10.3389/fmicb.2023.1127308

Zhang et al., 2022 – Zhang, W., Jiang, C., Chen, L., Bhagwat, G., Thava, P., Yang, Y. (2022). Spatial turnover of core and occasional bacterial taxa in the plastisphere from a plateau river, China. *Science of The Total Environment*. 838: 156179. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.156179

Zhang et al., 2023 – Zhang, C., Mu, Y., Li, T., Jin, F.J., Jin, C.Z., Oh, H.M., Lee, H.G., Jin, L. (2023). Assembly strategies for polyethylene-degrading microbial consortia based on the combination of omics tools and the “Plastisphere”. *Frontiers in microbiology*. 14: 1181967. DOI: 10.3389/fmicb.2023.1181967

Zhang et al., 2024 – Zhang, W., Liang, S., Grossart, H.P., Christie-Oleza, J.A., Gadd, G.M., Yang, Y. (2024). Convergence effect during spatiotemporal succession of lacustrine plastisphere: loss of priority effects and turnover of microbial species. *ISME communications*. 4(1): ycae056. DOI: 10.1093/ismeco/ycae056

Zhao et al., 2023 – Zhao, Z.Y., Wang, P.Y., Xiong, X.B., Zhou, R., Li, F.M., Cheng, Z.G., Wang, W., Mo, F., Cheruiyot, K.W., Wang, W.Y., Uzamurera, A.G. (2023). Plant biomass mediates the decomposition of polythene film-sourced pollutants in soil through plastisphere bacteria island effect. *Environment International*. 178: 108114. DOI: 10.1016/j.envint.2023.108114

Zhou et al., 2023 – Zhou, Q., Zhang, J., Fang, Q., Zhang, M., Wang, X., Zhang, D., Pan, X. (2023). Microplastic biodegradability dependent responses of plastisphere antibiotic resistance to simulated freshwater-seawater shift in onshore marine aquaculture zones. *Environmental Pollution*. 331: 121828. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121828

Zhu et al., 2023 – Zhu, M., Qi, X., Yuan, Y., Zhou, H., Rong, X., Dang, Z., Yin, H. (2023). Deciphering the distinct successional patterns and potential roles of abundant and rare microbial taxa of urban riverine plastisphere. *Journal of Hazardous Materials*. 450: 131080. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.131080

Zhulanov et al., 2018 – Zhulanov, Y.V., Makaveev, P.Y., Gradov, O.V. (2018). Towards the aerosol cytometry and hydrosol cytometry based on laser aerosol spectrometers. *IEEE DataPort*. DOI: 10.21227/njak-qr29

Žuna Pfeiffer et al., 2022 – Pfeiffer, T.Ž., Maronić, D.Š., Stević, F., Balkić, A.G., Bek, N., Martinović, A., Mandir, T., Nikolašević, R., Janjić, D. (2022). Plasticsphere development in relation to the surrounding biotic communities. *Environmental pollution*. 306: 119380. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.119380

Пластисфера как эволюционно новая геосферная оболочка и «биогеохимический реактор» техносферы (вводный методический обзор)

Олег Валерьевич Градов ^{a, *}, Юрий Васильевич Жуланов ^b, Павел Юрьевич Макавеев ^b, Михаил Константинович Филиппов ^a

^a Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

^b Научно-исследовательский физико-химический институт имени Л. Я. Карпова (НИФХИ), Москва, Российская Федерация

Аннотация. В настоящем кратком вводном обзоре мы даем базовые представления о биогеографии, геоэкологии / гидроэкологии и геохимической роли пластисферы и видового разнообразия микроорганизмов на ней. В последней части приводится ряд экспериментальных подходов и фотографий инструментов для его исследования. Техническая часть обзора основана на заделе семинара 2018 г. по методам анализа микропластика, готовившегося О.В. Градовым с соавторами для НИФХИ (однако без использования устаревших ссылок того периода). К сожалению, данные работы не удалось реализовать, в силу закрытия московской базы указанного института и утилизации оборудования. Однако общая идеология данных исследований не только остается актуальной по настоящее время (с учетом современных возрастающих технических возможностей науки), но и становится все более актуальной по мере увеличения загрязнения биосферы микропластиком и эволюции микробиоты в условиях изменения климата. Обзор в терминологически упрощенной версии рассчитан на широкий круг читателей, включая студентов и учащихся техникумов/колледжей.

Ключевые слова: пластисфера, микропластик, техносфера, геомикробиология, геоэкология, гидроэкология, анализатор микрочастиц, микрозондовый анализ.

* Корреспондирующий автор

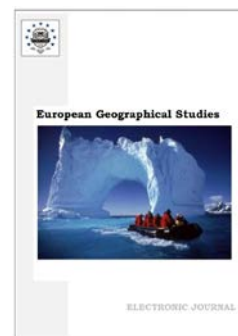
Адреса электронной почты: geochemicalphysics@gmail.com (О.В. Градов)

Copyright © 2025 by Cherkas Global University



Published in the USA
European Geographical Studies
Issued since 2013.
E-ISSN: 2413-7197
2025. 12(1): 57-61

DOI: 10.13187/egs.2025.1.57

<https://egs.cherkasgu.press>

Geoinformation Technologies as a Tool for Managing Natural and Economic Systems in the Cryolithozone: from the First Maps to Digital Doubles

Boris Yu. Krotenko ^{a, *}^a Lomonosov Moscow State University, Russian Federation

Abstract

The development of the Russian cryolithozone, which occupies 65 % of the country's territory, has historically been a daunting task. Against the background of rapid climate change and intensive economic development of the Arctic, the traditional risks associated with the melting of permafrost have become systemic and widespread. This article argues that it is modern geographic information systems (GIS) that are becoming the central technological solution for a paradigm shift from disaster management to proactive strategic management. The author examines in detail the evolution of GIS: from basic mapping to the development of complex “digital twins” of the territory. These dynamic models, integrating monitoring, survey, and climate forecast data, make it possible to simulate permafrost degradation processes in high detail, assess risks to critical infrastructure, and justify optimal spatial development solutions. The key conclusion of the article emphasizes that in order to ensure the long-term sustainability of vulnerable northern regions, deep integration of GIS platforms with artificial intelligence technologies is necessary, which will open up opportunities for predictive analytics and adaptive planning.

