

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

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

СЕНСОРНА ЕЛЕКТРОНІКА І МІКРОСИСТЕМНІ ТЕХНОЛОГІЇ 2024 – Т. 21, № 2

Науково-технічний журнал

Заснований 13.11.2003 року
Виходить 4 рази на рік

УДК 681.586

Засновник Одеський національний
університет імені І. І. Мечникова

За підтримки Українського фізичного
товариства

Ідентифікатор медіа: R30-03678
(zareestrovano Natsionalnoyu Radoyu
Ukrainy z pytany telobachennya
i radiomovlennya vid 28.03.2024 za № 1050)

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

Журнал реферується українським рефера-
тивним журналом «Джерело» та індексується
у міжнародних базах Index Copernicus Inter-
national Journals Master List, Directory of Re-
search Journal Indexing, General Impact Factor,
Crossref і EBSCO»

Видається за рішенням Вченої ради
Одеського національного університету
імені І. І. Мечникова
Протокол № 14 від 25.06.2024 р.

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

SENSOR ELECTRONICS AND MICROSYSTEM TECHNOLOGIES 2024 – VOL. 21, No. 2

Scientific and Technical Journal

Established on 13.11.2003
Published 4 times a year

UDC 681.586

Founded by Odesa I. I. Mechnikov
National University

With the support of the Ukrainian Physical
Society

The Media Identifier: R30-03678
(registered by the National Council of
Television and Radio Broadcasting of Ukraine
as of 28.03.2024, No.1050)

The journal is included in the Category B
of the List of Specialist Scientific Publications
of Ukraine in physical and mathematical,
engineering and biological sciences

The journal is abstracted in the Ukrainian
journal of abstracts “Dzherelo” and indexed
in international databases Index Copernicus
International Journals Master List, Directory of
Research Journal Indexing, General Impact
Factor, Crossref and EBSCO

Published as per the resolution of the Academic
Council of Odesa I. I. Mechnikov National
University
Minutes No.14 dated 25.06.2024

Editorial Board address:
2 Dvorianska St, ISEPTC (RL-3),
Odesa I. I. Mechnikov National University,
Odesa, 65082, Ukraine
Tel/Fax: +38(048)723-34-61

E-mail: semst-journal@onu.edu.ua, <http://semst.onu.edu.ua>
© ОНУ імені І. І. Мечникова, 2024

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)

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

V. M. Loktev

MAIN RESULTS OF SCIENTIFIC RESEARCH OF THE DEPARTMENT OF PHYSICS AND ASTRONOMY INSTITUTES OF THE NAS OF UKRAINE FOR 2023-2024 4

В. М. Локтєв

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ІНСТИТУТІВ ВФА НАН УКРАЇНИ ЗА 2023-2024 РОКИ

Біосенсори Biosensors

K. Berketa, S. Dzyadevych, O. Soldatkin
IMPROVEMENT OF THE ANALYTICAL CHARACTERISTICS OF OXIDASE-BASED ELECTROCHEMICAL BIOSENSORS' BY ADDING AN ADDITIONAL ENZYME - CATALASE TO THE BIOSELECTIVE MEMBRANE 25

К. Беркета, С. Дзядевич, О. Солдаткін
ПОКРАЩЕННЯ АНАЛІТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ БІОСЕНСОРІВ НА ОСНОВІ ФЕРМЕНТІВ КЛАСУ ОКСИДАЗ ЗА ДОПОМОГОЮ ДОДАВАННЯ У БІОСЕЛЕКТИВНУ МЕМБРАНУ ДОПОМІЖНОГО ФЕРМЕНТУ - КАТАЛАЗИ

Сенсори та інформаційні системи Sensors and information systems

M. A. Glauberman, Ya. I. Lepikh, O. S. Maksimov, A. P. Balaban

PROBLEMS OF CHOICE EFFECTIVE METHODS OF TREATMENT OF SEISMO SIGNALS FOR INTELLECTUAL OF SYSTEMS..... 38

М. А. Глауберман, Я. І. Лепіх, О. С. Максимов, А. П. Балабан

ПРОБЛЕМИ ВИБОРУ ЕФЕКТИВНИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ СЕЙСМОСИГНАЛІВ ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ

**Вітання академіку НАН України
Дзядевичу Сергію Вікторовичу 45**

**Інформація для авторів. Вимоги
до оформлення статей у журнал..... 46**

**Information for authors.
Paper preparation requirements 49**

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

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

УДК: 53,52

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.2.307065>

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ІНСТИТУТІВ ВФА НАН УКРАЇНИ ЗА 2023–2024 РОКИ

В. М. Локтєв

НАН України, вул. Володимирська, 64, 01601, Київ, vloktev@bitp.kiev.ua

Біля входу в Стелленбоський університет висить таке повідомлення:

*«Знищення будь-якої нації не вимагає атомних бомб
або використання ракет дальнього радіусу дії.
Потрібно тільки зниження якості освіти
і дозвіл учням шахрайства на іспитах.
Пацієнти вмирають від рук таких лікарів.
Будинки руйнуються від рук таких інженерів.
Гроші губляться від рук таких економістів і бухгалтерів.
Справедливість втрачається в руках таких юристів і суддів.
Крах освіти – це крах нації».*

Від редакції

На прохання редакції академік-секретар Відділення фізики і астрономії НАН України академік Локтєв Вадим Михайлович люб'язно погодився підготувати на основі щорічної звітної доповіді Відділенню статтю у наш журнал. Це вже стало доброю традицією і журнал отримує позитивні відгуки від авторів і читачів журналу, що свідчить про неабиякий інтерес до таких статей.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ІНСТИТУТІВ ВФА НАН УКРАЇНИ ЗА 2023–2024 РОКИ

В. М. Локтєв

Анотація. У статті висвітлено найбільш вагомні результати досліджень, досягнутих інститутами, що підпорядковані ВФА, даються певні наукові коментарі і оцінки. Розглядаються науково-організаційні питання з позиції підвищення ефективності діяльності підрозділів ВФА.

