

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Одеський національний університет  
імені І. І. Мечникова

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE  
OF UKRAINE  
Odesa I. I. Mechnykov National University

**СЕНСОРНА  
ЕЛЕКТРОНІКА  
І МІКРОСИСТЕМНІ  
ТЕХНОЛОГІЇ  
2022 – Т. 19, № 4**

**SENSOR  
ELECTRONICS  
AND MICROSYSTEM  
TECHNOLOGIES  
2022 – VOL. 19, No. 4**

*Науково-технічний журнал*

*Scientific and Technical Journal*

Заснований 13.11.2003 року  
Виходить 4 рази на рік

It is based 13.11.2003 року  
The Journal issue four times a year

УДК 681.586

UDC 681.586

Засновник Одеський національний  
університет імені І. І. Мечникова

Founded by Odesa I. I. Mechnykov  
National University

За підтримки Українського фізичного  
товариства

At support of the Ukrainian Physical  
Society

Свідоцтво про державну реєстрацію  
КВ № 8131

Certificate of State Registration  
KB № 8131

Журнал входить до переліку фахових видань  
ВАК України з фізико-математичних,  
технічних та біологічних наук

The Journal is a part of list of the issues  
recommended by SAK of Ukraine on physical  
and mathematical, engineering and biological  
sciences

Журнал реферується РЖ «Джерело»  
включено в міжнародні бази  
Index Copernicus, наукова електронна  
бібліотека Cross Ref. Elibrary, Directory of  
Research Journal Indexing, General Impact  
Factor EBSCO

The Journal is reviewed by RJ “Djerele»  
is included in the International Base Index  
Copernicus, Cross Ref. Elibrary,  
Directory of Research  
Journal Indexing, General Impact Factor  
EBSCO

Видається за рішенням Вченої ради  
Одеського національного університету  
імені І. І. Мечникова  
*Протокол № 4 від 27 грудня 2022 р.*

Publishes on the resolution of Odesa  
I. I. Mechnykov National University  
Scientific Council  
*Transaction No. 4, 27.12.2022*

Адреса редакції:  
вул. Дворянська, 2, МННФТЦ (НДЛІ-3),  
Одеський національний університет  
імені І. І. Мечникова, Одеса, 65082, Україна.  
Тел./Факс: +38(048)723-34-61

Editorial address:  
2, Dvoryanskaya Str., ISEPTC (RL-3),  
Odesa I. I. Mechnykov National University,  
Odesa, 65082, Ukraine.  
Ph./Fax: +38(048)723-34-61

## Редакційна колегія

Головний редактор – **В. А. Сминтина**  
Заступник головного редактора – **Я. І. Лепіх**  
**А. П. Балабан** (Одеса, Україна) –  
відповідальний секретар

**О. Є. Беляєв** (Київ, Україна)  
**І. В. Блонський** (Київ, Україна)  
**В. Г. Вербицький** (Київ, Україна)  
**Б. М. Галкін** (Одеса, Україна)  
**Ю. О. Гунченко** (Одеса, Україна)  
**А. Д'Аміко** (Рим, Італія)  
**Н. Джаффрезік Рене** (Ліон, Франція)  
**С. В. Дзядевич** (Київ, Україна)  
**Г. В. Єльська** (Київ, Україна)  
**В. О. Іваниця** (Одеса, Україна)  
**О. М. Калашніков** (Ноттінгем, Велика Британія)  
**О. В. Коваленко** (Дніпро, Україна)  
**І. А. Кравченко** (Одеса, Україна)  
**С. В. Ленков** (Київ, Україна)  
**Є. В. Малахов** (Одеса, Україна)  
**А. Медвідь** (Ріга, Латвія)  
**А. С. Опанасюк** (Суми, Україна)  
**С. М. Рябченко** (Київ, Україна)  
**В. А. Скришевський** (Київ, Україна)  
**О. П. Солдаткін** (Київ, Україна)  
**М. Ф. Стародуб** (Київ, Україна)  
**М. В. Стріха** (Київ, Україна)  
**М. В. Ткач** (Чернівці, Україна)  
**А. Чаудхрі** (Чандігар, Індія)  
**Є. М. Шерегій** (Жешув, Польща)

## Editorial Board

Editor-in-Chief – **V. A. Smyntyna**  
Vice Editor-in-Chief – **Ya. I. Lepikh**  
**A. P. Balaban** (Odesa, Ukraine) –  
responsible editor

**A. E. Belyaev** (Kyiv, Ukraine)  
**I. V. Blonskii** (Kyiv, Ukraine)  
**V. G. Verbitsky** (Kyiv, Ukraine)  
**B. M. Galkin** (Odesa, Ukraine)  
**Yu. O. Gunchenko** (Odesa, Ukraine)  
**A. D'Amiko** (Rome, Italy)  
**N. Jaffrezik Renault** (Lyon, France)  
**S. V. Dzyadevych** (Kyiv, Ukraine)  
**G. V. Elskaya** (Kyiv, Ukraine)  
**V. O. Ivanytsia** (Odesa, Ukraine)  
**O. M. Kalashnikov** (Nottingham, United Kingdom)  
**O. V. Kovalenko** (Dnipro, Ukraine)  
**I. A. Kravchenko** (Odesa, Ukraine)  
**S. V. Lenkov** (Kyiv, Ukraine)  
**E. V. Malakhov** (Odesa, Ukraine)  
**Arturs Medvids** (Riga, Latvia)  
**A. S. Opanasyuk** (Sumy, Ukraine)  
**S. M. Ryabchenko** (Kyiv, Ukraine)  
**V. A. Skryshevsky** (Kyiv, Ukraine)  
**A. P. Soldatkin** (Kyiv, Ukraine)  
**N. F. Starodub** (Kyiv, Ukraine)  
**M. V. Strikha** (Kyiv, Ukraine)  
**M. V. Tkach** (Chernivtsi, Ukraine)  
**A. Chaundhri** (Chandigarh, India)  
**E. M. Sheregii** (Rzeszow, Poland) 45

Науковий редактор випуску  
та відповідальний за випуск – **Я. І. Лепіх**

## ЗМІСТ CONTENTS

**Фізичні, хімічні та інші явища, на основі яких можуть бути створені сенсори**  
**Physical, chemical and other phenomena, as the bases of sensors**

*Yaroslav Olikh*

ON THE PHYSICAL NATURE  
OF SUBJECTIVE PSYCHOLOGICAL  
TIME ..... 4

*Ярослав Оліх*

ПРО ФІЗИЧНУ ПРИРОДУ  
СУБ'ЄКТИВНОГО ПСИХОЛОГІЧНОГО  
ЧАСУ

**Оптичні, оптоелектронні і радіаційні сенсори**  
**Optical and optoelectronic and radiation sensors**

*I. M. Vikulin, B. V. Korobitsin, P. Yu.*

*Markolenko, O. A. Nazarenko*

DETECTION OF SIGNS OF  
DEGRADATION OF PHOSPHIDE-  
GALLIUM LEDS BY THE LEVEL  
OF LOW-FREQUENCY NOISES..... 18

*I. M. Вікулін, Б. В. Коробіцин, П. Ю. Марко-*  
*ленко, О. А. Назаренко*

ВИЯВЛЕННЯ ОЗНАК ДЕГРАДАЦІЇ  
ФОСФІД-ГАЛІЄВИХ СВІТЛОДІОДІВ  
ЗА РІВНЕМ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ  
ШУМІВ

**Матеріали для сенсорів**

**Sensor materials**

*Yu. A. Nitsuk, O. V. Karaush, Ya. I. Lepikh,*

*Yu. F. Vaksman, G. V. Korenkova*

LUMINESCENCE OF COLLOIDAL  
CdSe:Cu NANOCRYSTALS..... 23

*Ю. А. Ніцук, О. В. Карауш, Я. І. Леніх,*

*Ю. Ф. Ваксман, Г. В. Коренкова*

ЛЮМІНЕСЦЕНЦІЯ КОЛОЇДНИХ НА-  
НОКРИСТАЛІВ CdSe:Cu

*V. M. Skobeeva, V. A. Smyntyna., Ya. I. Lepikh*

SYNTHESIS OF NOBLE METAL  
NANOPARTICLES AND THEIR USE  
IN SENSOR DEVICES,  
PART 1: SYNTHESIS OF Ag, Au  
NANOPARTICLES ..... 30

*B. M. Skobeєva, B. A. Сминтина, Я. І. Леніх*

СИНТЕЗ НАНОЧАСТИНОК  
БЛАГОРОДНИХ МЕТАЛІВ  
ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ У СЕНСОРНИХ  
ПРИСТРОЯХ,  
ЧАСТИНА 1: СИНТЕЗ НАНОЧАСТИ-  
НОК Ag, Au

**Інформація для авторів. Вимоги до оформлення статей у журнал..... 51**

**Information for authors.**

**The requirements on papers preparation . 54**

# ФІЗИЧНІ, ХІМІЧНІ ТА ІНШІ ЯВИЩА, НА ОСНОВІ ЯКИХ МОЖУТЬ БУТИ СТВОРЕНІ СЕНСОРИ

---

## PHYSICAL, CHEMICAL AND OTHER PHENOMENA, AS THE BASES OF SENSORS

---

---

### ВІД РЕДАКЦІЇ

Відомо, що умовами успішної роботи фізичного сенсора є: по-перше, – можливість фіксації сигналу, і по-друге, – інтерпретація сигналу в реальних фізичних величинах.

Якщо абстрагуватися від конкретних фізичних сенсорів можна прийти до думки, що ідеальним специфічним сенсором може вважатися нейронна система, що формує людську підсвідомість. Дійсно, існують дослідження того, що саме підсвідомість допускає існування ірраціонального за межами матеріальної реальності і є відповідальною за породження ідей для великих творів мистецтва, музики, прози, поезії, великих наукових відкриттів і глибоких духовних переживань, що в кінцевому результаті трансформується в раціональну форму.

Для реального використання такого інструменту (сенсора) необхідно навчитися надійно користуватися доступом до нашої підсвідомості. Зокрема, окремим особам, як відомо, вдається досягати відчуття такого рівня у стані медитації. При цьому надважливим чинником успішної комунікації свідомості з підсвідомістю, подібно до роботи фізичних сенсорів, виявляється спроможність: по-перше, – усвідомити (впізнати) в певних психофізичних умовах цей діалог та, по-друге, – вірно його інтерпретувати.

У запропонованій дискусійній статті автором зроблена спроба розшифрувати окремі власні психофізичні відчуття і спромогтися завдяки досвіду фізика-експериментатора логічно ці відчуття документувати в зрозумілій математичній формі зв'язку зміни психологіч-

ного часу з температурою. Як показано в роботі, визначальним чинником для успішного вирішення завдання кількісної оцінки тривалості та швидкості зміни психологічного часу, є взаємодія двох компонентів мислення – свідомості та підсвідомості.

Стаття, на нашу думку, може привернути увагу дослідників до цікавих аспектів взаємодії свідомого і підсвідомого елементів (систем) мозкової діяльності за участі специфічної сенсорики.

Ще в перші десятиліття 20 віку G. Parker із Єльського університету при пошуках примітивної рефлекторної дуги встановив, що нейронні шляхи, з допомогою яких збудження генерує сенсорним стимулом, діючи на певну частину тіла може викликати рух. А суть роботи центральної нервової системи – головного і спинного мозку – є проведення вхідної сенсорної інформації до численних структур і конвергенція на нейронах. Були виділені групи сенсорних нейронів, від яких, зокрема, поступають сигнали з навколишнього середовища. Спроби, що мають місце, підключити мозок до комп'ютера, або створити розум в середині комп'ютера також розраховані на використання сенсорних нейронів або інших специфічних сенсорних систем. Успіхи, чи певні результати, практичного втілення таких ідей є біонічні протези, наприклад, рука, що керується силою думки на підсвідомому рівні, рука-протез, як звичайна робить необхідні рухи (електрик Джессі Салліван, США). І тут працюють нейронні сенсори.

*Доктор фіз.-мат. наук, проф. Я. Леніх*

UDC: 159.961:536.756:115

DOI: 10.18524/1815–7459.2022.4.271199

**ON THE PHYSICAL NATURE OF SUBJECTIVE PSYCHOLOGICAL TIME***Yaroslav Olikh*

V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, National Academy of Sciences of Ukraine,  
Kyiv, Ukraine; e-mail: jaroluk3@ukr.net

**ON THE PHYSICAL NATURE OF SUBJECTIVE PSYCHOLOGICAL TIME***Yaroslav Olikh*

**Abstract.** A simple temperature dependence of rate changing a psychological time  $t_{ps}(t_c)$  in human was suggested:  $(\partial t_{ps} / \partial S_{ps}) = D_{ps} \cdot \delta T$ , where  $D_{ps}$  is some constant,  $S_{ps}$  is the psychological entropy, characterizing current human physical/mental state;  $\delta T$  is the normalized body temperature  $\delta T = (t_c - t_c^n)$ ,  $t_c$  – the now temperature and  $t_c^n$  – the normal temperature. This dependence as an empirical result of personal experience in “perception” of time intervals (~10 min) at high body temperature ( $t_c \geq 38,2^\circ\text{C}$ ) was ascertained. It has been shown the determining factor to successfully finding the task of quantitatively estimating a duration and changing rate of the psychological time there is cooperation of two thinking components – consciousness and subconsciousness. The optimal physical conditions for involving the subconscious results in significant strengthening of the brain capacity (synergy effect) were found out. The possible application of the formulas obtained for analyzing the changes of psychological time with temperature and entropy was suggested. Using on the calculations performed the graphical temperature dependences  $\delta T$ ,  $\delta t_{ps}$  ( $D_{ps} \cdot \Delta S_{ps}$ ) were plotted, that confirmed the expected growth of these parameters.

**Keywords:** time perception, psychological time, psychological entropy, subconsciousness

**ПРО ФІЗИЧНУ ПРИРОДУ СУБ'ЄКТИВНОГО ПСИХОЛОГІЧНОГО ЧАСУ***Ярослав Оліх*

**Анотація.** Запропоновано просту температурну залежність швидкості зміни психологічного часу  $t_{ps}(t_c)$  у людини:  $(\partial t_{ps} / \partial S_{ps}) = D_{ps} \cdot \delta T$ , де  $D_{ps}$  – деяка константа,  $S_{ps}$  – психологічна ентропія, що характеризує поточний фізичний/психічний стан людини;  $\delta T$  – нормована температура тіла  $\delta T = (t_c - t_c^n)$ ,  $t_c$  – поточна температура і  $t_c^n$  – нормальна температура. Встановлено цю залежність як емпіричний результат особистого досвіду «сприйняття» інтервалів часу (~10 хв) при високій температурі тіла ( $t_c \geq 38,2^\circ\text{C}$ ). Показано, що визначальним чинником для успішного вирішення завдання кількісної оцінки тривалості та швидкості зміни психологічного часу є взаємодія двох компонентів мислення – свідомості та підсвідомості. Виявлено оптимальні фізичні умови для залучення підсвідомості, що призводить до значного посилення можливостей мозку (ефект синергії). Запропоновано можливе застосування отриманих формул для аналізу змін психологічного часу з температурою та ентропією. З використанням проведених розрахунків були побудовані графічні температурні залежності  $\delta T$ ,  $\delta t_{ps}$  ( $D_{ps} \cdot \Delta S_{ps}$ ), які підтвердили очікуване зростання цих параметрів.

**Ключові слова:** сприйняття часу, психологічний час, психологічна ентропія, підсвідомість

## 1. INTRODUCTION

Time is the decisive factor in behavior of any living organism, but the nature of time itself remains one of the most mysterious problems of up-to-date science [1,2]. It appears that time is not a universal quantity but only some conditionality. This feature of *individual time* was known long ago. It is common knowledge that perception of identical time intervals determined using, for instance, a chronometer, can differ essentially for various persons as well as under different conditions [3,4]. This individual time perception is named by neurobiologists and psychologists as the “psychological time” ( $t_{ps}$ ). This field of studying the features of individual time perception is essentially widened in recent decades [2,4,5,6]. How many efforts and methods were applied to study this phenomenon of time perception. They considered a lot of various influencing factors, namely: changing the condition of consciousness by using meditation, introduction of narcotics and specific conditions of humans – neurologic and psychiatric ones [4].

Indeed, results of the newest world studies of psychological time in the field of psychology and neurobiology are of great importance. The main regularities of this phenomenon were ascertained, and it was found that human time perception is affected by strong emotions, apprehensiveness, age, body temperature, isolation (information deficiency), as well as concentration [3,7,8,9]. However, up to date there is no commonly adopted theory explaining the coding mechanism (recording) of time duration, and unfortunately comprehension of this phenomenon remains at the qualitative level [10,11]. Up to date, researchers have no specific mathematical relations quantitatively estimating the duration of the psychological time  $t_{ps}$  and predicting its changes under purposeful modification of ambient conditions. To eliminate this flaw, we suggested a simple formulation of the physical relation between the rate of time course and temperature (energy) in a separate biological system. The dependence has been formulated on the basis of considering subjective perception of

specific time periods (~10 min) under condition of fever. We analyzed the physical conditions that contributed to the optimal inclusion of subconscious thinking to solve the task to mathematically describe the rate of changes in the subjective psychological time. A possible applications of the found dependence  $\partial t_{ps} / \partial S_{ps} = D_{ps} \cdot \delta T$  ( $D_{ps}$  is some constant,  $S_{ps}$  – psychological entropy;  $\delta T$  is normalized body temperature  $\delta T = (t_c - t_c^n)$ ,  $t_c$  – the current and  $t_c^n$  – the usual normal human body temperature) were suggested to estimate duration of the psychological time under specific conditions.

## 2. EXPERIMENTAL

### 2.1. Equipment

Glass clinical thermometer to measure the body temperature; smartphone used as a chronometer.

### 2.2. Subject of investigation

Body temperature dependence of psychological time ( $t_{ps}$ )

### 2.3. Journal of events the personal experience in “perception” of time intervals

The experience was proceeded for approximately 8 hours, starting at 22:00 up to 6:00 o'clock of the following day. Painful feeling arose yet in the previous day. The preliminary measurement of temperature approximately at 14:00 indicated its increase up to  $t_c$  close to 38.2 °C. There arose a suspicion of the virus attack. Thereupon, the author used only folk remedies: localization, bed, water extract from medical plants with arrowwood and raspberries and without any antipyretics (as the increased body temperature helps to withstand virus attacks). To night, the temperature increased up to  $t_c = 38.5$  °C approximately at 22:00. Feeling of “heaviness in head”, desire to sleep, thought about this “damned virus” did not leave. It is expedient here to remind that this experience was performed under Covid-19 pandemy, when the general psychological situation itself created atmosphere of an enhanced psychological pressure. Probably, it affected the initial information message to formulate the problem [12,13]. It is worth to note that all descendant this night was stored in

mind and made it possible to distinctly reproduce. Nevertheless, to understand what was happened, it was necessary to describe these events (to be exact, feelings) in more details, including dreams running all over the night. It should be emphasized that in this case dreams are considered as specific pictures that, first of all, reflect the emotional background of thinking. All these dream details, their geometry, shape – correspond to specific psychophysical processes in subconsciousness. It implies processes that form a final result [12,14].

In what follows, we shall intentionally adduce all the details of this psychophysical play that were stored in mind. As one can see from the following analysis (Chapter 2.3, 3.2), the very dream details (“The devil in details”) inform us about subconsciousness content through original images (signs). The dream pictures were repeated especially persistently after brief waking up to measure the body temperature (without room lighting, using only the smartphone light). For these studies, it was reasonable to choose the time interval (~10 min) that could be controlled with the smartphone chronometer. The following development of events can be tracked using the journal records.

I woke up at 23:30 and began to measure temperature. I was perceiving a conscious desire for these 10 min to run as quickly as possible. Then, after recording the temperature ( $t_c \approx 38.6$  °C), I fell asleep again. In fact, I was falling asleep immediately, and in dream I saw some voluminous spheres, ellipsoid dumbbell-like figures of rotation that were alternatively blown and shrink, at the same time both parts of dumbbells tried to approach each other, but something prevents this motion. In parallel with this approaching-tension, the thought arises in mind almost consciously: why time runs so slowly?

I woke up again approximately at ~01:30 to measure temperature and fix time by the smartphone, waiting the result of temperature measurement, and it seemed that the time to record temperature has already come (*i. e.*, 10 min have past), and I am looking at my chronometer. However, only ~5 min have slowly past. Two looks at the chronometer more, and at last, the

10-min period has past. I fixed the temperature – approximately 38.8 °C. I fell asleep immediately, and again I saw the same dream with me among spheres. In this condition, almost consciously the thought of slowly running time comes to me. And it is interesting, what is the exact way for changing the rate of time? There appears (it is realized) a professional desire to describe this time flow changes from the mathematical viewpoint, *i. e.*, to reflect in some manner the rate of time running. But how it can be made? The feeling comes that my head is blown up like to those spheres! I do not imagine how it could be made, but I am sure to do it, as the solution is close to me. Physicists got accustomed to express rate of all the physical quantities via derivatives with respect to time, but here we have the time itself.

I woke up, fix the moment ~02:50, began to measure temperature. Again I wanted to make the measurement as quickly as possible. And I feel that time would be stopped, so I look at chronometer repeatedly for 4, 7 and, at last, 10 min. The thermometer indicates  $t_c \approx 39.0$  °C. And again I fell asleep, that resembles me a jump from steep and dive to the same dream, where the spheres-dumbbells rotate and approach. However, in addition, there arise some fuzzy signs, formulas, Latin characters... For some reason, the great capital letter “S” slows down, which resembles these doubled spheres-dumbbells. At the background of this letter, these spheres become reduced, approached and assimilated in one figure that look so elastic and smooth that causes desire to stroke it. However, this letter S twinkled and became more and more clear. Almost consciously, there comes up the thought – what does it mean? In physics, this letter is used to designate the distance, the square... but not; something gives me a hint that usually in thermodynamics this designation is used for entropy.

It becomes easier, I don’t know how yet, but already I feel that I will be able to write this “damned” derivative of time with respect to... what? Here, I cannot separate whether I am there in dream with spheres, or already awakened, but the term  $\partial t / \partial S$  becomes to twinkle more and more brightly. Stop, and where should I use my suffered temperature  $\delta T$ ? But it is already side by side,

as with increasing the temperature, the rate of changing my psychological time was increased, too! *I.e.*,  $\partial t_{ps} / \partial S_{ps} \sim \delta T$ . In what follows, it becomes obvious:

$$(\partial t_{ps} / \partial S_{ps}) = D_{ps} \delta T. \quad (1)$$

Here,  $t_{ps}$  is the psychological time,  $D_{ps}$  – some unknown constant that characterizes the studied system,  $S_{ps}$  – entropy;  $\delta T$  – normalized body temperature.

That's all! Having sensed and clearly seen this relation, I fell asleep with relief, it seems without any dreams, being calm, without any fear to forget the suffered regularity. After some period, I woke up with "light" head, measure body temperature –  $t_c \approx 36.6$  °C, it seemed to be suspiciously low. I measure temperature once more and get the same result. My chronometer indicates 06:40. I begin to analyze, what does it mean? Could it be real or only seems? What relation could take place between the time running rate and entropy? And what entropy should it be? And may be it is not the entropy? It was the morning. Recovery has come, the mind became clear. Temperature increase was not repeated neither in the same day nor in the following days. The high body temperature has done its work: allowed to (in the half-conscious condition) the simple form of an extraordinary important physical regularity indicating the quantitative relation of the time flow changes in a separate (biological) system with the energy (temperature) of this system.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1. Consciousness and subconsciousness cooperation a decisive factor for successful solution of the problem

Having analyzed records in the journal of events happened that night, let us try to find out and describe those extremely delicate but so interesting and important basic details of the process concerning human thinking as well as cooperation of consciousness with the level of subconsciousness. We believe that the

main process here is cooperation between two forms (phases) of thinking – consciousness and subconsciousness. Just this cooperation of both forms (in parallel) on the problem concerned by an individuum at the moment, essentially enhances abilities of the brain (synergistic effect). This cooperation becomes a decisive factor for successful solution of the problem, which is unattainable under each of these conditions separately. We use both of these categories consciousness and subconsciousness that via our thoughts are related to each other. The human mind is one and indivisible, however, it includes two phases interacting between each other, namely, consciousness and subconsciousness. The latter is the productive phase of mind, while the former – governing. Consciousness chooses what it wants to see in this life but is not be able to create that. Subconsciousness is a tool without which the choice cannot be made; we regularly see and hear some signals from our subconsciousness in the dream state. The only difficulty is to correctly decode the seen things.