Keywords: cryolithozone, geographic information systems (GIS), management of natural and economic systems, digital mapping, permafrost degradation, spatial planning, sustainable development of the Arctic.

1. Введение

История освоения российских пространств к востоку от Урала – это история непрерывного диалога, а зачастую и сурового противостояния, с многолетнемёрзлыми породами. Ещё в XVIII–XIX веках первопроходцы и инженеры эмпирическим путём, ценой проб и ошибок, вырабатывали правила жизни в условиях вечной мерзлоты. Они заметили, что подпочвенный лёд «дышит» и двигается, что одни участки устойчивы, а другие проваливаются, и эти наблюдения ложились в основу первых примитивных карт и схем. Сегодня, когда на карту поставлены грандиозные национальные проекты – «Северный широтный ход», развитие Северного морского пути, освоение гигантских месторождений Арктики, – ставки неизмеримо возросли (*Современные технологии...*, 2025).

Площадь российской криолитозоны составляет колоссальные 65 % от территории страны – это около 11 миллионов квадратных километров, пространство, сравнимое с целым континентом. Климатические изменения действуют на этот регион как катализатор: по данным научного сообщества, средняя годовая температура верхних горизонтов мёрзлых

* Corresponding author

E-mail addresses: boriskrotenko78@gmail.com (B.Yu. Krotenko)

пород в Западной Сибири за последние 30–40 лет повысилась на 1,5–2 °С, а в некоторых районах Якутии граница мёрзлых пород отступила к северу на десятки километров. Последствия этого процесса не абстрактны: просадки грунта приводят к деформациям зданий в Норильске, Якутске и Воркуте; таяние подземных льдов угрожает устойчивости магистральных нефте- и газопроводов; активизация термокарста меняет ландшафты, делая их непроходимыми для техники и нарушая традиционные пути коренных народов. В этих условиях наследие «дедовских методов» и разрозненные данные уже не спасают. Требуется системный, всевидящий и прогнозирующий инструмент ([Цифровизация промышленности..., 2024](#)). Им становятся современные геоинформационные системы (ГИС), совершающие настоящую революцию в нашем восприятии и управлении криолитозоной.

2. Материалы и методы

Основу исследования составили комплексные методы сбора, интеграции и анализа пространственных данных, направленные на оценку состояния и прогноз развития природно-хозяйственных систем криолитозоны. Методологический подход был реализован в несколько последовательных этапов.

2.1. Сбор и подготовка исходных данных. Для создания аналитической базы были использованы разнородные источники:

- Геокриологические и инженерно-геологические данные: архивные материалы и результаты полевых обследований (данные термометрических скважин, параметры мерзлых пород, кадастр инженерно-геокриологических условий);
- Картографические материалы: тематические карты разного масштаба и времени создания (карты распространения и характеристики многолетнемерзлых пород, ландшафтные, топографические карты);
- Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ): многолетние ряды космических снимков среднего и высокого разрешения (Landsat, Sentinel-1/2), использованные для мониторинга динамики ландшафтов (термокарст, береговая абразия) и деформаций земной поверхности методом радарной интерферометрии (InSAR);
- Данные о хозяйственной деятельности: цифровые слои расположения и характеристик объектов инфраструктуры (населенные пункты, линейные сооружения, промышленные объекты), материалы территориального планирования;
- Климатические данные: реанализы (например, ERA5) и сценарии будущих изменений климата (модельные ряды CMIP6 для различных траекторий RCP/SSP).

2.2. Геоинформационное моделирование и анализ. Все собранные данные были систематизированы и интегрированы в единую геоинформационную среду на платформе ArcGIS Pro/QGIS. Ключевые аналитические процедуры включали:

- Пространственный анализ и наложение многослойных тематических покрытий для выявления корреляций и зонирования территории по степени риска;
- Статистический анализ временных рядов данных (температура воздуха и пород, деформации) для выявления трендов;
- Моделирование сценариев деградации мерзлоты с использованием упрощенных физико-математических моделей (например, на основе уравнения Стефана), иницируемых климатическими прогнозами;
- Оценка уязвимости инфраструктуры на основе пространственного пересечения карт прогнозируемых геокриологических процессов с расположением объектов.

2.3. Верификация моделей. Результаты моделирования и прогнозные карты рисков верифицировались путем сравнения с данными натурных наблюдений на реперных участках, а также с известными случаями аварийных ситуаций и деформаций (на примере объектов в Норильске, Воркуте, Якутске). Для анализа использовались как авторские полевые данные, так и материалы, представленные в научных публикациях и отчетах производственных организаций.

3. Обсуждение

Внедрение ГИС-технологий кардинально меняет парадигму управления. Мы наблюдаем переход от борьбы с последствиями к их интеллектуальному предупреждению ([Zhdanov, 2022](#)).

Для пространственного планирования. Выбор места под новый завод, порт или даже целый населённый пункт перестаёт быть лотереей. ГИС-анализ позволяет провести «ситовой отбор» территории, отбросив зоны с высокой льдистостью, активными криогенными процессами и низкой несущей способностью, и выделив наиболее стабильные и безопасные участки. Это позволяет сэкономить миллиарды рублей на будущих ремонтах и ликвидации аварий ([Кузык и др., 2023](#)).