Ключові слова: наука, фізика, Національна академія наук України, досягнення, проблеми

© В. М. Локтєв, 2024

MAIN RESULTS OF SCIENTIFIC RESEARCH OF THE DEPARTMENT OF PHYSICS AND ASTRONOMY INSTITUTES OF THE NAS OF UKRAINE FOR 2023-2024

V. M. Loktev

Abstract. The article reflects the most significant results of research achieved by the institutes subordinated to the Department of Physics and Astronomy, provides certain scientific comments and assessments. Scientific and organizational issues are considered from the standpoint of increasing the efficiency of the Department of Physics and Astronomy divisions.

Keywords: science, physics, National Academy of Sciences of Ukraine, achievements, problems

ВСТУП

За Порядком денним я маю виголосити звіт про роботу відділення, тобто нашу роботу. Але, почавши готуватись, відчув, що робити це дуже важко, бо в голові, як, напевно, у кожного з нас, не думки про відділення, хоча ним практично щодня займався і намагався робити все, як завжди, а думки про ситуацію в країні – воєнний стан, мету яструбів *руССкого*, а фактично *СС-ського мира*, які посилають нам купу ракет, КАБи, різні БПЛА, заявляючи, що тим самим визволяють нас, хоча ми їх про це не просили. Ми несемо колосальні втрати – і людські, і матеріальні, – які ще вимагають точного визначення, що неможливо через неперервну зміну даних.

При цьому, ми знаходимось не поруч, а всередині війни, причому найгарячішої в Європі за останні 80 років.

Після певного періоду оптимізму, коли ми бачили сідниці ворога і вирішили, що головне зроблене, він через зменшення з різних причин обсягів західної допомоги і деякі наші прорахунки оговтався і навіть почав тіснити нас з вже нами відбитих територій. І дійшло до того, що попри панування загальної віри в Перемогу, навіть серйозні люди, інколи називають Перемогою повернення до ситуації 23 лютого 2022 року, що, принаймні мене, не може не дивувати, а якщо відверто, то сильно засмучує. Звісно, багато чого не знаю, але в моєму уявленні Перемога – це *повне* звільнення окупованих земель, вступ до НАТО та ЄС, а не до якихось штучних союзів з країнами, які нам палко обіцятимуть так званий палерівий захист і глибоку свою стурбованість.

Сказане є тим, що тривожить. Але є і надзвичайно приємні відкриття – рідкісна національна єдність, яку ми демонстрували, особливо у перші тижні війни. По суті єднання українців, якого, якщо бути чесними, майже ніхто не очікував, змінило ставлення до України на Заході, стало натхненням для його, справді, значної і різнопланової допомоги.

Закінчу цей вступ тим, що попрошу нас змінити розуміння шляху зростання нашої самосвідомості як народу, як науковців, як, зрештою, вільних людей.

Перетнувши лінію війни наше життя зміниться, і академії, впевнений, змін теж не уникнути. Ми не маємо права прогавити шанс зробити Академію більш потужною і ефективною, історія нас не пробачить.

Повертаючись, власне, до доповіді, хочу нагадати, що деякі зміни в нашій роботі почалися у 2020-му році, але з інших – пандемічних – причин і що наступні роки виявилися сильно несхожим з усіма попередніми. Справа в тім, що значна частина нашої роботи, спілкування припадає на віддалений режим. Можливо, їхня якість чи повнота обміну інформацією не змінилися, але вони інші. І хоча економляться кошти на відрядження та практично пропали наші очні зустрічі з колегами, їх трохи бракує, бо спілкування – це, як визначив Антуан де Сент-Екзюпері, розкіш.

Отже, про минулорічні результати нашого відділення, послідовність викладу яких відповідає послідовності переліку установ у Довіднику НАН України, а не рейтингу результатів.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Інституті фізики в цьому році подав як кращий результат, отриманий **Ганною Морозовською** разом з колегами з українських і зарубіжних установ, який встановив, що тонкі плівки оксиду гафнію-цирконію демонструють п'єзоелектричний відгук, що контролюється парціальним тиском кисню (рис. 1).

При цьому, як видно з рисунку, в атмосфері або в умовах присутності аргону, петлі гістерезису є вузькими, а коли кисень відсутній, то плівка знаходиться у фєроелектричній фазі, яка під дією неоднорідного змінного електричного поля може трансформуватись у діелектричну або фєріелектричну фазу. Автори запропонували фєро-іонну модель, яка