This is not a tribute to mysticism, consciousness-subconsciousness is the subject of serious study of a number of sciences; we are forced to be properly awake and awake in a state of sleep. Sleep is a form of communication with subconsciousness. Such an analysis of dreams discloses the secret of human subconsciousness, dreams inform about the processes that develop inside the organism and outside, dreams give the most interesting information to those who try to understand symbols appearing in them [15]. The consciousness condition in its thermodynamical sense corresponds to the definition for "open systems" (human organism is the open system, since it can receive information on the body temperature  $t_c$ , on time  $t_{cl}$  from the chronometer). Concerning the subconsciousness condition, the situation is more complicated. Indeed, when exchange with ambient by the energy (and information) is inhibited (weakened) temporarily, this system can be considered as the isolated one (or quasi-closed). In our opinion, it is the dream condition that corresponds to this situation.



### 3.2. Stages of solving the problem (task) of changes psychological time rate

Appearance of an idea (setting the problem) about some dependence of individual time duration  $\Delta t_{ps}$  for the chosen in the experiment time period  $\Delta t_{cl} \approx 10$  min for temperature measurement was conscious, i. e., when observing the chronometer and thermometer readings. While solution of this task was realized in fact at the subconscious level. Consciousness formulates the task, controls the process of its solution and mobilizes subconsciousness to do it [14]. In its turn, subconsciousness “digs into depth” but all the time needs informational confirmation (support) to: i) not “turn to another way”, and ii) be all this time “in contact” to transfer information to consciousness in a real time scale.

Let us follow these stages in more details. The revealed in the consciousness stage fact of deceleration of individual time was apprehended rather emotionally, so emotionally that it penetrated into the dream condition (i. e., into subconsciousness). It may be interpreted as setting the task for subconsciousness. It was confirmed by appearance of dreams (see section 2.3: *...spheres, ellipsoids, dumbbell-like figures of rotation...*). However, this moment is very far from solution of the task yet. Generally speaking, it would be finish of this play. But attention! There is temporal re-switching into the consciousness stage (~01:30). As a result, another portion of information and a new emotional pulse are added. At the same time, the task is specified (*...what is the exact way for changing the rate of time?...*). In parallel, the requirement to solve it is specified, too (*...to describe this change from a mathematical viewpoint...*), and motivation is enhanced (*...I am sure to do it, as the solution is close to me!*). Exactness of this delivery address is confirmed by continuation of the same dream.

It is important to emphasize the observed multiplicity (repetition and accumulation) of moments corresponding to formation of the same information and emotional requests that, in fact, appeared randomly but undoubtedly promoted successful solution of the task. The

smooth transition between consciousness and subconsciousness stages (instant, without any dissipation of energy and growth of entropy) was favoured by quasi-closeness of our system (absence of any light and sound contacts with ambient medium, high body temperature as well as the condition of dream).

Re-switching to the consciousness phase took place again (at ~2:50). The further temperature increase was fixed, which should promote an energetic enhancement of work in the consciousness phase. Deceleration of individual time is perceived clearer, as a result, the same (but more intensive!) information and emotional pulses were sent again to subconsciousness. The dream and its pictures were very similar to the previous ones, but there appeared new important elements (*...arise some formulas... the capital letter “S”... spheres approach to each other...*). It means that there was formation of solution for the set task in some format accessible for the consciousness stage. In this process, both phases of thinking articulate now practically simultaneously (*...it is difficult to distinguish whether I am there in my dream, with spheres, or already waken up. But the term  $\partial t/\partial S$  becomes to twinkle more and more brightly...*). And at this moment, the partially forgotten knowledge about entropy came out very timely. So, the final formula (1) is created in consciousness with not understandable designations yet:  $\partial t_{ps}/\partial S_{ps} = D_{ps} \delta T$ . Here,  $\partial t_{ps}/\partial S_{ps}$  is the flow changes rate of psychological time with changing the entropy or changing the body temperature:

$$\delta T = (t_c - t_c^n), \quad (2)$$

where  $t_c$  is the current and  $t_c^n$  – usual normal human body temperature (in general, it differs a little from one body to another). Let us take the mean value  $t_c^n = 36.6$  °C.

Therefore, the subconsciousness coped with the set task, the quantitative relation between thermodynamic parameters has been obtained (*...spheres become reduced, approached and assimilated in one figure!*).

### 3.3. About terminology concerning "deceleration/acceleration of psychological time"

In what follows, for unambiguous terms, one should make some correction. It is reasonable to speak not about time in general but to deal with specific time intervals. The interval of subjective time as  $\Delta t_{ps}$  in the consciousness phase differs from the measured data of chronometer (clock)  $\Delta t_{cl}$ , i. e.,  $\Delta t_{ps} > \Delta t_{cl}$ . Formally, it looks like some delay in chronometer readings relatively to the chosen time interval in consciousness. This difference between  $\Delta t_{ps}$  and  $\Delta t_{cl}$  should be naturally named as individual deceleration/acceleration of the psychological time:

$$\delta t_{ps} = \Delta t_{ps} - \Delta t_{cl}. \quad (3)$$

On the other hand, according to the formula (1):

$$\delta t_{ps} = D_{ps} \delta S_{ps} \delta T. \quad (4)$$

Here,  $\delta S_{ps}$  is a corresponding change in the psychological entropy. Finally, from (3) and (4) we get:

$$\Delta t_{ps} = \Delta t_{cl} + D_{ps} \delta S_{ps} \delta T. \quad (5)$$

### 3.4. The thinking process and psychological entropy: the thermodynamics aspects

Let us consider the formulas (4 and 5) in more details. It is expedient to remind that the individual biological perception is defined by bio-psychological processes that go on in accord with their own laws. But the governing factor in these processes, as it was adopted intuitively (subconsciously) in our observation, can be entropy. Our consciousness cannot immediately perceive such a definition for "S", it cannot agree with this offer obtained from subconsciousness (...*How could the rate of time running depend on the entropy?*). After deeper reflection, this rejection vanishes. Indeed, the brain, like to every molecular system, follows the second law of thermodynamics, where the categories of order and chaos always play their role. Also,

there are definiteness and uncertainty, therefore, the entropy can be represented in various forms (thermodynamical, molecular, information) [14,16]. By [17] was proposed the idea of entropy use to the human information system to understand uncertainty-related anxiety. At the same time, in biological objects the entropy has another nature as compared with that used in Boltzmann's formula; in these objects it is not a measure of disorder. Rather it serves as an information memory that really defines the character of further development inherent to this system. This entropy defines possibilities for the system to exist and characterizes not only the momentary state but possible states in the future, [14]. Between the information amount  $I_{ps}$  and entropy  $S_{ps}$ , there is an objective relation: both these quantities are the measure of organization in the studied biological system. By *I. Zeman*, accumulation of information means deceleration of time. In accordance with it, the time concerning information processes slows down; therefore, the rise of organization level in living organisms causes deceleration of its own time [16], i.e., assuming the relation  $\delta S_{ps} \sim \delta I_{ps}$ , the equality (4) can be written as

$$\delta t_{ps} = D_{ps}^* \delta T \cdot \delta I_{ps} \quad (4^*)$$

When analyzing the creative process of solution searching, we emphasized the role of such subconscious images as emotions, instant associations, dream pictures. The thermodynamical analysis of thinking process shows that considering the brain only as a biochemical cell and neurophysiological system, is not enough to explain fundamental properties of consciousness, namely: its capability to set a task, to find a definite solution for it, to create a special symbolics for these solutions, to code corresponding information. When realizing all these functions, the entropy acquires very low values that should be provided by a source of negative entropy to fully order some kinds of thinking products – logic conclusions, single-valued symbolic recording, and so on" [14,16]. As it was noted above, emotions slow down the time and increase the entropy, however, it takes

place in the consciousness phase of thinking. But the process of solving the task is mainly created in the subconsciousness phase: there is also selection of information material as well as its ordering. These processes lead to lowering  $\delta S_{ps}$  [18] and, respectively according (4), to decreasing  $\delta t_{ps}$ .

Let us consider the physical sense of the introduced parameter psychological entropy « $S_{ps}$ ». In general, application of the entropy conception to describe psychological processes looks as a most acceptable from the physical viewpoint [14,16,17]. However, it is necessary to remember that through extraordinary complexity of thinking all the components of this process (information, energetic...) cannot be comprised by this physical conception. First of all, it concerns with a high current physical/mental state. One can agree with [11], who introduced the psychophysical distinguishing character « $\underline{S}$ » that *qualitatively* characterizes some physical/mental situation and can influence the rate of processes in the brain. It is worth to note that such « $\underline{S}$ » coincides with our designation of psychological entropy in its notation and, in fact, coordinates with our using « $S_{ps}$ » as some *quantitative* mental parameter.

### 3.5. Application a deceleration/acceleration formulas of the psychological time

Let us come out of the frames limiting our “experimental method” that resulted in formulation of the dependences (1) – (4) and consider several examples of their possible application. The importance of these formulas are confirmed by their capability to formulate some quantitative relations between  $t_{ps}$  and other system parameters. It is expedient here to remind the expression by *I. Kant*: “In each knowledge, there is so much truth, how much mathematics is”.

#### 3.5.1. Why a high body temperature is necessary for appearance of "non-obvious" ideas?

Let us re-write the formula (4)  $\delta t_{ps} = D_{ps} \delta S_{ps} \delta T$ , *i. e.*, the change of individual psychological time is pro rata to the change in entropy. It is clearly seen from (4) “why a high body temperature is necessary for appearance of “brain-damaged ideas”. If we assume that “hallucination”

messages appear in the process of reading deeply hidden subconscious information accompanied by some thermal effect, then the necessity of an additional energy is understandable. The source of this energy (at the neuron level) can be increased of body temperature. Some portion of the negentropy (which lowers the entropy) provides the additional internal energy source, which according to (4) results in the increase of rate ( $\partial t_{ps} / \partial S_{ps}$ ) fixed as a delay of external chronometer (phenomenon of deceleration  $\Delta t_{ps}$ ). So, the amount of information read from the subconsciousness level of the system is a negative additional term to the total entropy: it is the negentropic principle of information transfer. To confirm this thought, it is reasonable to appeal to *E. Schrodinger* who put forward the hypothesis on the constancy of energy inherent to any living organism, explained by the negative entropy that arises due to “highly-organized” substances consumed by the organism. These substances have a low entropy, and being digested to a degraded form (with a high entropy) are removed into the ambient medium [18]. It turns out that arrival of negative entropy is caused not only due to the information flux accompanying the inflow of edible products but in other forms. At the same time, the nature of negative entropy is not clear yet and needs further investigations [10,17].

#### 3.5.2. Acceleration of the psychological time or its deceleration

It is worth to note that the formula (5) implies not only deceleration but acceleration of the psychological time in the system, too, in some definite conditions. Appearance of a negative value for  $\delta t_{ps}$  can take place for  $\delta T < 0$  (for example, if cooling the body  $t_c < 36.6^\circ\text{C}$ ) or when  $\delta S_{ps} < 0$ . It follows that  $\Delta t_{ps} > \Delta t_{cl}$ , *i. e.*, the acceleration of  $t_{ps}$  is changed by deceleration [8].

#### 3.5.3. Body temperature and the human individual time

Let's consider formula (5) once more under conditions of changing the temperature. If the body temperature is constant and corresponds to the normal one  $t_c^n = 36.6^\circ\text{C}$ , then  $\delta T \equiv 0$ . In this case, accordingly to (3 to 4)  $\delta t_{ps} = 0$  and  $\Delta t_{ps} = \Delta t_{cl}$ ;

it means that under the normal body temperature there is no deceleration of human time. In confirmation of this let's appeal to *G. Whitrow* who emphasized "...it is very probable that the constant body temperature is a decisive factor that relates the human individual time with the universal physical time and protects it from the excess instability" [19]. This hypothesis was checked up by *M. Hoagland*. In his investigations of "The chemical basis for our time perception", he found out that the experiments aimed at estimation of time intervals by human with increased temperature confirmed acceleration of human biochemical chronometer, and the real physical time seems to be decelerated [7].

### 3.5.4. Influence of human psycho-emotional state on its body temperature

It is worth here to remind the known facts about increasing human body temperature  $t_c$  in force majeure conditions of considerable emotion (information) loading. Herewith, when the necessity of intensive energetic expences arises, one can observe a pronounced deceleration of its own time [3,7]. At the same time, according

to formula (4),  $t_c$  should also increase due to the increase in  $\delta t_{ps}$ .

### 3.6. Table and Figures

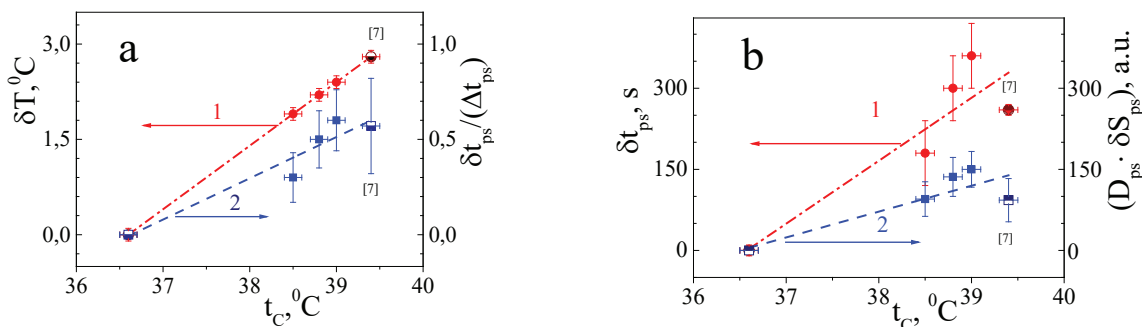
Using the formulas (2 to 4), let's analyze changes in psychophysical parameters with the increase of body temperature (it means our results from the Chapter 2.3 and the literature data [7]). Let's remember that seeming time in brain  $\Delta t_{ps} = 10$  min is the expected time interval chosen for plausible measuring the body temperature;  $\Delta t_{cl}$  is the real physical time that corresponds to that seeming time interval;  $\delta t_{ps}$  is the change in psychological time with temperature. Having made previous estimation of  $\delta t_{ps}$  and  $\delta T$  (columns 3 and 6 in Table), we can formally characterize the change in psychological entropy ( $D_{ps} \cdot \delta S_{ps}$ ) with the accuracy up to some constant factor  $D_{ps}$ .

#### 3.6.1. Table

The change of psychophysical parameters with the body temperature. Values of  $\Delta t_{ps}$ ,  $t_c$ ,  $\Delta t_{cl}$  were taken from the experiment (Section 2.3 and data [7]). Calculation:  $\delta T = (t_c - 36.6)$ ;  $\delta t_{ps} = \Delta t_{ps} - \Delta t_{cl}$ ;  $(D_{ps} \cdot \delta S_{ps}) = \delta t_{ps} / \delta T$ .

Parameters	$t_c, ^\circ C$	$\delta T, ^\circ C$	$\Delta t_{cl}, s$	$\delta t_{ps}, s$	$\delta t_{ps} / (\Delta t_{ps}), a. u.$	$D_{ps} \cdot \delta S_{ps}, a. u.$	Data
1	36.6±0.1	0±0.1	600±60	0±0.1	0	0	2.3
2	38.5±0.1	1.9±0.1	420±60	180±60	0.3±0.13	95±32	2.3
3	38.8±0.1	2.2±0.1	300±60	300±60	0.5±0.15	137±36	2.3
4	39.0±0.1	2.4±0.1	240±60	360±60	0.6±0.16	150±33	2.3
5	36.6±0.1	0±0.1	60±10	0	0	0	[7]
6	39.4±0.1	2.8±0.1	34±10	26±10	0.57±0.25	93±40	[7]

The results of these estimations are added in Figures *a* and *b*.



**3.6.2. Figure.** Dependences of psychophysical parameters on the body temperature. Figure a):  $\delta T$  is curve 1;  $\delta t_{ps}/(\Delta t_{ps})$  is curve 2. Figure b):  $\delta t_{ps}$  is curve 1;  $(D_{ps} \cdot \Delta S_{ps})$  is curve 2. Points are calculated from the experiment, lines is linear approximation. Our results from Section 2.3 and data (x 10) [7].

As can be seen in Table and Figures, not only  $\delta t_{ps}$  but the product  $(D_{ps} \cdot \delta S_{ps})$  increases with increasing the temperature, i. e., the entropy is expectedly increases, too.

### 3.7. Discussion

#### 3.7.1. Can the experience of the first person be convincing (determinative)?

Being joined to the discussion "...whether the experience of the first person, independently of data obtained from the third person, be a sufficient basis for the theory of consciousness?", which is profoundly considered in the brand new work [20]. Being based on our own experience, we can assume "yes, it is". However, it exists only when a honest-minded analysis of the original results concerning a subjective experience performed based on true scientific conceptions, which, in fact, belongs to the *third persons*. So, it taking place the increase the scientific level of results from the *first person*. Then the results of such analysis performed by researchers, including a *first person* as well, get the right to be considered "the data from the third person", which are lacking. Also, it is strengthened when the pure experience is accompanied not only by qualitative reports but specific quantitative measurements too.

#### 3.7.2. About the "two times problem" regarding the veridical and illusory nature of time [5]

Our analysis on the physical nature of quantitative dependence the psychological time changes allows to assume that there really is "only one physical time" in the mind, which is adapted in the brain in accordance with the current human physical/mental state. And the main biophysical force (motivation) of this specific adaptation can be precisely the "psychological entropy" as a

certain quantitative characteristic that the "two times problem" formally may been reconciled. "Feynman might agree that physics successfully crossed the bridge into the cranium" [5].

### 4. CONCLUSION

Being based on the analysis of personal experience concerning perception of the specific time periods (~10 min), that took place under conditions of high body temperature ( $t_c > 38$  °C), the quantitative dependence of the psychological time changes on temperature  $\delta t_{ps}(t_c)$ :  $(\partial t_{ps}/\partial S_{ps}) = D_{ps} \cdot \delta T$  was found (factor  $D_{ps}$  is some constant inherent to every specific system;  $S_{ps}$  is "psychological entropy", the parameter characterizing current psychophysical condition of the system,  $\delta T$  is temperature). A new interpretation of the term "entropy" in the sense of "psychological entropy" as a parameter characterizing the human physical/mental state was introduced. It opens the possibility to apply quantitative (physical) methods to the biophysical problems.

The physical conditions that contributed to the optimal inclusion of subconscious thinking to solve the task to mathematically describe the rate of changes in the subjective psychological time were analyzed. It was shown that controlled cooperation of consciousness and subconsciousness considerably enhances functional capabilities of the brain (synergetic effect) being a decisive factor for successful solution of the problem, which is unattainable in any of these phases separately. Optimal physical conditions for drawing the subconscious thinking phase to solve important task arising in conditions of high emotional (physical) loading were found.

The possible application of the formulas obtained for analyzing the changes of psychophysical parameters with temperature and entropy was suggested for explanation of:

(i) the possibility for not only deceleration but acceleration of the psychological time in the system, too ( $\delta S_{ps} < 0$  and  $\delta t_{ps} < 0$ );

(ii) the necessity of high body temperature for appearance of "unobvious" (subconscious) ideas;

(iii) increasing human body temperature in force majeure conditions of considerable emotion (information) loading.

Using the calculations performed, the graphical temperature dependences  $\delta T(t_c)$ ,  $\delta t_{ps}(t_c)$ ,  $\delta S_{ps}(t_c)$  that confirmed the expected growth of these parameters were plotted.

It is noteworthy that, to perform more accurate calculations of  $t_{ps}$ , it is necessary to apply the method for more adequate estimation of  $\delta S_{ps}$  or  $\delta I_{ps}$ . As a matter of fact, our work has additional aim to attract researchers' attention to quantitative study for the dependences of separate human psychophysical characteristics both with each other and with suitable for measuring physical parameters (temperature, time, potential, frequency, intensity, ... frequencies of heartbeats, breathing, muscular tonus, diameter of vessels, etc). We guess that further investigations will enable to deepen understanding of the thinking process, in general, and acceleration/deceleration of psychological time, in particular.

## 5. ACKNOWLEDGMENTS

We express our gratitude to the employ of the Odesa National University Ya. I. Lepikh and to the employ of the Kyiv Institute for Theoretical Physics of NASU V. G. Kozyrskyi, and to the employ of the Kyiv Institute of Semiconductor Physics of NASU P. S. Smertenko, and to the employ of the Kyiv National University of Trade and Economics O. V. Polunin for useful discussion of results.

## 6. REFERENCES

- [1]. Marc Wittmann. The inner experience of time // *Philosophical Transactions of the Royal Society.*, B364, pp. 1955–1967 (2009). doi:10.1098/rstb.2009.0003.
- [2]. R. A. Block, R. P. Gruber. Time perception, attention, and memory: a selective review // *Acta Psychol.*, 149, pp. 129–133 (2014). doi.org/10.1016/j.actpsy.2013.11.003
- [3]. Marc Wittmann. The inner sense of time: how the brain creates a representation of duration // *Nature Reviews Neuroscience*, 14, pp.217–223 (2013). doi:10.1038/nrn3452.
- [4]. Marc Wittmann. Modulations of the experience of self and time // *Review Consciousness and Cognition*. 38, pp. 172–181 (2015). doi.org/10.1016/j.concog.2015.06.008
- [5]. R. P. Gruber, R. A. Block and C. Montemayor. Physical Time Within Human Time // *Front. Psychol.*, 13, pp. 718505 (2022). doi: 10.3389/fpsyg.2022.718505
- [6]. Carlos Montemayor. Conscious awareness and time perception // *Psy. Ch.*, 6, pp. 3 (2017). doi:10.1002/pchj.173
- [7]. H. Hoagland. The physiological control of judgments of duration // *Journal of General Psychology*. 9, pp. 267–287 (1933). doi.org/10.1080/00221309.1933.9920937.
- [8]. P. A. Hancock. Body Temperature Influence on Time Perception. // *Journal of General Psychology*. 120, pp.197–215 (1993).
- [9]. M. Falla, A. Micarelli, K. Hüfner and G. Strapazzon. The Effect of Cold Exposure on Cognitive Performance in Healthy Adults // *A Systematic Review International Journal of Environmental Research and Public Health*. 18, pp. 9725 (2021). doi.org/10.3390/ijerph18189725
- [10]. G. Tononi, M. Boly, M. Massimini, & C Koch. Integrated information theory: from consciousness to its physical substrate // *Nature Reviews Neuroscience*. 17, pp. 450–461 (2016). doi.org/10.1038/nrn.2016.44.
- [11]. S. Carroll. Consciousness and the Laws of Physics // *Journal of Consciousness Studies*. 28(1), pp. 6–31 (2021). doi.org/10.53765/20512201.28.9.016
- [12]. David M. Eagleman. Human Time Perception and Its Illusions // *Current Opinion in Neurobiology*. 18, pp. 131–136 (2008). doi:10.1016/j.conb.2008.06.002
- [13]. Claudia Hammond. *Time Warped: Unlocking the Mysteries of Time Perception* // Publisher Harper Perennial, Livebook, pp. 368 (2013). http://www.claudiahammond.com.
- [14]. Kobozev N. I. *Studying thermodynamics of information and reasoning*. Moscow State University Press, M. (1971).
- [15]. Henri F. Ellenberger. *The Discovery of the Unconscious: The History and Evolution of Dynamic Psychiatry*. Basic Book, New York (1970).

[16]. Jiří Zeman. Information and the Brain //Progress in Brain Research. 2, pp. 70–77 (1963). [https://doi.org/10.1016/S0079-6123\(08\)62078-6](https://doi.org/10.1016/S0079-6123(08)62078-6)

[17]. J. B. Hirsh, R. A. Mar, J. B. Peterson. Psychological entropy: a framework for understanding uncertainty-related anxiety // Psychol Rev. 119, pp. 304–320 (2012). doi: 10.1037/a0026767

[18]. Erwin Schrödinger. What Is Life? The Physical Aspect of the Living Cell. Cambridge: University Press (1962).

[19]. G. J. Whitrow, J. T. Fraser, and M. Soulsby. What is Time?: The Classic Account of the Nature of Time. Oxford University Press. New York (2003).

[20]. Michael H. Herzog, Aaron Schurger, Adrien Doerig. First-person experience cannot rescue causal structure theories from the unfolding argument // Consciousness and Cognition., 98, pp. 103261 (2022). doi.org/10.1016/j.concog.2021.103261

## 7. SUMMARY FOR THE NON-SPECIALIST (LAYMAN)

The study of human perception of time has a lack of mathematical dependencies that could describe quantitatively such phenomena. The author suggested the quantitative dependence of changes in psychological time on temperature in a particular biosystem and introduced a new interpretation of the term "entropy" in the sense of "psychological entropy" as a parameter characterizing the current physical/mental state. It opens the possibility to apply quantitative (physical) methods to the biophysical problems. The article substantiates the influence of the synergy of two modes of thinking: Conscious and Subconscious on the strengthening of the brain functional capacity and clarifies the conditions for effective involvement of the subconscious

mode. Just the original nature of the research and a completely new result for quantitative characteristics of such a delicate object as consciousness are of great interest to researchers and contribute to deepening understanding of the thinking process in general and further involvement of physical methods. A major international journals in Philosophy, Psychology, and Neuroscience invite interdisciplinary research, including physical and biophysical ones. The paper fully consistent with this area. If we want to understand our consciousness, we must not be afraid to break new ground; just such new way gave new result.

