



# Взаимодействие электромагнитного излучения с металлическими фрактальными кластерами

## Часть 2

П. П. Мальцев  
МЦАИ РАН, Москва, Россия

Статья продолжает обсуждение эффектов, возникающих в полимерных нитях с металлическими фрактальными кластерами (см. *Photonics Russia*. 2025;19(1):14–27. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2025.19.1.14.27) и рассматривает особенности улавливания фрактальными кластерами из шарообразных металлических частиц радиуса  $R$  внешнего излучения с длиной волны  $\lambda$  в оптическом диапазоне длин волн. Дано объяснение условиям формирования эффекта, называемого «локализацией фотонов», при выполнении условия  $R \ll \lambda$ .

**Ключевые слова:** металлические фрактальные кластеры, наноразмерные капли алюминия, полимерные нити, плазма, надповерхностное высокопроводящее состояние, локализация фотонов

Статья поступила: 16.01.2025  
Статья принята: 03.02.2025

## СВОЙСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ФРАКТАЛЬНЫХ КЛАСТЕРОВ

Главная черта фрактального кластера (ФК), определяющая его физико-химические свойства, – масштабная инвариантность: любой малый фрагмент ФК при увеличении масштаба воспроизводит пространственную структуру всего кластера. Масштабная инвариантность приводит к тому, что пространственное расположение если не всех

# Interaction of Electromagnetic Radiation with the Metallic Fractal Clusters

## Part 2

P. P. Maltsev  
Inter-Agency Analytical Research Center of the RAS, Moscow,  
Russia

The article continues the discussion of effects occurring in the polymer threads with the metallic fractal clusters (see *Photonics Russia*. 2025;19(1):14–27. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2025.19.1.14.27) and considers the features of capturing external radiation with a wavelength  $\lambda$  in the optical wavelength range by the fractal clusters made of spherical metal particles with the radius  $R$ . An explanation is given to the effect generation conditions titled “photon localization” when the condition  $R \ll \lambda$  is met.

**Key words:** metallic fractal clusters, nanoscale aluminum droplets, polymer threads, plasma, off-surface highly conductive state, photon localization

Article received: January 16, 2025  
Article accepted: February 03, 2025

## PROPERTIES OF METALLIC FRACTAL CLUSTERS

The main feature of a fractal cluster (FC) determining its physical and chemical properties shall be its scale invariance: when scaled up, any small FC fragment reproduces the spatial structure of the entire cluster. The scale invariance shall lead to the fact that the spatial arrangement of not all cluster particles, but a very large group of particles, turns out to be correlated,

частиц кластера, то очень большой группы частиц, оказывается скоррелированным, хотя чисто визуальна структура может восприниматься как беспорядочная.

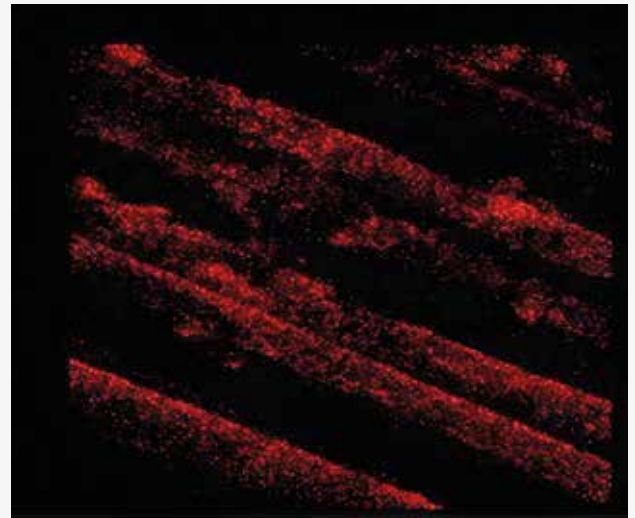
Второе следствие масштабной инвариантности – наличие в ФК большого числа полостей со степенным распределением по размерам, делающее ФК довольно ажурной конструкцией.

Фотографии полимерных нитей с цепочками нерегулярных наностроек (нанокпель) алюминия с размером 10–1000 нм (рис. 11) сделаны на растровом электронном микроскопе CAMSCAN-S4 с энергодисперсионной и волнодисперсионной приставками: Oxford INCA Energy 350 и INCA Wave 700 (Cambridge, Англия) в Центре высоких технологий ЦКП «Синхротрон» ФГУП Научно-исследовательский институт физических проблем им. Ф.В. Лукина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» [1, 10].

Расположенные цепочки нерегулярных наностроек алюминия с размером 10–1000 нм, в том числе и сферической формы с размером 10–30 нм, на поверхности полимерной нити из волокон арамида, можно представить в виде металлических фрактальных кластеров.

В литературе описываются различные случаи возникновения низкополевой эмиссии электронов с уменьшением размеров частиц на поверхности материалов до десятков нанометров и менее [11–15], а также выстраивание нитей из отдельных атомов олова [16]. Исследования влияния диспергированных сред, включая металлические частицы, на распространение электромагнитное излучение, включая оптический диапазон, проводятся достаточно давно [17–28], и были выявлены различные эффекты, которые потребовали дальнейших теоретических проработок.

Например, внешняя электромагнитная волна, распространяющаяся в системе слабо поглощающих рассеивателей, в результате многократного перераспределения способна «заиклиться» в ограниченной области пространства. Причина этого явления – специфические интерференционные эффекты, имеющие место даже в абсолютно упорядоченной системе частиц [24–26, 29]. Эффект улавливания фрактальным кластером внешнего излучения в оптическом диапазоне длин волн, например, на рэлеевских частицах, назвали «локализацией фотона», которую можно рассматривать, условно, как канал «диссипации» падающего излучения, дополняющий классические – неупругое рассеяние и поглощение.



80 мкм | 80 μm

**Рис. 11.** Карта Al поверхности полимерной нити с наностройками алюминия в виде металлических фрактальных кластеров

**Fig. 11.** Map of the Al surface of a polymer thread with aluminum nanoislands in the form of metallic fractal clusters

although visually the structure may be perceived as disordered.

The second consequence of scale invariance shall be the availability of a large number of cavities in the FC with a power distribution of dimensions, making the FC a rather delicate structure.

The photographs of polymer threads with the chains of irregular aluminum nanoislands (nanodroplets) with a size of 10–1000 nm (Fig. 11) were taken using a CAMSCAN-S4 scanning electron microscope with the energy-dispersive and wave-dispersive attachments: Oxford INCA Energy 350 and INCA Wave 700 (Cambridge, England) at the High Technology Center of the Synchrotron Collective Use Center of the Federal State Unitary Enterprise “Lukin Research Institute for Physical Problems” of the National Research Center “Kurchatov Institute” [1, 10].

The chains of irregular aluminum nanoislands with a size of 10–1000 nm, including spherical ones with a size of 10–30 nm, located on the surface of a polymer thread made of aramid fibers, can be represented as the metallic fractal clusters.

The publications describe various cases of the occurrence of low-field electron emission with the decreased size of particles on the surface of materials up to tens of nanometers and less [11–15], as well as the genera-



### ПОНЯТИЕ «ЛОКАЛИЗАЦИЯ ФОТОНА» ВО ФРАКТАЛЬНОМ КЛАСТЕРЕ

Эффект локализации фотона в системе рассеивателей можно ожидать при выполнении определенных условий [29]. Прежде всего, средняя длина поглощения фотона  $l_a$  должна быть больше длины упругого рассеяния  $l_s$ . Кроме того, сечение упругого рассеяния на отдельной частице должно быть достаточно велико. В противном случае образование петли маловероятно, т. к. иначе не будет условий для «развертывания» движения фотона.

Используем для описания этих условий выражения, полученные в работе [28]:

$$l_a = (n_0 \sigma_a)^{-1} \text{ и } l_s = (n_0 \sigma_s)^{-1},$$

где  $\sigma_a$  – сечение поглощения света отдельным рассеивателем;

$\sigma_s$  – сечение упругого рассеяния света отдельным рассеивателем;

$n_0$  – концентрация рассеивателей в системе.

На первый взгляд, из-за малости сечения упругого рассеяния отдельным рэлеевским рассеивателем с радиусом  $R$ , даже при максимально достижимых факторах упаковки параметра  $p = \lambda/l_s$ , определяющего вероятность локализации, остается пренебрежимо малым:  $\sigma_s/\pi R = (R/\lambda)^4 \ll 1$ .

Это действительно так, но ситуация меняется, если частота падающего кванта  $\omega$  совпадает с частотой какой-либо электромагнитной моды отдельного рассеивателя. Например, для поверхностного плазмона сферической металлической отдельной частицы с радиусом  $R$  имеем:  $\omega_1 = \omega_0/\sqrt{3}$ , где  $\omega_0$  – классическая плазменная частота неограниченного электронного газа [28].

