

УДК 004.942

DOI: [10.26102/2310-6018/2025.51.4.041](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.51.4.041)

Моделирование электрофизических свойств отражающего экрана на основе нанокompозитов фрактальной структуры для арктических мобильных комплексов

Д.В. Сердечный✉, С.А. Корчагин, Н.А. Андриянов

Государственный университет управления, Москва, Российская Федерация

Резюме. В работе проведено моделирование электрофизических свойств отражающего экрана, элементы решетки которого имеют слоистую, иерархически построенную структуру на основе нанокompозита, аналогичную фрактальным образованиям. Исследование направлено на решение проблемы создания эффективных, легких и устойчивых к экстремальным условиям отражающих структур для арктических мобильных комплексов, где традиционные экраны сталкиваются с ограничениями из-за большой массы, высокого аэродинамического сопротивления и ухудшения характеристик при обледенении. С использованием разработанного специализированного программного комплекса исследовано влияние уровня фрактальности элементов решетки на коэффициент отражения в широком частотном диапазоне в условиях низких температур и сложной радиоволновой среды Арктики. Установлено, что увеличение уровня фрактальности позволяет существенно расширить рабочий частотный диапазон по сравнению с традиционными периодическими структурами и повысить энергетическую эффективность. Мультирезонансная природа фрактальной геометрии обеспечивает гибкость в управлении спектральными характеристиками. Полученные результаты могут быть использованы при разработке систем широкополосной радиолокации, средств дистанционного мониторинга мобильных объектов, включая суда и наземный транспорт в Арктике, а также для создания защищенных каналов связи и интеллектуальных систем обеспечения информационной безопасности в условиях полярной ночи и ионосферных возмущений.

Ключевые слова: моделирование электрофизических свойств, отражающий экран, нанокompозиты, арктические мобильные комплексы, радиолокация, фрактальная структура, программный комплекс.

Благодарности: Статья подготовлена по результатам исследований, выполненных за счет средств федерального бюджета по государственному заданию «Научные, методологические и практические основы разработки и применения цифровых и интеллектуальных технологий в целях обеспечения устойчивого развития регионов Российской Федерации, включая удаленные и труднодоступные территории Сибири, Дальнего Востока и Арктической зоны»; код научной темы, присвоенной учредителем, - FZNW-2025-0021.

Для цитирования: Сердечный Д.В., Корчагин С.А., Андриянов Н.А. Моделирование электрофизических свойств отражающего экрана на основе нанокompозитов фрактальной структуры для арктических мобильных комплексов. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2025;13(4). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=2098> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.51.4.041

Modeling the electrophysical properties of a reflective screen based on fractal nanocomposites for Arctic mobile systems

D.V. Serdechnyy✉, S.A. Korchagin, N.A. Andriyanov

State University of Management, Moscow, the Russian Federation

Abstract. The electrophysical properties of a reflective screen were modeled. The grid elements have a layered, hierarchically constructed structure based on a nanocomposite, similar to fractal formations. The study aims to address the problem of creating effective, lightweight, and extreme-condition-resistant reflective structures for Arctic mobile systems, where traditional screens face limitations due to their large mass, high aerodynamic drag, and performance degradation during icing. Using the developed specialized software package, the influence of the grid element fractality level on the reflectivity over a wide frequency range was studied in low-temperature conditions and the complex Arctic radio wave environment. It was found that increasing the fractality level significantly expands the operating frequency range compared to traditional periodic structures and improves energy efficiency. The multiresonant nature of fractal geometry provides flexibility in managing spectral characteristics. The results obtained can be used in the development of broadband radar systems, remote monitoring systems for mobile objects, including ships and ground transport, in the Arctic, as well as for the creation of secure communication channels and intelligent information security systems in polar night conditions and ionospheric disturbances.

Keywords: modeling of electrophysical properties, reflecting the screen, nanocomposites, Arctic mobile complexes, radar, fractal structure, software complex.