## 8. LIST OF DESIGNATIONS

$t_{ps}$  is psychological (human) time  
 $\delta t_{ps}$  is deceleration/acceleration of the psychological time  
 $\delta T$  is normalized body temperature  $\delta T = (t_C - t_C^n)$   
 $t_C$  is the current human body temperature  
 $t_C^n$  is the usual normal human body temperature  
 $S_{ps}$  is psychological entropy characterizing human psycho-emotional state  
 $\delta S_{ps}$  is changing of psychological entropy  
 $D_{ps}$  is some unknown constant that characterizes the studied system  
 $\Delta t_{ps}$  is the interval of subjective time as perception  
 $\Delta t_{cl}$  is interval measured data of chronometer (clock)

**Yaroslav Mykhailovych Olikh** – Professor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Department of Electrical and Kinetic phenomena and polaritonics, V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, the National Academy of Sciences of Ukraine. *E-mail*: jaroluk3@ukr.net. *Tel.*: +38(067) 7509028

Стаття надійшла до редакції 29.11.2022 р.

## ON THE PHYSICAL NATURE OF SUBJECTIVE PSYCHOLOGICAL TIME

*Yaroslav Olikh*

V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, National Academy of Sciences of Ukraine,  
Kyiv, Ukraine; e-mail: jaroluk3@ukr.net

### Summary

A simple temperature dependence of rate changing a psychological time  $t_{ps}(t_c)$  in human was suggested:  $(\partial t_{ps} / \partial S_{ps}) = D_{ps} \cdot \delta T$ , where  $D_{ps}$  is some constant,  $S_{ps}$  is the psychological entropy, characterizing current human physical/mental state;  $\delta T$  is the normalized body temperature  $\delta T = (t_c - t_c^n)$ ,  $t_c$  – the now temperature and  $t_c^n$  – the usual normal human body temperature. This dependence as an empirical result of personal experience in “perception” of time intervals (~10 min) at high body temperature ( $t_c \geq 38,2^\circ\text{C}$ ) was ascertained. It has been shown the determining factor to successfully finding the task of quantitatively estimating a duration and changing rate of the psychological time there is cooperation of two thinking components – consciousness and subconsciousness. The optimal physical conditions for involving the subconscious results in significant strengthening of the brain capacity (synergy effect) were found out. These are situations when the exchange of energy and information from the outside is temporarily essentially weakened, and the human can be considered as isolated; a rise in body temperature and sleep corresponds to this. The possible application of the formulas obtained for analyzing the changes of psychological time with temperature and entropy was suggested. In particular, the conditions for not only “slowing down” but also “acceleration” of psychological time were emphasized. Also, it has been explained why an emergence of “non-obvious” (subconscious) ideas needs for high temperature. Using on the calculations performed the graphical temperature dependences  $\delta T$ ,  $\delta t_{ps}$  ( $D_{ps} \cdot \Delta S_{ps}$ ) were plotted, that confirmed the expected growth of these parameters.

**Keywords:** time perception, psychological time, psychological entropy, subconsciousness



УДК: 159.961:536.756:115

DOI: 10.18524/1815–7459.2022.4.271199

## ПРО ФІЗИЧНУ ПРИРОДУ СУБ'ЄКТИВНОГО ПСИХОЛОГІЧНОГО ЧАСУ

*Ярослав Оліх*

Інститут фізики напівпровідників ім. В. Лашкарьова НАН України, Київ, Україна;

e-mail: jaroluk3@ukr.net

### Реферат

Запропоновано просту залежність зміни психологічного часу з температурою  $\delta t_{ps}(t_c)$ :  $(\partial t_{ps} / \partial S_{ps}) = D_{ps} \cdot T (D_{ps} - \text{Const}, S_{ps})$  – ентропія, параметр, що характеризує фізично-психічний (або: фізично-емоційний) стан людини;  $T = (t_c - t_c^n)$ ,  $t_c^n$  – нормальна температура тіла). Цю залежність встановлено на основі аналізу особистого досвіду (experience) сприйняття конкретних проміжків часу (~10 хв), які проявилися за умови високої ( $t_c \geq 38,2^\circ\text{C}$ ) температури тіла. Показано, що співпраця паралельно двох фаз мислення – Свідомої й Підсвідомої, значно посилює функціональні можливості мозку (ефект синергії) і є визначальним чинником успішного розв'язання проблеми, недосяжного в кожній фазі окремо. З'ясовано оптимальні фізичні умови залучення підсвідомої фази мислення для розв'язку важливих завдань, що виникають в умовах високого емоційного (фізичного) навантаження. По-перше, це ситуації, коли тимчасово суттєво призупинено (послаблено) зовнішній обмін енергією й інформацією, а систему (людський організм) можна характеризувати як ізольовану; вважаємо, що стан сну відповідає такій ситуації. По-друге, це потреба додаткового допливу енергії до мозку; таким внутрішнім джерелом (на нейронній рівні) може бути підвищення температури тіла. Розглянуто можливе застосування отриманих формул для аналізу температурних змін психофізичних параметрів; побудовано графічні залежності  $T(t_c)$ ,  $\delta t_{ps}(t_c)$ ,  $(D_{ps} \cdot \Delta S_{ps})(t_c)$ , які підтвердили очікуване зростання цих параметрів. Обговорено умови (обставини), за яких можливе не тільки «сповільнення», а й «прискорення» психологічного часу в системі, тобто  $\Delta S_{ps} < 0$  або  $T < 0$ . Пояснено, зокрема, важливість (потребу) високої температури для появи «неочевидних» (підсвідомих) ідей.

**Ключові слова:** сприйняття часу; психологічний час; ентропія; підсвідомість.

UDC621.382.2

DOI: 10.18524/1815–7459.2022.4.271200

**DETECTION OF SIGNS OF DEGRADATION  
OF PHOSPHIDE-GALLIUM LEDS BY THE LEVEL  
OF LOW-FREQUENCY NOISES**

*I. M. Vikulin, B. V. Korobitsin, P. Yu. Markolenko, O. A. Nazarenko*

State University of Intellectual Technologies and Communications  
Ukraine, 65029. Odessa, 1 Kuznechna str.,  
phone (048) 705 0411, e-mail: markolenkop@gmail.com

**DETECTION OF SIGNS OF DEGRADATION  
OF PHOSPHIDE-GALLIUM LEDS BY THE LEVEL  
OF LOW-FREQUENCY NOISES**

*I. M. Vikulin, B. V. Korobitsin, P. Yu. Markolenko, O. A. Nazarenko*

**Abstract.** The results of measurements of low-frequency noises of light-emitting diodes are considered. It has been established that LEDs with an increased level of noise or with anomalous their growth kinetics in the first hours of testing are potentially unreliable, that is, they show further rapid or catastrophic degradation (failure). The prospects of noise measurements for the selection of LEDs in terms of reliability are shown.

**Keywords:** LED, noise, degradation

**ВИЯВЛЕННЯ ОЗНАК ДЕГРАДАЦІЇ ФОСФІД-ГАЛІЄВИХ СВІТЛОДІОДІВ  
ЗА РІВНЕМ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ ШУМІВ**

*I. M. Вікулін, Б. В. Коробіцин, П. Ю. Марколенко, О. А. Назаренко*

**Анотація.** Розглядаються результати вимірювань низькочастотних шумів світлодіодів. Встановлено, що світлодіоди з підвищеним рівнем шумів або з аномальною кінетикою зростання в перші години випробувань потенційно ненадійні, тобто виявляють надалі швидко чи катастрофічну деградацію (відмова). Показана перспективність шумових вимірів для відбору світлодіодів за показниками надійності.

**Ключові слова:** світлодіод, шум, деградація

The assessment of the reliability of semiconductor devices that are part of electronic devices is becoming increasingly important due to the complication of these devices and the increasing requirements for their reliability. An important feature of LEDs is that there is a gradual decrease in their luminous flux, while the issue of reducing the flux, that is, LED degradation, is of particular relevance.

The degradation of LEDs is studied by various authors from different angles of view, due to technological and metrological capabilities and challenges. The paper [1] describes the results of accelerated tests of gallium phosphide LEDs in the forced mode. This allows for a relatively short test time to determine the median resource of a batch of LEDs – the time to halve the brightness. At the same time, it was not possible to determine the service life of each LED separately.

The works [2–3] describe testing of LEDs at elevated temperatures and current densities. The decisive role of current density in the degradation process was confirmed and it was recommended to avoid high current loads.

Measurements of the noise characteristics of semiconductor devices also make it possible to draw conclusions about their reliability [4–5]. Of greatest interest are low-frequency noises, which are caused by various defects in the structures of devices. These noises are sometimes called flicker noise or  $1/f$  noise. Experimental studies have shown that often the main cause of  $1/f$  noise is the presence of states near the interface between the semiconductor and protective layers. Fluctuations in the density of surface states cause a change in the space charge in the depletion region and, as a consequence, change the potential barrier [6]. This entails current fluctuations through the p-n junction (noises).

Various volumetric inhomogeneities (impurities, dislocations, microcracks), being trapping centers, also strongly affect the passage of current through the p-n junction. As a result of relatively slow diffusion processes, the impurity concentration in the region of the p-n junction is equalized, the transition is broadened, and impurities diffuse along dislocations, which is accompanied by an increase in low-

frequency noises. Thus, an increase in noise is a sign of degradation of the active regions of the semiconductor structure, which can lead to a complete failure.

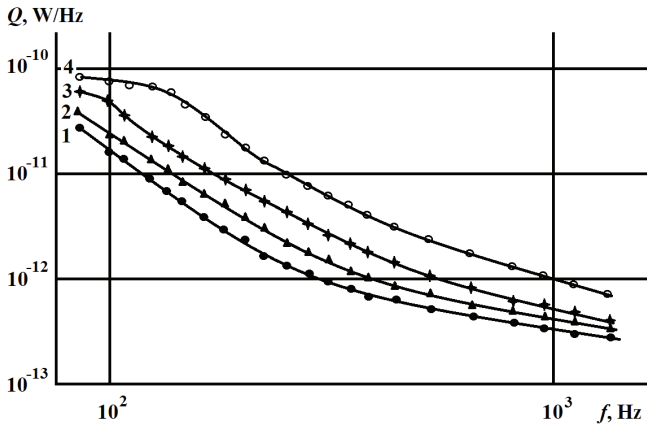
The purpose of the article is to develop a method for rejecting unreliable light emitting diodes (LEDs), in a short test time, using the example of gallium phosphide LEDs.

In this work, gallium phosphide LED sign indicators of the ALS321A type were studied the dependence of their noise and light characteristics were investigated. The light-emitting segments, identical in properties, were turned on one at a time, since when all segments are turned on simultaneously, their temperatures are different due to their different location on the sign indicator. The maximum allowable current of 25 mA was passed through the segments. The spectral density of the current noise was measured from the voltage drop across the etalon resistor with a selective microvoltmeter V6–2. The brightness of the glow was measured by a silicon photocell in the short circuit mode in relative units. The Noise Power Spectral Density (NPSD) is obtained by multiplying the current noise by the LED voltage and dividing by the bandwidth of the microvoltmeter (0.15 of the set frequency).

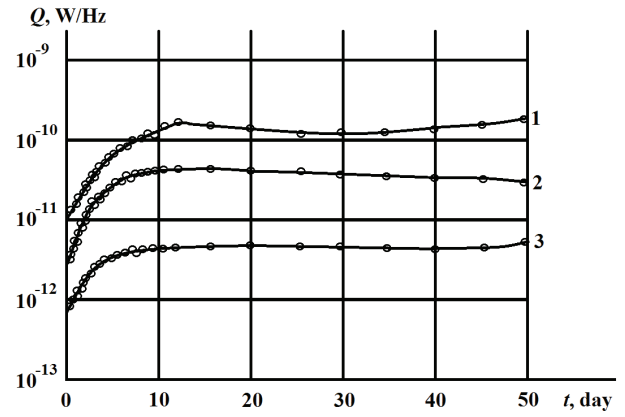
The measurement results are shown in Fig.1–3.

Figure 1a shows the NPSD (denoted by  $Q$ ) of a typical LED sample No. 15, segment A, measured before operation (curve 1), after 1 day (curve 2), 3 days (curve 3) and 8 days (curve 4). Figure 1b shows the dependences of the NPSD on the operating at frequencies of 100 Hz (curve 1), 180 Hz (curve 2), and 540 Hz (curve 3). As can be seen from Fig. 1a, b the noise spectrum corresponds to the form  $1/f$ , and as time goes by, the noise sharply increases in the first 10 days, becoming practically constant in the future up to 50 days (1200 hours) and slightly increasing after this period. Further operation showed a high brightness stability of this LED.

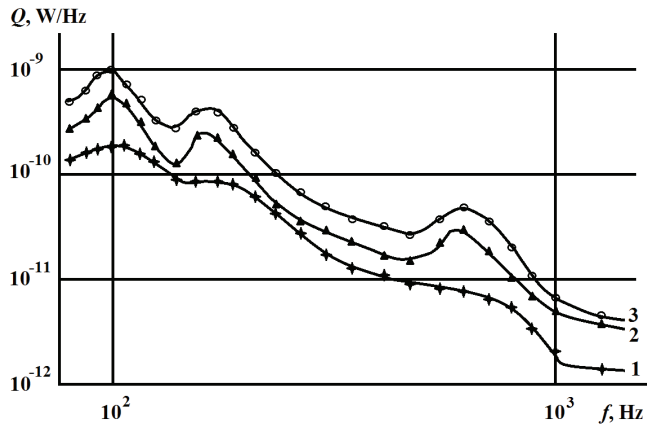
Figure 2a shows the noise characteristics of LED sample No. 31, segment G, measured before operation (curve 1), after 2 days of operation (curve 2), and after 10 days of operation (curve 3).



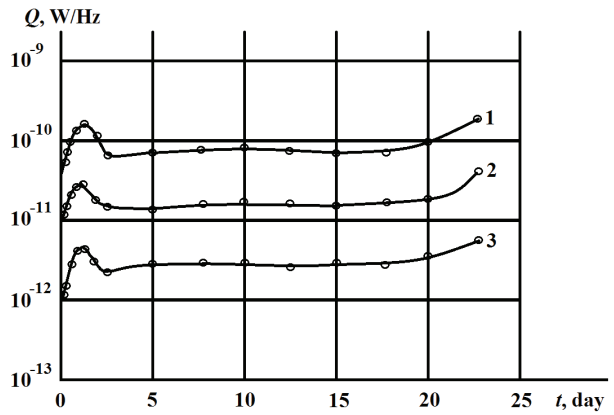
**Fig. 1a.** NPSD LED sample No. 15, segment A, with operation: 1-0 day, 2-1 day, 3-3 days, 4-8 days.



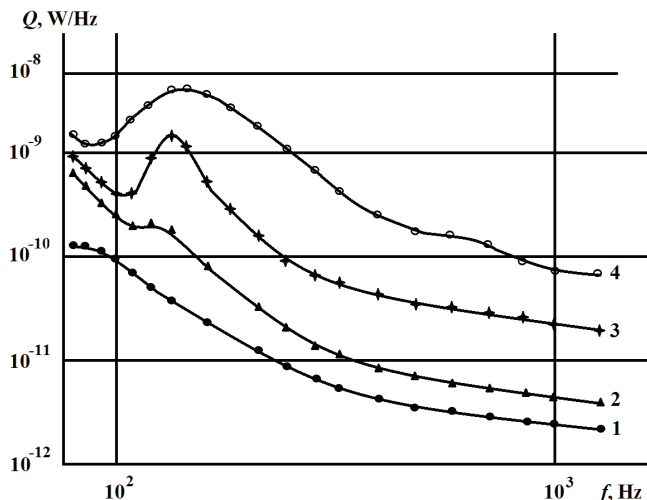
**Fig. 1b.** Dependences of NPSD LED sample No. 15, segment A, on the operating time at frequencies: 1-100 Hz, 2-180 Hz, 3-540 Hz.



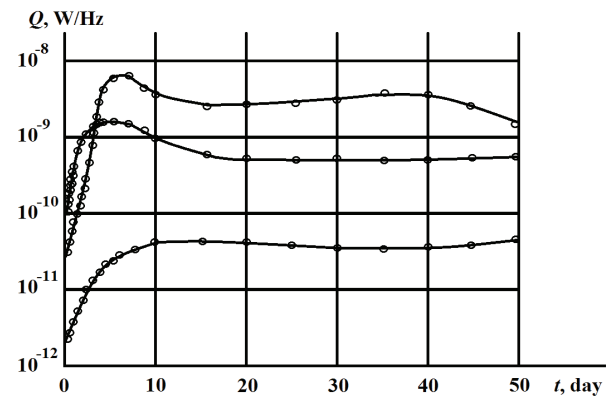
**Fig. 2a.** NPSD LED sample No. 31, segment G, with operation: 1-0 day, 2-2 days, 3-10 days.



**Fig. 2b.** Dependences of NPSD LED sample No. 31, segment G, on the operating time at frequencies: 1-200 Hz, 2-500 Hz, 3-1000 Hz.



**Fig. 3a.** NPSD LED sample No. 9, segment C, with operation: 1-0 day, 2-3 day, 3-5 days, 4-8 days.



**Fig. 3b.** Dependences of NPSD LED sample 9, segment C, on the operating time at frequencies: 1-80 Hz, 2-160 Hz, 3-1000 Hz.

Figure 2b shows the dependences of the noise spectral density on the operating time at frequencies of 200 Hz (curve 1), 500 Hz (curve 2), and 1000 Hz (curve 3). As can be seen from Fig. 2a, b, the noise spectrum of the original LED differs from  $1/f$  by the presence of three blurred maxima in the frequency range of 100–1000 Hz, and by the fact that after operating in the first 1–2 days, the noise increases sharply in the future. After 530 hours of operation, this LED segment experienced catastrophic degradation (failure). It should be noted that the initial noise level at a frequency of 100 Hz was an order of magnitude higher than that of LED No. 15, segment A.

Figure 3a shows the NPSD LED No. 9, segment C, measured before operation (curve 1), after operation for 3 days (curve 2), 5 days (curve 3), and 8 days (curve 4). Figure 3b shows the dependences of the NPSD on the operating time at frequencies of 80 Hz (curve 1), 160 Hz (curve 2), and 1000 Hz (curve 3). As can be seen from Fig. 3a, b, the noise spectrum of the original LED is characterized by an increased level, and with operation, it becomes anomalous in the form of a predominance of noise in the region of 160 Hz and, in general, it has a very high noise level in the entire frequency range. This LED rapidly begins to decrease in brightness, the emission spectrum shifts to the long-wavelength region, i.e. significant degradation is observed.

In conclusion, it should be said that measuring the noise characteristics of LEDs in the low-frequency region, when identifying devices with an increased initial noise level, allows them to be rejected as potentially unreliable. The identification of devices with a non-monotonous initial  $1/f$  noise spectrum and with an anomalous growth of noise in the first day at the maximum allowable current makes it possible to reject specimens that are prone to

catastrophic degradation (failure) within several tens of days of operation.

The considered measures make it possible to significantly improve the reliability indicators of the studied LED batch either immediately or in 2–3 days of testing at the stand.

## References

- [1]. L. P. Egorov, S. S. Nikiforov, V. A. Vorotinsky Forsirovannyye ispytaniya dlya otsenki nadezhnosti svetoizluchayushchikh priborov. *Electronic engineering. Series 2. Semiconductor devices.* No. 7, pp. 113–116. 1989.
- [2]. I. M. Vikulin, V. I. Irha, B. V. Korobitsyn, V. E. Gorbachev *Zakonomernosti degradatsii svetoizluchayushchikh diodov. Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature.* No. 2, pp. 55–56. 2004.
- [3]. A. A. Polishchuk, A. V. Turkin *Degradatsiya poluprovodnikovyykh svetodiodov na osnove nitrida galliya i yego tverdykh rastvorov. Komponenty i tekhnologii.* No. 2, pp. 25–28. 2008.
- [4]. A. A. Chernyshov *Osnovy nadezhnosti poluprovodnikovyykh priborov i integralnykh mikroskhem [monografiya].* Radio i svyaz, M. 256 p. 1988.
- [5]. N. N. Averkiev, M. E. Levinshtein, P. V. Petrov *Osobennosti rekombinatsionnykh protsessov v svetodiodakh na osnove InGaN/GaN pri bolshikh plotnostyakh toka.* *Letters to JTF.* vol. 35. No. 19, pp. 97–102. 2009.
- [6]. R. V. Viter, V. S. Grinevich, I. K. Deutscho et al. *Neravnovesnyye protsessy v sensorykh nanostrukturakh.* Under the general ed. V. A. Smyntyna, I. I. Mechnikov NU, Odesa. 2015.

Стаття надійшла до редакції 29.11.2022 р.

UDC621.382.2

DOI: 10.18524/1815–7459.2022.4.271200

## DETECTION OF SIGNS OF DEGRADATION OF PHOSPHIDE-GALLIUM LEDS BY THE LEVEL OF LOW-FREQUENCY NOISES

*I. M. Vikulin, B. V. Korobitsin, P. Yu. Markolenko, O. A. Nazarenko*

State University of Intellectual Technologies and Communications  
Ukraine, 65029. Odessa, 1 Kuznechna str.,  
phone (048) 705 0411, e-mail: markolenkop@gmail.com

### Summary

The results of measurements of low-frequency noises of light-emitting diodes are considered. It has been established that LEDs with an increased level of noise or with anomalous their growth kinetics in the first hours of testing are potentially unreliable, that is, they show further rapid or catastrophic degradation (failure). Measurement of the noise characteristics of LEDs in the low-frequency region, when identifying devices with an increased initial noise level, allows them to be rejected as potentially unreliable. The identification of devices with a non-monotonous initial  $1/f$  noise spectrum and with an anomalous growth of noise in the first day at the maximum allowable current makes it possible to reject specimens that are prone to catastrophic degradation (failure) within several tens of days of operation.

The prospects of noise measurements for the selection of LEDs in terms of reliability are shown.

**Keywords:** LED, noise, degradation

УДК 621.382.2

DOI: 10.18524/1815–7459.2022.4.271200

## ВИЯВЛЕННЯ ОЗНАК ДЕГРАДАЦІЇ ФОСФІД-ГАЛІЄВИХ СВІТЛОДІОДІВ ЗА РІВНЕМ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ ШУМІВ

*I. M. Вікулін, Б. В. Коробіцин, П. Ю. Марколенко, О. А. Назаренко*

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку  
вул. Кузнечна 1, 65029, м. Одеса, Україна,  
тел. (048) 705 0411, e-mail: markolenkop@gmail.com

### Реферат

Розглядаються результати вимірювань низькочастотних шумів світлодіодів. Встановлено, що світлодіоди з підвищеним рівнем шумів або з аномальною кінетикою зростання в перші години випробувань потенційно ненадійні, тобто виявляють надалі швидко чи катастрофічну деградацію (відмова). Вимірювання шумових характеристик СВД в області низьких частот при виявленні приладів з підвищеним вихідним рівнем шумів дозволяє відбракувати їх як потенційно ненадійні. Виявлення ж приладів з не монотонним вихідним спектром  $1/f$  шуму і з аномальним ходом зростання шумів у першу добу при максимально допустимому струмі дозволяє відбракувати екземпляри, схильні до катастрофічної деградації (відмови) протягом декількох десятків діб експлуатації.

Показана перспективність шумових вимірів для відбору світлодіодів за показниками надійності.

**Ключові слова:** світлодіод, шум, деградація

PACS: 61.46.+w, 42.25.Bs, 07.07.Df  
DOI: 10.18524/1815–7459.2022.4.271202

## ЛЮМІНЕСЦЕНЦІЯ КОЛОЇДНИХ НАНОКРИСТАЛІВ CdSe:Cu

*Ю. А. Ніцук, О. В. Карауш, Я. І. Леніх, Ю. Ф. Ваксман, Г. В. Коренкова*

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, Одеса, Україна

## ЛЮМІНЕСЦЕНЦІЯ КОЛОЇДНИХ НАНОКРИСТАЛІВ CdSe:Cu

*Ю. А. Ніцук, О. В. Карауш, Я. І. Леніх, Ю. Ф. Ваксман, Г. В. Коренкова*

**Анотація.** Досліджено люмінесценцію колоїдних нанокристалів CdSe:Cu. Встановлено, що легування атомами міді не призводить до помітної зміни розміру нанокристалітів. Зсув ширини забороненої зони при легуванні можна пояснити міждомішковою кулонівською взаємодією між частинками. Показано, що легування міддю призводить до гасіння екситонної люмінесценції CdSe. Встановлено, що довгохвильова люмінесценція CdSe:Cu зумовлена переходами всередині донорно-акцепторних пар, до складу яких входять власні та домішкові дефекти Cu.