В этом случае для сферической металлической отдельной частицы сечение упругого рассеяния света частицей будет равно [28]:

$$\sigma_s = 8/3 [\pi R^2 (2\pi R/\lambda)^4] [\omega^4 / (\omega^2 - \omega_1^2)^2 + \gamma^2 \omega_1^4]$$

и имеет резкий максимум, так как ширина плазменного резонанса  $\gamma = 10^{-2}$  для многих металлов, а сечение поглощения сферической металлической отдельной частицы будет равно:  $\sigma_a = 8\pi R^2 \gamma \omega^4 / \lambda [(\omega^2 - \omega_1^2)^2 + \gamma^2 \omega_1^4]^{-1}$ , и фактор упаковки частиц в системе равен:  $f = 4/3 \pi R^3 n_0$ .

В этом случае параметр  $p = (R/\lambda)^3 f / \gamma^2$  достигает единицы для частиц с  $R/\lambda = 10^{-1}$  уже при  $f \approx 0,1$ . Длина поглощения фотона  $l_a$  остается при этом сравнимой с длиной упругого рассеяния  $l_s$  [29].

Таким образом, плотно упакованные системы наноразмерных металлических частиц при частоте

of threads made of individual tin atoms [16]. The studies of the dispersed media influence, including any metal particles, on the propagation of electromagnetic radiation, including the optical range, have been conducted for quite a long period of time [17–28]. Various effects have been found that require further theoretical development.

For example, an external electromagnetic wave propagating in a system of low-capture scatterers, as a result of multiple rescattering is capable of “moving in loops” in a limited spatial region. The reason for this phenomenon shall be the specific interference effects that occur even in a completely disordered system of particles [24–26, 29]. The effect of capturing external radiation in the optical wavelength range by a fractal cluster, for example, on the Rayleigh particles, is called “photon localization” that can be conditionally considered as a channel for “dissipation” of incident radiation, complementing the classical ones, such as inelastic scattering and absorption.

### THE “PHOTON LOCALIZATION” CONCEPT IN A FRACTAL CLUSTER

The photon localization effect in a system of scatterers can be expected under certain conditions [29]. First of all, the average photon absorption length  $l_a$  shall be greater than the elastic scattering length  $l_s$ . In addition, the elastic scattering cross section on an individual particle shall be large enough. Otherwise, the loop generation is unlikely, since otherwise there will be no conditions for “unfolding” of the photon movement.

To describe these conditions, the expressions obtained in [28] shall be used:

$$l_a = (n_0 \sigma_a)^{-1} \text{ и } l_s = (n_0 \sigma_s)^{-1},$$

where  $\sigma_a$  – light absorption cross-section of an individual scatterer;

$\sigma_s$  – cross-section of light elastic scattering by an individual scatterer;

$n_0$  – concentration of scatterers in the system.

At first glance, due to the small elastic scattering cross-section of an individual Rayleigh scatterer with the radius  $R$ , even at the maximum achievable packing factors of the parameter  $p = \lambda/l_s$  that determines the probability of localization, this value remains negligibly low:  $\sigma_s/\pi R = (R/\lambda)^4 \ll 1$ .

This is indeed the case. However, the situation is changed if the frequency of the incident quantum  $\omega$  coincides with the frequency of some electromagnetic mode of a separate scatterer. For example, for the

тах внешнего излучения  $\omega_1$  являются подходящими кандидатами для наблюдения явления локализации фотонов в диапазоне частот от видимого до ультрафиолетового.

Следует отметить работу [29], в которой введено понятие «локализация фотона» во фрактальном кластере с подробным описанием этого эффекта. В работе [29] с использованием диаграммного метода создан новый подход к описанию электродинамических свойств фрактального кластера, состоящего из непоглощающих твердых частиц. Проведено исследование явления перенормировки (уменьшения) длины волны  $\lambda$  внешнего излучения по мере его проникновения во фрактальный кластер и вычислена эффективная диэлектрическая проницаемость фрактального кластера  $\epsilon_{\text{фк}}$ .

Показано, что фрактальный кластер характеризуется набором значений  $\epsilon_{\text{фк}}$ , каждое из которых соответствует своей степени перенормировки  $\lambda$ . Показано, что эффективная диэлектрическая проницаемость кластера является критической функцией фрактальной размерности кластера  $d$ , и при  $d$ , меньших некоторого критического значения, она может быть чрезвычайно высокой.

Внешний фотон, попадающий во фрактальный кластер, имеет возможность «разглядеть» масштабную инвариантность кластера. Длина волны фотона в кластере  $\lambda_{\text{int}}$  становится намного меньше внешней  $\lambda$ , но частота фотона  $\omega$  при этом не меняется, т.к. одновременно уменьшается скорость фотона, т.е. по мере уменьшения длины волны фотон приобретает способность «разглядывать» все более мелкие детали структуры. Дальнейшие корреляции в расположении частиц фрактального кластера, визуально выражающиеся в связности кластера, являются причиной уменьшения длины волны  $\lambda$  внешнего излучения при «зацикливании» в нем.

Перенормировка  $\lambda$  происходит следующим образом. Падающий на кластер фотон с длиной волны  $\lambda$  порядка характерного размера кластера  $L$  «улавливается» какой-нибудь достаточно крупной полостью фрактального кластера (первичной резонансной полостью). Это улавливание приводит к росту эффективной диэлектрической проницаемости кластера  $\epsilon_{\text{фк}}$ , т.к.  $\epsilon$  возрастает вблизи любого электромагнитного резонанса. Возрастание  $\epsilon$  инициирует, в свою очередь, уменьшение длины волны фотона:  $\lambda_{\text{int}} = \lambda$ . Фотон с перенормированной длиной волны  $\lambda_{\text{int}}$  находит другую резонансную полость, меньшего размера. Новое улавливание вновь стимулирует возрастание  $\epsilon$  и новое уменьшение  $\lambda_{\text{int}}$  и т.д. В результате все полости кла-

surface plasmon of a spherical metallic individual particle with the radius  $R$  the following expression can be obtained:  $\omega_1 = \omega_0 / \sqrt{3}$ , where  $\omega_0$  is the classical plasma frequency of an unlimited electron gas [28].

In this case, for a spherical metallic individual particle, the cross section of light elastic scattering by the particle shall be equal to [28]:

$$\sigma_s = 8/3 [\pi R^2 (2\pi R/\lambda)^4] [\omega^4 / (\omega^2 - \omega_1^2)^2 + \gamma^2 \omega_1^4]$$

and shall have a sharp maximum value, since the plasma resonance width is equal to  $\gamma = 10^{-2}$  for many metals, and the absorption cross-section of a spherical metallic individual particle shall be equal to:  $\sigma_a = 8\pi R^2 \gamma \omega^4 / \lambda [(\omega^2 - \omega_1^2)^2 + \gamma^2 \omega_1^4]^{-1}$  and the packing factor of particles in the system shall be:  $f = 4/3 \pi R^3 n_0$ .

In this case, the parameter  $p = (R/\lambda)^3 f / \gamma^2$  shall be equal to one for the particles with  $R/\lambda = 10^{-1}$  already at  $f \approx 0.1$ . The photon absorption length  $l_a$  shall remain comparable to the elastic scattering length  $l_s$  [29].

Thus, the densely packed systems of nanoscale metallic particles at the external radiation frequencies  $\omega_1$  shall be the suitable candidates for observing the photon localization phenomenon in the frequency range from visible to ultraviolet.

It shall be worth noting the paper [29] that has introduced the concept of “photon localization” in a fractal cluster with a detailed description of this effect. In the paper [29], a new approach to the description of electrodynamic properties of a fractal cluster consisting of non-absorbing solid particles has been developed using the diagrammatic method. The phenomenon of renormalization (decrease) of the external radiation wavelength  $\lambda$  as it penetrates the fractal cluster has been studied, and the effective capacitivity of the fractal cluster  $\epsilon_{\text{fc}}$  has been calculated.

It is shown that the fractal cluster is characterized by a set of values  $\epsilon_{\text{fc}}$ , each of which corresponds to its own renormalization degree  $\lambda$ . It is shown that the effective capacitivity of the cluster is a critical function of the fractal dimension of the cluster  $d$ , and if the  $d$  value is less than some critical value, it can be extremely high.

An external photon entering the fractal cluster has the ability to “discern” the cluster scale invariance. The photon wavelength in the cluster  $\lambda_{\text{int}}$  becomes much smaller than the external value  $\lambda$ , but the photon frequency  $\omega$  is not changed, since the photon speed is simultaneously decreased, i.e. as the wavelength decreases, the photon acquires the ability to “discern” the increasingly smaller structural details. The long-range correlations in the arrangement of particles of the fractal cluster, visually expressed



стера могут заполниться перенормированными виртуальными фотонами, в том числе и теми, чья  $\lambda_{\text{int}} \rightarrow 0$ . Их эффективная скорость нулевая.