Acknowledgements: The article was prepared according to the results of studies performed at the expense of the federal budget on the state assignment "Scientific, methodological and practical foundations for the development and use of digital and intellectual technologies in order to ensure the sustainable development of the regions of the Russian Federation, including remote and hard-to-reach territories of Siberia, the Far East and the Arctic zone"; the code of the scientific topic assigned by the founder is FZNW-2025-0021.

For citation: Serdechnyy D.V., Korchagin S.A., Andriyanov N.A. Modeling the electrophysical properties of a reflective screen based on fractal nanocomposites for Arctic mobile systems. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(4). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/journal/pdf?id=2098> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.51.4.041

Введение

Отражающие экраны являются важнейшим компонентом ряда современных технологий: от систем пассивной радиолокации и антенных устройств [1] до средств широкополосной и нелинейной радиолокации [2], систем локализации подвижных объектов [3], селективных и радиопоглощающих материалов [4], а также интеллектуальных решений в области защиты информации. В условиях стремительного освоения Арктической зоны возникает острая необходимость в создании высокоэффективных, легких и устойчивых к экстремальным климатическим условиям отражающих структур, способных функционировать в условиях полярной ночи, низких температур, сильных ветров, обледенения и ионосферных возмущений.

Традиционные отражающие экраны, выполненные в виде параболоидов вращения или сплошных металлических пластин [5], обладают высокой отражающей способностью, однако их применение в арктических условиях сопряжено со значительными ограничениями: большая масса затрудняет транспортировку и монтаж на удаленных объектах, а высокое аэродинамическое сопротивление увеличивает риск повреждения конструкций при штормовых ветрах, характерных для приполярных регионов. Кроме того, обледенение таких поверхностей приводит к изменению электродинамических характеристик и снижению эффективности отражения.

Альтернативные решения – тонкие перфорированные металлические пластины [6] или системы параллельных проводящих полос, ориентированных перпендикулярно вектору электрического поля волны [7], – позволяют снизить массу и ветровую нагрузку. В арктических условиях, где особенно ценятся надежность и стабильная работа оборудования в широком частотном диапазоне – включая полосы, задействованные в

спутниковой связи и радиолокации, – традиционные конструкции сталкиваются с серьезным ограничением: через их структуру происходит утечка электромагнитной энергии. Это приводит к ослаблению полезного сигнала и снижению коэффициента отражения. Проблема особенно обостряется при многолучевом распространении радиоволн, характерном для ледяной поверхности и приповерхностного слоя арктической атмосферы.

Решетчатые металлические конструкции [8, 9] предлагают преимущество в виде снижения массы и улучшения аэродинамических характеристик. Однако с ростом рабочей частоты их эффективность резко деградирует из-за возрастающих дифракционных потерь и усиления эффекта просачивания излучения сквозь ячейки решетки. В арктических условиях, где радиолокационные и связные системы должны работать в широком диапазоне – от мониторинга ледовой обстановки до сопровождения судов – это становится неприемлемым ограничением.

В связи с этим актуальной задачей является разработка нового типа отражающих экранов, сочетающих малую массу, устойчивость к экстремальным климатическим факторам и высокую эффективность отражения в широком частотном диапазоне. В настоящей работе предлагается использовать слоистую иерархически построенную структуру элементов решетки фрактальной геометрии. Такой подход позволяет не только оптимизировать электромагнитные характеристики, но и повысить механическую устойчивость конструкции к обледенению и ветровым нагрузкам.

Целью данной работы является моделирование электрофизических свойств таких фрактально-подобных отражающих экранов, исследование влияния уровня фрактальности на их эффективность в условиях, имитирующих арктическую среду, а также оценка потенциала их применения в системах радиолокации, навигации, мониторинга подвижных объектов и защищенной связи в Арктике.

Результаты исследования открывают путь к созданию нового класса «умных» отражающих поверхностей, адаптированных к экстремальным условиям Крайнего Севера, и способных обеспечить надежную работу радиотехнических систем в условиях активного освоения Арктической зоны.