Для эксплуатации инфраструктуры. Создаются «цифровые паспорта» и «цифровые двойники» критических объектов – мостов, эстакад, трубопроводов. В такой двойник в режиме, близком к реальному времени, поступают данные мониторинга (например, о деформациях опор). Система не просто фиксирует изменения, но и, используя заложенные модели, может сигнализировать: «Устойчивость опоры №47 достигла 80 % от критического значения, рекомендовано провести укрепление в течение 6 месяцев».

Для экономики и страхования. ГИС даёт возможность перевести риски из категории «форс-мажор» в категорию «просчитанная величина». Страховые компании могут использовать ГИС-карты рисков для точного калькулирования страховых премий для объектов в криолитозоне. Инвесторы получают инструмент для реалистичной оценки жизненного цикла проекта и потенциальных экологических издержек ([Кобзев и др., 2022](#)).

4. Результаты

Эволюцию методов можно проследить в трёх ключевых направлениях, где ГИС выступают центральным нервным узлом:

1. От статичной карты к динамическому многослойному полотну. Первые карты распространения вечной мерзлоты, созданные ещё основоположником российского мерзловедения Михаилом Сумгиным, были гениальным, но статичным обобщением. Современная ГИС – это живой, «дышащий» организм ([Цифровизация промышленности..., 2023](#)). Представьте себе виртуальную модель территории, на которую, как прозрачные кальки, нанесены десятки тематических слоёв: не только классическая топооснова, но и геоэкологические данные (температура, мощность, льдистость), инженерно-геологические условия, расположение всей инфраструктуры, космические снимки разных лет, данные мониторинга деформаций и даже социально-экономические показатели. Возможность наложить слой распространения наледных процессов на карту автодорог или посмотреть, как менялась граница мёрзлых пород за 20 лет на фоне нового промышленного объекта, – это качественный скачок в аналитике.

2. От ретроспективного анализа к прогнозному моделированию. Самый мощный козырь ГИС – не в том, чтобы показать, что уже произошло, а в том, чтобы смоделировать, что может произойти. Используя климатические прогнозы (например, по модели RCP 8.5), ГИС позволяет рассчитать, как будет повышаться температура мёрзлых пород в ближайшие 50 лет, и, что критически важно, к каким последствиям это приведёт. Можно создать «карту рисков» просадки фундаментов для всего города, рассчитать вероятность образования нового термокарстового озера вблизи ключевого объекта инфраструктуры или спрогнозировать изменение несущей способности грунтов под взлётно-посадочной полосой. Яркий пример – история с Норильской ТЭЦ-3, где предварительный ГИС-анализ мог бы выявить риски протавивания под резервуаром и предотвратить масштабную аварию.

3. От точечных измерений к сплошному космическому мониторингу. Гляциологи и мерзловеды десятилетиями проводили в полевых условиях, бури скважины и закладывая термометрические станции. Их труд бесценен, но он даёт информацию лишь в точках. Сегодня на помощь приходят технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Радарная интерферометрия (технология InSAR) со спутников позволяет с сантиметровой точностью отслеживать вертикальные смещения земной поверхности на площадях в тысячи квадратных километров. Данные со спутников серий Landsat и Sentinel позволяют наблюдать динамику береговой линии, зарастание озёр, смещение границ тундры и леса. Всё это «сырьё» поступает в ГИС, где обрабатывается, анализируется и превращается в готовые продукты для принятия решений ([Топ-10 трендов цифровизации, 2023](#)).

5. Заключение

Таким образом, геоинформационные системы – это уже не просто вспомогательный софт для картографов, а становой хребет новой философии управления северными и арктическими территориями. Они позволяют увидеть невидимое: скрытые под землёй линзы льда, медленные, но неумолимые движения грунта, будущие очаги разрушений (Поняева и др., 2024). Синтез ГИС с технологиями искусственного интеллекта для автоматического анализа снимков и Big Data для обработки гигантских массивов климатической информации открывает следующую ступень – создание «Цифрового двойника Российской криолитозоны». Это будет общедоступная платформа, где учёные, инженеры, градостроители и чиновники смогут совместно моделировать сценарии развития, минимизируя ущерб для хрупкой арктической природы и обеспечивая устойчивое и безопасное будущее для уникальных российских регионов, стоящих на ледяном фундаменте. Этот путь от наскальных рисунков первопроходцев к цифровым двойникам – наглядное свидетельство того, как знание и технологии позволяют человеку не покорять природу, а находить с ней разумный и устойчивый компромисс.

Литература

Кобзев и др., 2022 – Кобзев В.В., Бабкин А.В., Скоробогатов А.С. Цифровая трансформация промышленных предприятий в условиях новой реальности // *π-Economy*. 2022. Т. 15. № 5. С. 7-27.

Кузык и др., 2023 – Кузык М.Г., Симачев Ю.В., Федюнина А.А., Сергеева К.П. Цифровизация компаний как фактор адаптации к коронавирусу и санкционному шоку // *Российский журнал менеджмента*. 2023. Т. 21. № 4. С. 481-513.

Поняева и др., 2024 – Поняева И.И., Кукушкин К.В., Рождественский О.И., Бабкин А.В. Стратегическое управление организацией в условиях цифровой трансформации: основные тенденции // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Менеджмент*. 2024. Т. 18. № 1. С. 45-67.

Современные технологии..., 2025 – Современные технологии в промышленности: как автоматизация, роботизация и цифровизация меняют производство / GDPQuadrat. 2025. [Электронный ресурс]. URL: <https://gdpquadrat.ru/modern-technologies-industry> (дата обращения: 21.10.2025).