Локализация света связана с замкнутыми петлями на траекториях виртуальных фотонов [29]. Если фотон совершает замкнутую петлю, набег фазы его волновой функции нулевой. Амплитуды вероятности, соответствующие двум возможным способам обхода петли (по ходу вращения часовой стрелки и наоборот), интерферируют конструктивно независимо от степени неупорядоченности рассеивателей. Любая петля – это возвращение назад. Поскольку вероятность образования петли из-за подобного рода интерференции увеличивается, возрастает и рассеяние в заднюю полусферу. Это, в свою очередь, стимулирует образование новых петель и т. д. Результатом этого самоподдерживающегося процесса является «запирание» фотона в ограниченной области пространства – «локализация света».

### ОТЛИЧИЕ ОТ СТАНДАРТНОГО ОПИСАНИЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ СВЕТА

Стандартная схема описания локализации света – сведение уравнения Бете-Солпитера для неприводимой четырехточечной вершинной функции (четырёххвостки) в импульсном представлении к транспортному уравнению (уравнение переноса излучения) и введение эффективного коэффициента диффузии электромагнитной энергии [29]. По аналогии с андерсоновской локализацией электрона обращение этого коэффициента в нуль означает сильную локализацию света.

В работе [29] подход к решению уравнения переноса излучения отличается от стандартного. В основе построений лежит представление о локализованных фотонах как о типичных виртуальных частицах, аналогичных виртуальным фотонам квантовой электродинамики. Эти фотоны не связаны ни с детектором, ни с источником света.

Типичный виртуальный фотон [29] – это замкнутая петля фотонного пропагатора (свертка двух векторных потенциалов), вырастающая на двойной линии, описывающей распространение электрона (рис. 11а), и возникающая во втором порядке теории возмущений (ТВ) с гамильтонианом  $H$ :

$$H = (p - eA/c)^2 / 2m,$$

где  $e$  и  $m$  – заряд и масса электрона,  
 $c$  – скорость света в вакууме,  
 $p$  – электронный импульс,

in the cluster connectivity, shall be the reason for the decreased external radiation wavelength  $\lambda$  when “moving in loops” in it.

The renormalization of  $\lambda$  shall occur as follows. The photon with a wavelength  $\lambda$  of the order of the typical cluster size  $L$  incident on the cluster shall be “captured” by some sufficiently large cavity of the fractal cluster (the primary resonance cavity). This capture shall lead to an increase in the effective capacitance of the cluster  $\epsilon_{\text{фк}}$ , since the  $\epsilon$  value is increased near any electromagnetic resonance. The increased  $\epsilon$  value shall initiate, in turn, a decrease in the photon wavelength:  $\lambda_{\text{int}} = \lambda$ . The photon with a renormalized wavelength  $\lambda_{\text{int}}$  shall find another resonance cavity of a smaller size. The new capture shall again stimulate an increased  $\epsilon$  value and a new decrease in  $\lambda_{\text{int}}$ , etc. As a result, all cluster cavities can be filled with the renormalized virtual photons, including those which  $\lambda_{\text{int}} \rightarrow 0$ . Their effective speed shall be equal to zero.

The light localization shall be associated with the closed loops on the trajectories of virtual photons [29]. If the photon makes a closed loop, the phase incursion of its wave function shall be equal to zero. The probability amplitudes relevant to the two possible ways of the loop bypass (clockwise and counter clockwise) shall interfere constructively regardless of the disorder degree of the scatterers. Any loop shall be a return back. Since the loop formation probability due to this kind of interference is increased, scattering into the back hemisphere is also increased. In turn, it stimulates the generation of new loops, etc. The result of this self-sustaining process shall be the photon “locking” in a limited spatial region, namely “the light localization”.

### DIFFERENCE FROM THE STANDARD DESCRIPTION OF LIGHT LOCALIZATION

The standard description scheme for the light localization shall be the reduction of the Bethe-Salpeter equation for an irreducible four-point vertex function (four-tail function) in the momentum representation to the transport equation (radiative transfer equation) and introduction of an effective electromagnetic energy diffusion coefficient [29]. Similar to the Anderson electron localization, vanishing of this coefficient shall mean strong light localization.

In [29], the approach to solving the radiation transfer equation differs from the standard one. The constructions shall be based on the idea of localized photons as the typical virtual particles, similar to the virtual photons of quantum electrodynamics. These photons shall not be related to either the detector or the light source.



$A$  – векторный потенциал электромагнитного поля.

Этот замкнутый сам на себя фотонный пропагатор дает некоторое представление о том, что представляет собой локализованный фотон (рис. 12а).

Формально локализация [29] связана с возникновением полюса у составленной из верных диаграмм четырех хвостки (рис. 12б). Полюс подобного рода описывает связанные состояния пары взаимодействующих частиц, например, экситон. В рассматриваемых задачах о распространении одного единственного фотона вершинная функция описывает эффективное взаимодействие пары виртуальных фотонов (рис. 12б), обходящих замкнутую петлю на траектории в двух противоположных направлениях (точнее, интерференцию амплитуд, соответствующих этим двум направлениям обхода).

В отличие от общепринятой схемы в работе [29] удалось решить уравнение Бете-Солпитера непосредственно в координатном представлении. В рамках предлагаемых построений нет никакой необходимости введения коэффициента диффузии электромагнитной энергии. Локализация проявляет себя просто как интерференционные

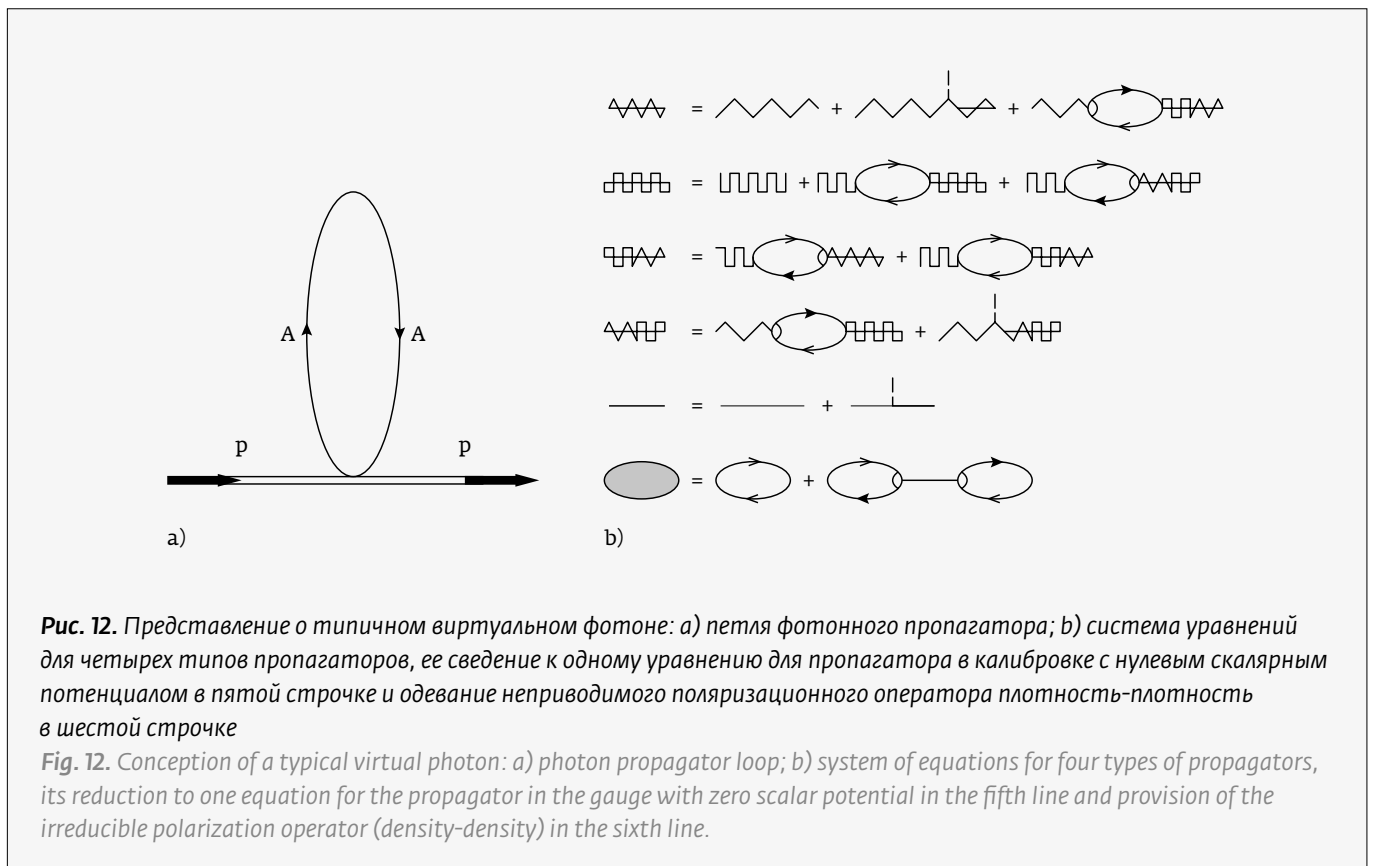
A typical virtual photon [29] shall be a closed loop of the photon propagator (convolution of two vector potentials) growing on a double line describing the electron propagation (Fig. 11a) and occurring in the second order of perturbation theory (PT) with the Hamiltonian  $H$ :

$$H = (p - eA/c)^2 / 2m,$$

where  $e$  and  $m$  are the electron charge and mass,  
 $c$  – speed of light in vacuum,  
 $p$  – electron momentum,  
 $A$  – vector potential of the electromagnetic field.