**Ключові слова:** нанокристали CdSe:Cu, колоїдний синтез, оптичне поглинання, фотолюмінесценція, власні дефекти, донорно-акцепторні пари

## LUMINESCENCE OF COLLOIDAL CdSe:Cu NANOCRYSTALS

*Yu. A. Nitsuk, O. V. Karaush, Ya. I. Lepikh, Yu. F. Vaksman, G. V. Korenkova*

**Abstract.** The luminescence of Colloidal CdSe:Cu nanocrystals was studied. It is shown that copper doping does not lead to a noticeable change in the size of nanocrystallites. The change in the band gap width can be explained by the inter-impurity Coulomb interaction. It is shown that copper doping leads to quenching of exciton luminescence of CdSe. It is established that the long-wave luminescence of CdSe:Cu is caused by transitions within the donor-acceptor pairs, which include intrinsic and impurity Cu defects.

**Keywords:** CdSe:Cu nanocrystals, Cu impurity, optical absorption, photoluminescence, native defects, donor-acceptor pairs

### ВСТУП

Наночастинки CdSe отримали широке застосування в якості модельних наночастинок при дослідженні властивостей наноматеріалів. На основі досліджень CdSe опубліковано перші роботи [1], що показали прояв квантово-розмірного ефекту в спектрах оптичного поглинання та фотолюмінесценції. Простота виробництва та ефективне екситонне випро-

мінювання наночастинок CdSe у видимому та ближньому ІЧ-діапазоні зробили цей матеріал одним із найперспективніших у біомедичній візуалізації. Наночастинки CdSe, кон'юговані з антитілами, використовували для діагностики вірусних інфекцій на ранній стадії [2]. На основі нанокристалів CdSe сконструйовані світлодіоди, активні середовища для лазерів та сонячні елементи [3–5]. В хімічних сенсорах

нанокристали CdSe використовуються для виявлення небезпечних газів [6].

Найпростішим і найдешевшим способом отримання наночастинок CdSe є колоїдний синтез. Недоліком цього методу є велика дисперсія отриманих частинок і, як наслідок, велика флуктуація спектральних характеристик. Іншим недоліком є неконтрольоване легування нанокристалів CdSe атомами прекурсорів. Є два способи уникнути цього:

1. Розробка нових методів синтезу для отримання наночастинок з регульованим у часі розміром.

2. Отримання ефективного внутрішньо-центрального випромінювання або випромінювання на донорно-акцепторних парах, на яке не впливає ширина забороненої зони (розмір) нанокристалу. Це може відкрити більш широкі перспективи застосування нанокристалів в різних зовнішніх умовах. Тому дослідження довгохвильової фотолюмінесценції нанокристалів, визначення природи власних і домішкових дефектів в них є актуальним.

У даній роботі нами розроблено методику отримання нанокристалів CdSe:Cu розміром 3–6 нм. Досліджено фотолюмінесценцію нелегованих та легуваних Cu кристалів CdSe. Показано, що розмір нанокристалів CdSe:Cu не впливає на спектральні характеристики довгохвильового випромінювання.

Метою даної роботи є визначення природи центрів, відповідальних за довгохвильове випромінювання нанокристалів CdSe:Cu.

## МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Досліджено нанокристали, отримані методом колоїдного синтезу. Джерелом іонів кадмію був 10% водний розчин нітрату кадмію, а джерелом іонів селену – 10% розчин селеносульфату натрію. Легування атомами Cu проводили шляхом додавання 1% розчину хлориду міді до розчину нітрату кадмію. В якості стабілізатора росту наночастинок використовували 5% розчин желатину. Встановлено, що ефективно вбудовування атомів Cu в підґратку кадмію відбувається після 5 хвилин нагріван-

ня розчину при  $T=373$  К. Для дослідження оптичного поглинання та фотолюмінесценції на скляні підкладки наносили плівки.

Дослідження оптичного поглинання проводили за допомогою монохроматора МДР-6 з двома дифракційними ґратками 1200 штр/мм. В якості приймача світлового потоку використовувався фотопомножувач ФЕУ-100.

Спектри фотолюмінесценції досліджували на призматичному монохроматорі ІСП-51 з ФЕУ-100 в якості приймача випромінювання. Для збудження випромінювання використовувався напівпровідниковий лазер з довжиною хвилі 400 нм. Для дослідження температурної залежності інтенсивності фотолюмінесценції використовували кріостат, що дозволяв проводити дослідження в температурному діапазоні 77–400 К. Температурні залежності інтенсивностей фотолюмінесценції, аналізовані в координатах  $\ln(I)$  від  $1/T$ , дають в області гасіння пряму лінію, по нахилу якої визначали енергію активації процесу температурного гасіння.

Розмір наночастинок оцінювали за зсувом краю фундаментального поглинання в наближенні ефективних мас (табл. 1) за формулою Вонга [7].

Таблиця І.  
Результати розрахунків оптичного поглинання

№ .	Cd(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , Na <sub>2</sub> SeSO <sub>3</sub>	CuCl <sub>2</sub> концентрації	E <sub>g</sub> , eV	ΔE <sub>g</sub> , eV	R, нм
1.	0.02%	-	3.2	1.5	3
2.	0.03%	-		1.23	3.5
3.	0.05%	-	2.40	0.7	4.6
4.	0.02%	0.001% (2·10 <sup>17</sup> cm <sup>-3</sup> )	3.18	1.48	3.1
5.	0.02%	0.005% (2·10 <sup>18</sup> cm <sup>-3</sup> )	3.12	1.42	3.2
6.	0.02%	0.01% (4·10 <sup>19</sup> cm <sup>-3</sup> )	2.9	1.2	3.5

Результати розрахунків підтверджені дослідженнями скануючого електронного мікроскопу (СЕМ). На рис. 1 показано утворення наночастинок CdSe:Cu розміром 3–6 нм.



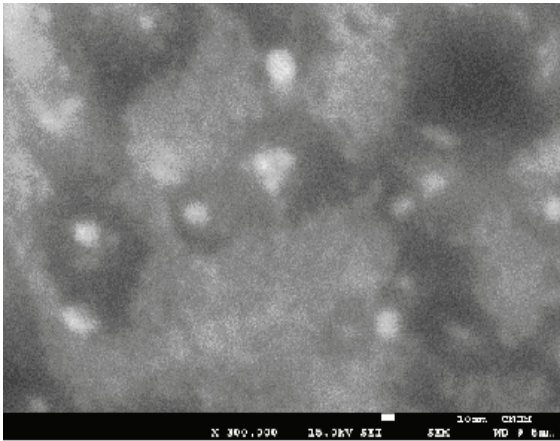


Рис. 1. СЕМ-зображення нанокристалів CdSe:Cu.

### ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИЧНОГО ПОГЛИНАННЯ

Дослідження оптичного поглинання проводили в діапазоні довжин хвиль 370–800 нм. На рис. 2 наведено спектри поглинання нелегованих нанокристалів CdSe. встановлено, що зі збільшенням концентрації прекурсорів край поглинання зсувається в область менших енергій, що підтверджується зміною кольору розчинів. Це пов'язано зі збільшенням розмірів нанокристалітів (табл. 1).

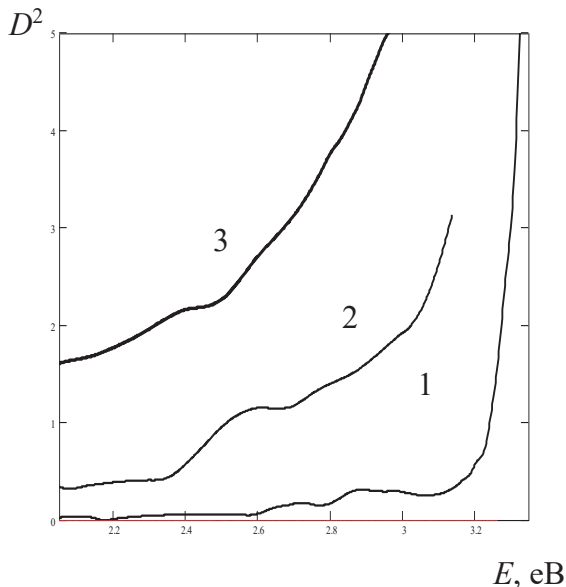


Рис. 2. Спектри оптичного поглинання нанокристалів CdSe.  $[Cd(NO_3)_2]$ ,  $[Na_2SeSO_3]$  дорівнюють 0.02 (1), 0.03 (2) та 0.05% (3).

Легування Cu призводить до зсуву краю поглинання в область менших енергій порівняно з відповідними нелегованими нанокристалітами (рис. 3).

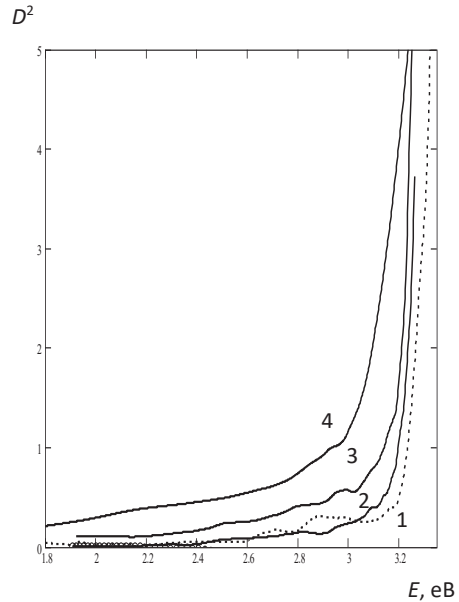


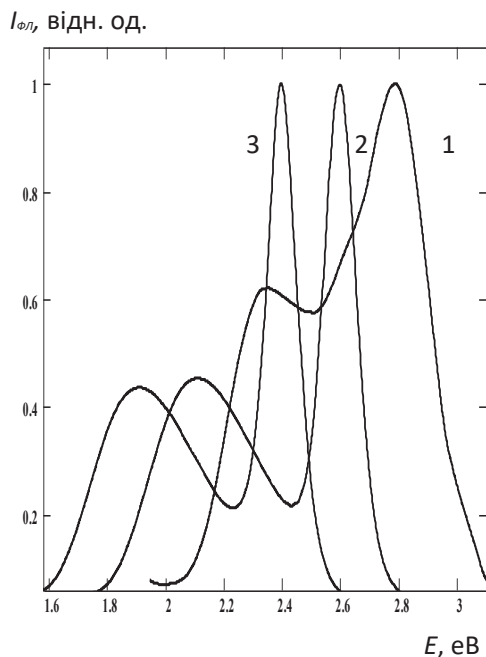
Рис. 3. Спектри оптичного поглинання нанокристалів CdSe (1) та CdSe:Cu (2-4).  $[CuCl_2]$  дорівнюють 0.001 (2), 0.005 (3) та 0.01% (4).

Величина зсуву становить 20–70 нм. Така поведінка спектрів поглинання при легуванні наночастинок атомами міді досліджувалася раніше в [7] і пояснювалася наявністю міждомішкової кулонівської взаємодії. Співвідношення було використано для визначення концентрації оптично активної домішки міді.

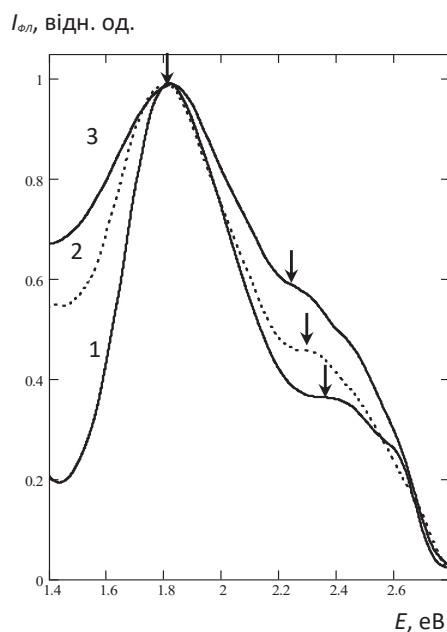
### ДОСЛІДЖЕННЯ ФОТОЛЮМІНЕСЦЕНЦІЇ

Спектри фотолюмінесценції щойно синтезованих нанокристалів CdSe наведені на рис. 4. Спектри характеризуються наявністю однієї високоенергетичної смуги випромінювання, положення якої корелює з положенням краю поглинання на рис. 2. Подібні лінії випромінювання в колоїдних нанокристалітах CdSe, отриманих за схожою методикою, спостерігалися нами раніше в [8].

Після термообробки в спектрах фотолюмінесценції з'являється додаткова низькоенергетична смуга випромінювання в області



**Рис 4. Спектри фотолюмінесценції нанокристалів CdSe. [CdNO<sub>3</sub>], [Na<sub>2</sub>SeSO<sub>3</sub>] = 0.02 (1), 0.03 (2) та 0.05% (3).**



**Рис. 5. Фотолюмінесценція нанокристалів CdSe:Cu. [CuCl<sub>2</sub>] = 0.001 (1), 0.005 (2) та 0.01% (3).**

600–700 нм. Її положення корелює з положенням високоенергетичної смуги. При зміні температури зразків від 293 до 400 К максимум цієї смуги випромінювання зсувається в область менших енергій на 0.07 еВ. Цей зсув відповідає температурному зсуву забороненої зони CdSe. З дослідження температурного гасіння люмінесценції в області 700 нм визначено енергію активації центрів люмінесценції 0.14 еВ, що в CdSe відповідає акцепторним центрам Na<sub>Cd</sub> [8]. Присутність атомів натрію в нанокристалах пояснюється його присутністю в прекурсорах і низькою температурою гідролізу солей натрію (Na<sub>2</sub>SeSO<sub>3</sub> і NaNO<sub>3</sub>).

Легування нанокристалів CdSe міддю призводить до помітного гасіння високоенергетичної лінії випромінювання (рис. 5).

Разом з тим, в спектрах випромінювання нанокристалів CdSe:Cu виникають дві широкі смуги випромінювання в зеленій (2.4 еВ) та червоній (1.85 еВ) області (рис. 5). Перша смуга змінювала положення максимуму при зміні концентрації міді та температури зразків. За температурною залежністю інтенсивності випромінювання визначена енергія активації 0.3 еВ. В об'ємних кристалах CdSe:Cu раніше

[9] спостерігались випромінювальні переходи електронів із зони провідності на глибокі акцепторні рівні міді (Cu<sub>Cd</sub><sup>+</sup>) з подібною енергією. Ми припускаємо, що досліджувана фотолюмінесценція на 2.4 еВ має подібну природу.

Друга смуга випромінювання на 1.85 еВ не змінювала положення максимуму при зміні температури і концентрації домішки міді.

Температурне гасіння люмінесценції цій області характеризується кривою з двома лінійними ділянками. Такі залежності з двома лінійними ділянками гасіння пояснюються в рамках моделі випромінювальної рекомбінації, що здійснюється на донорно-акцепторних парах. У цьому випадку енергія випромінюваного кванта визначається рівнянням

$$h\nu = E_g - E_d - E_a + \frac{e^2}{\epsilon R}, \quad (1)$$

де:  $E_d$ ,  $E_a$  – енергії активації донора і акцептора;  $R$  – відстань між донором і акцептором.

В області низьких температур спостерігалось слабке гасіння люмінесценції з енергією активації близько 0.06 еВ. Така енергія активації в селенідах цинку та кадмію відповідає вакансіям селену  $V_{Se}^+$ .

Енергія активації, визначена у високо-температурній області становить 0.8 eВ, що дорівнює різниці ( $E_a - e^2/\epsilon R$ ). Згідно досліджень [9], в об'ємних кристалах таким глибоким акцепторам можуть відповідати центри  $\text{Cu}_{\text{Cd}}^{2-}$ .

В [10] довгохвильове випромінювання  $\text{CdSe}:\text{Cu}$  пов'язують з асоціативними центрами  $(\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}, (\text{V}_{\text{Cd}}^{-}, \text{Cu}_1^{2+})^+)$ . Ми вважаємо, що енергія активації 0.06 eВ не може відповідати асоціативним донорним рівням, тому більш ймовірними бачимо асоціативні центри  $(\text{V}_{\text{Se}}^{+}, \text{Cu}_{\text{Cd}}^{2-})$ . Відсутність внутрішньоцентрових випромінювальних переходів іонів  $\text{Cu}$  в цій області спектру підтверджується відсутністю домішкових ліній поглинання.

Таким чином, червона смуга випромінювання в нанокристалах  $\text{CdSe}:\text{Cu}$  пов'язана з випромінювальними переходами всередині донорно-акцепторних пар. Наявність кількох стійких елементарних ліній випромінювання в цій смузі можна пояснити утворенням донорно-акцепторних пар з різною відстанню між донорами та акцепторами.

## ВИСНОВКИ

В результаті проведених досліджень показано, що легування міддю призводить до появи ефективного випромінювання на донорно-акцепторних парах, на спектральні характеристики якого не впливають зміни ширини забороненої зони зі зміною розмірів нанокристалітві температури нанокристалітів. Показано, що при легуванні міддю край фундаментального поглинання зсувається в область менших енергій. Максимальну концентрацію оптично активної домішки міді визначали за величиною зсуву, яка становила  $4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  у нанокристалах із вмістом 0,01%  $\text{CuCl}_2$ . Довгохвильова люмінесценція зумовлена переходами всередині донорно-акцепторних пар, до складу яких входять власні дефекти та атоми міді.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1]. Neeleshwar S., Chen C. L., Tsai C. B., Chen Y. Y. Size-dependent properties of CdSe

quantum dots// Phys. Rev. B.– 2005 – V.71.– P. 2013071–20130714.

[2]. Bentzen E. L., House F., Utley T. J., Crowe J. E., Wright D. W. Progression of respiratory syncytial virus infection monitored by fluorescent quantum dot probes // Nano. Lett.– 2005.– V. 5, N.4.

[3]. Colvin V. L., Schlamp M. C., Alivisatos A. P. Light-emitting diodes made from cadmium selenide nanocrystals and a semiconducting polymer // Nature – 1994.– V. 370.– P. 354–357.

[4]. Klimov V. I., Tretiak S., Anikeeva P. O., Bezel I. V., Balet L. P., Achermann M., Piryatinski A., Nanda J., Ivanov S. A. Light Amplification Using Inverted Core/Shell Nanocrystals: Towards Lasing in the Single-Exciton Regime // Phys. Chem.– 2004.– V. 108.– P. 10625–10630.

[5]. Huynh W. U., Dittmer J. J., Libby W. C., Whitting G. L., Alivisatos P. A. Controlling the Morphology of Nanocrystal–Polymer Composites for Solar Cells // Adv. Funct. Mater.– 2003. V. 13, № 1.– P. 73–79.

[6]. Wang L. G., Pennycook S. J., Pantelides S. T. The role of the nanoscale in surface reactions:  $\text{CO}_2$  on CdSe // Phys. Rev. Lett.– 2002.– V. 89, N.7, P. 2841–2849.

[7]. Nitsuk Yu. A., Kiose M. I., Vaksman Yu. F., Smyntyna, V. A., Yatsunskyi I. R. Optical Properties of CdS Nanocrystals Doped with Zinc and Copper // Semiconductors.– 2019.– V. 53, N3.– P. 361–367.

[8]. Nitsuk Yu. A., Leonenko A. S., Lepikh Ya. I. Colloidal CdSe Nanocrystals as a Material for Optoelectronics and Biomedical Imaging // «UWBUSIS-2018» – 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, Proceedings – 2018.– P. 210–213.

[9]. Kokubun Y., Watanabe H., Wada Masanobu W. Photoluminescence of CdSe Single Crystals // Jap. J. of Appl. Phys.– 1974.– V.13, N.9.– P. 1393–1398.

[10]. Arora B. M., Dale Compton W. Luminescence from impurities and radiation defects in CdSe and CdS// J. Appl. Phys.– 1972 – V. 43, N.11 – P. 4499–4507.

Стаття надійшла до редакції 02.12.2022 р.

PACS: 61.46.+w, 42.25.Bs, 07.07.Df  
DOI: 10.18524/1815–7459.2022.4.271202

## LUMINESCENCE OF COLLOIDAL CdSe:Cu NANOCRYSTALS

*Yu. A. Nitsuk, O. V. Karaush, Ya. I. Lepikh, Yu. F. Vaksman, G. V. Korenkova*

Odesa I. I. Mechnikov National University, Odesa, Ukraine

### Summary

The goal of the study is to establish the nature of the centers responsible for the long-wave emission of CdSe:Cu nanocrystals.

CdSe:Cu nanocrystals obtained by the method of colloidal synthesis were investigated in the study. Doping with a Cu impurity was carried out during the synthesis. The size of the nanocrystals was determined in the approximation of the effective masses by the magnitude of the fundamental absorption edge shift. The results of calculating the size of nanocrystals agree well with the results of SEM studies. The nature of the centers responsible for long-wave radiation was determined by means of studies of the temperature dependence of the photoluminescence intensity.

The obtained results showed that the size of nanocrystals can be influenced by changing the concentrations of cadmium and selenium precursors. It was established that doping with copper atoms does not lead to a noticeable change in the size of nanocrystals. A slight shift in the band gap upon doping with copper can be explained by the inter-impurity Coulomb interaction. It is shown that doping with copper leads to quenching of the excitonic luminescence of CdSe. However, doping with copper leads to the emergence of effective long-wave radiation with a maximum at 1.85 eV. Changing the size of nanocrystals and their temperature did not affect the position of the emission maximum. According to the results of the study of the temperature dependence of the photoluminescence intensity at 1.85 eV, it was established that the long-wavelength luminescence of CdSe:Cu is caused by transitions inside the donor-acceptor pairs, which include intrinsic and impurity defects of Cu.

Thus, as a result of the research, it is shown that Cu impurity doping CdSe nanocrystals during the synthesis process, there is no significant increase in the size of CdSe:Cu nanocrystals. At the same time, during doping, a broad line of long-wave radiation appears on donor-acceptor pairs, the location of which is not affected by the width of the band gap and the temperature of the nanocrystals. The obtained results allow the use of CdSe:Cu nanocrystals as fluorescent markers and luminescent sensors.

**Keywords:** CdSe:Cu nanocrystals, Cu impurity, optical absorption, photoluminescence, native and impurity defects, donor-acceptor pairs

PACS: 61.46.+w, 42.25.Bs, 07.07.Df  
DOI: 10.18524/1815-7459.2022.4.271202

## ЛЮМІНЕСЦЕНЦІЯ КОЛОЇДНИХ НАНОКРИСТАЛІВ CdSe:Cu

*Ю. А. Ніцук, О. В. Карауш, Я. І. Леніх, Ю. Ф. Ваксман, Г. В. Коренкова*

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, Одеса, Україна

### Реферат

Метою дослідження є встановлення природи центрів, відповідальних за довгохвильове випромінювання нанокристалів CdSe:Cu.

В роботі досліджено нанокристали CdSe:Cu, отримані методом колоїдного синтезу. Легування домішкою Cu здійснювалось в процесі синтезу. Розмір нанокристалітів визначався в наближенні ефективних мас за величиною зсуву краю фундаментального поглинання. Результати розрахунку розмірів нанокристалітів добре співпадають з результатами досліджень СЕМ. Природа центрів, відповідальних за довгохвильове випромінювання визначалась за допомогою досліджень температурної залежності інтенсивності фотолюмінесценції.

Отримані результати показали, що зміною концентрацій прекурсорів кадмію та селену можна впливати на розмір нанокристалів. Встановлено, що легування атомами міді не призводить до помітної зміни розміру нанокристалів. Незначний зсув ширини забороненої зони при легуванні міддю можна пояснити міждомішковою кулонівською взаємодією. Показано, що легування міддю призводить до гасіння екситонної люмінесценції CdSe. Разом з тим, легування міддю призводить до виникнення ефективного довгохвильового випромінювання з максимумом на 1.85 еВ. Зміна розмірів нанокристалів та їх температури не впливала на положення максимуму випромінювання. За результатами дослідження температурної залежності інтенсивності фотолюмінесценції на 1.85 еВ встановлено, що довгохвильова люмінесценція CdSe:Cu зумовлена переходами всередині донорно-акцепторних пар, до складу яких входять власні та домішкові дефекти Cu.

Таким чином, в результаті проведених досліджень показано, що при легуванні нанокристалів CdSe домішкою Cu в процесі синтезу не відбувається істотного збільшення розмірів нанокристалів CdSe:Cu. Разом з тим, при легуванні виникає широка лінія довгохвильового випромінювання на донорно-акцепторних парах, на розташування якої не впливає ширина забороненої зони і температура нанокристалів. Отримані результати дозволяють використовувати нанокристали CdSe:Cu в якості флуоресцентних маркерів та люмінесцентних сенсорів.