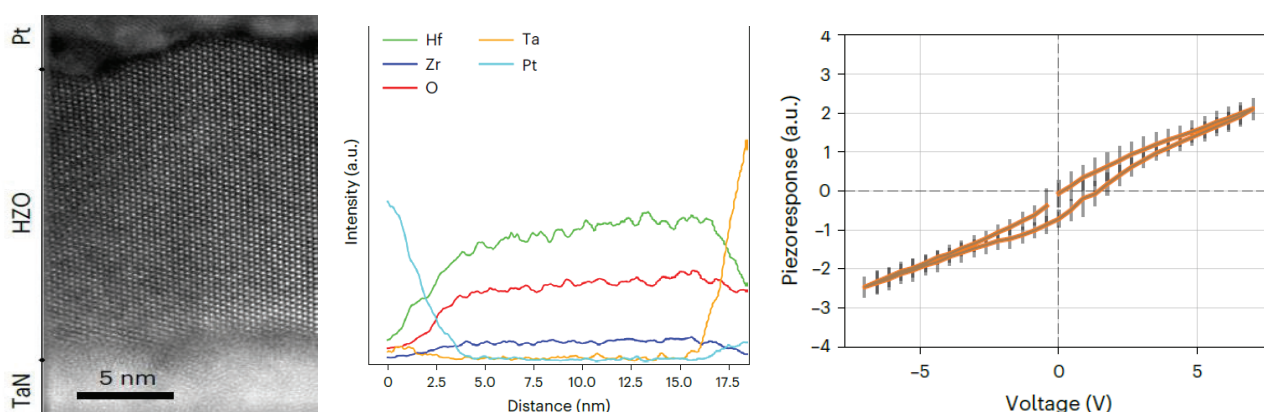


Рис. 1. K. P. Kelley, A. N. Morozovska, E. A. Eliseev, et al., Nature Materials 22, 1144 (2023).

спирається на уявлення, що кисень створює над поверхню і в ній шари екрануючого заряду та пружні дефекти. Шари екранують поляризацію і фазовий перехід між різними фазами стає неможливим. Результати, як стверджується, є важливими для використання таких ультратонких плівок у напівпровідниковій електроніці.

Найважливішим результатом, отриманим минулого року в Інституті фізики напівпровідників, визнано роботи, виконані **Петром Литвином**, **Володимиром Лисенком** та іншими спільно з співробітниками КНУ імені Шевченка. Вони стосуються деформаційної інженерії зонної структури германію. Авторами вперше продемонстрована значна залежність модуля Юнга нанометрових плівок германій-олово від вмісту останнього. При цьому зміна в них пружних полів викликає значний синій зсув низькоенергетичного краю фотопровідності, а також зменшення ширини смуги прямозонного переходу.

На рис. 2 наведена структура плівок, експериментальні криві модуля пружності від вмісту олова. Спектри розсіювання рентгєнівських променів демонструють зміни, що відбуваються у плівках. За свідченням авторів такі плівки можуть служити елементами нових оптоелектронних приладів з регульованим в інфрачервоному діапазоні спектром.

В Інституті металофізики **Валентином Татаренком**, **Тарасом Радченком** з колегами зроблено важливий крок у дослідженнях впливу деформацій різного характеру на електронні властивості чорного фосфору. Фрагмент його квазі-двовимірної структури на рис 3.

Цікаво, що йдеться про результат вже третього інституту і у всіх до кращих віднесено ефекти, зумовлені пружною підсистемою, хоча їхня природа і прояви різні. У даному випадку йдеться про матеріал пост-графєнової епохи, синтезований лише у 2014 році і цікавий тим, що на відміну від графєну він має заборонену зону. А скінченність щільності в спек-

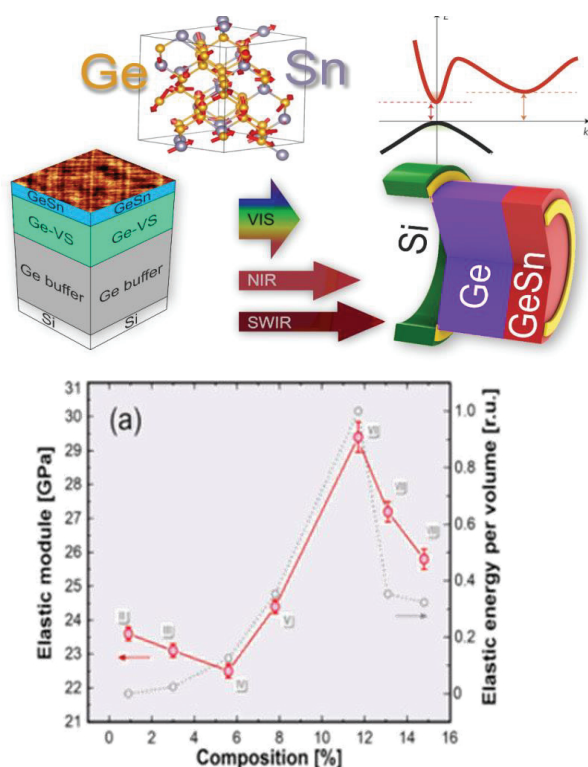


Рис. 2. P. Lytvyn, ... V. S. Lysenko et. al. Appl. Phys. Lett. 123 (2023).; S. Kondratenko, et. al. Phys. Rev. Mater. 7. 074604 (2023).

трі напівпровідників є критичною для можливості їхнього застосування в електроніці.