This self-closed photon propagator shall give some idea of the localized photon (Fig. 12a).

Formally, the localization [29] is associated with the occurrence of a pole in a fan-shaped diagram of four tail function (Fig. 12b). Such kind of pole shall describe the bound states of a pair of interacting particles, for example, an exciton. In the considered problems of the single photon propagation, the vertex function shall describe the efficient interaction of a pair of virtual photons (Fig. 12b) bypassing a closed loop on a trajectory in two opposite directions (more





поправки к сечениям рассеяния и поглощения. Именно эти поправки вычисляются, и именно этот «смысл» вкладывается в слово «локализация».

### ОСОБЕННОСТИ ВИРТУАЛЬНЫХ ФОТОНОВ

Классический пример виртуальных фотонов – виртуальные фотоны квантовой электродинамики, испускаемые движущимся электроном. Эти фотоны описываются пропагатором или функцией Грина уравнений Максвелла, а не плоской электромагнитной волной. Например, при заданной частоте длина волны виртуального фотона  $\lambda_{\text{int}}$  определяется эффективной скоростью света в среде  $v$  согласно соотношению  $\omega = 2\pi v / \lambda_{\text{int}}$ . В условиях локализации  $v \rightarrow 0$  (стремится к нулю) либо при очень большой величине  $\epsilon$ , либо при очень большом значении производной  $d\epsilon/d\omega$ .

Обнаруженное явление проливает новый свет на причину известного недостатка многочисленных приближений эффективной среды [29]. В рамках этих теорий в определенном диапазоне частот и факторов упаковки эффективная диэлектрическая проницаемость среды, состоящей из малых непоглощающих частиц, оказывается комплексной, тем самым допуская существование в системе некоего загадочного поглощения. Однако все становится на свои места – эффективное поглощение связано с локализацией.

В качестве примера, свидетельствующего о надежности разработанной диаграммной техники в работе [29], воспроизведены результаты классической теории Ми в задаче об упругом рассеянии электромагнитной волны сферической металлической частицей. Одновременно вскрыты и ее недостатки, заключающиеся в неучете эффектов пространственной дисперсии, и показано как их преодолеть.

В системе частиц разность между амплитудами прямого и обратного прохождения фотоном маршрута «частица а – частица б» определяется не только упругим рассеянием, но и зацикливанием или локализацией света между этими частицами. Именно это зацикливание описывается комплексными составляющими  $\sigma_{\text{ab}}$ .

В работе [29] построена теория локализации фотона в плотной случайной упаковке рэлеевских частиц. Обнаружена сильная деформация индикатрисы рассеяния света отдельной частицей системы, выражающаяся в аномальном увеличении рассеяния в заднюю полусферу, а также сильная чувствительности локализации к типу поляризации падающего света. Предложено пред-

precisely, the interference of amplitudes relevant to these two bypass directions).

In opposition to the common scheme in the paper [29], the Bethe-Salpeter equation has been solved directly in the coordinate representation. As a part of the proposed constructions, there is no need to introduce the diffusion coefficient of electromagnetic energy. The localization is demonstrated simply as the interference corrections to the scattering and absorption cross-sections. It is these corrections that are calculated, and it is this “meaning” that is put into the word “localization”.

### SPECIFIC FEATURES OF VIRTUAL PHOTONS

A classic example of virtual photons shall be the virtual photons of quantum electrodynamics emitted by a moving electron. These photons are described by the propagator or Green's function of the Maxwell's equations, rather than by a plane electromagnetic wave. For example, at a given frequency, the wavelength of a virtual photon  $\lambda_{\text{int}}$  is determined by the efficient speed of light in the medium  $v$  according to the relation  $\omega = 2\pi v / \lambda_{\text{int}}$ . Under the localization conditions  $v \rightarrow 0$  that tends to zero either at a very large value of  $\epsilon$ , or at a very large value of the derivative  $d\epsilon/d\omega$ .

The phenomenon found sheds new light on the cause of a well-known shortage of numerous efficient medium approximations [29]. As a part of these theories, in a certain range of frequencies and packing factors, the effective capacitivity of a medium consisting of small non-absorbing particles turns out to be comprehensive one, thereby allowing for the existence of some mysterious absorption in the system. However, everything fits together: the effective absorption is related to localization.

As an example demonstrating reliability of the developed diagram technique, the results of the classical Mie theory in the problem of elastic scattering of an electromagnetic wave by a spherical metallic particle are reproduced in the paper [29]. At the same time, its shortcomings, consisting in non-consideration of the spatial dispersion effects, are found, and it is shown how to overcome them.

In a system of particles, the difference between the amplitudes of forward and reverse photon passage along the route “particle a – particle b” shall be determined not only by elastic scattering, but also by the light cycling or localization between these particles. It is this cycling that is described by the complex components  $\sigma_{\text{ab}}$ .

In the paper [29], the photon localization theory in a dense random packing of Rayleigh particles is prepared. The strong deformation of the light scattering

ставление о частотном и концентрационном диапазоне локализации фотонов.

Предложенное в работе [29] уравнение, как и следовало ожидать, совпадает с уравнением для функции Грина уравнений Максвелла в той же калибровке. Предложенный формализм далее применяется для расчета вероятностей основных электродинамических процессов в диспергированных средах: упругое рассеяния, поглощение, неупругое рассеяние, фотоэффект и разного рода трехфотонные процессы.

### ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ СВЕТА

Результаты по исследованиям локализации света могут использоваться при создании «случайных» (порошковых) лазеров [29]. В случайном лазере роль зеркал играет многократно рассеивающая среда – кластеры из наночастиц слабо поглощающего материала (например, ZnO). Еще один вариант «случайного» лазера – введение такого порошка в кювету лазера на жидких красителях. После облучения внешним источником света такой лазер обеспечивает как усиление, так и удержание света в системе за счет многократного перерассеяния. В отличие от регулярного лазера излучение «случайного» изотропно. Не исключено, что «случайный» лазер способен обойтись и вовсе без активной среды, за счет вынужденного излучения локализованного света.

На основании построенной теории локализации света во фрактальном кластере [29] вычислено время жизни света, локализованного как в одиночном фрактальном кластере, так и в агломерате фрактальных кластеров. Предложено использовать вынужденное излучение локализованного света для создания фрактального микролазера, не требующего инверсной заселенности уровней и способного работать в широком диапазоне длин. В результате предложения оформлены в виде авторского свидетельства на способ преобразования излучения в когерентный свет устройствами микронного размера [20].

В работе [29] предложена модель, позволяющая понять причину гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) света молекулами, адсорбированными на поверхности малых металлических частиц. В ее основе локализация излучения при многократном неупругом рассеянии света в ансамбле частиц. Двигаясь по замкнутой траектории, виртуальный фотон многократно обменивается энергией со средой распространения, возбуждая в ней флуктуации зарядовой плотности. Энергия

indicatrix by a single system particle is determined, expressed by an anomalous increase in scattering into the back hemisphere, as well as a strong localization sensitivity to the incident light polarization type. The determination of frequency and concentration range of photon localization is proposed.

As expected, the equation proposed in the paper [29] coincides with the equation for the Green's function of the Maxwell's equations with the same gauge. The proposed formalism is then applied to calculate the probabilities of the main electrodynamic processes in the dispersed media: elastic scattering, absorption, inelastic scattering, photoelectric effect, and various three-photon processes.

### EXAMPLES OF LIGHT LOCALIZATION APPLICATION

The results of light localization studies can be used to develop the “random” (powder) lasers [29]. In a random laser, the role of mirrors is played by a multiple scattering medium, namely the clusters of nanoparticles of a weakly absorbing material (for example, ZnO). Another version of a “random” laser shall be introduction of such a powder into a laser cell on liquid dyes. After irradiation by an external light source, such a laser shall provide both light amplification and retention in the system due to the multiple rescattering process. In contrast to a regular laser, the radiation of a “random” laser is isotropic. It is possible that a “random” laser can do without an active medium at all, due to the forced emission of localized light.