Материалы и методы

В настоящей работе представлена модель отражающего экрана, основанного на использовании нанокompозитов фрактальной структуры (Рисунок 1). Такая конструкция обеспечивает расширение рабочего частотного диапазона и позволяет целенаправленно управлять положением и интенсивностью максимумов отражения за счет варьирования геометрических параметров структурных элементов.

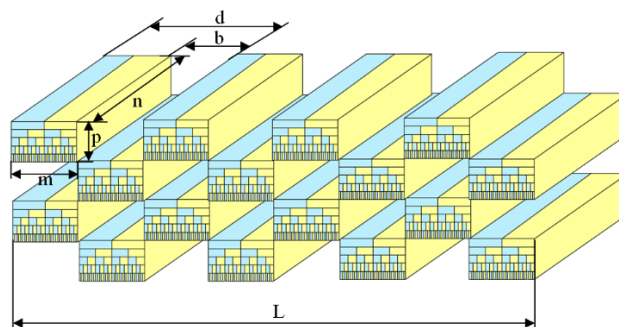


Рисунок 1 – Схематическое изображение отражающего экрана с фрактальной структурой на основе нанокompозита

Figure 1 – Schematic representation of a reflective screen with a fractal structure based on a nanocomposite

Геометрические характеристики отражающего экрана выбираются согласно соотношению:

$$\cos\left(\frac{2\pi d f_{\max}}{c}\right) + \frac{c}{2b f_{\max} \ln\left(\frac{b}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}}\right)} \sin \frac{2\pi d f_{\max}}{c} = 1, \quad (1)$$

где b – период, d – межэлементное расстояние, n – длина нанокompозита, m – ширина нанокompозита, p – высота нанокompозита, $f_{\max}$ – верхняя граница рабочего частотного диапазона, c – скорость света в вакууме, L – общая длина отражающего экрана.

Каждый элемент решетки реализован в виде многослойного иерархического композита, сочетающего металлические и полупроводниковые компоненты Al-Si. Такие материалы показывают устойчивость электрофизических и механических свойств при температурах до -55°C [10]. Если нужна эксплуатация устройства на более низких температурах, рекомендуется использовать структуры Al-Pt или Al-Pd, однако, такие материалы являются более дорогостоящими [11].

Структура обладает свойством самоподобия на нескольких масштабных уровнях и формально описывается как фрактальное образование (Рисунок 2). Минимальный характерный размер отдельного слоя может достигать величины, сопоставимой с радиусом Ван-дер-Ваальса атомов, входящих в состав композита, что обеспечивает высокую чувствительность электромагнитного отклика.

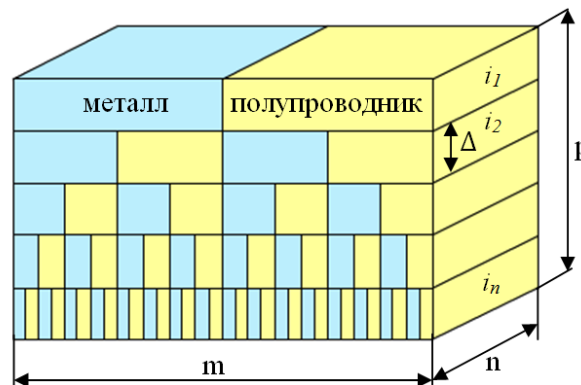


Рисунок 2 – Нанокompозит фрактальной структуры
Figure 2 – Fractal structure nanocomposite

Общее количество ячеек в решетке определяется из геометрического соотношения:

$$m = \frac{W^2}{4Fd}, \quad (2)$$

где W – ширина активной зоны экрана, F – фокусное расстояние рефлектора.

Расчет коэффициента отражения R осуществлялся на основе электродинамической модели полубесконечной среды. Согласно подходу, предложенному в работе [12], коэффициент отражения выражается следующим образом:

$$R = \frac{(n-1)^2 + \chi^2}{(n+1)^2 + \chi^2}, \quad (3)$$

где n – показатель преломления, χ – показатель поглощения среды.