Сам чорний фосфор є подібним до графіту, має таку ж шарувату структуру, завдяки якій можна ізолювати шари фосфору. Вони, справді, отримуються тим же способом за допомогою скочу. Структура ізолюваних шарів теж, певною мірою, дублює графенову, яка якщо вибрати ортогональну систему обліку і розглядати обмежені плоскі зразки, містить границі двох типів, що отримали назву «зігзаг» і «крісло». Далі все видно з наведених даних: автори у наближенні сильного зв'язку і природного припущення про залежність різних міжатомних взаємодій від відстані дослідили деформації розтягу, зсуву вздовж різних границь та їхні комбінації. В більшості випадків ширина забороненої зони вела себе лінійно від величини деформації, що узгоджується з експериментальними спостереженнями. Хоча сам підхід по суті доволі простий і прозорий, він дає такі ж результати, що й набагато склад-

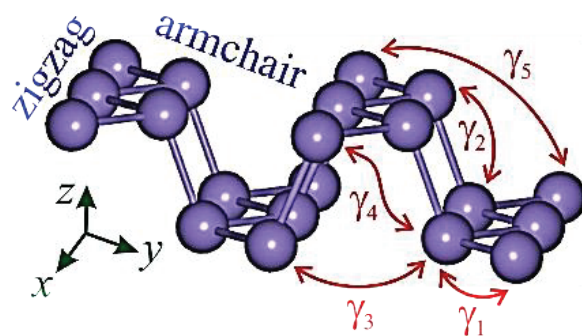


Рис. 3. A. G. Solomenko, I. Y. Sahalianov, T. M. Radchenko, V. A. Tatarenko, Scientific Reports, 13, 13444 (2023).

ніші розрахунки з перших принципів чи теорія функціоналу густини. Тому автори дійшли загального висновку про можливість застосування фосфору в наноелектроніці і запропонували спосіб розрахунку його властивостей.

В Інституті теоретичної фізики найцікавішим у 2023 році визнано результат, отриманий **Марком Горенштейном** з його молодими співробітниками і колегами з Німеччини, яким запропоновано статистичну модель для опису ядро-ядерних реакцій.

Треба сказати, що у релятивістських ядро-ядерних зіткненнях досліджується нова форма матерії – кварк-глюонна плазма, що утворюється на ранніх стадіях цих процесів на Великому Адронному Колайдері в ЦЕРНі. Швидке розширення такої речовини призводить до її перетворення в адрон-резонансний газ. Запропоновано теоретичний підхід до пошуку експериментальних сигналів цих нових форм матерії та їх фазових перетворень за допомогою аналізу флуктуації числа частинок від-події-до-події.

Якщо детальніше, то методами молекулярної динаміки виконано аналіз статистичних властивостей скінченної системи частинок з потенціалом взаємодії Леннарда-Джонса. Досліджено вплив рідинно-газової змішаної фази на флуктуації числа частинок у координатному підпросторі. Метастабільна область змішаної фази, так звана область зародження речовини, сформульована в термінах

моделі невзаємодіючих кластерів. Виявлено, що в області спінодальної нестабільності спостерігаються великі флуктуації. Останні розраховані за допомогою спеціально розробленої моделі. Результати аналітичних апроксимацій для нормованої варіації розподілу числа частинок порівнюються з результатами, отриманими прямим молекулярно-динамічним моделюванням і вже використовуються колаборацією ALICE для аналізу експериментів, що стосуються вимірювання числа протонів від події до події.

На Рис. 4 показана область рідина-газ, яка представлена в безрозмірних змінних T/T_c та n/n_c , де T_c та n_c є значеннями критичної температури та критичної густини числа частинок. Суцільні та пунктирні лінії показують бінодалі та спінодалі, відповідно. Синя та зелена області відповідають метастабільним частинам змішаної фази. Сіра зона позначає область спінодальної нестабільності. Чорна зірка представляє критичну точку. Квадрати позначають точки, де було виконано моделювання методами молекулярної динаміки у змішаній фазі.

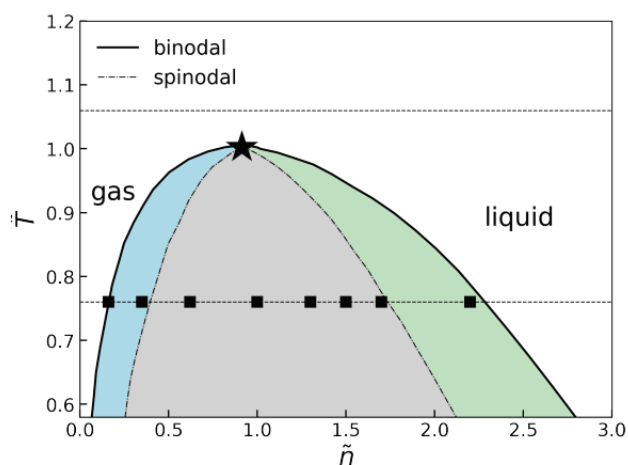


Рис. 4. V.A. Kuznetsov, O. Savchuk, R. V. Poberezhnyuk, V. Vovchenko, M. I. Gorenstein, H. Stoecker, Phys. Rev. C107, 055206 (2023).

У Головній астрономічній обсерваторії до найкращих віднесли результати, які увійшли до циклу з чотирьох публікацій, де, якщо я правильно зрозумів, провідними виконавцями були Марина Іщенко і Петер Берцик, які

разом з колегами дослідили еволюцію зоряних кулястих скупчень, починаючи з часу 10 млрд років тому. При цьому враховувалася їхня взаємодія з Галактичним центром, парні між собою та Сонячною системою.

Для цього довелося здійснити чисельне моделювання 150 скупчень Молочного шляху, яке охоплювало зазначений часовий період, при врахуванні змінних у часі і просторі потенціалів. Виявлено, що еволюції повної енергії та кутового моменту для скупчень всередині Галактики і поза неї істотно різні. З виду траєкторій скупчень встановлено, як вони наближались або одне до одного, тобто майже зіткнулися, або до центру Галактики, а отже, впливали на взаємний рух. Такі результати поглиблюють відомі або дають нові знання про процеси у Всесвіті, які формують його структуру і розвиток, тобто, не виключено, містять підстави для певних передбачень стосовно їхнього впливу не тільки на галактичне життя, а й, може бути, земне.