Based on the obtained theory of light localization in the fractal cluster [29], the lifetime of light localized both in a single fractal cluster and in an agglomerate of fractal clusters has been calculated. It is proposed to use the stimulated localized light emission to develop a fractal microlaser that does not require any inverse population of levels and is capable of operating in a wide range of lengths. As a result, the proposals are formalized in the form of an inventor's certificate for a method for radiation conversion into the coherent light using the micron-sized devices [20].

In the paper [29], a model is proposed that allows us to understand the cause of giant Raman scattering (GRS) of light by the molecules adsorbed on the surface of small metallic particles. It is based on the radiation localization during the multiple inelastic light scattering in an ensemble of particles. When moving along a closed trajectory, the virtual photon repeatedly exchanges energy with the propagation medium while exciting fluctuations in the charge density. The energy of these fluctuations can be an arbitrary value, less than the photon energy.



этих флуктуаций может быть произвольной величиной, меньшей энергии фотона.

Сильные локальные поля, связанные с этими флуктуациями и существующие во всем частотном диапазоне от ИК до УФ, являются причиной ГКР. Особенности поведения этих флуктуаций позволяют объяснить специфические черты фликкер-шума, а также объясняют каталитические свойства малых металлических частиц.

Кроме того, в работе [29] предложена новая модель, описывающая жидкометаллический эффект Ребиндера, в основе которой лежит представление о возможности локализации электромагнитного поля в складках границы раздела фаз и компонентов жидкой эвтектической смеси, заполняющей трещины в поверхности твердого металла (типичный пример – жидкая эвтектика In и Ga на поверхности Al). Поскольку в каждой пространственной точке эвтектической смеси соседствуют три различных субстанции (однородный расплав In+Ga, твердый In и твердый Ga), система складок такого интерфейса моделируется известной в топологии структурой Вады-Брауэра – поверхностью, разделяющей три различных области в каждой своей точке.

Локализованные фотоны способны «выключить» кулоновское притяжение флуктуаций заряда на противоположных «берегах» заполненной эвтектикой трещины, обеспечивающей Ван-дер-Вальсовское притяжение берегов. Предсказано явление испускания локализованного света при жидкометаллическом эффекте Ребиндера и аналогичная эмиссия из казимировской щели с нарушенной симметрией.

Полезным результатом работы [29] является возможность использовать еще одно свойство, возникающее при локализации фотона, для объяснения формирования широкого «основания» в нижней части конуса черенковского излучения (рис. 12а). Такая внешняя форма черенковского излучения, сформированная при возникновении пробоя на убегающих электронах (скорости электронов близкие к скорости света) [30–32], зафиксирована при разряде на полимерной нити длиной 30 м с металлическими фрактальными кластерами (при напряженности электрического поля 30 кВ/м) [30, 32]. Используемые в эксперименте композитные нити, представленные металлическими фрактальными кластерами, предположительно обладают свойствами метаматериала с отрицательной диэлектрической проницаемостью [1, 6, 8].

Учитывая, что в метаматериалах фазовая скорость и групповая скорость направлены в разные

The strong local fields related to these fluctuations and available in the entire frequency range from IR to UV shall be the GRS cause. The behavioral features of these fluctuations allow us to explain the specific features of flicker noise and also explain the catalytic properties of small metallic particles.

In addition, a new model describing the liquid-metal Rehbinder effect is proposed in the paper [29] that is based on the idea of possible electromagnetic field localization in the folds of phase boundary and components of a liquid eutectic mixture filling the cracks in the solid metal surface (a typical example shall be the liquid eutectic of In and Ga on the Al surface). Since at each spatial point of the eutectic mixture three various substances are adjacent (a homogeneous melt of In+Ga, solid In and solid Ga), the system of folds of such an interface is modeled by the Wada-Brauer structure well-known in topology, namely a surface separating three various regions at each of its points.

The localized photons are capable of “switching off” the Coulomb attraction of charge fluctuations on opposite banks of a eutectic-filled crack that provides for the Van der Waals attraction of the banks. The phenomenon of localized light emission in the liquid-metal Rehbinder effect and similar emission from a Casimir gap with the broken symmetry are predicted.

The useful result of the paper [29] is possible application of another property occurred during the photon localization process to explain generation of a wide “base” in the lower part of the Cherenkov radiation cone (Fig. 12a). Such an external form of Cherenkov radiation obtained during the occurrence of breakdown on runaway electrons (the electron velocities close to the speed of light) [30–32], has been registered during a discharge on a 30 m long polymer thread with metallic fractal clusters (at an electric field strength of 30 kV/m) [30, 32]. The composite threads with metallic fractal clusters used in the experiment presumably have the properties of a metamaterial with negative capacitivity [1, 6, 8].

Having considered that the phase velocity and group velocity in metamaterials are aimed at various directions for Cherenkov radiation (“inverted” Cherenkov radiation) [8], the phase velocity shall determine the tip of Cherenkov radiation, and the group velocity shall be opposite and shall influence the formation of its “base”.

However, when photons are localized, the group velocity in the metallic fractal cluster is decreased

стороны для черенковского излучения («обращенное» черенковское излучение) [8] – при этом фазовая скорость определяет острие черенковского излучения, а групповая скорость – противоположна и влияет на формирование его «основания».

Однако при локализации фотонов уменьшается групповая скорость в металлическом фрактальном кластере и возникает сильная деформация индикатрисы рассеяния света отдельной частицей системы, выражающейся в аномальном увеличении рассеяния в заднюю полусферу и изотропного излучения [29], которое может привести к резкому расширению «основания» черенковского излучения (рис. 13а).

Аналогичную форму излучений можно наблюдать и для высотного пробоя «Спрайт» (рис. 13б) на убегающих электронах (скорости электронов близки к скорости света) [31, 32], возникающих при воздействии высокоэнергетических космических частиц на фракталы и начинающиеся с их микропробоев. Возможно, наблюдаемое «обращенное» черенковское излучение (высотный пробой), направленное к источнику – навстречу высокоэнергетическим космическим частицам, также происходит на фракталах с «ажурной архитектурой» [31], обладающих свойствами метаматериалов с отрицательной диэлектрической проницаемостью.

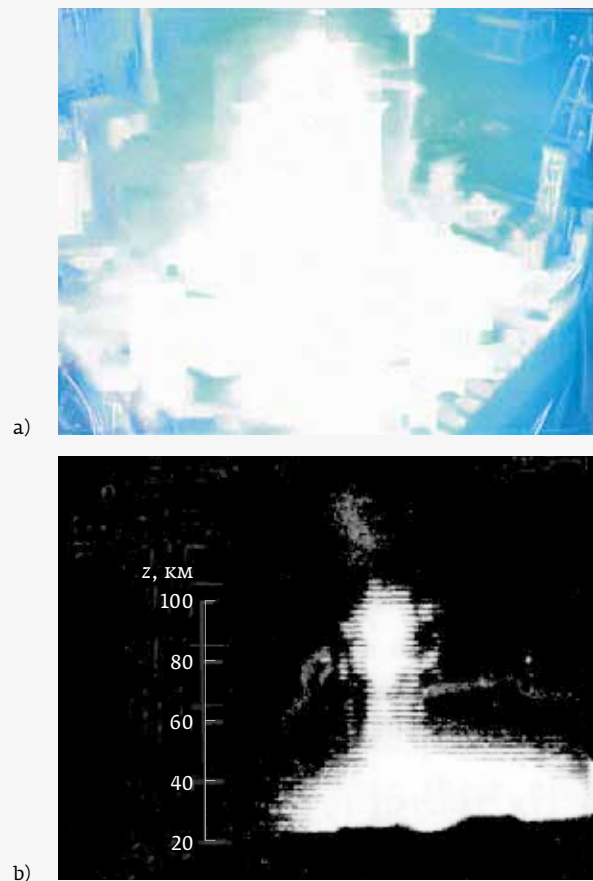
## ВЫВОДЫ ПО ЧАСТИ 2

Гипотетически можно предположить, что при определенных условиях внешняя электромагнитная волна, распространяющаяся в системе слабо поглощающих рассеивателей, в результате многократного перерассеяния способна «зациклиться» в ограниченной области пространства и причина этого явления – специфические интерференционные эффекты, имеющие место даже в абсолютно разупорядоченной системе частиц. Этот эффект улавливания фрактальным кластером внешнего излучения в оптическом диапазоне длин волн называли «локализацией фотона», которую можно рассматривать условно как канал «диссипации» падающего излучения, дополняющий классические – неупругое рассеяние и поглощение.