В соответствии с расчетами, показатели преломления и поглощения среды равны:

$$\chi = \frac{c}{2\pi df} \operatorname{arch}\left[\cos \frac{2\pi df}{c} + \frac{c}{2bf \cdot \ln\left[\frac{b}{\sqrt{m^2+n^2}}\right]}\sin \frac{2\pi df}{c}\right], \quad (4)$$

$$n = \frac{c}{2\pi df} \arccos\left[\cos \frac{2\pi df}{c} + \frac{c}{2bf \cdot \ln\left[\frac{b}{\sqrt{m^2+n^2}}\right]}\sin \frac{2\pi df}{c}\right]. \quad (5)$$

Для решения задач проектирования и анализа отражающих экранов, предназначенных для эксплуатации в экстремальных арктических условиях, разработан специализированный программный комплекс, ориентированный на моделирование электрофизических характеристик нанокompозитных структур с фрактальной геометрией. Комплекс учитывает как электродинамические, так и климатические особенности функционирования оборудования в условиях низких температур, высокой влажности, обледенения и многолучевого распространения радиоволн над ледяной поверхностью. Ядро программного комплекса включает модуль параметрического генератора фрактальных ячеек, поддерживающий иерархические структуры с возможностью задания уровня итераций ($i = 1 \dots 5$), масштаба, ориентации и плотности заполнения решетки. Геометрические модели автоматически интегрируются в вычислительный модуль, реализующий численные методы – метод конечных элементов (FEM) и метод конечных разностей во временной области (FDTD) – для расчета ключевых электрофизических параметров, описанных выше.

Особое внимание уделено моделированию свойств нанокompозитной основы: в расчет включены температурно-зависимые параметры – комплексная диэлектрическая проницаемость, удельная проводимость и коэффициент теплового расширения, полученные на основе экспериментальных данных для полимерных матриц с углеродными нанотрубками и графеновыми наполнителями при температурах от -60°C до $+25^\circ\text{C}$. Это позволяет достоверно оценивать стабильность характеристик экрана в реальных арктических условиях. Дополнительно реализован модуль многопараметрической оптимизации, использующий адаптивные алгоритмы на основе машинного обучения (включая гауссовские процессы и нейросетевые регрессоры). Он позволяет автоматически подбирать конфигурацию фрактальной решетки для достижения требуемых показателей: максимальной ширины рабочего диапазона, высокого коэффициента отражения при наклонном падении волны (до $\pm 50^\circ$), минимальных потерь на рассеяние и устойчивости к деградации свойств при циклическом замораживании/оттаивании.

Интерфейс комплекса разработан с учетом требований к мобильности и автономному использованию: он доступен как локальное приложение с поддержкой работы в офлайн-режиме и включает библиотеку готовых решений, адаптированных под типовые платформы арктических мобильных комплексов. Результаты моделирования могут экспортироваться в форматы STEP, GDSII и Gerber для последующего изготовления опытных образцов методами лазерной абляции или аддитивной печати.

Таким образом, программный комплекс обеспечивает сквозной цикл проектирования – от формирования фрактальной топологии до верификации электрофизических характеристик в условиях, приближенных к реальной арктической эксплуатации, что существенно ускоряет разработку надежных и энергоэффективных радиофизических систем для Крайнего Севера.

Результаты

С использованием разработанных математических моделей и программного комплекса проведен вычислительный эксперимент с отражающим экраном разного уровня фрактальности элемента решетки i (1: $i = 10$, 2: $i = 6$, 3: $i = 3$) в результате

которого получены зависимости показателя отражения от частоты электромагнитного излучения. Использовались следующие параметры, указанные в Таблице 1.