Топ-10 трендов цифровизации, 2023 – Топ-10 трендов цифровизации / Vedomosti.ru при поддержке «Ростелекома». 2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vedomosti.ru/technology/articles/2023/11/15/top-10-trends-digitalization> (дата обращения: 21.10.2025).

Цифровизация промышленности..., 2024 – Цифровизация промышленности – тренды и проблемы российского рынка / Skolkovo-resident.ru. 2024. [Электронный ресурс]. URL: <https://skolkovo-resident.ru/digitalization-trends-problems> (дата обращения: 21.10.2025).

Цифровизация промышленности..., 2023 – Цифровизация промышленности как главный драйвер развития экономики России / MGPU-Media. 2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://mgpu-media.ru/digitalization-industrial> (дата обращения: 21.10.2025).

Zhdanov, 2022 – Zhdanov D. Digitalization of domestic manufacturing companies: status and prospects // *Economics of Contemporary Russia*. 2022. Vol. 25. No. 2. Pp. 127-141.

References

Kobzev i dr., 2022 – Kobzev, V.V., Babkin, A.V., Skorobogatov, A.S. (2022). Tsifrovaya transformatsiya promyshlennykh predpriyatii v usloviyakh novoi real'nosti [Digital transformation of industrial enterprises in the new reality]. *π-Economy*. 15(5): 7-27. [in Russian]

Kuzyk i dr., 2023 – Kuzyk, M.G., Simachev, Yu.V., Fedyunina, A.A., Sergeeva, K.P. (2023). Tsifrovizatsiya kompanii kak faktor adaptatsii k koronavirusnomu i sanktsionnomu shokam [Digitalization of companies as a factor in adaptation to the coronavirus and sanctions shocks]. *Rossiiskii zhurnal menedzhmenta*. 21(4): 481-513. [in Russian]

Ponyaeva i dr., 2024 – Ponyaeva, I.I., Kukushkin, K.V., Rozhdestvenskii, O.I., Babkin, A.V. (2024). Strategicheskoe upravlenie organizatsiei v usloviyakh tsifrovoi transformatsii: osnovnye tendentsii [Strategic management of an organization in the context of digital transformation: main trends]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Menedzhment*. 18(1): 45-67. [in Russian]

[Sovremennye tekhnologii..., 2025](#) – Sovremennye tekhnologii v promyshlennosti: kak avtomatizatsiya, robotizatsiya i tsifrovizatsiya menyayut proizvodstvo [Modern technologies in industry: how automation, robotics and digitalization are changing production]. GDPQuadrat. 2025. [Electronic resource]. URL: <https://gdpquadrat.ru/modern-technologies-industry> (date of access: 21.10.2025). [in Russian]

[Top-10 trendov tsifrovizatsii, 2023](#) – Top-10 trendov tsifrovizatsii [Top-10 digitalization trends]. Vedomosti.ru pri podderzhke «Rostelekoma». 2023. [Electronic resource]. URL: <https://www.vedomosti.ru/technology/articles/2023/11/15/top-10-trends-digitalization> (date of access: 21.10.2025). [in Russian]

[Tsifrovizatsiya promyshlennosti..., 2023](#) – Tsifrovizatsiya promyshlennosti kak glavnyi draiver razvitiya ekonomiki Rossii [Digitalization of industry as the main driver of the Russian economy's development]. MGPU-Media. 2023. [Electronic resource]. URL: <https://mgpu-media.ru/digitalization-industrial> (date of access: 21.10.2025). [in Russian]

[Tsifrovizatsiya promyshlennosti..., 2024](#) – Tsifrovizatsiya promyshlennosti – trendy i problemy rossiiskogo rynka [Digitalization of industry – trends and problems of the Russian market]. Skolkovo-resident.ru. 2024. [Electronic resource]. URL: <https://skolkovo-resident.ru/digitalization-trends-problems> (date of access: 21.10.2025). [in Russian]

[Zhdanov, 2022](#) – Zhdanov, D. (2022). Digitalization of domestic manufacturing companies: status and prospects. *Economics of Contemporary Russia*. 25(2): 127-141.

Геоинформационные технологии как инструмент управления природно-хозяйственными системами в криолитозоне: от первых карт к цифровым двойникам

Борис Юрьевич Кротенко ^{a, *}

^aМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Российская Федерация

Аннотация. Освоение российской криолитозоны, занимающей 65 % территории страны, исторически было сложнейшей задачей. На фоне стремительного изменения климата и интенсивного хозяйственного освоения Арктики традиционные риски, связанные с таянием вечной мерзлоты, стали системными и масштабными. В данной статье утверждается, что именно современные геоинформационные системы (ГИС) становятся центральным технологическим решением для смены парадигмы – от ликвидации последствий к упреждающему стратегическому управлению. Автор детально рассматривает эволюцию ГИС: от базового картографирования до разработки комплексных «цифровых двойников» территории. Эти динамические модели, интегрирующие данные мониторинга, изысканий и климатических прогнозов, позволяют с высокой детализацией имитировать процессы деградации мерзлоты, проводить оценку рисков для критической инфраструктуры и обосновывать оптимальные решения по пространственному развитию. Ключевой вывод статьи подчеркивает, что для обеспечения долгосрочной устойчивости уязвимых северных регионов необходима глубокая интеграция платформ ГИС с технологиями искусственного интеллекта, что откроет возможности для предиктивной аналитики и адаптивного планирования.

Ключевые слова: криолитозона, геоинформационные системы (ГИС), управление природно-хозяйственными системами, цифровое картографирование, деградация многолетнемерзлых пород, пространственное планирование, устойчивое развитие Арктики.