Інституті магнетизму як кращий визнав результати дослідження тришарових наносистем, в яких керівником був **Олександр Товстолиткін** і, як він зазначив, **Володимир Голуб**. Вони стосуються шаруватих магнітних гетероструктур, що містять як феро-, так і антиферомагнітні шари.

Так, вперше отримано дані щодо товщинних і температурних залежностей міжшарової взаємодії, на базі чого встановлено три якісно різних режими поведінки системи, що фактично складається з двох, так би мовити, зовнішніх ФМ шарів, розділених АФМ шаром, товщина якого грає ключову роль. При широких АФМ прошарках ФМ шари ведуть себе, як обмінно-закріплені. При проміжних товщинах взаємодія між ФМ шарами існує лише в обмеженому температурному діапазоні і демонструє високу коерцитивну силу. Нарешті, при тонкому АФМ шарі, він сам намагнічується і поведінка системи нагадує поведінку неоднорідного феромагнетика (рис. 5).

У Фізико-технічному інституті низьких температур група співробітників, під керівництвом **Юрія Найдюка** у співавторстві з німецькими колегами досліджувала контакти

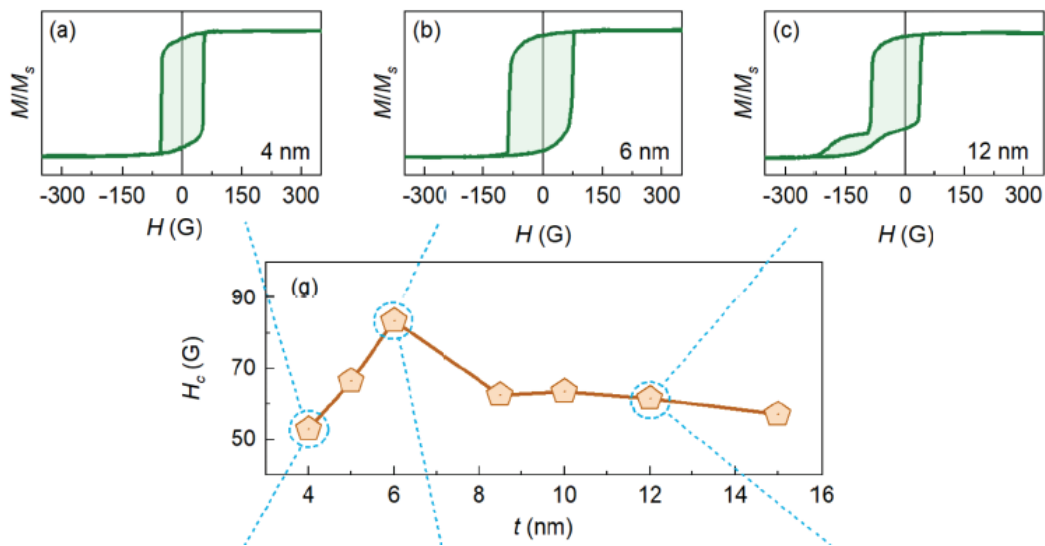


Рис. 5. Polishchuk D. M., Tykhonenko-Polishchuk Yu. O., Lytvynenko Ya. M., Rostas A. M., Kuncser V., Kravets A. F., Tovstolytkin A. I., Gomonay O. V., and Korenivski V. Phys. Rev. B, 107, 224432 (2023).

Янсона, або мікроконтакти, які демонструють ефект резистивного перемикавання. Ефект відноситься до нелінійних явищ, коли зразок значно змінює свій опір під впливом сильного електричного поля або струму. Цей ефект досліджувався і раніше (рис. 6).

У звітному випадку було вперше, продемонстровано, що нанорозмірний точковий контакт може обернено, що суттєво, перемикати тип провідності між нормальним та напівпровідним станом і що така поведінка є спільним

явищем для низки діхалькогенідів перехідних металів, які залежно від елементного складу та кристалічної структури можуть демонструвати металеву, напівметалеву, напівпровідникову та надпровідну поведінку. Є ще одна особливість цих сполук, що неодноразово підкреслювалася з інших приводів – діхалькогеніди мають шарувату структуру, яка теж надає унікальну можливість отримувати їхні моношари, а також досліджувати плівки з визначеною кількістю таких шарів. Саме в них виявлено ефект

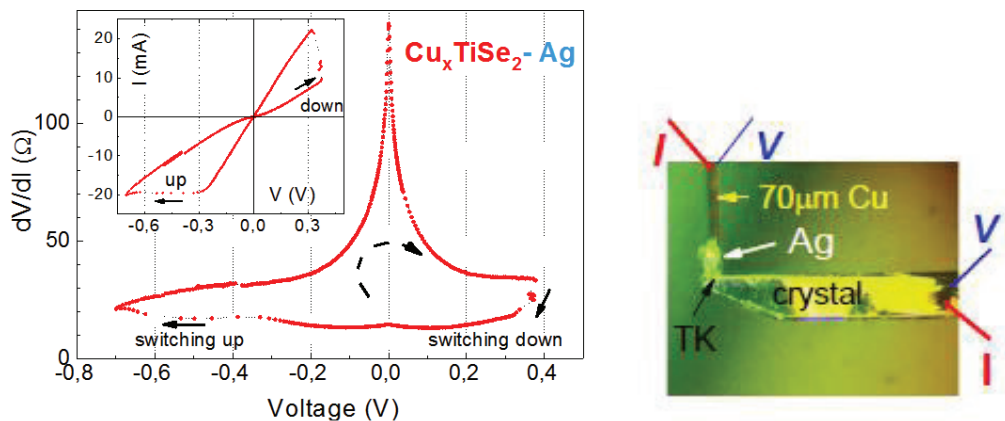


Рис. 6. Д.Л. Башлаков, О.Є. Квітницька, Ю.Г. Найдюк та ін. Low Temp. Phys., 49, 916 (2023).