Таблица 1 – Параметры отражающего экрана
Table 1 – Reflective screen parameters

№	b , см	d , см	m , см	n , см	p , см
1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
2	0,5	0,5	0,045	0,045	0,045
3	0,5	0,5	10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}

На Рисунке 3 показан график, отражающий зависимость коэффициента отражения от частоты падающего электромагнитного излучения и уровня фрактальности ячеек решетки. Кривые соответствуют трем различным уровням фрактальности:

$$1 - i = 10, 2 - i = 6, 3 - i = 3.$$

Построение выполнено для заданных характеристик отражающего экрана.



Рисунок 3 – График зависимости показателя отражения от частоты внешнего электромагнитного излучения и уровня фрактальности элемента решетки
Figure 3 – Graph of the dependence of the reflection index on the frequency of external electromagnetic radiation and the fractal level of the lattice element

Предлагаемое устройство функционирует следующим образом: падающее электромагнитное излучение взаимодействует с отражающим экраном, параметры которого подобраны таким образом, что обеспечивается высокий коэффициент отражения в требуемом диапазоне частот.

Как следует из анализа графика на Рисунке 3, ширина рабочего частотного диапазона существенно зависит от уровня фрактальности элементов решетки экрана. Применение фрактальной геометрии в конфигурации ячеек дает возможность увеличить этот диапазон в среднем на 5 ГГц по сравнению с традиционными конструкциями отражающих экранов, основанными на регулярных (непрерывных или периодических) структурах. Более того, варьирование уровня фрактальности дает возможность целенаправленно управлять положением и амплитудой пиков коэффициента отражения.

При реализации отражающего экрана с указанными выше параметрами его энергетическая эффективность (КПД) возрастает на 5,5 % относительно аналогов с классической решеткой, что подтверждает преимущество предложенного технического решения.

Обсуждение

Полученные результаты моделирования подтверждают высокий потенциал применения фрактальных нанокompозитных структур в качестве отражающих элементов для специализированных радиотехнических систем, в частности, для арктических мобильных комплексов, где критически важны широкополосность, энергоэффективность и устойчивость к экстремальным условиям.

Ключевым наблюдением является прямая корреляция между уровнем фрактальности ячеек решетки и шириной рабочего частотного диапазона. Как следует из анализа данных (Рисунок 3), увеличение степени фрактальности приводит к значительному расширению полосы частот с высоким коэффициентом отражения – в среднем на 5 ГГц по сравнению с традиционными периодическими структурами. Это объясняется мультрезонансной природой фрактальных геометрий, которые способны одновременно поддерживать резонансы на нескольких масштабах, что особенно актуально для систем, функционирующих в условиях изменяющейся внешней электромагнитной обстановки, характерной для арктических регионов.

Важно отметить, что предложенная архитектура не только расширяет частотный диапазон, но и предоставляет дополнительную степень свободы в проектировании – возможность тонкой настройки спектральных характеристик отражения за счет изменения параметра фрактальности i . Такой подход открывает перспективы для адаптивного управления электромагнитным откликом экрана без изменения его физических размеров или материального состава.

Кроме того, повышение энергетической эффективности на 5,5 % по сравнению с классическими аналогами свидетельствует о снижении потерь на рассеяние и поглощение, что особенно ценно в условиях ограниченных энергоресурсов мобильных комплексов. Учитывая, что нанокompозитная основа обеспечивает также высокую механическую прочность, термостойкость и устойчивость к коррозии, предложенное решение демонстрирует комплексное улучшение эксплуатационных характеристик. Благодаря возможности масштабирования фрактальных ячеек без потери функциональности, такие экраны могут быть адаптированы под различные факторы и требования по массогабаритным характеристикам, что особенно важно при проектировании компактных и легких систем.

С точки зрения промышленного внедрения, технология изготовления таких структур совместима с современными методами аддитивного производства и микро-наноитографии. Это позволяет не только снизить себестоимость серийного выпуска, но и обеспечить высокую воспроизводимость геометрических параметров, что критично для стабильности электродинамических характеристик. В перспективе возможно создание библиотеки стандартизированных фрактальных модулей, которые можно будет комбинировать в зависимости от задачи – от узкополосной фильтрации до сверхширокополосного отражения.