* Корреспондирующий автор

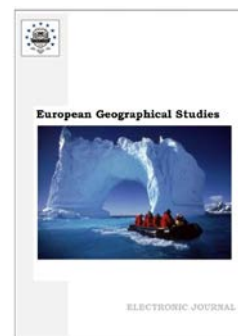
Адреса электронной почты: boriskrotenko78@gmail.com (Б.Ю. Кротенко)

Copyright © 2025 by Cherkas Global University



Published in the USA
European Geographical Studies
Issued since 2013.
E-ISSN: 2413-7197
2025. 12(1): 62-67

DOI: 10.13187/egs.2025.1.62
<https://egs.cherkasgu.press>



Letters to the Editorial Office

Time-Resolved Scanning Electron Microscopy for Sand Saltation Measurements

Brief Conference Communication

Oleg V. Gradov ^{a, *}, Irina A. Maklakova ^a, Andrei I. Sergeev ^a

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

Abstract

The role of electrostatics in providing sand saltations is well known (including during the formation of dunes, as well as variations of sand flows in dust storms and sand clouds in aeology). We propose to use time-resolved scanning electron microscopy for this purpose, since in the column of an electron microscope it is possible to program the potential difference/field strength by varying the accelerating voltage. Examples of time-resolved microimages for calibrated "sand models" are shown in this short paper.

Keywords: sand saltations, sand electrostatics, dust storms, time-resolved SEM, sand clouds, aeology.

1. Введение

Общеизвестна роль электростатики в обеспечении "сальтации" песка, в том числе при формировании дюн (модифицированный механизм Багнольда), а также вариациях песчаных потоков в пылевых бурях и песчаных облаках в эолологии (Schmidt et al., 1988; Yue et al., 2003, 2007; Zheng et al., 2006; Yue, Zheng, 2007). Несмотря на пересмотр некоторых механизмов сальтационных эффектов в последние годы, в особенности – недавно обнаруженную немонотонную зависимость порога текучести от диаметра частиц, приложенного электрического поля и поверхностной плотности заряда (приводящую к сепарации в течениях проводящих частиц от диэлектрических – за счёт снижения порога текучести за счёт электростатики для проводящих частиц до 31 % и повышения порога текучести до 76 % за счёт электростатики у отрицательно заряженных диэлектрических частиц) (Zhang, 2024), в целом, различные электростатические феномены воспроизводятся на песчинках в лабораторных условиях в элементарных установках типа описанной в (Xie et al., 2021). Две параллельные электродные пластины используются для создания однородного электрического поля, имитирующего атмосферное или золотое электрическое поле. Под действием электрического поля частицы песка приобретают индуктивный заряд и поднимаются в воздух. Их траектории снимают скоростной камерой, на основе чего вычисляют суммарные заряды отдельных частиц песка, и их заряд на единицу массы.

* Corresponding author

E-mail addresses: geochemicalphysics@gmail.com (O.V. Gradov)

Измеряется также пороговая напряженность электрического поля, приводящая к подъему частиц песка (она увеличивается с диаметром песчинки).

В данном методе невозможно воздействовать на одиночную песчинку и наблюдать динамические феномены, сопутствующие сальтациям, в которых она участвует (электростатическая мультитабильность и обратимая агрегация, вращение частиц в вихревых полях и т. д.).

2. Предлагаемый подход

Нами предлагается использовать для этого времяразрешенную (и стробоскопическую) сканирующую электронную микроскопию, так как в колонне сканирующего электронного микроскопа возможно программировать разность потенциалов/напряженность поля через варьирование ускоряющего напряжения на катоде. Находящиеся на специализированной платформе с ограничивающими стенками либо в "субкамере" (если речь идёт об ASEM – атмосферной электронной микроскопии) песчинки будут испытывать воздействие электронного пучка и проявлять динамику строго в находящихся под электронным пучком/облучаемых/сканируемых участках (ROI/region of interest). При этом можно отслеживать их динамику под пучком с временным разрешением, соответствующим техническим свойствам детекторов и системы развёртки.

3. Материалы и методы

Времяразрешенное исследование динамики песчинок с разным зарядом (в том числе модифицированных химически) и размерами/морфометрическими характеристиками было произведено впервые на собственноручно модифицированном сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM T330-A в TV-режиме при подключении АЦП с модулем оцифровки видео к BNC-разъёму, выводящему на монитор (обычно при использовании TV-режима). При записи видеосигналов сальтационной динамики частиц песка с параметрами регистрации, отображаемыми на адресно-временном коде/тайм-коде, достигали разрешение от десятков миллисекунд до миллисекунд. Напряжение на катоде варьировали от единиц киловольт до 25 киловольт.

4. Результаты

Примеры времяразрешенных микроизображений для динамики калиброванных моделей песчинок с измеренными характеристиками заряда, пористости и морфометрии (SILASORB) приведены на [Рисунке 1а](#). Можно видеть вращение одной частицы на поверхности другой – удерживающей первую электростатическими силами. Подтвердить факт вращения можно с применением двумерного преобразования Фурье в реальном времени (мы осуществляли это с использованием ПО QAVIS разработки ТОИ ДВО РАН): динамику изменений 2D FFT данной серии рапид-микрофотографий можно видеть на [Рисунке 1б](#). В ряде случаев можно наблюдать прецессию частиц, а также явления, подобные гироскопическому движению песчинки в конфайнменте на поверхности. После отрыва от поверхности частицы уносятся вовне, иногда за пределы зоны сканирования. Ещё одним экстраординарным феноменом является дискретная динамика переключений при вращении частиц (частица "стопорится" в определенных угловых позициях), а также дискретные переходы в ориентациях песчинки между двумя состояниями ("бистабильность") и более ("мультитабильность"). Также наблюдаются "перемещения частиц на дальние расстояния", предположительно, коррелирующие с размерами и зарядом поверхности песчинок. Они детектируются с использованием осциллографического метода на заданных строках.