**Ключові слова:** нанокристали CdSe:Cu, колоїдний синтез, оптичне поглинання, фотолюмінесценція, власні і домішкові дефекти, донорно-акцепторні пари

PACS81.05.Dz, UDC621.32; 535. 37  
DOI: 10.18524/1815–7459.2022.4.271204

**СИНТЕЗ НАНОЧАСТИНОК БЛАГОРОДНИХ МЕТАЛІВ  
ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ У СЕНСОРНИХ ПРИСТРОЯХ,  
ЧАСТИНА 1: СИНТЕЗ НАНОЧАСТИНОК Ag, Au**

*В. М. Скобеєва, В. А. Сминтина, Я. І. Лепіх*

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,  
65082, Одеса, вул. Дворянська, 2, Україна. e-mail: v\_skobeeva@ukr.net

**СИНТЕЗ НАНОЧАСТИНОК БЛАГОРОДНИХ МЕТАЛІВ  
ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ У СЕНСОРНИХ ПРИСТРОЯХ,  
ЧАСТИНА 1: СИНТЕЗ НАНОЧАСТИНОК Ag, Au**

*В. М. Скобеєва, В. А. Сминтина, Я. І. Лепіх*

**Анотація.** Наночастинки благородних металів мають велике значення в області біомедицини завдяки дуже різноманітному застосуванню як противірусні агенти, засоби діагностики, носії ліків, зонди для візуалізації. Ці нанорозмірні матеріали, зокрема наночастинки золота та срібла, є корисними оптичними зондами для виявлення широкого спектру біологічних аналітів, перспективними кандидатами для розробки високонадійних та надчутливих металевих нано-біосенсорів. Успіх практичного застосування наночастинок залежить від розробки безпечних, простих, ефективних, масштабованих та екологічно чистих методів синтезу. Для цього було успішно розроблено різноманітні зелені протоколи з використанням різноманітних видів рослин, водоростей, грибків, бактерій та інших мікроорганізмів.

У першій частині цієї статті представлені відомості про традиційні методи синтезу наночастинок з акцентом на, найбільш поширений, хімічний метод, наведено огляд останніх досягнень у галузі зеленого синтезу металевих наночастинок за участю рослин, їх ймовірного синтетичного механізму, методів характеристики та факторів, що впливають на їх синтез. . Визначено проблеми біологічного синтезу та способи їх вирішення у майбутній перспективі.

**Ключові слова:** синтез наночастинок, наночастинки срібла, наночастинки золота, хімічний синтез, біологічний синтез

**SYNTHESIS OF NOBLE METAL NANOPARTICLES  
AND THEIR USE IN SENSOR DEVICES,  
PART 1: SYNTHESIS OF Ag, Au NANOPARTICLES**

*V.M. Skobeeva, V.A. Smyntyna., Ya.I. Lepikh*

**Abstract.** Noble metal nanoparticles are of great importance in the field of biomedicine due to their very diverse applications as antiviral drugs, diagnostic methods, drug carriers and imaging probes. These nanosized materials, in particular gold and silver nanoparticles, are useful as optical probes for detecting a wide range of biological analytes and as promising candidates for the development of highly reliable and ultrasensitive metal nanobiosensors. The success of the practical

application nanoparticles depends on the development of safety, simple, efficient, scalable and environmentally friendly synthesis methods. For this has been successfully developed various green protocols using a variety of plant species, algae, fungi, bacteria and other microorganisms.

In the first part of this article have been presented information about traditional methods for the synthesis of nanoparticles, with an emphasis on the most common, chemical method, an overview of recent advances in the field of green synthesis of metal nanoparticles involving plants, their likely synthetic mechanism, characterization methods and factors influencing their synthesis. Have been determined the problems of biological synthesis and ways to solve them in the future.

**Keywords:** synthesis of nanoparticles, silver nanoparticles, gold nanoparticles, chemical synthesis, biological synthesis

## ВСТУП

Нанотехнології та наноматеріали є ключовими факторами для створення продуктів та процесів нового покоління з покращеними властивостями. Це стосується широкого класу ринків споживання, таких як аерокосмічна та авіаційна промисловість, автомобілебудування, паливні елементи та зберігання водню, біомедицина та охорона здоров'я, електроніка, фотоніка, захист навколишнього середовища, продовольство та сільське господарство, безпека та обороноздатність, датчики, сонячна енергетика процесів.

Всебічна оцінка можливостей, що надаються цими унікальними матеріалами та технологіями, наведена у звіті [1], в якому представлені повні ринкові прогнози для наноматеріалів та промислових секторів, порушених нанотехнологіями до 2027 року. Цьому свідчать дані оцінної вартості світового ринку «Наносенсори» у 2020 та 2027 роках. Враховуючи, що темпи зростання світового ринку наносенсорів за аналізований період становлять 75,5%, то у 2027 році оцінна вартість ринку становитиме 21, 5 млрд. доларів порівняно з 419,1 млн. доларів у 2020 році.

Нанотехнології та наноматеріали можуть значно вирішити багато технологічних проблем, а також проблеми суспільної охорони здоров'я, що виникли внаслідок пандемії коронавірусу. В аналітичному огляді [2] докладно розглядається, як нанотехнології та наноматеріали можуть допомогти у боротьбі з цією пандемічною хворобою, а також поточні стратегії пом'якшення наслідків. В даний час роз-

робляються та впроваджуються продукти на основі нанотехнологій для стримування, діагностики та лікування COVID-19. Аналіз ринку нанотехнологічних діагностичних тестів на COVID-19 включає наносенсори, що містять наночастинки срібла і золота, наночастинки оксиду заліза, графен, квантові точки, вуглецеві квантові точки і вуглецеві нанотрубки.

У розвитку ринку наносенсорів лідирують такі країни як Америка, Китай, Японія, Канада, Німеччина. На тлі, наведених вище витрат на проблематику нанотехнологій у зарубіжних країнах, витрати України на дослідження у цій галузі виглядають більш ніж скромними. Проте, завдяки високому науковому потенціалу українських вчених, ефективної роботи наукових шкіл, переважно протягом минулих років, нанотехнологія в Україні має певні успіхи. Перші дослідження на нанорівні українські вчені вели ще в довоєнні роки – працювали з колоїдними розчинами, вивчали властивості наноплівки та наночастинок. І зараз у деяких галузях нанофізики в Україні є оригінальні розробки, серед них – дві найперспективніші галузі застосування українських нанотехнологій – електроніка та матеріалознавство [3]. Одним із прикладів високого потенціалу українських розробок нанотехнологій є дослідження, пов'язані з пристроями для альтернативної енергетики – суперконденсаторами, літійовими батареями, паливними осередками (пристрої, що перетворюють хімічну енергію безпосередньо на електричну). Їхній коефіцієнт корисної дії становить близько 60%, тоді як ККД сучасних перетворювачів енергії (наприклад, двигунів внутрішнього згоряння)

зазвичай не перевищує 35%. Як паливо вони можуть використовувати, наприклад, водень. І саме у цьому ключі працюють співробітники Інституту проблем матеріалознавства НАН України. Основні завдання та дослідження нанотехнології та наноустроїв виконуються у низці інститутів НАНУ, таких як: Інститут фізики; Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича; Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова; Інститут фізичної хімії ім. Л. В. Писаржевського; Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова; Інститут хімії поверхні; Інститут загальної та неорганічної хімії ім. В. І. Вернадського; Інститут біоколоїдної хімії ім. Ф. Д. Овчаренко; Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона, а також у наукових лабораторіях та підрозділах провідних ВНЗ України.

В Україні фундаментальні та прикладні дослідження, що спрямовані на виготовлення, вивчення властивостей та застосування наноструктурних матеріалів, здійснюються протягом останніх років за проектами відомчого замовлення НАН України, грантів Міністерства освіти і науки, грантів міжнародних наукових фондів. Сукупний досвід українських академічних лабораторій значний, у світі більшість їх розробок визнано як передові. Однак, слід зазначити, що недостатнє фінансування наукових досліджень відчутно стримує розвиток у галузі нанотехнології та фізичних засад створення наносенсорів в Україні.

Як показує огляд літературних даних, є обнадійливі передумови для успішної реалізації наносенсорної електроніки в теперішньому та майбутньому практичному застосуванні і для цього є такі підстави. Сфера наносенсорів є однією з декількох областей, які безпосередньо і всеосяжно використовують переваги нанотехнологій. Ультрамалі розміри пристроїв роблять їх дуже придатними для виявлення виключно малих концентрацій газів або частинок будь-якого типу, доводячи їх чутливість до теоретичних меж. Нанофункціоналізація поверхонь може вирішити основні проблеми селективності датчиків та обміну інформацією між ними, а також зробити сенсорні поверхні самоочисними або самоприкріплюваними.

У наносенсорів настільки мале споживання енергії, що вони можуть отримувати живлення із сонячних панелей, термоелектричних генераторів або з перетворювачів кінетичної енергії, їхня енергоефективність робить їх придатними для будь-яких автономних майбутніх систем із датчиками. Більшість нанодатчиків можна використовувати на передових нанoeлектронних платформах, на яких вже є наноустрою розміром менше 22 нм, що означає, що є високий рівень технологічної готовності для використання нанодатчиків будь-якого виду. Такі програми безпеки, як електронні носи, нанобіосенсори та всі види датчиків для моніторингу навколишнього середовища будуть мати велику користь від розвитку наносенсорів. Сьогодні датчики є ключовими компонентами та визначальними факторами у будь-якому комплексному сценарії, в якому мають місце розширені в реальному часі людські відчуття як для цивільних, так і для військових додатків. Запропоновано передові концепції, пов'язані зі створенням квазіневидимих, з нульовим енергоспоживанням мереж датчиків на поверхні людського тіла, або, якщо це необхідно, імплантованих пристроїв, які здійснюють моніторинг життєвих функцій та дають необхідну інформацію для підприємства відповідних дій для збереження людського життя. Вони будуть отримувати чітку картину стану здоров'я даної особи, адаптовану до індивідуальних потреб з використанням працюючої в реальному часі мультипараметричну комбінацію неінвазивних, біосигнальних сенсорів (ЕКГ, акселерометри, гіроскопи, пульсоксиметри і т. д.) і таким чином покращення якості життя. Важливо, що сенсори в наносистемах будуть працювати з ультранизьким енергоспоживанням. У таких системах можуть застосовуватися такі нові технології, як електронна шкіра або носії, що носять на собі самопідживлювані системи датчиків з бездротовим інтерфейсом. Ці системи будуть сумісними, з комунікаційної точки зору, з будь-якими існуючими інтерфейсними зв'язками (смартфони та розумні годинники), і зможуть функціонувати як розумні елементи майбутнього. Більш удосконалені версії таких розумних систем могли б захищати людей від



різноманітних екологічних небезпек, у тому числі пов'язаних з викидами шкідливих речовин та з катастрофами, роблячи довкілля безпечнішим. Передбачається, що такі пристрої будуть давати доступ у режимі реального часу до доповненої реальності, у тому числі попередження про такі небезпеки, як електромагнітне або іонізуюче випромінювання, висока концентрація алергенів та шкідливі гази. Вони будуть побудовані на комплексних, енергоефективних комунікаційних технологіях, що базуються на нових наноматеріалах, надаючи можливість повністю мережевої роботи. Очікується безліч екологічних застосувань, наприклад розумні супроводжуючі пристрої для внутрішнього і зовнішнього використання з шістьма органами почуттів, що контролюють якість води та повітря, а також надійні персональні пристрої при надзвичайних ситуаціях.

У сучасному світі нанотехнології стають областю стратегічних досліджень та стратегічного виробництва з погляду безпеки. У зв'язку з цим розробка технології та виробництво наносенсорних пристроїв стають дедалі актуальнішими. Очевидно, що наносенсори дуже перспективні для застосування у сфері безпеки. Можна вважати, що нанотехнології будуть ключовими технологіями, на основі яких базуватиметься розвиток майбутніх сенсорних інтелегентних систем. Мережі датчиків, які використовують нанотехнології, є стратегічно важливими для безпеки, оскільки вони створюють динамічну картину середовища з раннім виявленням небезпек шляхом аналізу великих обсягів даних у реальному часі. Для сфери безпеки ці технології застосовуються на різних рівнях, починаючи від людського тіла (мережі, розташовані на тілі) і закінчуючи будовами, містами та навколишнім середовищем. Датчики, які закріплені на тілі, можуть забезпечити здійснення оцінки медичного статусу солдатів на полі бою для оцінки на місці тяжкості поранень та підготовки найбільш ефективного лікування.

Істотний прогрес у галузі нанотехнологій та їх практичного застосування, зокрема у розробці наносенсорів, став можливим після розробки методів синтезу наноматеріалів, ком-

позитів та функціональних наносистем на їх основі. Дослідження наноматеріалів, а також фізичних та хімічних процесів у наносистемах, технології та різноманітні застосування наносенсорів продовжують розвиватися і в даний час. Накопичений великий досвід наукових досліджень та розробок, які присвячені сенсорам, виготовлених на основі благородних металів, серед яких виділено такі метали, як наночастинки срібла та золота.

У першій частині цього огляду представлені розділи щодо методів синтезу наночастинок срібла та золота, які є перспективними наноматеріалами для використання у медичному та сенсорному призначеннях. Окремо визначено проблеми хімічного і біологічного підходів у подальшому розвитку стратегії синтезу металевих наночастинок.

У другій частині огляду будуть наведені основні фізико-хімічні та оптичні характеристики, що визначатимуть сенсорні властивості НЧ Ag, Au. Будуть розглянуті типи сенсорів для різних сфер застосування, особливу увагу буде приділено біосенсорам. У заключній частині будуть визначені перспективи розвитку сенсорних пристроїв на основі наночастинок шляхетних металів.

## **1. СТРАТЕГІЇ СИНТЕЗУ НАНОЧАСТИНОК БЛАГОРОДНИХ МЕТАЛІВ ДЛЯ ПРИКЛАДНОГО ВИКОРИСТАННЯ**

### **1.1. Практичне застосування наночастинок благородних металів срібла та золота**

Синтез наночастинок – це процес, який вважається найважливішою частиною створення наночастинок, тому що він значною мірою визначає їх властивості та практичні застосування. Для отримання гібридних наноматеріалів, як складових компонентів, необхідні НЧ, які мають різні форму, розмір і мають потрібні властивості. Наявність таких властивостей НЧ визначається розробкою різних контрольованих способів їхнього синтезу.

Огляд літератури з синтезу наночастинок шляхетних металів показує, що за останні два десятиліття було досягнуто величезного про-

гресу в розробці нових стратегій більш економічних і надійних методів синтезу НЧ, які забезпечують матеріали з фізико-хімічними, оптичними і термічними властивостями, що легко налаштовуються, а також з біохімічними функціональними можливостями [4]. В результаті були розроблені нові удосконалені гібридні НЧ з полімером, графеном, вуглецевими нанотрубками, квантовими точками та системами ядро-оболонки з ще більш покращеними фізико-хімічними характеристиками, що призвело до виняткових діагностичних та терапевтичних застосувань.

Наночастинки золота та срібла використовуються у нанобіотехнологіях, біосенсорних дослідженнях, візуалізації клітинних структур [5, 6] та адресній доставці ліків [4, 5]. В даний час колоїдні наночастки вивчаються у зв'язку з їх унікальними фізико-хімічними властивостями, відмінними від «об'ємних» [9]. Форма чи розмір наночастинок відіграє у всіх додатках нанотехнологій [10–12]. Унікальні властивості наночастинок металів [13] призводить до їх застосування, наприклад, паливних елементах, захисту навколишнього середовища. Перспективним напрямом практичного застосування наночастинок благородних металів срібла та золота є розробка сенсорних пристроїв на їх основі [14, 15]. Основним принципом роботи цих програм є унікальні оптичні властивості, особливо локалізований поверхневий плазмонний резонанс (ЛППР) [16–18].

Поряд з наночастинками золота (НЧ Au) наночастки срібла (НЧ Ag) є важливими матеріалами з високим попитом для тканинної інженерії та антибактеріальних додатків через їх ефективну антибактеріальну активність як у розчині, так і в компонентах [19–21]. Останнім часом нанотехнології стали перспективною областю досліджень та мають безліч застосувань у сільському господарстві, особливо використання наночастинок для боротьби з хворобами рослин та підвищення врожайності сільськогосподарських культур [24]. Наночастинки срібла корисні в медицині та медичних пристроях, біотехнології, електроніці чи науці про навколишнє середовище [25–27]. НЧ Ag широко застосовуються також у продуктах

охорони здоров'я, харчової промисловості та одягу [28, 29].

Слід зазначити, що окисна активність НЧ Ag супроводжується вивільненням іонів срібла, що призводить до ряду негативних ефектів на біологічні системи, викликаючи цитотоксичність, генотоксичність або імунологічні реакції і навіть загибель клітин [30–34]. Можливість негативного впливу НЧ металів на організм людини є ключовим моментом в питанні їх медичного застосування.

Успішне практичне застосування наночастинок металів залежить від науково-обґрунтованого підходу до технології з позицій економічності та екологічності методів синтезу з контрольованими та відтворюваними характеристиками наночастинок, від удосконалення технології, що дозволяє їх масштабне виробництво. Основними наноматеріалами для сенсорів в медичному застосуванні є наночастинки срібла і золота.

## 1.2. Методи синтезу наночастинок срібла, золота

Вибір методу синтезу, зазвичай залежить від властивостей використовуваного матеріалу, властивостей наночастинок заданих з урахуванням їх подальшого призначення. Вибираючи метод приготування, вивчається вплив різних параметрів, які можуть вплинути на процес. На основі цих досліджень вибір цих параметрів дасть найкращі можливі характеристики для бажаних наночастинок. Зазвичай параметри наночастинок, що вивчаються, включають розмір, дзета-потенціал (поверхневий заряд) або характеристики захоплення/вивільнення. Метод синтезу, тип обраного полімеру і стабілізатор, що використовуються, критично впливають на властивості отриманих наночастинок.

При приготуванні НЧ в основному використовуються два різні підходи: «зверху-вниз» та «знизу-вгору» [35]. Процеси «згори донизу» включають руйнування сипких матеріалів на більш дрібні частинки нанорозмірів з допомогою різних фізичних і хімічних методів. Навпаки, у висхідному підході НЧ утворюються

шляхом самоскладання атомів, молекул або кластерів.

Підходи «згори – вниз» включають такі методи: фізичне осадження з парової фази (PVD); механічне подрібнення; лазерна абляція; піроліз хімічне осадження з парової фази [36–39]. Цей підхід має одне суттєве обмеження – недосконала структура поверхні НЧ, що істотно впливає на їх фізико-хімічні властивості [40]. Крім того, цей метод вимагає величезної кількості енергії для підтримки умов високого тиску та високої температури під час процедури синтезу, що робить процес дорогим.

Підхід «знизу – вгору» виявився вигідним, оскільки він забезпечує набагато кращий контроль над формуванням кінцевого продукту з одноріднішими розмірами, формою, фізичними параметрами та хімічним складом. Крім того, цей підхід загалом менш витратний. Висхідний підхід зазвичай включає такі методи хімічного синтезу, такі як хімічний [41, 42], електрохімічний [43,44], сонохімічний [45,46] і зелений синтез [47–50].

Однак, при підході «знизу – вгору» очищення синтезованих частинок від їхньої реакційної суміші (токсичних хімікатів, органічних розчинників та реагентів) є серйозною проблемою при їх біомедичному застосуванні, за винятком методів зеленого синтезу або окремих методів хімічного синтезу з нетоксичними реагентами. В останньому випадку, для зменшення або виключення проблеми токсичності, в хімічному синтезі розробляються технології, в яких у якості реагентів використовуються речовини, які нетоксичні і біосумісні з цільовим об'єктом. До таких матеріалів можна віднести глюкозу, дубильну кислоту, желатин та інші, які є відновниками іонів металів та стабілізаторами наночастинок у хімічному синтезі. В останні роки виник інтерес до біологічних методів одержання різних нанометалів. Розробляються нові методи біологічного синтезу, так званий «зелений синтез». Продовжуються дослідження щодо вдосконалення як хімічного, так і біологічного методів шляхом оптимізації процесів синтезу, пошуку нових вихідних матеріалів – прекурсорів.

Наночастинки благородних металів є перспективними матеріалами для застосування у медицині. Це визначає особливі умови для синтезу наночастинок. У наступній частині статті будуть наведені поточні досягнення синтезу НЧ (Ag, Au). Серед численних способів при підході "знизу – вгору" найбільшого поширення набув хімічний метод синтезу, що характеризується найбільшою вивченістю та відносною простотою.

### 1.3. Хімічні методи синтезу наночастинок срібла, золота

Одними із суттєвих факторів на користь застосування того чи іншого методу синтезу є їх економічність, простота, екологічність та можливість масштабного виробництва. Хімічні методи найбільше задовольняють цим умовам. В основі цього методу лежить явище хімічного відновлення іонів металів із солей цих металів різними відновниками у присутності стабілізаторів. Цей метод є найбільш поширеним завдяки простоті та можливості отримання великого обсягу наноматеріалу. У якості відновників, окрім наведених вище, використовуються цитрат натрію, дубильна кислота, боргідрат натрію, гідразин та інші органічні речовини. Такі відновники, як цитрат натрію, виконують одночасно і роль стабілізатора. Процес відновлення іонів металу можна регулювати, змінюючи параметри реакції (температуру, рН, концентрацію та співвідношення відновлювального та стабілізуючого агентів).

Фундаментальне дослідження, присвячене процесам зародження та зростання частинок при синтезі у присутності цитрату натрію, було опубліковано американським вченим Джоном Туркевичем. Незважаючи на те, що ця стаття була опублікована ще в 1951 році, описаний метод є класичним актуальним і на сьогоднішній день. Нині розроблено чимало модифікацій класичного цитратного синтезу металевих НЧ. Вони спрямовані, перш за все, на розширення діапазону розміру одержуваних наночастинок і формування більш однорідних за розміром та формою частинок. Як правило, ці результати досягаються введенням додаткових реагентів, які покращують характеристики

наночастинок за допомогою варіювання рН середовища та температури реакції, використання фізичних методів ініціювання синтезу, способів стабілізації поверхні.

У роботах авторів [51–54] наведено результати синтезу НЧ срібла цитратним методом із зазначенням його технологічних параметрів.

У типовій методиці синтезу до розчину (10 мл) нітрату срібла певної концентрації додавали такий ж самий обсяг розчину відновника (цитрат натрію). Швидко та рівномірне нагрівання всього обсягу реакційного розчину забезпечувалося за допомогою магнітної мішалки з підігрівом, що сприяло однорідності складу в умовах нуклеації та зростання зародків.

Синтез НЧ Ag проводився за наступних технологічних параметрів:

- еквімолярні концентрації  $\text{AgNO}_3$  та  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ ;  $10^{-5}\text{M}$ ;  $10^{-4}\text{M}$ ;  $10^{-3}\text{M}$ ;  $5 \cdot 10^{-3}\text{M}$ ;
- Відношення концентрацій ( $\text{AgNO}_3$ ) / ( $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ ) = 1:4; 1:2;
- температура синтезу –  $100^\circ\text{C}$ ;
- час синтезу, хв: 10; 15; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80.

Характерно, що з усіх використовуваних параметрах синтезу із застосуванням цитрату натрію було отримано наночастинок срібла сферичної форми (рис. 1.).

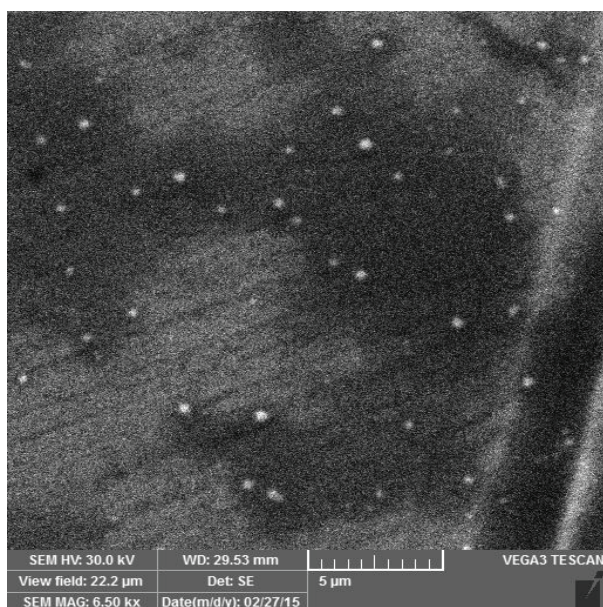


Рис. 1. Зображення НЧ срібла, отримане у растровому електронному мікроскопі [51].

У спектрах поглинання отриманих зразків з розмірами 20–30 нм спостерігалася інтенсивна смуга з максимумом, локалізованим в області 390–420 нм. Природа смуги, що спостерігається, пов’язана з явищем поверхневого плазмонного резонансу (ППР) в металевих наночастинках [55]. Поява цієї смуги в спектрах поглинання свідчить про факт утворення наночастинок срібла.

Результати експериментів показали, що синтез НЧ істотно залежить від концентрації вихідних продуктів реакції. Встановлено, що при концентраціях солі срібла  $10^{-5}\text{M}$  при кип’ятінні розчину протягом 120 хвилин смуга ППР НЧ Ag не реєструється, тобто наночастинок не відтворюються. Визначено, що при подальшому збільшенні концентрації  $\text{AgNO}_3$  ( $10^{-4}\text{M} \div 5 \cdot 10^{-3}\text{M}$ ) утворення наночастинок срібла визначається кінетикою хімічної реакції. Дійсно, якщо при концентрації  $\text{AgNO}_3$   $10^{-4}\text{M}$  смуга ППР реєструється лише через 50 хвилин після злиття реагентів (рис. 2.), то при концентрації  $\text{AgNO}_3$   $10^{-3}\text{M}$  час, що необхідний для відновлення срібла, зменшується і смуга ППР з’являється вже через 20 хвилин від початку реакції.