Суть «локализации света» хорошо иллюстрирует следующая простая аналогия, предложенная в работе [29]. Наберем немного воды в широкий сосуд и спустя некоторое время  $t$  откроем узкое сливное отверстие. При условии, что приход воды в сосуд в точности равен ее сливу, уровень воды в сосуде вскоре стабилизируется на отметке  $H$  (формула Торричелли). Если первоначальный уровень воды в сосуде мал, то сосуд наполняется до  $H$ ,

and a strong deformation of the scattering light indicatrix by an individual particle of the system occurs that is expressed by an anomalous increased scattering into the back hemisphere and isotropic radiation [29] that can lead to a sharp expansion of the “base” of Cherenkov radiation (Fig. 13a).

The similar form of radiation can be observed for the high-altitude sprite breakdown (Fig. 13b) on the runaway electrons (the electron velocities are close to the speed of light) [31, 32], occurring due to



**Рис. 13.** Разряды: а) электрический разряд в направлении распространения электромагнитной волны вдоль полимерной нити из волокон арамиды с наноструктурами алюминия; б) высотный разряд «Спрайт» (источник [32])

**Fig. 13.** Discharges: a) electric discharge in the direction of electromagnetic wave propagation along a polymer thread made of aramid fibers with aluminum nanoislands; b) high-altitude sprite discharge (source [32])



а если задержка воды перед открытием отверстия достаточно большая, то избыток воды уходит.

Роль воды играет излучение, сосуд – система частиц, вода в сосуде – локализованный свет. Если время жизни  $t$  локализованного фотона мало, система реагирует уменьшением рассеяния (сосуд наполняется водой), а если  $t$  излишне велико, то рассеяние увеличивается (излишек воды уходит из сосуда).

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00129, <https://rscf.ru/project/24-29-00129/>.

## REFERENCES

1. P. P. Maltsev. Pulsed Optical and X-ray Radiation of Fractals: Review of Hypotheses. Part II. Micro-Breakdown of Fractals made of Metamaterials. *Photonics Russia*. 2024;18(7):522–534. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2024.18.7.522.534>  
П. П. Мальцев. Импульсные оптические и рентгеновские излучения фракталов: обзор гипотез. Часть 2. Микропробой фракталов из метаматериалов. *Фотоника*. 2024;18(7):522–534.
2. P. P. Maltsev, A. A. Ganzha, V. Yu. Pavlov, A. O. Mikhalev, A. I. Kozlitin, V. V. Sarajkin. Low-Filed Electron Emission from Fractals on Metamaterials. *Russian Microelectronics*. 2024. 53(5): 483–491.
3. P. P. Maltsev, A. A. Ganzha, V. Yu. Pavlov, A. O. Mikhalev, A. I. Kozlitin. Formation of Polymer Threads with a Nanosized Aluminum Topology. *Russian Microelectronics*. 2023; 52(4):312–316.
4. P. P. Maltsev, A. A. Ganzha, V. Yu. Pavlov, A. O. Mikhalev, and A. I. Kozlitin. Formation of Polymer Threads with Nanoscale Aluminum Formations. *Nanobiotechnology Reports*. 2022; 17(7): S15–S17.
5. *Fizicheskie velichiny: Spravochnik* / [A. P. Babichev i dr.]; Pod red. I. S. Grigor'eva, E. Z. Mejliхова. Moskva: Energoatomizdat, 1991. 1231p.  
*Физические величины: Справочник* / [А. П. Бабичев и др.]; Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. Москва: Энергоатомиздат, 1991. 1231p.
6. P. P. Mal'cev, A. A. Ganzha, V. Yu. Pavlov, A. O. Mihalev, A. I. Kozlitin, V. V. Sarajkin. Ocenka znachenij radial'noj plazmennoj chastoty dlya polimernoj niti s nanoostrovkami aluminija. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. 2024; 26(1): 25–32.  
П. П. Мальцев, А. А. Ганжа, В. Ю. Павлов, А. О. Михалев, А. И. Козлитин, В. В. Сарайкин. Оценка значений радиальной плазменной частоты для полимерной нити с наноструктурами алюминия. *Нано- и микросистемная техника*. 2024; 26(1): 25–32.
7. P. P. Mal'cev, A. A. Ganzha, V. Yu. Pavlov, A. O. Mihalev, A. I. Kozlitin, V. V. Sarajkin. Vozmozhnost' predstavleniya metasolenoidea, kak polimernoj niti s neregulyarnymi serpochkami nanoostrovkov aluminija. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. 2024; 26(2): 81–89.  
П. П. Мальцев, А. А. Ганжа, В. Ю. Павлов, А. О. Михалев, А. И. Козлитин, В. В. Сарайкин. Возможность представления метасоленоида, как полимерной нити с нерегулярными цепочками наноструктур алюминия. *Нано- и микросистемная техника*. 2024; 26(2): 81–89.
8. V. G. Veselago. Elektrodinamika veshchestv s odnovremenno otricatel'nyimi znacheniyami  $\epsilon$  i  $\mu$ . *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 1967; 92(7): 517–526.  
В. Г. Веселаго. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями  $\epsilon$  и  $\mu$ . *Успехи физических наук*. 1967; 92(7): 517–526.
9. A. I. Malkin. Zakonomernosti i mekhanizmy effekta Rebindera. *Kolloidnyj zhurnal*. 2012; 74:239–254.  
А. И. Малкин. Закономерности и механизмы эффекта Ребиндера. *Кolloидный журнал*. 2012; 74:239–254.
10. Mal'cev P.P., Ganzha A.A., Pavlov V.Yu., Mihalev A.O., Kozlitin A.I., Sarajkin V.V. Issledovanie polimernyh nitej s nanoostrovkovoj topologiej nanogeterostruktur aluminija. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. 2023; 25(5): 203–209.  
Мальцев П. П., Ганжа А. А., Павлов В. Ю., Михалев А. О., Козлитин А. И.,

the impact of high-energy cosmic particles on the fractals and beginning from its micro breakdowns. It is possible that the observed “reversed” Cherenkov radiation (high-altitude breakdown), directed towards the source (towards the high-energy cosmic particles), also occurs on the fractals with “lattice architecture” [31] having the properties of metamaterials with negative capacitivy.

## CONCLUSIONS FOR PART 2

Hypothetically, it can be assumed that under certain conditions, an external electromagnetic wave propagating in a system of weakly absorbing scatterers as a result of multiple rescattering is capable of “moving in loops” in a limited spatial region, and the reason for this phenomenon is specific interference effects that occur even in an absolutely disordered system of particles. This effect of capturing external radiation in the optical wavelength range by a fractal cluster has been called “photon localization” that can be considered conditionally as a channel for “dissipation” of incident radiation, complementing the classical ones, namely the inelastic scattering and absorption.

The essence of “light localization” is well illustrated by the following simple analogy, proposed in the paper [29]. Let us collect some water in a wide vessel and after some time  $t$  open a narrow drain hole. Provided that the water inflow  $Q$  into the vessel is exactly equal to its outflow, the water level in the vessel shall soon stabilize at the  $H$  mark (Torricelli formula). If the initial water level in the vessel is low, then the vessel is filled to the  $H$  mark, and if the water delay prior to the hole opening is large enough, then the excess water shall be drained.

The role of water is played by radiation, the vessel is a system of particles, and the water in the vessel is localized light. If the lifetime  $t$  of a localized photon is short, the system reacts by decreasing scattering (the vessel is filled with water), and if  $t$  is excessively large, then scattering is increased (excess water is drained from the vessel).

## FINANCING OF THE PAPER

The study was supported by the grant No.24-29-00129 of the Russian Science Foundation, <https://rscf.ru/project/24-29-00129/>.

## AUTOR

Petr Maltsev, Dr. of Sciences (Tech), Professor, Leading Researcher, Inter-agency Center of Analytical Studies of the RAS; e-mail: p.p.maltsev@mail.ru; Moscow, Russia.  
ORCID: 0000-0001-9160-5272

## Широкий спектр продукции от ООО «Спектр»

ООО «Спектр» – активно развивающаяся компания, специализирующаяся на разработке, производстве и продаже специализированной химической продукции, а также изделий, которые находят применение в различных отраслях российской промышленности.

За 12 лет работы компания смогла завоевать доверие большинства крупных предприятий и научных организаций России и Ближнего зарубежья. Наши клиенты – это предприятия, входящие в корпорации Ростех и Роскосмос, в концерн Росатом, а также в Лазерную ассоциацию.

Высокий профессионализм сотрудников, широкий круг надежных партнеров обеспечивают решение любых поставленных клиентами задач.

На сегодняшний день технологии и продукция предприятия уникальны: подавляющее большинство позиций не имеют аналогов в России, а ряд продуктов – в мире.