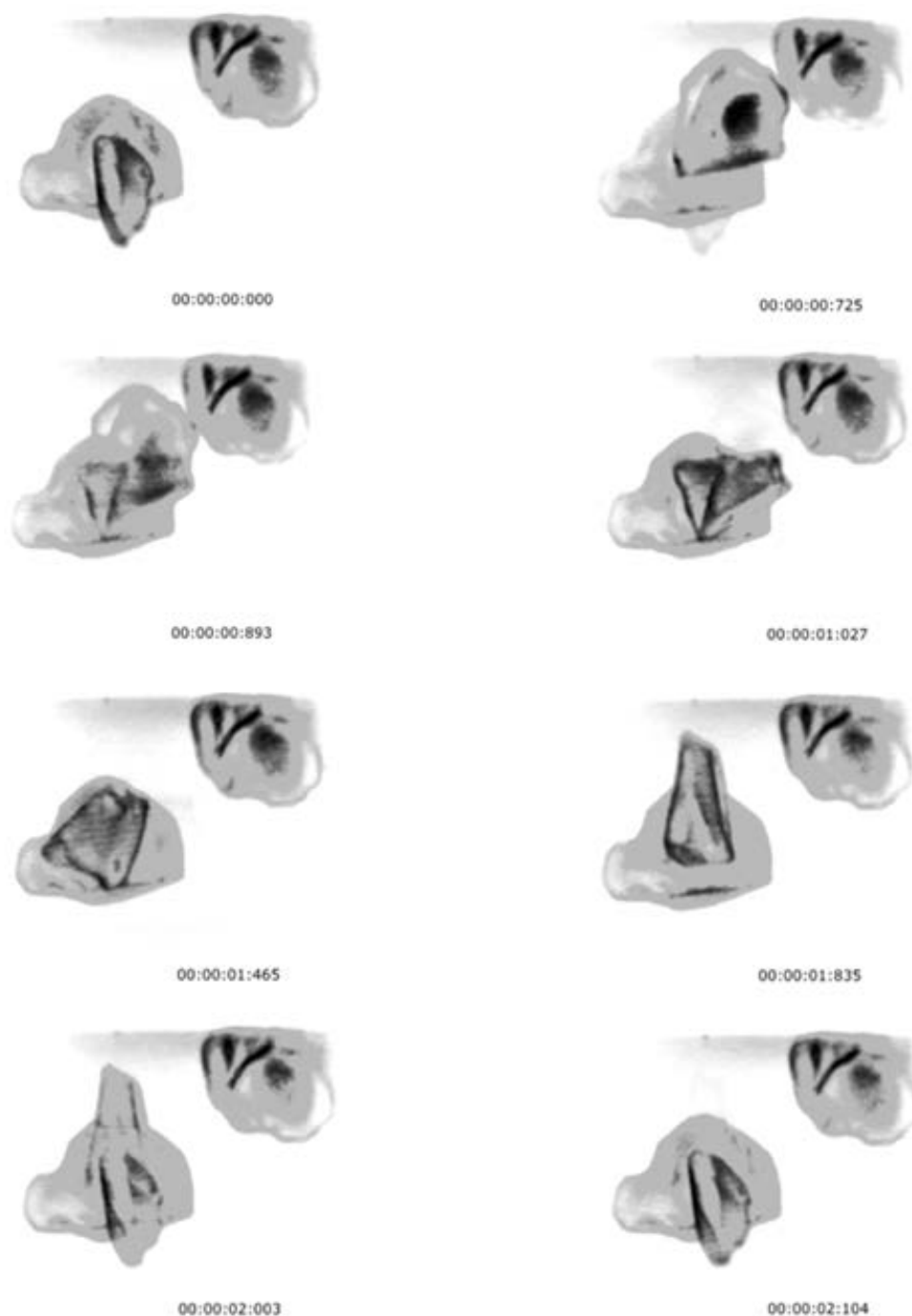
Примеры этих эффектов показаны на [Рисунках 2а, 2б](#).

Результаты модельных экспериментов опубликованы ([Elfimov et al., 2025](#)). Микрофото приведены из данной работы, а также исходной конференционной публикации.

5. Обсуждение

Эксперименты могут быть воспроизведены на любом песке при соблюдении электрофизических условий проведения эксперимента, а также могут лечь в основу классификации песков по их динамике. Созданные подходы могут иметь значение для

геологии также в целях: исследования механизмов извлечения отдельных минералов из песков электростатическим методом; анализа и моделирования электростатических эффектов в пылевых бурях и поведения частиц почв в ходе выветривания; поведения песка при формировании не только земных дюн, но и дюн Багнольда на Марсе и экзопланетах.