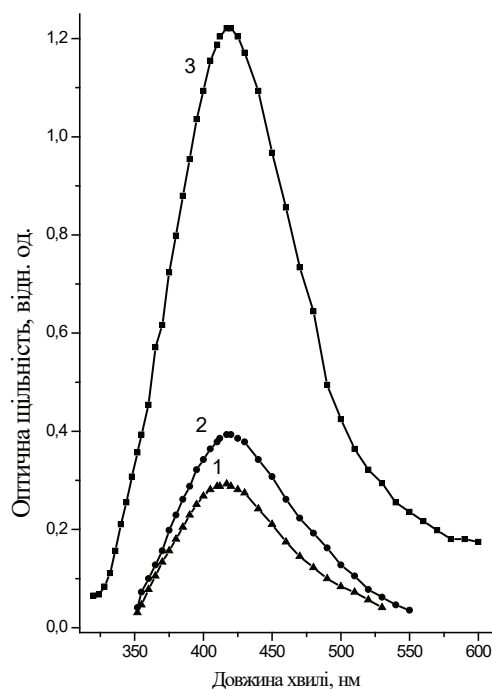


Рис. 2. Залежність спектрів поглинання НЧ срібла від часу синтезу, хв: 50 (1); 60 (2); 80 (3). Концентрації  $\text{AgNO}_3$  та  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 = 10^{-4}\text{M}$  [53].

Кінетика синтезу НЧ показує залежність розміру наночастинок від часу протікання реакції. Цей факт проілюстровано на рис. 3, на якому представлені нормовані спектри поглинання зразків. Дійсно, спектр поглинання містить інтенсивну смугу, що відповідає ППР, причому максимум смуги на початковій стадії синтезу (крива 1, рис. 3.) локалізований у  $\lambda_{\text{макс}} = 405$  нм, що відповідає розміру НЧ Ag 20 нм, а на наступних стадіях (криві 2, 3) положення максимуму смуги зміщується до  $\lambda_{\text{макс}} = 420$  нм, що відповідає розміру – 30 нм.

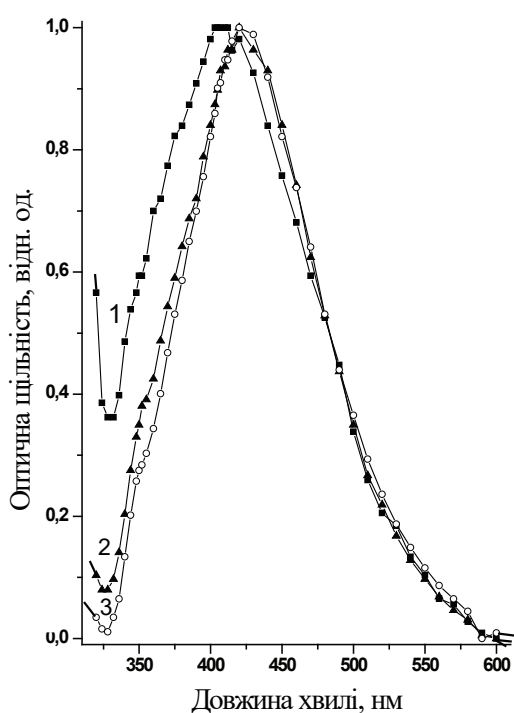


Рис. 3. Нормовані спектри поглинання НЧ срібла, виміряні через 30 хв (1), 40 хв (2), 50 хв (3) від початку синтезу. Концентрації  $\text{AgNO}_3$  та  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 = 10^{-3}\text{M}$  [53].

Тенденція скорочення часу, необхідного відновлення і зростання наночастинок металу спостерігається і зі збільшенням солі срібла до концентрації  $5 \cdot 10^{-3}$  М. Наночастинок срібла, що виявляють поверхневий плазмонний резонанс, реєструються через 10–15 хвилин від початку синтезу. Подальше збільшення концентрації солі срібла супроводжується утворенням осаду срібла у реакторі.

Таким чином, із збільшенням концентрації реагентів збільшується інтенсивність смуги

поглинання, що свідчить про збільшення кількості синтезованих наночастинок. Характерно також зменшення напівширини смуги поглинання, що свідчить про зниження розкиду за розмірами НЧ срібла із збільшенням часу синтезу (криві 1, 3 на рис. 3).

Ці факти свідчать на користь наступного механізму утворення НЧ Ag. На першій стадії утворюються частинки різних розмірів, потім відбувається розчинення більш дрібних частинок за механізмом оствальдівського дозрівання і, паралельно, здійснюється зростання частинок за рахунок відновлення іонів срібла на поверхні наночастинок. Автори звертають увагу на властивості стабільності властивостей наночастинок і залежність їх оптичних характеристик від різних зовнішніх факторів. До одного з таких зовнішніх факторів належить УФ – опромінення, що може супроводжуватись перебігом наступних електронних процесів. Дійсно, під дією УФ – світла в розчині з наночастинками можливі відбуватися наступні явища: по-перше, в результаті поляризації наночастинок, що складаються з дрібних кластерів можуть придбати заряд, що веде до їх нестабільності та наступного розпаду, по-друге, при опроміненні світлом області сильного поглинання у розчині, у якому ще не завершено стадію відновлення іонів срібла, може здійснюватися цей процес за рахунок фотоелектронів, створюваних світлом. Якщо в першому випадку очікується зменшення інтенсивності поглинання, то в другому буде спостерігатися збільшення інтенсивності за рахунок нових наночастинок срібла, що утворюються.

Результати досліджень щодо впливу опромінення УФ-світлом із довжиною хвилі  $\lambda = 360$  нм на стабільність НЧ показали зменшення інтенсивності смуги ЛППР НЧ срібла, що свідчить про прояв першого механізму фотонестабільності [49]. Для підвищення стабільності необхідно створити на поверхні наночастинок оболонку із відповідної поверхнево-активної речовини (ПАР). Наприклад, у якості ПАР, для додаткової стабілізації НЧ Ag у цій роботі використовували водний розчин додецилсульфат натрію, який вводився колоїдний розчин після процесу синтезу.

Характерно, що отримані за допомогою описаної технології, НЧ срібла зберігають свою стабільність протягом декількох років за умови їх зберігання у темряві.

#### 1.4. Біологічні методи синтезу

Фізичний підхід до виробництва наночастинок потребує більш високого використання енергії та є дорогим. Хоча хімічні підходи недорогі, але вони вимагають найчастіше використання токсичних розчинників (боргідрид натрію і спирти, які, в основному, токсичні, легко займаються і не піддаються деградації). Утворення токсичних побічних продуктів призводять до хімічного забруднення та необхідності витрат на їх утилізацію. Наведені факти використання хімічних речовин у хімічному синтезі обмежують біологічне застосування металевих НЧ. Це спричинило вивчення більш екологічних методів з мінімальним використанням хімікатів. Біологічні методи синтезу, які отримали назву «Зелена хімія», з використанням рослинних екстрактів, мікро-

організмів та біополімерів виявились потенційними кандидатами на заміну хімічних методів синтезу НЧ. Важливо, що на відміну від хімічно синтезованих металевих наночастинок, до переваг зеленого синтезу наночастинок відноситься підвищення їх біосумісності, що є сприятливим для біомедичного застосування. Таким чином, біологічний підхід, що включає рослини, водорості, бактерії, грибки, дріжджі та віруси, може забезпечити високопродуктивний, недорогий та екологічно безпечний синтез наночастинок [56–68].

Схематичне зображення методів зеленого синтезу проілюстровано рис. 4. При додаванні біологічного екстракту до попередника синтезованих наночастинок срібла (сіль срібла, наприклад, нітрат срібла, хлорид срібла), при певних параметрах, таких, як температура, рН середовища, концентрація екстракту та попередника, розчин набуває кольору від світло-жовтого до темно – коричневого, що свідчить про утворення НЧ Ag. Як правило, механізм біовідновлення наночастинок металів у рос-

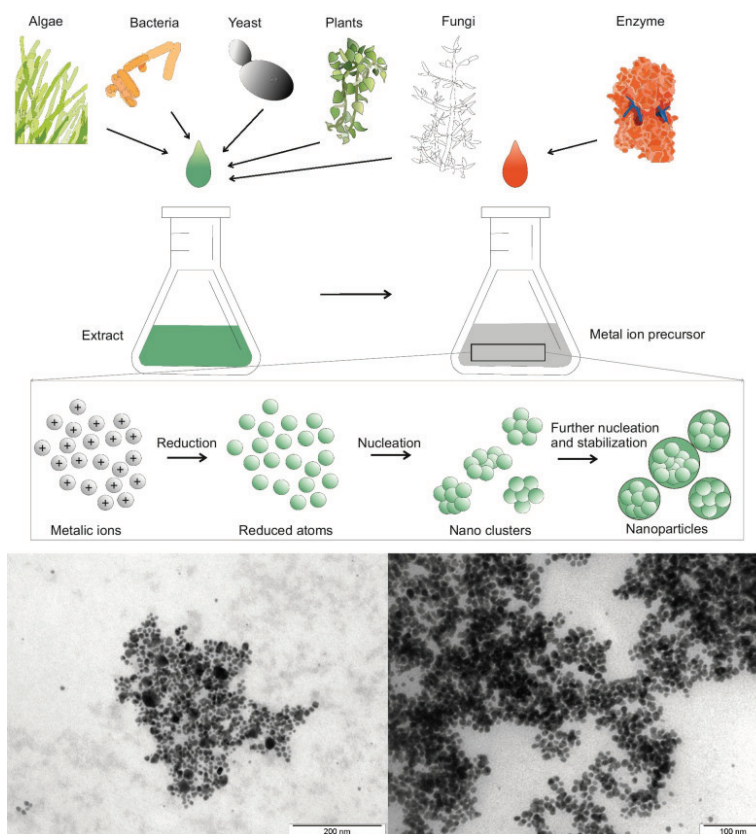


Рис. 4. Схематичне зображення методів зеленого синтезу [56].

линах та рослинних екстрактах включає три основні етапи: фази активації, в якій відбувається відновлення іонів металу та зародкутворення відновлених атомів металу; фази зростання, що відноситься до мимовільного злиття малих сусідніх наночастинок у частинки більшого розміру, що супроводжується підвищенням термодинамічної стабільності наночастинок, або процес, званий дозріванням Оствальда, і завершальної фази, в якій утворюється остаточна форма наночастинок.

Маючи багаті рослинні біоресурси, країни Південно-Східної Азії зробили основний внесок у розвиток біологічного синтезу наночастинок металів. Більшість досліджень з біосинтезу металевих НЧ, переважно, з синтезу НЧ Ag і НЧ Au, було проведено на рослинах з використанням рослинної біомаси, рослинного екстракту чи самих рослин [69]. Однак виявилось, що не всі види рослин були ефективними відновниками іонів металів. Основна проблема вибору рослин з їхнього великого різноманіття полягала у розкритті механізму синтезу, властивого певному виду рослин. Так як у природі існує необмежена кількість рослин, які можуть відновлювати метали, то зелений синтез розвивався у напрямку пошуку нових природних відновників з більш ефективними відновними здібностями, а також у використанні рослин, які самі мали лікувальні властивості.

Порівнюючи результати синтезу НЧ Ag, Au за участю різних рослин було зазначено, що отримані наночастинок мають різні фізико-хімічні властивості [70]. Опис можливого механізму біосинтезу НЧ Ag з використанням бульйону листя саговника представлено у роботі [71]. Автори вказують, що відновлення іонів срібла рослиною саговником досягається, ймовірно, за рахунок фітохімічних речовин, таких як поліфеноли, глутатіони, які містяться в листі саговника і можуть сприяти утворенню НЧ Ag, які мають кристалічну структуру та розмір 2–5 нм.

Досліджено синтез наночастинок срібла та золота з використанням екстрактів листя шипшини зморшкуватого [72]. Спектри поверхневого плазмонного резонансу

для срібла та золота отримані при 451 і 578 нм з коричнево-жовтим та рожево-червоним забарвленням, відповідно. НЧ Ag та НЧ Au відрізнялися за розміром залежно від концентрації екстракту листя та металу, що використовується для синтезу. Синтезовані НЧ були переважно сферичними (у разі НЧ Ag) з деякими трикутними та шестикутними (особливо у разі НЧ Au) за формою із середнім розміром 12 та 11 нм для AgNP та AuNP, відповідно. Досліджено фітосинтез наночастинок срібла (AgNP) листям водного екстракту *Dalbergia spinosa* (вид колючої ліани) [73]. Результати показали, що збільшення початкової концентрації екстракту при кімнатній температурі збільшувало середній розмір та розширювало розподіл за розмірами AgNP, що призводило до червоного зміщення та розширення поглинання поверхневого плазмонного резонансу. Результати показали, що властивості цукру і флавоноїдів, що відновлюють, несуть основну відповідальність за біовідновлення іонів срібла і що їх відновна здатність підвищується при 36 °C. Аналіз за допомогою електронної мікроскопії (ТЕМ) показав, що наночастки Ag мають майже сферичну форму із середнім розміром  $18 \pm 4$  нм.

Наночастинок золота були синтезовані з екстрактів листя картопляної агави з використанням трьох розчинників з різною полярністю (вода, етанол і гексан) [74]. Аналіз спектрів УФ-видимої області виявив чіткі сигнали поверхневого плазмонного резонансу близько 540 нм, положення яких залежало від декількох факторів, таких як відновник, розчинник і температура, що використовуються. Використовуючи різні розчинники (вода, етанол та гексан) були отримані НЧ Au з різною морфологією та розмірами (на рис. 5 – це фракції Fx1, Fx2 та Fx3, відповідно, для води, етанолу та гексану). Було показано, що екстракт Fx1 був найшвидшим у відновленні розчину попередника Au. Помітно вплив розчинників на форму та розмір НЧ Au.

Відновлення іонів  $Au^{+3}$  стимулюють основні сполуки, присутні в різних сімействах агави (цукри, амінокислоти, феноли, сапоніни та терпеноїди).

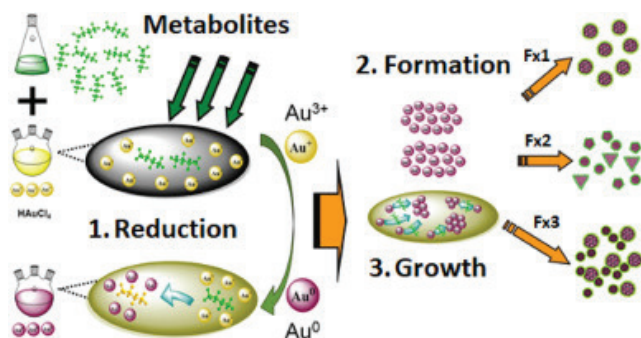


Рис. 5. Схематична ілюстрація впливу розчинників на різну морфологію та розміри НЧ Au у процесі їх біосинтезу [74].

Процес відновлення супроводжується складними фотохімічними реакціями. Незважаючи на те, що основні функціональні групи та відповідальні за них фотохімічні сімейства подібні, але фактичні хімічні сполуки різняться. Це може вплинути на фізико-хімічні властивості НЧ, що утворюються. Температура та концентрація екстракту відіграють ключову роль у визначенні розміру та форми НЧ відповідно. Як правило, НЧ, синтезовані за допомогою рослинних біовідновників, мали сферичну форму з розміром від 10 до 125 нм. Час реакції відновлення варіюється від кількох хвилин до кількох годин. Так, у зеленому синтезі НЧ Au з використанням відновної здатності водного екстракту листя кипарису (*Thuja orientalis*) реакція завершилася за 10 хв при кімнатній температурі з виходом реакції понад 90%. Синтезовані НЧ Au були переважно сферичними, середній розмір яких сильно залежав від рН і концентрації екстракту і становив від 5 до 94 нм.

Розмір та розподіл металевих наночастинок сильно залежать від біоз'єднань, присутніх в екстракті. Присутність сильного відновника в екстракті сприяє високій швидкості реакції та сприяє утворенню дрібніших наночастинок. Якщо біомолекули швидко відновлюють сіль металів Ag, Au, що призводить до безперервного утворення нових ядер або вторинних ядер, то можна спостерігати вузький розподіл за розмірами. Однак повільна реакція може відбуватися, якщо вторинне зародкутворення пригнічується в порівнянні з первинним. Біомолекули є вторинним варіантом для форму-

вання моношару на поверхні наночастинок для запобігання агломерації.

На сьогодні сотні рослин та їх екстрактів задіяні у випробуванні синтезу металевих наночастинок. Детальний звіт про останні тенденції в синтезі за рахунок рослинних екстрактів та різних застосування наночастинок «зеленого» металу рослинного походження наведено в оглядових роботах [69], [75–78].

Крім рослин, водорості також використовуються як біоактивний матеріал. Біоредукція водоростей показала великий потенціал у розвитку чистого зеленого синтезу різних наночастинок металів та оксидів металів. Незважаючи на те, що було виявлено досить багато водоростей, здатних синтезувати різні НЧ, здійснення контролю розміру та форм продуктів та ідентифікувати механізми відновлення водоростями, все ще потребує додаткового вивчення [71]. Недостатньо вивчений процес внутрішньоклітинного утворення наночастинок золота біомасою водоростей. У ході еволюції водорості розвинули здатність виробляти складні неорганічні внутрішньоклітинні та позаклітинні структури. Припускають, що іони металів спочатку захоплюються на поверхні рослинної клітини за рахунок електростатичної взаємодії між іонами та негативно зарядженими карбоксилатними групами, присутніми на поверхні клітини. Надалі іони відновлюються клітинними ферментами, що призводить до утворення ядер, які згодом зростають при подальшому відновленні іонів металів. Деякі водорості відновлюють НЧ металів як позаклітинному, так і внутрішньоклітинному механізму. Так, частинки золота розміром <20 нм були виявлені як усередині, так і на поверхні клітини середовища біомаси *L. majuscula* (кіпрей, вид морських водоростей) [79]. Висушена водорість *Chlorella vulgaris* відновлювала приблизно 88% золота в металевому стані, а кристали золота накопичувалися як у внутрішній, так і зовнішній частині клітинних поверхонь з тетраедричною, декаедричною і ікосаедричною структурами [80].

Мікробний синтез наночастинок приваблює дослідників завдяки багатому біо-



різноманіттю мікробів, можливості використання простого мікробного культивування, при клітинних, біохімічних та молекулярних механізмах для покращення властивостей наночастинок. Багато одноклітинних та багатоклітинних організмів, таких як бактерії (прокаріоти), гриби (еукаріоти) та віруси, виробляють або внутрішньоклітинні, або позаклітинні неорганічні матеріали [81–83]. Як показали дослідження, внутрішньоклітинні механізми включають перенесення позитивних іонів металів у клітинну стінку шляхом взаємодії з негативними іонами клітинної стінки [81]. Далі ферменти клітинної стінки відновлюють іон металу до наночастинок, а потім наночастинки дифундують через клітинну стінку бактерій. У разі грибів позаклітинне виробництво наночастинок є синтезом, опосередкованим нітратредуктазою у присутності ферменту нітрату, який сприяє біовідновленню іонів металів у наночастинок.

Біосинтез металевих наночастинок з металовмісних бактерій призводить до контрольованих оптичних та електричних властивостей з потенційним застосуванням у майбутньому [84]. Вилучення металів із навколишнього середовища шляхом адсорбції на біомасі бактерій додатково призводить до біовідновлення металів у наночастинок. Тому біосорбція у поєднанні з біовідновленням для перетворення відходів важких металів на наночастинок викликає все більший інтерес у промисловому синтезі наночастинок.

Синтез наночастинок грибами має переваги перед бактеріями. Він є екологічно чистим та енергозберігаючим та підходить для великомасштабного синтезу металевих наночастинок для можливої комерційної життєздатності. За допомогою грибів можна синтезувати наночастинки з більшою монодисперсністю порівняно з тими, що синтезуються бактеріями. Синтезовані наночастинки виявляють довготривалу стабільність у розчині завдяки зв'язуванню з білком за рахунок зв'язку залишків цистеїну та лізину. Завдяки цій властивості можлива іммобілізація на матрицях або тонких плівках для застосування в оптоелектроніці та нелінійній оптиці [85].

### 1.5. До питання вибору методів синтезу НЧ для медичного використання

Навіть короткий огляд методів біологічного синтезу свідчить про перебіг складних біохімічних реакцій у процесі синтезу. Контроль та управління такими процесами на сьогодні є проблематичним. З порівняння біологічного методу синтезу з класичними методами фізичного та хімічного синтезів слід відзначити позитивні та негативні якості кожного з цих методів. Попередні дослідження фізичних та хімічних методів показали, що на фізико-хімічні властивості, такі як розмір, морфологія, стабільність та реакційна здатність наночастинок металів, сильно впливають умови експерименту, кінетика взаємодії між іонами металу та відновниками та адсорбція між стабілізуючим агентом та наночастицею [51–54, 86].

Хімічні методи найбільше широко використовуються для синтезу металевих наночастинок завдяки найкращій вивченості, широкому вибору ліцензованих хімічних сполук, які не вимагають попереднього приготування. Однак, використання наночастинок, отриманих хімічним шляхом, обмежено в клінічній та біомедичній областях, оскільки процедура синтезу включає використання кількох токсичних хімічних та неполярних розчинників. Деякі з цих хімічних процесів включають використання токсичних хімічних речовин на пізніших стадіях як синтетичні добавки і закупорювальні засоби. Крім того, використання токсичних хімічних речовин у процесі синтезу зрештою потрапить у навколишнє середовище, таку як ґрунт і вода, що посилить проблему поряд з іншими токсичними побічними продуктами.

На відміну від хімічних процесів, біологічні методи не споживають енергії і проводяться в екологічно сприятливих умовах. Також відсутність токсичних хімікатів та розчинників робить процес екологічно безпечним. Такі «біопродукти» нетоксичні і можуть використовуватись у клінічних та біомедичних цілях [87, 88]. Біологічне виробництво високостабільних і добре охарактеризованих наночастинок може бути реалізованим в результаті оптимізації життєво важливих аспек-

тів, таких як відбір типів організмів, вивчення механізмів зростання клітин та ролі активності ферментів, пошуку відповідних біокаталізаторів. Ферменти, що виділяються мікробами, та присутність білків забезпечують екстрагування біологічно синтезованих наночастинок, що є ще одним кроком до «зеленого синтезу» за рахунок відмови від стабілізуючих реагентів. Фундаментальні властивості, такі як електронні, оптичні, магнітні та каталітичні властивості, контролюються розміром та формою наночастинок. Крім того, біологічно синтезовані наночастинок, в порівнянні з хімічно синтезованими наночастинками, є полідисперсними. Автори роботи [89] вважають, що через легкість та величезний вибір біологічних систем, біологічний синтез наночастинок є більш зручним методом, ніж хімічний синтез. Тим не менш, основним недоліком, наприклад, мікробного біологічного синтезу наночастинок є тривалість виробництва, оскільки мікроби ростуть у природних умовах та синтезують наночастинок, що необхідно вирішити у майбутніх дослідженнях.

### **1.6. Майбутні перспективи вирішення проблем біологічного методу синтезу**

Біологічний синтез наночастинок є порівняно новою ідеєю і перебуває у стадії розробки, тому ця область досліджень стикається з первісними проблемами синтезу, зокрема, з формою, розміром і розподілом за розмірами, контролем росту кристалів, стабільністю і агрегацією синтезованих наночастинок [88, 89]. Ці основні проблеми є найбільш спільними для всіх методів синтезу наночастинок; однак у біологічному синтезі існують проблеми, які потребують подальших досліджень.

1. Таким чином, майбутні дослідження мають бути зосереджені на вивченні ферментативних механізмів та білках, відповідальних за синтез наночастинок. Крім того, властивості синтезованих наночастинок необхідно систематично вивчати в порівнянні з їх хімічними аналогами.

2. Мало вивченою областю є кінцева обробка синтезованих НЧ. Цей процес включає очищення синтезованих наночастинок від

будь-яких присутніх домішок, таких як мікроби. Слід зазначити, що слід уникати більшості процесів хімічної очистки, щоб наночастинок не були токсичними. Мало досліджені фізичні процеси, такі як центрифугування, заморожування – розморожування, процеси нагрівання, ультразвук та осмотичний шок.

3. До цього часу біологічний синтез металевих наночастинок здебільшого здійснювався у лабораторних масштабах. Для багатосерійного виробництва потрібна оптимізація промислового масштабу. За наявності належних оптимізованих умов та відповідних мікроорганізмів ці «біонанофабрики» можуть виробляти стабільні наночастинок з чітко визначеними розмірами, складом та морфологією. Комерційні процеси призведуть до створення нетоксичної біологічної системи, здатної виробляти металеві наночастинок, що стане ще однією віхою шляху до сталого розвитку.