В производственной номенклатуре ООО «Спектр» насчитывается более 150 наименований продукции таких направлений как:

### ПЛЕНКООБРАЗУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ (ПОМ) ДЛЯ ВАКУУМНОГО ИСПАРЕНИЯ

Керамические материалы (оксиды, фториды, халькогениды, чистые металлы) в виде таблеток, гранул, дисков применяются для вакуумного термического, электронно-лучевого или магнетронного нанесения просветляющих, защитных и других интерференционных тонкопленочных покрытий на оптические детали (линзы, призмы и т.д.) для широкого диапазона спектра электромагнитного излучения – от вакуумного УФ до дальнего ИК.

### ИНФРАКРАСНЫЕ И УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫЕ ВИЗУАЛИЗАТОРЫ

Применяются для юстировки лазерного и светодиодного оборудования, для визуализации невидимого излучения. Визуализаторы способны регистрировать излучение от 250 нм до 2100 нм. Выпускаются в форме керамических дисков в металлическом держателе или без него, а также в виде карточек из прочного пластика с односторонней или двухсторонней активной частью.

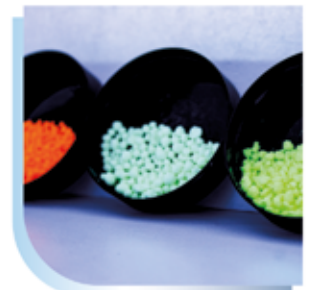
### ИНДИКАТОРЫ ТЕМПЕРАТУРЫ

Обеспечивают высокоточный контроль температуры нагреваемых поверхностей. Выпускаются в виде суспензий (красок) на температуры от 30 до 1200 °С, а также в виде наклеек на температуры от 40 до 300 °С.

Изменение цвета при достижении заданной температуры происходит быстро (около 100 мс) и необратимо. Индикаторы температуры широко применяются для контроля температуры в камерах вакуумного испарения, стерилизации, а также в двигателестроении, авиа-, ракетной и другой технике, электроэнергетике, транспорте и ЖКХ.

### ПИГМЕНТЫ И КРАСКИ, ОБЛАДАЮЩИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫМИ И ДРУГИМИ СПЕЦИАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Применяются в защитных технологиях, дизайне, светоиндикации и светоразметке. Одним из перспективных направлений компании является разработка и продвижение люминесцентных концентратов, применяемых в сельском хозяйстве и медицине.



**ПРИГЛАШАЕМ К ДОЛГОСРОЧНОМУ И ВЗАИМОВЫГОДНОМУ СОТРУДНИЧЕСТВУ!**



- Сарайкин В. В. Исследование полимерных нитей с наноструктурной топологией наногетероструктур алюминия. *Нано- и микросистемная техника*. 2023; 25(5): 203–209.
11. **Gluhovskoj E. G., Zhukov N. D.** Protekanie toka v avtoemissionnom nanokontakte metall–poluprovodnik. *Prikladnaya fizika*. 2015; 3:5–9. Глуховской Е. Г., Жуков Н. Д. Протекание тока в автоэмиссионном наноконтакте металл–полупроводник. *Прикладная физика*. 2015; 3:5–9.
12. **Mihajlov A. I., Kabanov V. F., Zhukov N. D.** Osobennosti avtoelektronnoj emissii iz submikronnyh vystupov sherohovatoj poverhnosti antimonida indiya. *Pis'ma v ZhTF*. 2015; 41(12):8–14. Михайлов А. И., Кабанов В. Ф., Жуков Н. Д. Особенности автоэлектронной эмиссии из субмикронных выступов шероховатой поверхности антимиониды индия. *Письма в ЖТФ*. 2015; 41(12):8–14.
13. **Stecenko V. V.** Otstuplenie ot formuly Faulera–Nordgejma dlya toka avtoemissii iz nanopachostic. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2011;81(4):152–154. Стеценко В. В. Отступление от формулы Фаулера–Нордгейма для тока автоэмиссии из наночастиц. *Журнал технической физики*. 2011;81(4):152–154.
14. **Gadiev R. M., Lachinov A. N., Kornilov V. M. et al.** Anomal'no vysokaya provodimost' vdol' interfejsa dvuh polimernyh dielektrikov. *Pis'ma v ZhETF*. 2009;90(11):821–825. Гадиев Р. М., Лачинов А. Н., Корнилов В. М. и др. Аномально высокая проводимость вдоль интерфейса двух полимерных диэлектриков. *Письма в ЖЭТФ*. 2009;90(11):821–825.
15. **Senichkin A. P., Bugaev A. S., Yachmenev A. E.** Osobennosti vol't–ampernyh karakteristik sistemy nanonitej iz atomov olova, vstroennyh v kristall arsenida galliya. *Nano- i mикросистемная техника*. 2012;11:52–54. Сеничкин А. П., Бугаев А. С., Ячменев А. Э. Особенности вольт–амперных характеристик системы нанонитей из атомов олова, встроенных в кристалл арсенида галлия. *Нано- и микросистемная техника*. 2012;11:52–54.
16. **RU Patent 2650576 Nanorazmernaya struktura s profilom legirovaniya v vide nanonitej iz atomov olova / Mal'cev P. P., Bugaev A. S., Yachmenev A. E. et al.** (16.04.2018, № заявки: 2016139392). RU Patent 2650576 Наноразмерная структура с профилем легирования в виде нанонитей из атомов олова / Мальцев П. П., Бугаев А. С., Ячменев А. Э. и др. (16.04.2018, № заявки: 2016139392).
17. **Lushnikov A. A., Maksimenko V. V., Simonov A. Ya.** Pogloshchenie nizkochastotnogo elektromagnitnogo izlucheniya melkimi metallicheskimy chasticami. *FTT*. 1978;20(2):505–509. Лушников А. А., Максименко В. В., Симонов А. Я. Поглощение низкочастотного электромагнитного излучения мелкими металлическими частицами. *ФТТ*. 1978;20(2):505–509.
18. **Lushnikov A. A., Maksimenko V. V., Simonov A. Ya., Sutugin A. G.** Rasseyanie elektromagnitnyh voln zaryazhennymi chasticami. *Izvestiya Vuzov. Radiofizika*. 1984; XXVII(6):726–733. Лушников А. А., Максименко В. В., Симонов А. Я., Сутугин А. Г. Рассеяние электромагнитных волн заряженными частицами. *Известия Вузов. Радиофизика*. 1984; XXVII(6):726–733.
19. **Maksimenko V. V., Krikunov V. A., Lushnikov A. A., Potapov V. K.** Poverhnostnye plazmon–poljaritony v ostrovkovoj metallicheskoj plenke. *Poverhnost'. Fizika, himiya, mekhanika*. 1988;10:21–28. Максименко В. В., Крикунов В. А., Лушников А. А., Потапов В. К. Поверхностные плазмон–поляритоны в островковой металлической пленке. *Поверхность. Физика, химия, механика*. 1988;10:21–28.
20. **Maksimenko V. V., Lushnikov A. A.** Fazovyy perekhod vidimost'–nevidimost' vo fraktal'nom klasterne. *Pis'ma v ZhETF*. 1993; 54(4):204–209. Максименко В. В., Лушников А. А. Фазовый переход видимость–невидимость во фрактальном кластере. *Письма в ЖЭТФ*. 1993; 54(4):204–209.
21. **Mal'cev P. P., Galyamov B. Sh., Maksimenko V. V.** Sposob preobrazovaniya izlucheniya v kogерentnyj svet ustroystvami mikronnogo razmera. Avtorskoe svidetel'stvo № 95115865/25 от 30.10.96 g. Мальцев П. П., Галямов Б. Ш., Максименко В. В. Способ преобразования излучения в когерентный свет устройствами микронного размера. Авторское свидетельство № 95115865/25 от 30.10.96 г.
22. **Maksimenko V. V.** Osobennosti pogloshcheniya sveta fraktal'nyh klasterom. *Optika atmosfery i okeana*. 1997; 10(10):21–28. Максименко В. В. Особенности поглощения света фрактальным кластером. *Оптика атмосферы и океана*. 1997; 10(10):21–28.
23. **Andreev G. B., Maksimenko V. V.** Otsutstvie diffuzii cherez fraktal'nyuyu granicu dvuh sred. *Teoreticheskaya i matematicheskaya fizika*. 2001; 128(2):309–319. Андреев Г. Б., Максименко В. В. Отсутствие диффузии через фрактальную границу двух сред. *Теоретическая и математическая физика*. 2001; 128(2):309–319.
24. **Mal'cev P. P., Galyamov B. Sh., Maksimenko V. V.** Fraktal'nye klastery i mikrosistemnaya tekhnika. Lokalizatsiya sveta, inducirovannoe izluchenie, "sverhprovodimost' sveta", "teleportatsiya". *Mikrosistemnaya tekhnika*. 2001;9:13–19. Мальцев П. П., Галямов Б. Ш., Максименко В. В. Фрактальные кластеры и микросистемная техника. Локализация света, индуцированное излучение, «сверхпроводимость света», «телепортация». *Микросистемная техника*. 2001;9:13–19.
25. **Mal'cev P. P., Galyamov B. Sh., Maksimenko V. V.** Fraktal'nye klastery i mikrosistemnaya tekhnika. Dielektricheskaya pronicaemost' fraktal'nogo klastera. *Mikrosistemnaya tekhnika*. 2001; 8:25–30. Мальцев П. П., Галямов Б. Ш., Максименко В. В. Фрактальные кластеры и микросистемная техника. Диэлектрическая проницаемость фрактального кластера. *Микросистемная техника*. 2001; 8:25–30.
26. **Mal'cev P. P., Galyamov B. Sh., Maksimenko V. V.** Fraktal'nye klastery i mikrosistemnaya tekhnika. Lokalizatsiya i ostanovka sveta v sisteme nepogloshchayushchih nanochastich. *Mikrosistemnaya tekhnika*. 2001; 7:29–35. Мальцев П. П., Галямов Б. Ш., Максименко В. В. Фрактальные кластеры и микросистемная техника. Локализация и остановка света в системе непоглощающих наночастиц. *Микросистемная техника*. 2001; 7:29–35.
27. **Maksimenko V. V., Kupriyanov L. Yu., Zagajnov V. A.** Effektivnaya dielektricheskaya pronicaemost' fraktal'nogo klastera. *Rossiyskie nanotekhnologii*. 2009;4:46–50. Максименко В. В., Куприянов Л. Ю., Загайнов В. А. Эффективная диэлектрическая проницаемость фрактального кластера. *Российские нанотехнологии*. 2009;4:46–50.
28. **Boren S., Hafmen D.** Pogloshchenie i rasseyanie sveta malymi chasticami. – М.: Мир. 1986. Борен С., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. – М.: Мир. 1986.
29. **Maksimenko V. V.** Lokalizatsiya sveta v neuporyadochennyh dispersnyh sredah (avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni d. f.-m.n. Dissertatsionnyj sovet D 217.024.01 v OAO «Ordена Трудового Красного Знамени Nauchno–issledovatel'skij fiziko–himicheskij institut im. L. Ya. Karlova». – Moskva. 2015. Максименко В. В. Локализация света в неупорядоченных дисперсных средах (автореферат диссертации на соискание ученой степени д. ф.-м. н. Диссертационный совет Д 217.024.01 в ОАО «Ордена Трудового Красного Знамени Научно–исследовательский физико–химический институт им. Л. Я. Карлова». – Москва. 2015.
30. **Ganzha A. A.** Issledovaniya atmosfernogo elektrichestva s pomoshch'yu kvantovo–strukturnykh nitej. *Materialy Vosemnadcatoy Vserossiyskoj Otkrytoj konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa»*. 16–20 noyabrya. 2020. IKI RAN, 2020. S. 145. <https://doi.org/10.21046/18DZconf-2020a> Ганжа А. А. Исследования атмосферного электричества с помощью квантово–структурных нитей. *Материалы Восемнадцатой Всероссийской Открытой конференции с международным участием «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»*. 16–20 ноября. 2020. ИКИ РАН, 2020. С. 145. <https://doi.org/10.21046/18DZconf-2020a>
31. **Gurevich A. V., Zybin K. P.** Proboj na ubegayushchih elektronah i elektricheskoe razryady vo vremya grozy. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 2001; 171(11):1177–1199. Гуревич А. В., Зыбин К. П. Пробой на убегающих электронах и электрические разряды во время грозы. *Успехи физических наук*. 2001; 171(11):1177–1199.
32. **Maltsev P. P.** Pulsed Optical and X-ray Radiation of Fractals: Review of Hypotheses. Part I. Micro Runaway Breakdown. *Photonics Russia*. 2024;18(5): 358–374. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2024.18.5.358.374> Мальцев П. П. Импульсные оптические и рентгеновские излучения фракталов: обзор гипотез. Часть I. Микропробой на убегающих электронах. *Фотоника*. 2024;18(5): 358–374. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2024.18.5.358.374>