а

Рис. 1. Вращение модельной песчинки: а – серия микрофотографий; б – двумерные Фурье-спектры (2D FFT), снятые с ПО QAVIS

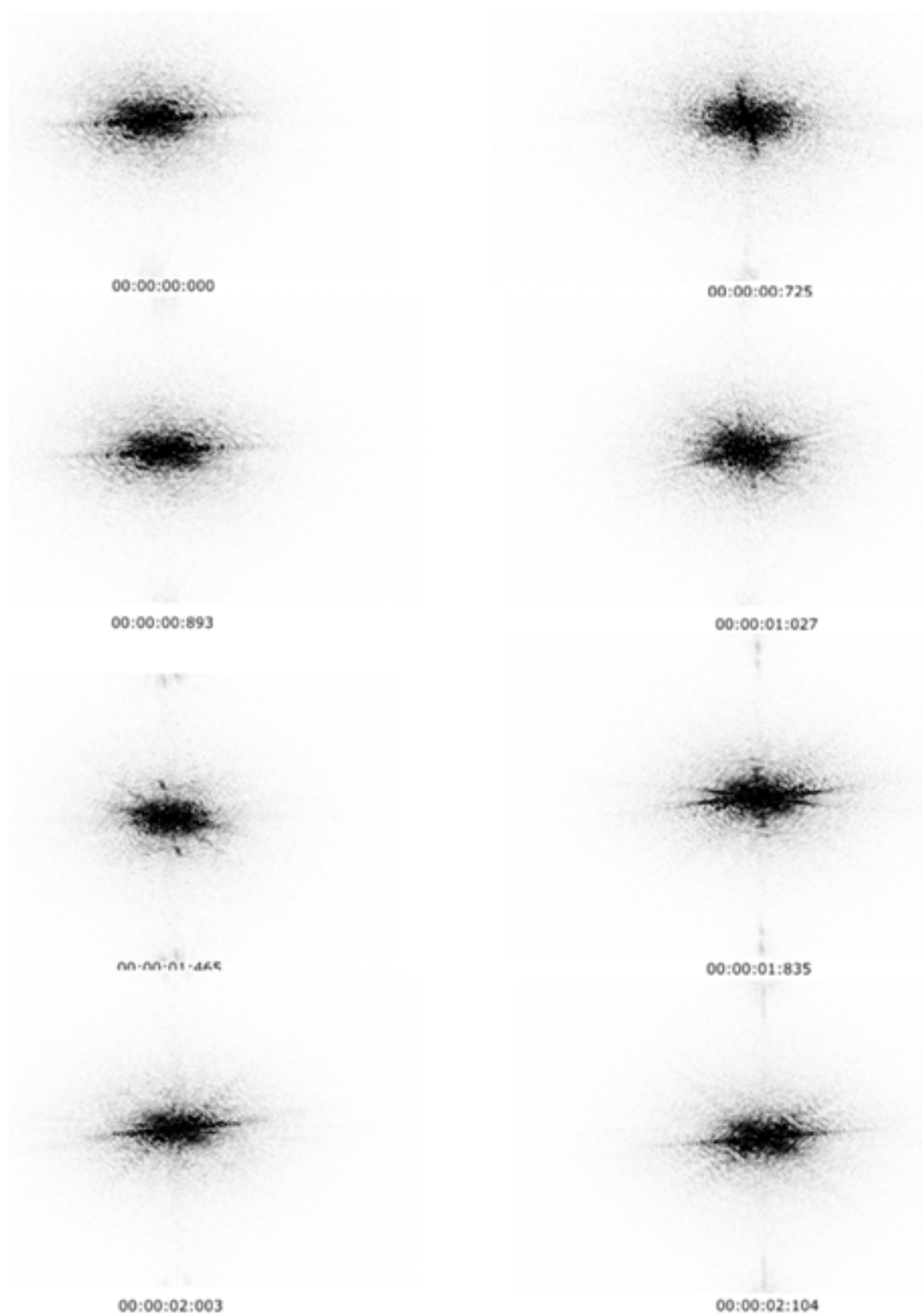


Рис. 1. Вращение модельной песчинки: а – серия микрофотографий;
 б – двумерные Фурье-спектры (2D FFT), снятые с ПО QAVIS

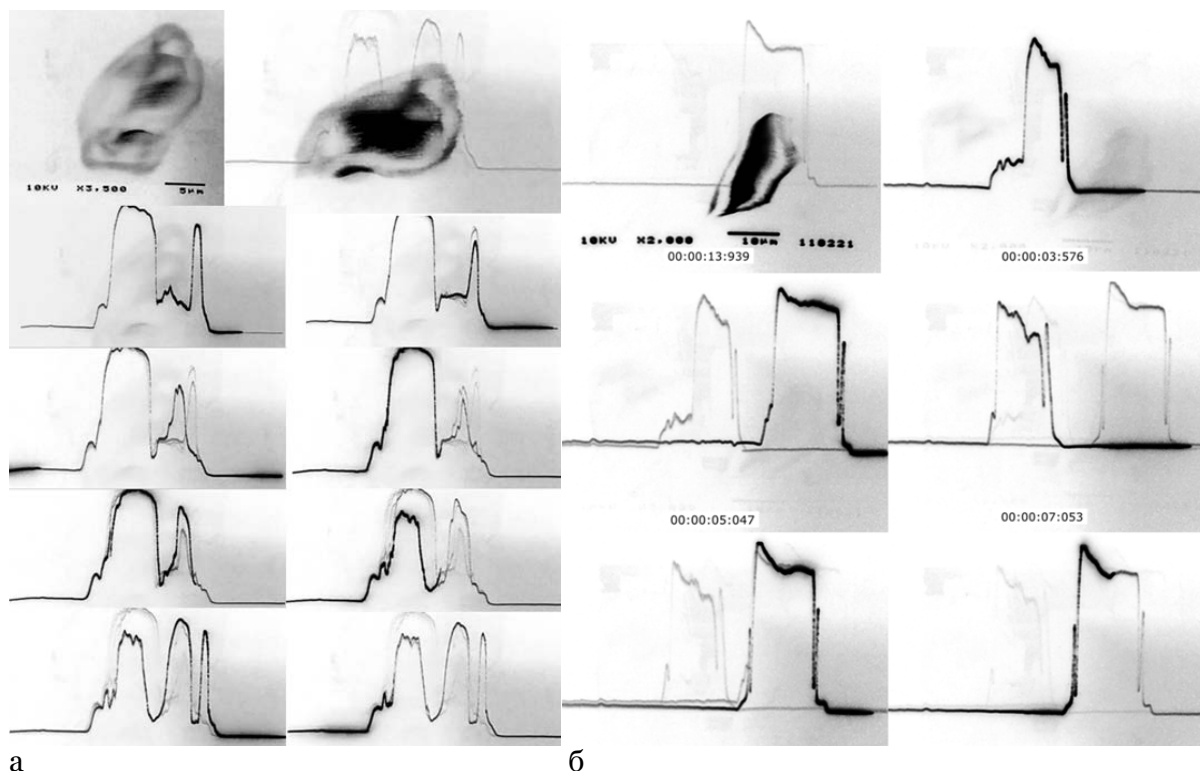


Рис. 2. Осциллограммы динамики модельной песчинки: а – ротация с промежуточными фазами; б – резкое перемещение в пространстве.