4. Економічна ефективність є ще одним фактором, який необхідно враховувати, щоб зробити процес стійким. Економічний аналіз необхідно проводити порівняно з широко застосовуваними хімічними методами. Як згадувалося раніше, великомасштабне виробництво наночастинок за допомогою біосинтезу ще належить здійснити, щоб впровадження цієї технології у промисловість стало реальним.

5. Майбутні дослідження повинні акцентувати увагу на швидкому синтезі наночастинок, на виявленні механізмів біовідновлення та стабілізації біонаночастинок.

Успішне вирішення цих проблем дозволить створити нову біологічну платформу синтезу наночастинок металів для застосування в медицині.

## **ВИСНОВКИ**

У цій статті представлено огляд робіт, які опубліковані переважно за останні 10 років, у галузі синтезу та практичного застосування наночастинок благородних металів.

На сьогодні накопичений великий досвід наукових досліджень та розробок, які присвячені практичним застосуванням таких наноматеріалів, як наночастинок золота (НЧ Au) та

наночастки срібла (НЧ Ag). Наночастинки Au та Ag є важливими матеріалами з високим попитом для різноманітних застосувань у різних областях життєдіяльності людини, зокрема в медицині та медичних пристроях, біотехнології, електроніці чи науці про навколишнє середовище. Особливу роль відводиться розробці наносенсорів на основі цих металів. Сфера наносенсорів є однією з декількох областей, які безпосередньо і всеохоплююче використовують переваги нанотехнологій.

Досягнення в області нанотехнології за останні роки показали, що практичне застосування нанотехнології залежить від розробки методів синтезу наноматеріалів, композитів та функціональних наносистем на їх основі. Розроблено різноманітні методи їх синтезу, такі як фізичні, хімічні та біологічні.

В даній статті представлений огляд хімічних методів синтезу наночастинок срібла і золота, як найбільш поширений, показано залежність властивостей наночастинок від технологічних умов їх отримання. Звернено увагу як на позитивні так і на негативні фактори цього методу. До позитивних факторів відноситься відносна простота, маловитратність та наявність широкого вибору реактивів, що є сертифіковані. Критичні зауваження щодо хімічного синтезу пов'язані з побоюваннями токсичності вихідних матеріалів.

Альтернативним хімічному, в останні роки набуває розвиток метод синтезу наночастинок металів, зокрема срібла і золота, що базується на відновленні цих металів біологічними речовинами (рослини, водорості, мікроби, гриби). Біологічні методи не споживають енергії і проводяться в екологічно сприятливих умовах. Також відсутність токсичних хімікатів та розчинників робить процес екологічно безпечним. Такі наноматеріали нетоксичні і можуть використовуватись у клінічних та біомедичних цілях. Проте, аналіз досліджень робіт щодо біологічного синтезу НЧ Au та НЧ Ag показує недостатню вивченість процесів біологічного відновлення срібла і золота, внаслідок складності ферментативних механізмів та білках, що є відповідальними за синтез наночастинок. Основним недоліком, наприклад,

мікробного біологічного синтезу наночастинок є тривалість виробництва, оскільки мікроби ростуть у природних умовах та синтезують наночастки, що необхідно вирішити у майбутніх дослідженнях. Не вирішена у перспективі проблема багатосерійного виробництва та оптимізація промислового масштабу таких наноматеріалів.

Даний огляд літературних даних щодо синтезу нанометалів срібла і золота показує, що ключевим моментом успішного прикладного застосування є розробка методів їх синтезу, які мають бути малотоксичними, маловитратними, комерційно здатними, оптимізовані щодо конкретного використання. Вибір методу синтезу, зазвичай залежить від властивостей використовуваного матеріалу, властивостей наночастинок заданих з урахуванням їх подальшого призначення. Такі дослідження активно продовжуються як іноземними, так і вітчизняними дослідниками. В Україні основні завдання та дослідження нанотехнології та наноустроїв виконуються у низці інститутів НАНУ а також у наукових лабораторіях та підрозділах провідних ВНЗ України.

### Список використаної літератури

[1]. Nanosensors – Global Market Trajectory & Analytics. ID: 027970 Report April 2021, Region: Global, 115 Pages, Global Industry Analysts, Inc. <https://www.researchandmarkets.com/reports/5027970/nanosensors-global-market-trajectory-and#rela3-4479459>

[2]. Nanotechnology and Nanomaterials Solutions for COVID-19: Diagnostic Testing, Antiviral and Antimicrobial Coatings and Surfaces, Air-Borne Filtration, Facemasks, PPE, Drug Delivery and Therapeutics. ID: 5023699. Report. May 2020. Region: Global. 273 Pages. Future Markets, Inc. <https://www.researchandmarkets.com/reports/5023699/nanotechnology-and-nanomaterials-solutions-for#tag-pos-11>

[3]. I. V. Zhikharev, V. I. Lyashenko. Nanotechnology in the world and Ukraine: problems and prospects. Economic Herald of Donbass. Management of innovations. 2007.

- 1(7). P. 117–145. <http://dspace.nbuiv.gov.ua/handle/123456789/15380>
- [4]. Zhou, J.; Ralston, J.; Sedef, R.; Beattie, D.A. Functionalized gold nanoparticles: Synthesis, structure and colloid stability. *J. Colloid Interface Sci.* 2009, 331, 251–262.
- [5]. Zhang L., Wang E. Metal nanoclusters: New fluorescent probes for sensors and bioimaging. *Nano Today*. 2014;9:132–157. doi: 10.1016/j.nantod.2014.02.010.
- [6]. M. Falahati, F. Attar, M. Sharifia, A.A. Saboury, A. Salihie, F.M. Aziz, I. Kostova, C. Burda, P. Priece, J. A. Lopez-Sanchez, S. Laurent, N. Hooshmand, M.A. El-Sayed, Gold nanomaterials as key suppliers in biological and chemical sensing, catalysis, and medicine, *BBA Gen. Subj.* 2020. (1864) 129435–129462.
- [7]. Ghosh P., Han G., De M., Kim C.K., Rotello V.M. Gold nanoparticles in delivery applications. *Adv. Drug Deliv. Rev.* 2008; 60:1307–1315. doi: 10.1016/j.addr.2008.03.016.
- [8]. Kshitij R B Singh, Vanya Nayak, Jay Singh, Ajaya Kumar Singh and Ravindra Pratap Singh. Potentialities of bioinspired metal and metal oxide nanoparticles in biomedical sciences. *RSC Adv.*, 2021, 11, 24722. DOI: 10.1039/d1ra04273d
- [9]. Kamat P. V. Photophysical, Photochemical and Photocatalytic Aspects of Metal Nanoparticles. *J. Phys. Chem. B.* 2002; 106:7729–7744. doi: 10.1021/jp0209289.
- [10]. Takanari Togashi, Koki Tsuchida, Shiori Soma, Ryosuke Nozawa, Jun Matsui, Katsuhiko Kanaizuka, Masato Kurihara. Size-Tunable Continuous-Seed-Mediated Growth of Silver Nanoparticles in Alkylamine Mixture via the Stepwise Thermal Decomposition of Silver Oxalate. *Chemistry of Materials* 2020, 32 (21), 9363–9370. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.0c03303>
- [11]. Jordi Piella, Neus G. Bastús, and Victor Puntes. Size-Controlled Synthesis of Sub-10-nanometer Citrate-Stabilized Gold Nanoparticles and Related Optical Properties. *Chemistry of Materials* 2016, 28 (4), 1066–1075. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.5b04406>
- [12]. Delfino Cornejo-Monroy, Laura S. Acosta-Torres, Aura I. Moreno-Vega, Carlos Saldana, Verónica Morales-Tlalpan, Víctor M. Castaño. Gold nanostructures in medicine: past, present and future. *Journal of Nanoscience Letters J. Nanosci. Lett.* 2013, 3: 25
- [13]. Sahoo G.P., Basu S., Samanta S., Misra A. Microwave-assisted synthesis of anisotropic gold nanocrystals in polymer matrix and their catalytic activities. *J. Exp. Nanosci.* 2014; 10:690–702. doi: 10.1080/17458080.2013.877163.
- [14]. Jin-Ha Choi, Jin-Ho Lee, Joohyung Son and Jeong- Woo Choi. Noble Metal-Assisted Surface Plasmon Resonance Immunosensors. *Sensors* 2020, 20, 1003; doi:10.3390/s20041003
- [15]. Amir Ghasemi, Navid Rabiee, Sepideh Ahmadi, Shabnam Hashemzadeh, Farshad Lolasi, h Mahnaz Bozorgomid, Alireza Kalbasi, Behzad Nasser, Amin Shiralizadeh Dezfouli, Amir Reza Aref, Mahdi Karimi and Michael R. Hamblin. Optical assays based on colloidal inorganic nanoparticles. *Analyst*, 2018, 143, 3249.
- [16]. Jonathan A. Scholl, Koh A. L., Dionne J.A. Quantum plasmon resonances of individual metallic nanoparticles. *Nature*. 2012; 483:421–427. doi: 10.1038/nature10904.
- [17]. Fozzieh Sohrabi, Sajede Saaidifard, Masih Ghasemi, Tannaz Asadishad, Seyedeh Mehri Hamidi, Seyed Masoud Hosseini. Role of plasmonics in detection of deadliest viruses: a review. *Eur. Phys. J. Plus.* (2021) 136:675 <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01657-9>
- [18]. Serafinelli, C., Fantoni, A. (2021). ENHANCED PLASMONIC PROPERTIES OF METAL NANOPARTICLES/WS<sub>2</sub> HYBRIDS. *Academia Letters*, Article 947. <https://doi.org/10.20935/AL947>.
- [19]. Naidu, K. B.; Govender, P.; Adam, J. K. Biomedical applications and toxicity of nanosilver: A review. *Med. Technol. SA.* 2015, 29, 13–19.
- [20]. Phumuzile Dube; Samantha Meyer, Abram Madiehe, Mervin Meyer. Antibacterial activity of biogenic silver and gold nanoparticles synthesized from *Salvia africana* and *Sutherlandia frutescens*. *Nanotechnology*. 2020 Dec 11; 31(50):505607. DOI: 10.1088/1361-6528/abb6a8
- [21]. Aizamddin, M. F.; Mahat, M. M.; Ariffin, Z. Z.; Samsudin, I.; Razali, M. S. M.;

- Amir, M. A. Synthesis, Characterisation and Antibacterial Properties of Silicone–Silver Thin Film for the Potential of Medical Device Applications. *Polymers* 2021, 13, 3822. <https://doi.org/10.3390/polym13213822>
- [22]. Le Ouay, B., & Stellacci, F. (2015). Antibacterial activity of silver nanoparticles: A surface science insight. *Nano Today*, 10(3), 339–354. doi:10.1016/j.nantod.2015.04.002
- [23]. Temoor Ahmed, Muhammad Shahid, Muhammad Noman, Muhammad Bilal Khan Niazi, Faisal Mahmood, Irfan Manzoor, Yang Zhang, Bin Li, Yong Yang, Chengqi Yan and Jianping Chen. Silver Nanoparticles Synthesized by Using *Bacillus cereus* SZT1 Ameliorated the Damage of Bacterial Leaf Blight Pathogen in Rice. *Pathogens* 2020, 9, 160; doi:10.3390/pathogens9030160
- [24]. Chamakura K., Perez-Ballesteros R., Luo Zh., Baskir S., Liu J. Comparison of bactericidal activities of silver nanoparticles with common chemical disinfectants // *Colloid. Surfac. B.* 2011. V. 84. № 1. P. 88–96.
- [25]. Yu S. J., Yin Y. G., Liu J. F. Silver nanoparticles in the environment. *Environ. Sci. Proc. Impacts*. 2013; 15:78–92. doi: 10.1039/C2EM30595J.
- [26]. EL- Ghwas DE, Elkhateeb WA, Akram M and Daba GM. Nanoparticles: Characterization, Biological Synthesis and Applications. *Open Access Journal of Microbiology & Biotechnology*. Volume 6 Issue 2. June 16, 2021 DOI: 10.23880/oajmb-16000196
- [27]. Sakthi Devi R, Girigoswami A, Siddharth M, Girigoswami. Applications of Gold and Silver Nanoparticles in Theranostics. *K. Appl Biochem Biotechnol*. 2022 May 13:1–33. doi: 10.1007/s12010–022–03963-z.
- [28]. Edwards-Jones V. The benefits of silver in hygiene, personal care and healthcare. *Lett. Appl. Microbiol*. 2009; 49:147–152. doi: 10.1111/j.1472–765X.2009.02648.x.
- [29]. Agnishwar Girigoswami, Mahashweta Mitra Ghosh, Pragma Pallavi, Seenuvasan Ramesh, Koyeli Girigoswami. Nanotechnology in Detection of Food Toxins – Focus on the Dairy Products. *Biointerface Research in Applied Chemistry* Volume 11, Issue 6, 2021, 14155–14172 <https://doi.org/10.33263/BRIAC116.1415514172>
- [30]. Chernousova, S.; Epple, M. Silver as antibacterial agent: Ion, nanoparticle, and metal. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 2013, 52, 1636–1653. doi: 10.1002/anie.201205923.
- [31]. Simon-Deckers, A.; Gouget, B.; Mayne-L’hermite, M.; Herlin-Boime, N.; Reynaud, C.; Carriere, M. In vitro investigation of oxide nanoparticle and carbon nanotube toxicity and intracellular accumulation in A549 human pneumocytes. *Toxicology*. 2008, 253, 137–146. doi: 10.1016/j.tox.2008.09.007.
- [32]. Cho J.-G., Kim K.-T., Ryu T.-K., Lee J.-W., Kim J.-E., Kim J. Stepwise embryonic toxicity of silver nanoparticles on *Oryzias latipes*. *BioMed. Res. Int.* 2013;2013:1–7.
- [33]. Serenella Medici, Massimiliano Peana, Valeria M. Nurchi and Maria Antonietta Zoroddu. Medical Uses of Silver: History, Myths, and Scientific Evidence. *J. Med. Chem.* 2019, 62, 5923–5943. DOI: 10.1021/acs.jmedchem.8b01439
- [34]. Jin Kwon Kim, Hoi Pin Kim, Jung Duck Park, Kangho Ahn, Woo Young Kim, Mary Gulumian, Günter Oberdörster and Il Je Yu. Lung retention and particokinetics of silver and gold nanoparticles in rats following subacute inhalation co-exposure. *Particle and Fibre Toxicology* (2021) 18:5 <https://doi.org/10.1186/s12989–021–00397-z>
- [35]. Vishal Sharma. Review and Synthesis of Silver Nanoparticles, Characterization and Application. *International Journal of Science and Research ((IJSR))*. (2022).V.11 Issue 4. P.397–403. DOI: 10.21275/SR22331094950
- [36]. Košević MG et al (2019) Structural and electrochemical properties of nesting and core/shell Pt/TiO<sub>2</sub> spherical particles synthesized by ultrasonic spray pyrolysis. *Metals (Basel)* 10(1):11
- [37]. Lusker KL, Li J-R, Garno JC (2011) Nanostructures of functionalized gold Nanoparticles prepared by particle lithography with organosilanes. *Langmuir* 27(21):13269–13275
- [38]. Davies G-L, O’Brien J, Gun’ko YK (2017) Rare earth doped silica nanoparticles via thermolysis of a single source metallasilsesquioxane precursor. *Sci Rep* 7(1):45862

- [39]. Abedini A, Daud AR, Abdul Hamid MA, Kamil Othman N, Saion E A review on radiation-induced nucleation and growth of colloidal metallic nanoparticles. *Nanoscale Res Lett* (2013). 8(1):474. <http://www.nanoscalereslett.com/content/8/1/474>
- [40]. Medici S, Peana M, Nurchi VM, Lachowicz JJ, Crisponi G, Zoroddu MA. Noble metals in medicine: latest advances. *Coord Chem Rev* 2015; 284:329–350. DOI: 10.1016/j.ccr.2014.08.002.
- [41]. Hasan S (2014) A review on nanoparticles: their synthesis and types. *Res J Recent Sci Research Journal of Recent Sciences*. Vol. 4(ISC-2014), 1–3 (2015)/ <https://www.researchgate.net/publication/273203342>
- [42]. Sun S. (2006) Recent advances in chemical synthesis, self-assembly, and applications of FePt nanoparticles. *Adv Mater* 18(4):393–403
- [43]. Starowicz M, Stypuła B (2008). Electrochemical synthesis of ZnO nanoparticles. *Eur. J. Inorg. Chem.* 2008(6):869–872
- [44]. Ramimoghadam D, Bagheri S, Hamid SBA (2014) Progress in electrochemical synthesis of magnetic iron oxide nanoparticles. *J. Magn. Mater.* 368:207–229
- [45]. Noman MT, Petru M, Militký J, Azeem M, Ashraf MA (2019) One-pot sonochemical synthesis of ZnO nanoparticles for photocatalytic applications, modelling and optimization. *Materials (Basel)* 13(1):14
- [46]. Balachandramohan J, Sivasankar T, Sivakumar M (2020) Facile sonochemical synthesis of Ag<sub>2</sub>O-guar gum nanocomposite as a visible light photocatalyst for the organic transformation reactions. *J Hazard Mater* 385:121621
- [47]. Sharma D, Kanchi S, Bisetty K (2015) Biogenic synthesis of nanoparticles: a review. *Arab J Chem* 12:3576–3600
- [48]. H. M. El-Rafie, M. H. El-Rafie, M. K. Zahran. Green synthesis of silver nanoparticles using polysaccharides extracted from marine macro algae *Carbohydrate Polymers* 96 (2013) 403–410. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.03.071>
- [49]. Shakil Ahmed Polash, Nilofar Yakub Nadaf, Md. Atikur Rahman, Abdullah Mohammad Shohael. Green synthesis of silver nanoparticles (AgNPs): Agricultural applications and future vision. *Journal of biodiversity and Environmental Sciences (JBES)*. 2018. Vol. 13, No. 2, p. 35–57, <http://www.innspub.net>
- [50]. Ahmad S et al (2019) Green nanotechnology: a review on green synthesis of silver nanoparticles – an ecofriendly approach. *Int J Nanomed* 14:5087–5107
- [51]. Smyntyna V. A., Skobeeva V. M., Vorobyov N. K., Struts D. A., Kogut I. S., Sviridova O. I. Influence of external factors on the stability of the optical properties of silver nanoparticles. // *Sensor electronics and microsystem technologies*, v. 3(9), No. 1, 2012.
- [52]. Smyntyna, V. and V. Skobeeva. 2018. Heterogeneous Systems with Ag Nanoparticles. NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology. doi:10.1007/978-94-024-1304-5\_22.
- [53]. Smyntyna V. A., Skobeeva V. M. Synthesis and Optical Properties of Nanoparticles of Silver // *Technical Digest Frontiers in Optics (FiO) 2012 and Laser Science (LS) XXVIII Meetings*. (Optical Society of America, Washington, DC, 2012), FW3A.15.
- [54]. V. Smyntyna, V. Skobeeva, N. Malushin. HETEROGENEOUS SYSTEMS WITH SILVER NANOPARTICLES // *Book of Abstracts of the 9 th Nanoconference Advances in Bioelectrochemistry and Nanomaterials*. Vilnius Lithuania. 2016. P. 38–39.
- [55]. Kathryn M. Mayer and Jason H. Hafner. Localized Surface Plasmon Resonance Sensors. Kathryn M. Mayer and Jason H. Hafner. *Localized Surface Plasmon Resonance Sensors*. *Chem. Rev.* 2011, 111, 3828–3857. dx.doi.org/10.1021/cr100313v
- [56]. Anupam Roy, Onur Bulut, Sudip Some, Amit Kumar Mandal and M. Deniz Yilmaz. Green synthesis of silver nanoparticles: biomolecule-nanoparticle organizations targeting antimicrobial activity. (Review Article) *RSC Adv.*, 2019, 9, 2673–2702 DOI: 10.1039/C8RA08982E
- [57]. Oza, G., Reyes-Calderón, A., Mewada, A. *et al.* Plant-based metal and metal

alloy nanoparticle synthesis: a comprehensive mechanistic approach. *J Mater Sci* 55, 1309–1330 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10853-019-04121-3>

[58]. Srikar, S, Giri, D., Pal, D., Mishra, P. and Upadhyay, S. (2016) Green Synthesis of Silver Nanoparticles: A Review. *Green and Sustainable Chemistry*, 6, 34–56. doi: 10.4236/gsc.2016.61004

[59]. T. S. Santra, F. G. Tseng, and T. K. Barik. Biosynthesis of Silver and Gold Nanoparticles for Potential Biomedical Applications – A Brief Review. *Journal of Nanopharmaceutics and Drug Delivery*. Vol. 2, 1–17, 2014. doi:10.1166/jnd.2014.1065

[60]. Ritika CHAUHAN, Abhishek KUMAR, Jayanthi ABRAHAMA. Biological Approach to the Synthesis of Silver Nanoparticles with *Streptomyces* sp JAR1 and its Antimicrobial Activity. *Sci Pharm*. 2013; 81: 607–621. doi:10.3797/scipharm.1302-02

[61]. Peter Logeswari, Sivagnanam Silambarasan, Jayanthi Abraham. Synthesis of silver nanoparticles using plants extract and analysis of their antimicrobial property. *Journal of Saudi Chemical Society*. Volume 19, Issue 3, 2015. P. 311–317. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2012.04.007>

[62]. Abdelghany, T. M., Al-Rajhi, A. M. H., Al Abboud, M. A. *et al.* Recent Advances in Green Synthesis of Silver Nanoparticles and Their Applications: About Future Directions. A Review. *BioNanoSci*. 8, 5–16 (2018). <https://doi.org/10.1007/s12668-017-0413-3>

[63]. Ritika CHAUHAN, Abhishek KUMAR, Jayanthi ABRAHAMA. Biological Approach to the Synthesis of Silver Nanoparticles with *Streptomyces* sp JAR1 and its Antimicrobial Activity. *Sci Pharm*. 2013; 81: 607–621. doi:10.3797/scipharm.1302-02

[64]. Italo José Batista Durval, Hugo Morais Meira, Bruno Oliveira de Veras, Raquel Diniz Rufino, Attilio Converti and Leonie Asfora Sarubbo. Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using a Biosurfactant from *Bacillus cereus* UCP 1615 as Stabilizing Agent and Its Application as an Antifungal Agent. *Fermentation* 2021, 7, 233. <https://doi.org/10.3390/fermentation7040233>

[65]. Ayandiran D. Aina, Oluwafayoke Owolo, Okaro Ginikachukwu, Folasade O. Aina, Olusola N. Majolagbe, Olumide D. Olukanni, Mary C. Stephen, Aderiike, G. Adewumi. Biosynthesis of Silver Nanoparticles using Almond Plantleaf extract and their Antibacterial Activity. *International Journal of Engineering Science and Computing (IJESC)*, 2018. Volume 8 Issue No.10.P. 19227–19231.

[66]. Srikar, S. K., Giri, D. D., Pal, D. B., Mishra, P. K. and Upadhyay, S. N. (2016) Green Synthesis of Silver Nanoparticles: A Review. *Green and Sustainable Chemistry*, 6, 34–56. <http://dx.doi.org/10.4236/gsc.2016.61004>

[67]. Srikar, S. K., Giri, D. D., Pal, D. B., Mishra, P. K. and Upadhyay, S. N. (2016) Light Induced Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using Aqueous Extract of *Prunus amygdalus*. *Green and Sustainable Chemistry*, 6, 26–33. <http://dx.doi.org/10.4236/gsc.2016.61003>

[68]. Deepak Bamal, Anoop Singh, Gaurav Chaudhary, Monu Kumar, Manjeet Singh, Neelam Rani, Poonam Mundlia and Anita R. Sehrawat. Silver Nanoparticles Biosynthesis, Characterization, Antimicrobial Activities, Applications, Cytotoxicity and Safety Issues: An Updated Review. *Nanomaterials* 2021, 11, 2086–2126. <https://doi.org/10.3390/2126>

[69]. Das, R. K.; Pachapur, V. L.; Lonappan, L.; Naghdi, M.; Pulicharla, R.; Maiti, S.; Cledon, M.; Dalila, L. M. A.; Sarma, S.; Brar, S. K. Biological synthesis of metallic nanoparticles: Plants, animals and microbial aspects. *Nanotechnol. Environ. Eng.* 2017, 2, 18.