## АВТОР

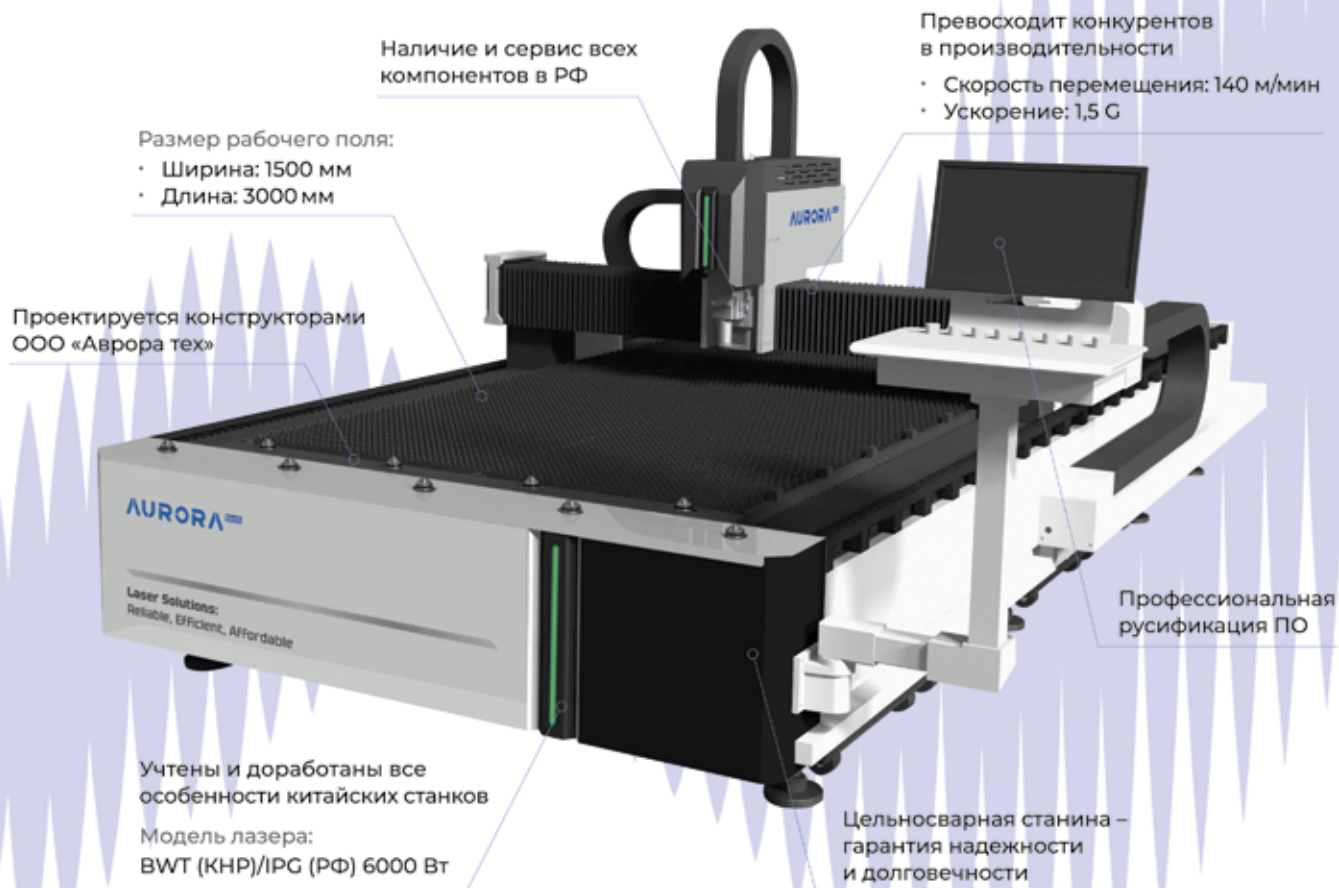
Петр Мальцев, д. т. н., профессор, ведущий научный сотрудник МЦАИ РАН; e-mail: p.p.maltsev@mail.ru; Москва, Россия. ORCID: 0000-0001-9160-5272

→ Наши компетенции — залог эффективного производства!

Подбираем диаметр волокна под обрабатываемую толщину металла

# СТАНОК ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ

## 6 кВт



## Адаптируем лазерный источник под ваши задачи

- ООО «Аврора тех» – официальный представитель BWT в России
- 2 года гарантии

- Собственная опытно-конструкторская лаборатория
- Научно-производственный участок на площадке 700+ м<sup>2</sup>
- Наилучшая цена на рынке РФ за аналогичную комплектацию
- Производится под инженерным контролем российских специалистов на заводе KHP

- > 1000 заказчиков
- > 300 поставщиков
- Член Лазерной Ассоциации

ООО «Аврора тех» — поставщик станков лазерной резки на территории РФ и стран СНГ и предлагает наиболее выгодные условия поставки продукции и полную техническую поддержку.