перемикання. Причому перемикання під дією електричного поля чи струму спостерігається у широкому інтервалі температур – від гелієвих до кімнатної, і автори його пов'язують зі зміною стехіометрії матеріалу в центрі мікроконтакту.

На думку авторів, пристрої з перемиканням провідності необхідні для енергоефективної електроніки, розвитку різного роду обчислень, імітації архітектури та функціонування людського мозку.



Рис. 7. Багатосенсорні роботи для виявлення неглибоко прихованих вибухонебезпечних загроз.

цями відділу радіофізичної інтроскопії ІРЕ і створеним ними ж конкретним радіоелектронним виробом, який має свого замовника чи користувача. Головними виконавцями були **Геннадій Почанін, Вадим Рубан** та деякі інші співробітники цього відділу, які розробили цілу низку оригінальних радіопристроїв.

Робота була спільною з закордонними організаціями і власне ІРЕ мав розробити імпульсний радіорадар, який міг би працювати з рештою приладів як, образно кажучи, член команди.

Про нього я можу лише сказати, що він складається з одного випромінювача радіохвиль і чотирьох приймальних антен, конфігурація яких дозволяє визначати об'єкти неглибокого (20–25 см) залягання під землею або водою при русі радара. При цьому такими можуть бути навіть неметалеві предмети, зокрема пластикові міни, які не піддаються виявленню іншими платформами. Але останні є теж необхідними, оскільки можуть визначати розмір і форму знайдених радаром підозрілих

Інститут радіофізики і електроніки представив цього року як основне досягнення завершення проєкту за програмою НАТО «Наука заради миру та безпеки», який виконувався три роки і був міжнародним. Презентація його результатів перед представниками НАТО відбулася у вересні минулого року (рис. 7).

Мабуть, вперше інститут звітує, і в принципі це зрозуміло, не публікаціями, хоча вони є, або спостереженими чи передбаченими явищами і ефектами, а розробленим науков-

об'єктів. Об'єднання всіх радарів в один комплекс, завдяки розробленим методам дистанційного керування ним також, як зазначалося, результат роботи науковців ІРЕ.

НАТО схвалила проєкт і високо оцінила створені платформи як окремі, так і в комплексі. Що стосується їхнього або його використання в Україні, мінування територій якої є вкрай високим, то такі дані звіт ІРЕ не містить.

У Радіоастрономічному інституті **В'ячеслав Захаренко, Олександр Коноваленко** разом з колегами, базуючись на існуючому досвіді детектування слабких сигналів, що йдуть з космосу, зокрема ліній вуглецю з відносною чутливістю 10^{-5} , розробили схему виявлення екстремально низькочастотної лінії надтонкого розщеплення основного стану гідрогену теж з епохи Темних віків, про які ми чули в звіті ГАО (рис. 8).

Виконавши модельні розрахунки, автори з'ясували, що детектування шуканої лінії вимагає чутливості на рівні 10^{-7} , що на 2 порядки перевищує вимірювання ліній вуглецю.

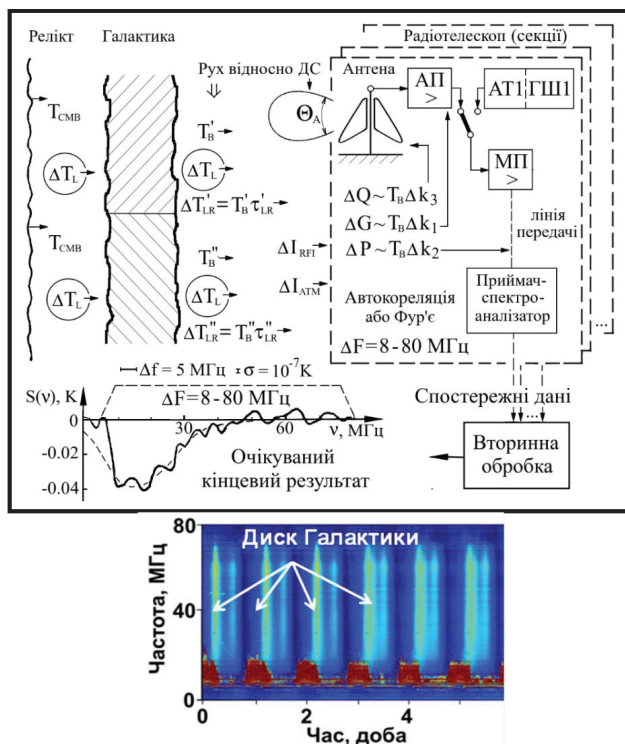
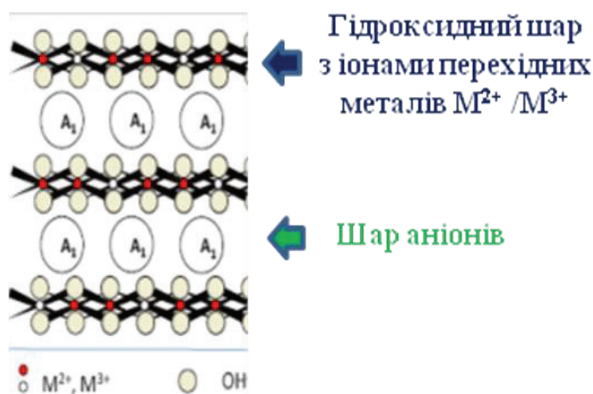


Рис. 8. О. Коноваленко, В. Захаренко та ін. Журнал фізичних досліджень, 28, 1902 (2024).