[70]. Jiale Huang, Liqin Lin, Qingbiao Li, Daohua Sun, Yuanpeng Wang, Yinghua Lu, Ning He, Kun Yang, Xin Yang, Huixuan Wang, Wenta Wang, and Wenshuang Lin. Continuous-Flow Biosynthesis of Silver Nanoparticles by Lixivium of Sundried *Cinnamomum camphora* Leaf in Tubular Microreactors. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2008, 47, 16, 6081–6090. <https://doi.org/10.1021/ie701698e>

[71]. Anal K. Jha, K. Prasad, Kamlesh Prasad, A. R. Kulkarni. Plant system: Nature's nanofactory. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* Volume 73, Issue 2, 15 October

2009, Pages 219–223. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2009.05.018>

[72]. Shashi Prabha Dubey, Manu Lahtinen, Mika Sillanp. Green synthesis and characterizations of silver and gold nanoparticles using leaf extract of *Rosa rugose*. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. Volume 364, Issues 1–3, 20 July 2010, Pages 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.04.023>

[73]. N. Muniyappan, N. S. Nagarajan. Green synthesis of silver nanoparticles with *Dalbergia spinosa* leaves and their applications in biological and catalytic activities. *Process Biochemistry* Volume 49, Issue 6, June 2014, Pages 1054–1061. <https://doi.org/10.1016/j.procbio>.

[74]. F. B. Moreno-Luna, J. L. Herrera-Pérez, A. Bautista-Hernández, M. A. Meraz-Melo, J. Santoyo-Salazar, O. Vázquez-Cuchillo. Biosynthesis of gold nanoparticles from *Agave potatorum* extracts: effect of the solvent in the extraction. *Materials Today Sustainability*. Volume 20, December 2022, 100231. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2022.100231>

[75]. M. Jannathul Firdhouse. P. Lalitha. Biogenic green synthesis of gold nanoparticles and their applications – A review of promising properties. *Inorganic Chemistry Communications*. Volume 143, September 2022, 109800. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2022.109800>

[76]. Anjali Guleria, Harshita Sachdeva, Kirti Saini, Komal Gupta, Jaya Mathur. Recent trends and advancements in synthesis and applications of plant-based green metal nanoparticles: A critical review. *Applied Organometallic Chemistry*. Volume 36, Issue 9, September 2022. 6778. <https://doi.org/10.1002/aoc.6778>

[77]. Anupam Roy, Onur Bulut, Sudip Some, Amit Kumar Mandal and M. Deniz Yilmaz. Green synthesis of silver nanoparticles: biomolecule-nanoparticle organizations targeting antimicrobial activity. *RSC Adv.*, 2019, 9, 2673. DOI: 10.1039/c8ra08982e

[78]. Mrinalini Parmar, Mallika Sanyal. Extensive study on plant mediated green synthesis of metal nanoparticles and their application

for degradation of cationic and anionic dyes. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. Volume 17, May 2022, 100624. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100624>

[79]. Chakraborty, N., Banerjee, A., Lahiri, S. *et al.* Biorecovery of gold using cyanobacteria and an eukaryotic alga with special reference to nanogold formation – a novel phenomenon. *J Appl Phycol* 21, 145–152 (2009). <https://doi.org/10.1007/s10811-008-9343-3>

[80]. Luangpipat, T., Beattie, I. R., Chisti, Y. *et al.* Gold nanoparticles produced in a microalga. *J Nanopart Res* 13, 6439–6445 (2011). <https://doi.org/10.1007/s11051-011-0397-9>

[81]. Nasreen I. Hulkoti, T. C. Taranath. Biosynthesis of nanoparticles using microbes – A review. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* Volume 121, 1 September 2014, Pages 474–483. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2014.05.027>

[82]. Badri Narayanan, Natarajan Sakthivel. Biological synthesis of metal nanoparticles by microbes. *Advances in Colloid and Interface Science*. Volume 156, Issues 1–2, 22 April 2010, Pages 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2010.02.001>

[83]. Mandal, D., Bolander, M. E., Mukhopadhyay, D. *et al.* The use of microorganisms for the formation of metal nanoparticles and their application. *Appl Microbiol Biotechnol* 69, 485–492 (2006). <https://doi.org/10.1007/s00253-005-0179-3>.

[84]. Tanja Klaus, Ralph Joerger, Eva Olsson, and Claes-Göran Granqvist. Silver-based crystalline nanoparticles, microbially fabricated. *APPLIED PHYSICAL SCIENCES*. November 23, 1999. 96 (24) 13611–13614 <https://doi.org/10.1073/pnas.96.24.13611>

[85]. Priyabrata Mukherjee, Satyajyoti Senapati, Deendayal Mandal, *et al.* *Chem-BioChem*. Volume 3, Issue 5, May 3, 2002. Pages 461–463. [https://doi.org/10.1002/1439-7633\(20020503\)3:5<461::AID-CBIC461>3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/1439-7633(20020503)3:5<461::AID-CBIC461>3.0.CO;2-X).

[86]. Virender K. Sharma, Ria A. Yngard, Yekaterina Lin. Silver nanoparticles: Green synthesis and their antimicrobial activities. *Advances in Colloid and Interface Science*.



Volume 145, Issues 1–2, 30 January 2009, Pages 83–96. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2008.09.002>

[87]. Kaushik N. Thakkar, Snehit S. Mhatre, Rasesh Y. Parikh. Biological synthesis of metallic nanoparticles. Review Article. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*. Volume 6, Issue 2, April 2010, Pages 257–262. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2009.07.002>

[88]. Mohanpuria, P., Rana, N. K. & Yadav, S. K. Biosynthesis of nanoparticles: technological

concepts and future applications. *J Nanopart Res.* 10, 507–517 (2008). <https://doi.org/10.1007/s11051-007-9275-x>

[89]. Ghorbani HR et al (2011) Biological and non-biological methods for silver nanoparticles synthesis. *Chem Biochem Eng Q.* 25(3):317–326.

Стаття надійшла до редакції 27.11.2022 р.

PACS81.05.Dz, UDC621.32; 535. 37  
DOI: 10.18524/1815–7459.2022.4.271204

## SYNTHESIS OF NOBLE METAL NANOPARTICLES AND THEIR USE IN SENSOR DEVICES, PART 1: SYNTHESIS OF Ag, Au NANOPARTICLES

*V.M. Skobeeva, V.A. Smyntyna., Ya. I. Lepikh*

Odesa I. I. Mechnikov National University, 65082, Odesa, street Dvoryanska, 2, Ukraine

### Summary

The technology and application of nanosensors is one of the areas in which the benefits of nanotechnology are directly and to the full are used. Significant progress in practical application of nanotechnologies, particular, in the development of nanosensors, has become possible as the result of development methods for the synthesis of nanomaterials, composites, and functional nanosystems based on them.

By now, a large amount of experimental work has been carried out, as both in the synthesis of nanomaterials and in the manufacture of nanosensors for various purposes.

The article which consist of two parts is devoted to a review of works in these two directions. The purpose of the first part is to provide an overview of resent trends in the synthesis and various applications of noble metal nanoparticles, in particular the silver and the gold. The article gives examples of the chemical method for the synthesis of silver nanoparticles and shows the dependence of their properties on technological conditions. As an alternative to the traditional chemical synthesis method, this review presents a comprehensive analysis of recent advances in green fusion, the method for synthesizing silver and gold nanoparticles involving various plant species, algae, fungi, bacteria, and other microorganisms. Actual problems of the biological synthesis metal nanoparticles and ways to solve its are outlined.

**Keywords:** synthesis of nanoparticles, silver nanoparticles, gold nanoparticles, chemical synthesis, biological synthesis

PACS81.05.Dz, UDC621.32; 535. 37  
DOI: 10.18524/1815–7459.2022.4.271204

**СИНЕЗ НАНОЧАСТИНОК БЛАГОРОДНИХ МЕТАЛІВ  
ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ У СЕНСОРНИХ ПРИСТРОЯХ,  
ЧАСТИНА 1: СИНТЕЗ НАНОЧАСТИНОК Ag, Au**

*В. М. Скобеєва, В. А. Сминтина, Я. І. Лепіх*

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,  
65082, Одеса, вул. Дворянська, 2, Україна.

**Реферат**

Технологія та застосування наносенсорів є однією з областей, в якій безпосередньо та всеосяжно використовуються переваги нанотехнологій. Істотний прогрес у галузі практичного застосування нанотехнологій, зокрема у розробці наносенсорів, став можливим у результаті розробки методів синтезу наноматеріалів, композитів та функціональних наносистем на їх основі. На цей час виконано великий обсяг експериментальних робіт, як із синтезу наноматеріалів, так і з виготовлення наносенсорів різного призначення. Огляду робіт з цих двох напрямів присвячена стаття, що складається із двох частин.

Метою першої частини статті є представлення огляду сучасних тенденцій синтезу та різноманітних застосувань наночастинок шляхетних металів, зокрема срібла та золота. У статті наведено приклади хімічного методу синтезу наночастинок срібла, продемонстровано залежність їх властивостей від технологічних умов. Як альтернатива традиційному хімічному методу синтезу, у цьому огляді представлений всебічний аналіз останніх досягнень у галузі зеленого синтезу – методу синтезу наночастинок срібла та золота за участю різних видів рослин, водоростей, грибків, бактерій та інших мікроорганізмів. Позначено сучасні проблеми біологічного синтезу металевих наночастинок та способи їх вирішення.

**Ключові слова:** синтез наночастинок, наночастки срібла, наночастки золота, хімічний синтез, біологічний синтез

## ІНФОРМАЦІЯ ДЛЯ АВТОРІВ. ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ У ЖУРНАЛ

Журнал «Сенсорна електроніка і мікросистемні технології» публікує статті, короткі повідомлення, листи до Редакції, а також коментарі, що містять результати фундаментальних і прикладних досліджень, за наступними напрямками:

1. Фізичні, хімічні та інші явища, на основі яких можуть бути створені сенсори
2. Проектування і математичне моделювання сенсорів
3. Сенсори фізичних величин
4. Оптичні, оптоелектронні і радіаційні сенсори
5. Акустоелектронні сенсори
6. Хімічні сенсори
7. Біосенсори
8. Наносенсори (фізика, матеріали, технологія)
9. Матеріали для сенсорів
10. Технологія виробництва сенсорів
11. Сенсори та інформаційні системи
12. Мікросистемні та нанотехнології (MST, LIGA-технологія та ін.)
13. Деградація, метрологія і сертифікація сенсорів

Журнал публікує також замовлені огляди з актуальних питань, що відповідають його тематиці, поточну інформацію – хроніку, персоналії, платні рекламні повідомлення, оголошення щодо конференцій.

Основний текст статті повинен відповідати вимогам Постанови Президії ВАК України від 15.01.2003 р. № 7–05/1 (Бюлетень ВАК України 1, 2003 р.) і бути структурованим. Матеріали, що надсилаються до Редакції, повинні бути написані з максимальною ясністю і чіткістю викладу тексту. У поданому рукописі повинна бути обґрунтована актуальність розв'язуваної задачі, сформульована мета дослідження, міститися оригінальна частина і висновки, що забезпечують розуміння суті отриманих результатів і їх новизну. Автори повинні уникати необґрунтованого введення нових термінів і вузькопрофільних жаргонних висловів.

Редакція журналу просить авторів при направленні статей до друку керуватися наступними правилами:

1. Рукописи повинні надсилатися у двох примірниках українською або англійською мовою і супроводжуватися файлами тексту і малюнків на CD. Рукописи, які пропонуються авторами з України або країн СНД до видання англійською мовою обов'язково доповнюються україномовною або російськомовною версією. Електронна копія може бути надіслана електронною поштою.
2. Прийнятні формати тексту: MS Word (rtf, doc, docx).
3. Прийнятні графічні формати для рисунків: EPS, TIFF, BMP, PCX, WMF, MS Word і MS Graf, JPEG. Рисунки, які створені за допомогою програмного забезпечення для математичних і статистичних обчислень, повинні бути перетворені до одного з цих форматів.
4. На статті авторів з України мають бути експертні висновки про можливість відкритого друку.

### Рукописи надсилати за адресою:

Лепіх Ярослав Ілліч,  
Заст. гол. редактора,  
Одеський національний університет  
імені І. І. Мечникова, МННФТЦ (НДЛ-3),  
вул. Дворянська, 2,  
Одеса, 65082, Україна.

Телефон / факс +38(048) 723–34–61,  
E-mail: [semst-journal@onu.edu.ua](mailto:semst-journal@onu.edu.ua),  
<http://semst.onu.edu.ua>

Здійснюється анонімне рецензування рукописів статей.

## Правила підготовки рукопису:

Рукописи повинні супроводжуватися офіційним листом, підписаним керівником установи, де була виконана робота. Це правило не стосується робіт представлених авторами із закордону чи міжнародними групами авторів.

Авторське право переходить Видавцю.

Титульний аркуш:

1. PACS і Універсальний Десятковий Код Класифікації (УДК) (для авторів із країн СНД) – у верхньому лівому куті. Допускається декілька відділених комами кодів. Якщо ніякі коди класифікації не позначені, код(и) буде(-уть) визначено Редакційною Колегією.

2. Назва роботи (по центру, прописними літерами, шрифт 14pt, жирно).

3. Прізвище (-а) автора(-ів) (по центру, шрифт 12pt).

4. Назва установи, повна адреса, телефони і факси, e-mail для кожного автора, нижче, через один інтервал, окремим рядком (по центру, шрифт 12pt).

5. Анотація: до 1000 символів.

6. Ключові слова: їхня кількість не повинна перевищувати восьми слів. В особливих випадках можна використовувати терміни з двома – чи трьома словами. Ці слова повинні бути розміщені під анотацією і написані тією самою мовою.

П.п. 2,3,4,5,6 послідовно викласти українською та англійською мовами.

Для авторів з закордону, які не володіють українською мовою, пп. 2–5 викладаються англійською мовою.

7. До кожного примірника статті додаються реферати українською та англійською мовами (кожен реферат на окремому аркуші). Особливу увагу слід приділяти написанню резюме статті англійською мовою. Для цього доцільно користуватися послугами кваліфікованих спеціалістів-лінгвістів з подальшим науковим редагуванням тексту автором(-ами). Перед словом «реферат» необхідно написати повну назву статті відповідною мовою, УДК, прізвища та ініціали авторів, назви установ.

Реферат обсягом 200–250 слів має бути структурованим: мета (чітко сформульована), методи дослідження, результати дослідження (стисло), узагальнення або висновки.

Після тексту реферату з абзацу розміщуються ключові слова.

8. Текст статті повинен бути надрукований через 1,5 інтервали, на білому папері формату А4. Поля: зліва – 3см, справа – 1,5см, вверху і знизу – 2,5см. Шрифт 12pt. Підзаголовки, якщо вони є, повинні бути надруковані прописними літерами, жирно.

Рівняння повинні бути введені, використовуючи MS Equation Editor або MathType. Роботи з рукописними вставками не приймаються. Таблиці повинні бути представлені на окремих аркушах у форматі відповідних текстових форматів (див. вище), чи у форматі тексту (з колонками, відділеними інтервалами, комами, крапкам з комою, чи знаками табулювання).

9. У кінці тексту статті указати прізвища, імена та по батькові усіх авторів, поштову адресу, телефон, факс, e-mail (для кореспонденції).

10. Список літератури повинен бути надрукований через 1,5 інтервали, з літературою, пронумерованою в порядку її появи в тексті. Бібліографія друкується лише латиницею (кирилиця подається в транслітерації). Порядок оформлення літератури повинен відповідати вимогам ВАК України, наприклад:

[1]. I. M. Cidilkovskii. *Elektrony i dyrki v poluprovodnikah*. Nauka, M. 450 s. (1972).

[2]. J. A. Hall. *Imaging tubes*. Chap. 14 in *The Infrared Handbook*, Eds. W. W. Wolfe, G. J. Zissis, pp. 132–176, ERIM, Ann Arbor, MI (1978).

[3]. N. Blutzer, A. S. Jensen. *Current readout of infrared detectors // Opt. Eng.*, 26(3), pp. 241–248 (1987).

11. Підписи до рисунків і таблиць повинні бути надруковані в рукописі з двома пробілами після списку літератури. Виносок, якщо можливо, бажано уникати.

Приймаються тільки високоякісні рисунки. Написи і символи повинні бути надруковані усередині рисунку. Негативи, слайди, і діапозитиви не приймаються.

Кожен рисунок повинен бути розташований у тексті статті після посилання на нього та мати розмір, що не перевищує 160x200 мм. Для тексту на рисунках використовуйте шрифт 10pt. Одиниці виміру повинні бути позначені після коми (не в круглих дужках). Усі рисунки повинні бути пронумеровані в порядку їх появи в тексті, з частинами позначеними як (а), (б), і т. д. Розміщення номерів рисунків і напису усередині малюнків не дозволяються.

Кольоровий друк можливий, якщо його вартість сплачується авторами чи їх спонсорами.

12. Стаття має бути підписана автором (усіма авторами) з зазначенням дати на останній сторінці.

Автори несуть повну відповідальність за бездоганне мовне оформлення тексту, особливо за правильну наукову термінологію (її слід звіряти за фаховими термінологічними словниками).

13. Датою надходження статті вважається день, коли до редколегії надійшов остаточний варіант статті після рецензування.

Після одержання коректури статті автор повинен виправити лише помилки (чітко, синьою

або чорною ручкою неправильно закреслити, а поряд з цим на полі написати правильний варіант) і терміново відіслати статтю на адресу редколегії електронною поштою.

Підпис автора у кінці статті означає, що автор передає права на видання своєї статті редакції. Автор гарантує, що стаття оригінальна; ні стаття, ні рисунки до неї не були опубліковані в інших виданнях.

Відхилені статті не повертаються.

*ДО УВАГИ АВТОРІВ*

*Міжнародна агенція ISSN встановила скорочену назву нашого журналу  
«Sens. elektron. mikrosist. tehnol.»*

*Просимо Вас у своїх посиланнях і бібліографічних даних статей використовувати саме таку назву оскільки по ній буде здійснюватися посилання на Вашу статтю.*

# INFORMATION FOR AUTHORS

## THE REQUIREMENTS

## ON PAPERS PREPARATION

---

---

Journal «Sensor Electronics and Microsystems Technologies» publishes articles, brief messages, letters to Editors, and comments containing results of fundamental and applied researches, on the following directions:

1. Physical, chemical and other phenomena, as the bases of sensors
2. Sensors design and mathematical modeling
3. Physical sensors
4. Optical, optoelectronic and radiation sensors
5. Acoustoelectronic sensors
6. Chemical sensors
7. Biosensors
8. Nanosensors (physics, materials, technology)
9. Sensor materials
10. Sensors production technologies
11. Sensors and information systems
12. Microsystems and nano- technologies (MST, LIGA-technologies et al.)
13. Sensor's degradation, metrology and certification

The journal publishes the custom-made reviews on actual questions appropriate to the mentioned subjects, current information – chronicle, special papers devoted to known scientists, paid advertising messages, conferences announcements.

The basic article text should meet the SAC Ukraine Presidium Decree requirements from 15.01.2003 № 7-05/1 (SAC Bulletin № 1, 2003) and be structured. The materials sent to Editors, should be written with the maximal text presentation clearness and accuracy. In the submitted manuscript the actuality of problem should be reflected, the purpose of the work should be formulated. It must contain an original part and conclusions providing the received

results essence and their novelty understanding. The authors should avoid the new terms and narrowprofile jargon phrase unreasonable introduction.

Journal Edition asks authors at a direction of articles in a print to be guided by the following rules:

1. Manuscripts should be submitted in duplicate in Ukrainian or English, a hard copy and supplemented with a text file and figures on a CD. Manuscripts which are offered by authors from Ukraine or CIS countries to the edition in English are necessarily supplemented by Ukrainian or Russian version. An electronic copy may be submitted by e-mail.
2. Acceptable text formats: MS Word (rtf, doc, docx).
3. Acceptable graphic formats for figures: EPS, TIFF, BMP, PCX, CDR, WMF, MS Word and MS Graf, JPEG. Figures created using software for mathematical and statistical calculations should be converted to one of these formats.
4. For articles of authors from Ukraine there should be expert conclusions about an opportunity of an open print.

### **Manuscripts should be sent to:**

Lepikh Yaroslav Illich,  
The Vice Editor, Odesa National  
I. I. Mechnykov University, ISEPTC (RL-3),  
str. Dvoryanskaya, 2, Odesa,  
65082, Ukraine.

**Phone/fax** +38(048) 723-34-61,  
**E-mail:** semst-journal@onu.edu.ua,  
**http://**semst.onu.edu.ua

*Manuscripts of articles anonymous reviewing  
is carried out*

**The manuscript preparation rules:**

The manuscripts should be supplemented with the Official letter signed by a chief manager of the institution where the work was performed. This rule does not apply to papers submitted by authors from abroad or international groups of authors.

Copyright transfer to the Publisher.

Title Page:

1. PACS and Universal Decimal Classification code (for authors from CIS) in the top left corner. Several comma-separated codes are allowed. If no classification codes are indicated, the code(s) will be assigned by the Editorial Board.

2. Title of the paper (central, capital, bold, 14pt).

3. Name (–s) of the author(–s) below, in one space (central, normal face, 12pt).

4. Name of affiliated institution, full address, phone and fax numbers, e-mail addresses (if available) for each author below, in one space (central, normal face, 12pt).

5. Abstract: up to 1000 characters.

6. Keywords: its amount must not exceed eight words. In the specific cases it is acceptable to use two- or three-word terms. These words must be placed under the abstract and written in the same language.

Items 2,3,4,5,6 must be presented in series in Ukrainian and English languages.

For authors from abroad which do not know Ukrainian languages, items 2–5 may be presented only in English.

7. To each copy of the article abstracts in Ukrainian and the English language are applied (each abstract on a separate sheet). The special attention should be given to the writing of the article summary in English. For this purpose it is expedient to use the qualified experts – linguists with the further scientific editing the text by the author (–s). Before the word “abstract” it is necessary to write the full article name by the appropriate language, UDC, surnames and the initials of the authors, names of affiliated institutions. The abstract in volume of 200–250 words must be structured: the purpose (precisely formulated), research methods and results (shortly), generalizations or conclusions. After the text of the abstract from the item key words are placed.

8. Article text should be printed 1,5-spaced on white paper A4 format with a 12pt, margins: left – 3sm, right – 1,5, upper and lower – 2,5sm. Titles of the sections if it is present should be typed bold, capitals.

Equations should be entered using MS Equation Editor or MathType. Papers with handwritten equations are not accepted. Notations should be defined when the first appearing in the text.

Tables should be submitted on separate pages in the format of appropriate text formats (see above), or in the text format (with columns separated by interval, commas, or tabulation characters).

9. At the article text end one must indicate surnames, names and patronymics of all authors, the mail address, the phone, a fax, e-mail (for the correspondence).

10. List of references should be 1,5-spaced, with references numbered in order of their appearance in the text. The bibliography is printed only by the roman type (cyrillics represents in transliteration).

The literature registration order should conform to DAS of Ukraine requirements, for ex-ample:

[1]. I. M. Cidilkovskii. *Elektrony i dyrki v poluprovodnikah*. Nauka, M. 450 s. (1972).

[2]. J.A. Hall. Imaging tubes. Chap. 14 in *The Infrared Handbook*, Eds. W. W. Wolfe, G. J. Zissis, pp. 132–176, ERIM, Ann Arbor, MI (1978).

[3]. N. Blutzer, A. S. Jensen. Current readout of infrared detectors // *Opt. Eng.*, 26(3), pp. 241–248 (1987).

11. Figures and tables captions should be printed in the manuscript double-spaced after the list of references. Footnotes should be avoided if possible.

Only high-quality pictures can be accepted. Inscriptions and symbols should be printed inside picture. Negatives, and slides are not accepted.

Each figure should be printed on a separate page and have a size not exceeding 160x200 mm. For text inside figures, use 10pt. Measurement units should be indicated after a comma (not in blankets). All figures are to be numbered in order of its appearance in the text, with sections denoted as (a), (b), etc. Placing the figure numbers and captions inside figures is not allowed.

Color printing is possible if its cost is covered by the authors or their sponsors.

12. The article must be signed by author (all authors) with the date indication on the last page.

Authors bear full responsibility for irreproachable language make out of the text, especially for a correct scientific terminology (it should be verified under terminological dictionaries of the appropriate speciality).

13. The date of article acceptance is that one when the final variant comes to the publisher after a prepublication review.

After obtaining the proof sheet the author should correct mistakes (clearly cancel incorrect variant with blue or black ink and put the correct variant on border) and send urgently the revised variant to the editor by e-mail.

Author's signature at the article end vouches that author grants a copyright to the publisher. Author vouches that the work has not been published elsewhere, either completely, or in part and has not been submitted to another journal.

Not accepted manuscripts will not be returned.

***TO AUTHOR ATTENTION***

*International agency ISSN has established our Journal shortcut –  
«Sens. elektron. mikrosist. tehnol.»  
We ask you in your references and article bibliographic dates  
use such name as on it the reference to your article will be carried out.*



*Комп'ютерна верстка – В. Вітвицька*

Підписано до друку 28.12.2022 р. Формат 60×84/8.  
Ум.-друк. арк. 6,63. Тираж 50 прим.  
Зам. № 2552.

**Видавець і виготовлювач**  
**Одеський національний університет імені І. І. Мечникова**

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4215 від 22.11.2011 р.

Україна, 65082, м. Одеса, вул. Єлісаветинська, 12  
Тел.: (048) 723 28 39