6. Благодарности

Результаты, приведенные в данном кратком сообщении, впервые доложены в Борке, на международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле» осенью 2025 г., организаторам которой, слушателям и коллегам из Борка мы предельно благодарны за проявленный интерес к тематике, стимулирующий нас далее продолжать работы в этом направлении.

Литература

- [Elfimov et al., 2025](#) – *Elfimov A., Gradov O.V., Gradova M.A., Maklakova I.A., Sergeev A.I.* Field-driven and electron beam-driven discrete multi-stable microrotators based on modified HPLC sorbents // *Advanced Structured Materials*. 2025. 221: 157-189.
- [Schmidt et al., 1988](#) – *Schmidt D.S., Schmidt R.A., Dent J.D.* Electrostatic force on saltating sand // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1988. 103(D8): 8997-9001.
- [Xie et al., 2021](#) – *Xie L., Liu Y., Zhou C., Wang M., Lacks D.J., Zhou J.* A laboratory study of the electrostatic charge of individual sand particles lofted in an electric field // *Aeolian Research*. 2021. 50: 100675.
- [Yue, Zheng, 2007](#) – *Yue G.W., Zheng X.J.* Effect of thermal diffusion and electrostatic force on evolution of wind-blown sand flow // *Applied Mathematics and Mechanics*. 2007. 28(2): 183-192.
- [Yue et al., 2003](#) – *Yue G.W., Huang N., Zheng X.J.* Effect of irregular sand grains and electrostatic force on threshold wind speed // *Journal of Desert Research*. 2003. 23(6): 621.
- [Zhang, 2024](#) – *Zhang H.* Revisiting the effects of electrostatic forces on the lifting of sand particles in dust storms // *Journal of Electrostatics*. 2024. 127: 103880.
- [Zheng et al., 2006](#) – *Zheng X.J., Huang N., Zhou Y.* The effect of electrostatic force on the evolution of sand saltation cloud // *The European Physical Journal E*. 2006. 19(2): 129-138.

References

- [Elfimov et al., 2025](#) – *Elfimov, A., Gradov, O.V., Gradova, M.A., Maklakova, I.A., Sergeev, A.I.* (2025). Field-driven and electron beam-driven discrete multi-stable microrotators based on modified HPLC sorbents. *Advanced Structured Materials*. 221: 157-189.

[Schmidt et al., 1988](#) – Schmidt, D.S., Schmidt, R.A., Dent, J.D. (1998). Electrostatic force on saltating sand. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 103(D8): 8997-9001.

[Xie et al., 2021](#) – Xie, L., Liu, Y., Zhou, C., Wang, M., Lacks, D.J., Zhou, J. (2021). A laboratory study of the electrostatic charge of individual sand particles lofted in an electric field. *Aeolian Research*. 50: 100675.

[Yue, Zheng, 2007](#) – Yue, G.W., Zheng, X.J. (2007). Effect of thermal diffusion and electrostatic force on evolution of wind-blown sand flow. *Applied Mathematics and Mechanics*. 28(2): 183-192.

[Yue et al., 2003](#) – Yue, G.W., Huang, N., Zheng, X.J. (2003). Effect of irregular sand grains and electrostatic force on threshold wind speed. *Journal of Desert Research*. 23(6): 621.

[Zhang, 2024](#) – Zhang, H. (2024). Revisiting the effects of electrostatic forces on the lifting of sand particles in dust storms. *Journal of Electrostatics*. 127: 103880.

[Zheng et al., 2006](#) – Zheng, X.J., Huang, N., Zhou, Y. (2006). The effect of electrostatic force on the evolution of sand saltation cloud. *The European Physical Journal E*. 19(2): 129-138.

Времяразрешенная сканирующая электронная микроскопия для измерения и моделирования сальтационных процессов в песчаных бурях

Краткое конференционное сообщение

Олег Валерьевич Градов ^{a, *}, Ирина Александровна Маклакова ^a, Андрей Иванович Сергеев ^a

^a Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва, Российская Федерация

Аннотация. Роль электростатики в обеспечении сальтационных процессов в песке хорошо известна (в том числе при формировании дюн, а также при изменении песчаных потоков в пылевых бурях). Мы предлагаем использовать для этой моделирования и измерения параметров этих процессов на уроне одиночных песчинок времяразрешающую сканирующую электронную микроскопию, поскольку в колонне электронного микроскопа возможно программировать разность потенциалов/напряженность поля путем изменения ускоряющего напряжения. В данном кратком сообщении представлены примеры времяразрешенных микроизображений для калиброванных по размеру и моментам инерции силикагелевых гранул – «модельных песчинок».

Ключевые слова: сальтационные процессы в песке, электростатика песка, пылевые бури, времяразрешенная сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), песчаные облака, эолология.

* Корреспондирующий автор

Адреса электронной почты: geochemicalphysics@gmail.com (О.В. Градов)