Тому був проведений аналіз всіх факторів, що заважають детектуванню. В результаті було зроблено висновок, що такі вимірювання при правильному виборі напрямку розповсюдження сигналу на диск Галактики цілком імовірні, якщо на порядок збільшити час накопичення сигналів, використовувати багатоантенні спостереження на відносно невеликих субсекціях сучасних ширококутових телескопів.



Фактично, представлена публікація є певним підсумком багаторічних досліджень в галузі низькочастотної радіоастрономії і оприлюдненням міркувань авторів щодо можливості успішного виконання такого експерименту, який ними і планується на найближчий час.

У Донецькому фізико-технічному інституті **Юрій Пашкевич** досліджував подвійні – теж шаруваті – гідроксиди, які застосовуються у різних цілях – і як захист від корозії, і для очищення води, і в сенсорах для виявлення деяких газів тощо. Введення в них магнітних катіонів M^{2+} або M^{3+} розширюють їхні функціональні властивості, що викликає чисто науковий інтерес стосовно природи магнетизму в них та його ролі у згаданих явищах, яка залишається незрозумілою (рис. 9).

Якщо говорити про роботу, виконану у ДонФТІ, то в ній експериментально і теоретично досліджена поведінка і намагніченість кобальт-алюмінієвих подвійних гідроксидів із співвідношення Co і Al при $n = 2$ і 3 в широкому діапазоні магнітних полів до 50 кЕ і температур від гелієвих до 150 К. Трошки нижче температури 10 К на кривій теплоємності $C(N)$ виявлено аномалію типу Шотткі.

Для її пояснення запропонована модель, в якій ця аномалія пов'язується з розщепленням крамерсового дублету в основному стані іону Co^{2+} за рахунок обмінного поля. Показано, що температура максимуму аномалії не

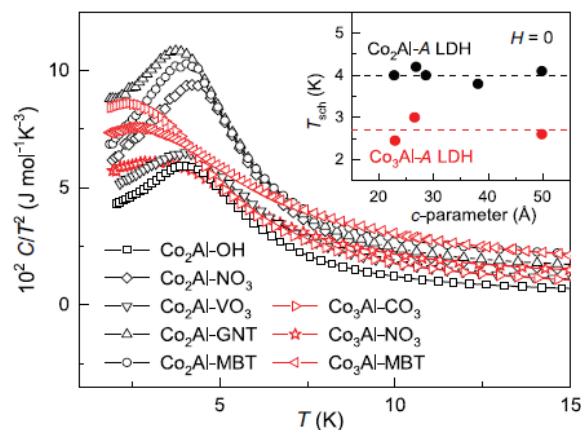


Рис. 9. Yu. G. Pashkevich et al. Applied Clay Science (2023).

залежить від відстані між шарами і повністю визначається внутрішньо-шаровими взаємодіями. Наведені також теоретичні аргументи, що основним станом досліджених зразків є магнітне кластерне скло, коли кластерами є Co_2Al або Co_3Al . Першим відповідає далекосяжне просторове впорядкування, тоді як другі розташовуються в матриці випадково, але в обох випадках спінові моменти кластерів не мають далекого порядку. Нарешті, зроблено висновок, що досліджувані магнітні матеріали є ідеальними двовимірними магнетиками.

В Інституті фізики конденсованих систем **Андрій Баумкетнер** досліджував чи не найбільш інтригуючі та і популярні наразі об'єкти, якими є квантові точки, або нанокристалічні утворення розміром 5–10 нм (рис. 10).

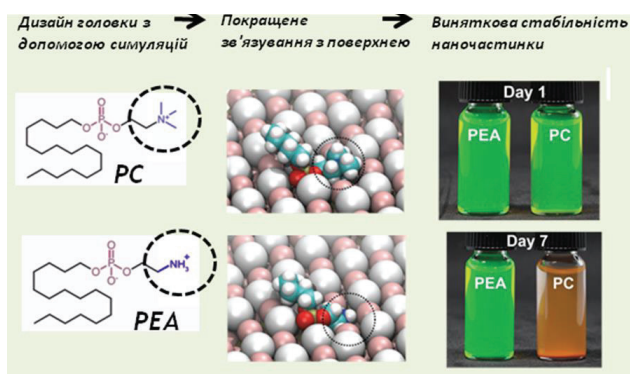


Рис. 10. А. Baumketner et al. Nature 626, 542 (2024).

Найбільше зацікавили автора метал-галідні частинки, про які я ніколи не чув і почав шукати, що це таке, але не знайшов, припустивши, що в назву вкралася випадкова помилка, аж поки Олесь Іванків не пояснив мені, що галідні – це від слова галоїдні, але саме така термінологія використовується у Західній Україні. Якщо ж метал-галоїдні, то йдеться про наночастинки галоїдних перовскитів з загальною формулою APbX_3 , де $\text{A} = \text{Cs}$, $\text{MA} =$ метиламмоніум, а $\text{FA} =$ формамідініум, $\text{X} = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$, наприклад CsPbBr_3 .