Стоит подчеркнуть экологическую и логистическую целесообразность применения нанокompозитных решений в Арктике. Композиты на основе полимерных матриц с нанонаполнителями обладают низкой плотностью, устойчивы к перепадам температур от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ и не требуют сложного технического обслуживания в полевых условиях. Такие материалы значительно упрощают эксплуатацию оборудования в удаленных районах с ограниченной инфраструктурой и сокращают потребность в частой замене компонентов.

Таким образом, интеграция фрактальных принципов в дизайн отражающих экранов на основе нанокompозитов представляет собой перспективное направление для разработки надежных, эффективных и адаптивных радиофизических систем, способных

функционировать в суровых климатических условиях Арктики. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию иерархической структуры фракталов с учетом реальных условий многолучевого распространения, а также на создание гибридных систем, сочетающих пассивные фрактальные элементы с активными электронными модулями для динамической перестройки характеристик в реальном времени.

Заключение

В ходе проведенного исследования продемонстрирована принципиальная возможность повышения эффективности отражающих экранов за счет использования слоистых иерархических структур на основе нанокompозитов с фрактальной геометрией элементов решетки. Моделирование электрофизических характеристик в условиях, имитирующих арктическую среду (низкие температуры, сложная радиоволновая обстановка), показало, что увеличение уровня фрактальности позволяет не только расширить рабочий частотный диапазон на 5 ГГц, но и повысить энергетическую эффективность устройства на 5,5 % по сравнению с традиционными конструкциями.

Полученные результаты подтверждают, что фрактальный подход к проектированию отражающих поверхностей обеспечивает гибкость в управлении спектральными характеристиками отражения и способствует созданию широкополосных, устойчивых и энергоэффективных решений, критически важных для эксплуатации в экстремальных климатических условиях Арктики.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанной структуры в системах широкополосной радиолокации, средствах дистанционного мониторинга мобильных объектов (включая морские и наземные платформы), а также в технологиях защищенной связи и интеллектуальных системах обеспечения информационной безопасности, функционирующих в условиях полярной ночи, ионосферных возмущений и других специфических арктических факторов.

Таким образом, предложенный подход открывает новые перспективы для создания адаптивных радиофизических устройств нового поколения, отвечающих вызовам современной арктической техносферы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Леухин С.А., Казаков И.В., Гольтяев И.В. Исследование поглощающих свойств пирамидальных поглотителей с применением временной селекции. *Электроника и микроэлектроника СВЧ*. 2021;1:582–585.
2. Филонович А.В., Ворначева И.В., Степанова В.В., Артюхова В.И. Адаптивная обработка стохастических сигналов различной структуры в базово-корреляционных системах пассивной радиолокации. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2023;(7):531–537.
Filonovich A.V., Vornacheva I.V., Stepanova V.V., Artyukhova V.I. Adaptive Processing of Stochastic Signals of Various Structures in Basic Correlation Systems of Passive Radar. *News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2023;(7):531–537. (In Russ.).
3. He Q.-M., Tao J.-R., Yang Y., et al. Electric-Magnetic-Dielectric Synergism and Salisbury Screen Effect in Laminated Polymer Composites with Multiwall Carbon Nanotube, Nickel, and Antimony Trioxide for Enhancing Electromagnetic Interference Shielding. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2022;156. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.106901>

4. Lupone F., Padovano E., Casamento F., Badini C. Process Phenomena and Material Properties in Selective Laser Sintering of Polymers: A Review. *Materials*. 2022;15(1). <https://doi.org/10.3390/ma15010183>
5. Арумов Г.П., Бухарин А.В., Макаров В.С. Трёхмерные отражающие объекты в задаче моделирования лидарного сигнала от рассеивающего слоя. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022;19(4):328–334. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-4-328-334>
Arumov G.P., Bukharin A.V., Makarov V.S. Three-Dimensional Reflecting Objects in the Problem of Modeling a Lidar Signal from a Scattering Layer. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2022;19(4):328–334. (In Russ.). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-4-328-334>
6. Golovastov S., Mikushkin A., Mikushkina A., Zhilin Yu. Interaction of Weak Shock Waves with Perforated Metal Plates. *Experiments in Fluids*. 2022;63(6). <https://doi.org/10.1007/s00348-022-03451-4>
7. Tang H., Wen T., Zhou Y., You J., Ma D. Study on the Wrinkling Behavior of Perforated Metallic Plates Using Uniaxial Tensile Tests. *Thin-Walled Structures*. 2021;167. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108132>
8. Корчагин С.А. Математическое моделирование электропроводности нанокompозита на основе углеродных нанотрубок с учетом эффекта волнистости и индекса дисперсии. *Инженерный вестник Дона*. 2024;(3). URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2024/9073>
Korchagin S.A. Mathematical Modeling of the Electrical Conductivity of a Nanocomposite Based on Carbon Nanotubes, Taking into Account the Waviness Effect and Dispersion Index. *Engineering Journal of Don*. 2024;(3). (In Russ.). URL: <http://www.ivdon.ru/en/magazine/archive/n3y2024/9073>
9. Khoda B., Ahsan A.M.M.N., Shovon A.N., Alam A.I. 3D Metal Lattice Structure Manufacturing with Continuous Rods. *Scientific Reports*. 2021;11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79826-6>
10. Behrle R., Murphey C.G.E., Cahoon J.F., et al. Understanding the Electronic Transport of Al–Si and Al–Ge Nanojunctions by Exploiting Temperature-Dependent Bias Spectroscopy. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2024;16(15):19350–19358. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c18674>
11. Jiménez A.M.B., Sichevych O., Spanos I., Altendorf S.G., Ormeci A., Antonyshyn I. Al–Pt Compounds Catalyzing the Oxygen Evolution Reaction. *Dalton Transactions*. 2023;52(5):1433–1440.
12. Борн М., Вольф Э. *Основы оптики*. Москва: Наука; 1973. 720 с.
Born M., Wolf E. *Principles of Optics*. Moscow: Nauka; 1973. 720 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сердечный Денис Владимирович, кандидат технических наук, доцент, начальник лаборатории цифровых и интеллектуальных технологий для развития территорий Российской Федерации, Государственный университет управления, Москва, Российская Федерация.

e-mail: dv_serdechnyj@guu.ru

ORCID: [0000-0003-3060-9469](https://orcid.org/0000-0003-3060-9469)

Denis V. Serdechnyy, Candidate of Engineering Sciences, Docent, Head of the Laboratory of Digital and Intelligent Technologies for the Development of Territories of the Russian Federation, State University of Management, Moscow, the Russian Federation.

Корчагин Сергей Алексеевич, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории цифровых и интеллектуальных технологий для развития территорий Российской Федерации, Государственный университет управления, Москва, Российская Федерация.

e-mail: sa_korchagin@guu.ru

ORCID: [0000-0001-8042-4089](https://orcid.org/0000-0001-8042-4089)

Sergei A. Korchagin, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Docent, Senior Researcher at the Laboratory of Digital and Intelligent Technologies for the Development of Territories of the Russian Federation, State University of Management, Moscow, the Russian Federation.

Андриянов Никита Андреевич, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории цифровых и интеллектуальных технологий для развития территорий Российской Федерации, Москва, Российская Федерация.

e-mail: na_andriyanov@guu.ru

ORCID: [0000-0003-0735-7697](https://orcid.org/0000-0003-0735-7697)

Nikita A. Andriyanov, Candidate of Engineering Sciences, Docent, Senior Researcher at the Laboratory of Digital and Intelligent Technologies for the Development of Territories of the Russian Federation, State University of Management, Moscow, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 16.10.2025; одобрена после рецензирования 12.11.2025; принята к публикации 18.11.2025.

The article was submitted 16.10.2025; approved after reviewing 12.11.2025; accepted for publication 18.11.2025.