Ці частинки мають унікальні оптоелектронні властивості, світяться яскраво і мають доволі вузькі спектри випромінювання, тобто мають чисті кольори. Проте для стабільності властивостей їх треба пасивувати, або по-

кривати певними лігандами, що взаємодіють з поверхнею, не псуючи необхідні властивості. Пошук ефективних, або краще сказати оптимальних лігандів не має систематики, особливо коли їх підбирати експериментально. Тому автор зробив спробу пошуку лігандів комп'ютерним моделюванням.

Для цього були обрані цвітер-іонні молекулярні речовини, які мають таку особливість, як присутність в їхніх молекулах двох протилежно заряджених груп при нейтральності всієї молекули. Як виявилось, такі ліганди мають низку переваг над тими, що мають по одній зарядженій групі. Якщо я правильно зрозумів, то автор робив обчислення з дипольними молекулами, які, як ним зазначається, краще зв'язуються з поверхнями. Крім того, вони краще розчиняються, що дозволяє працювати з розчинами вищої концентрації.

Було розглянуто саме дипольний ліганд і з'ясовано, яку структуру він утворює на поверхні квантової точки у формі кубу. Конкретно було розглянуто фосфоліпідний ліганд, бо його фосфатна група заряджена негативно, а амонієва – позитивно. Було перевірено, як цей ліганд змінюється при заміщенні в ньому деяких метильних груп CH_3 на H_2O , що сприяє посиленню зв'язування. Саме таке давали комп'ютерні експерименти.

Потім був проведений реальний експеримент, який підтвердив феноменальну, як пише автор, стабільність. Якщо з метильними групами квантові частинки втрачають оптичні властивості за кілька днів, то з водними групами – вони стабільно світять тиждень, маючи при цьому більший квантовий вихід, а також здатність не спотворюватись при зануренні в різні розчини.

Подібний матеріал був синтезований вперше.

В Інституті електронної фізики під керівництвом **Володимира Маслюка** методом мас-спектрометрії вперше здійснено фрагментація глюкози при її опроміненні електронами низької енергії. Були проведені вимірювання при різних дозах опромінення і виявлені різні канали фрагментації, серед яких, як встановлено, домінують симетричні канали (рис. 11).

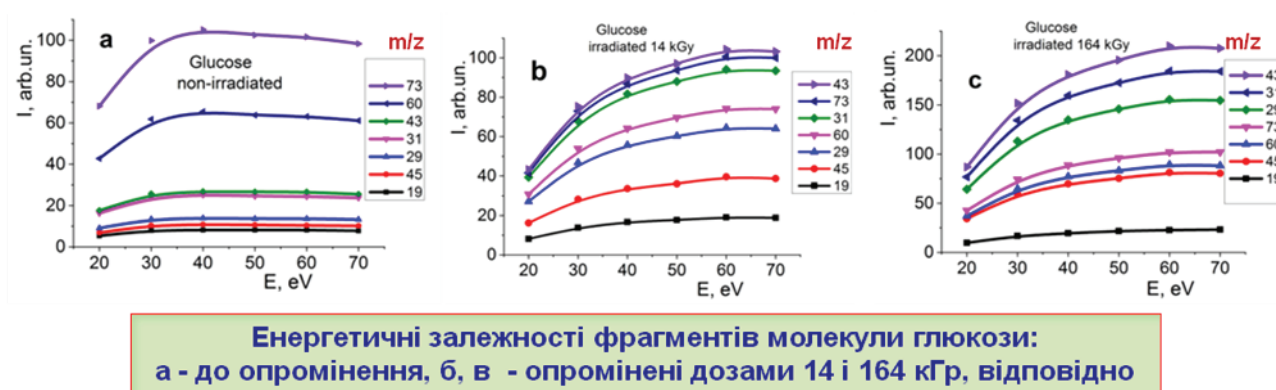


Рис. 11. V. Maslyuk, A. Zavilopulo, N. Svatiuk, Yu. Bandurin. Cell Biochemistry and Biophysics (2023).

Робота має явно біофізичне спрямування, а її результати важливі для визначення стійкості моносахаридів, зокрема глюкози, відносно різного роду перетворень, що пов'язані з радіаційними потоками.

Як видно, майже всі результати, а вони, справді, справляють непогане враження і практично всі опубліковані в журналах 1-го квартілю, що є характерною ознакою вимог, які ставляться до академії з боку керівних органів, а також переважною частиною платників податків, які хотіли б від наукової сфери лише застосувань, а про основоположні питання науки, які є предметом фундаментальних досліджень, або «*basic research*», як вони звуться на заході, ніхто дбати не хоче. Вузько-утилітарне бачення ролі наук притаманне не тільки нашій країні. Проте коли наша країна знаходиться у смертельному протистоянні з вічним ворогом, вимоги до нашої науки з боку суспільства стають жорсткішими, і ми справді маємо щось переглянути у нашому ставленні до головних проблем сьогодення. Якщо раніше мені здавалося, що академія – це організація, де головний наголос і головні зусилля сконцентровані на фундаментальній складовій, від якої вимагається одне – мати світовий рівень, то тепер треба робити суттєву поправку, запитуючи, а що ми робимо для оборони, а краще сказати – Перемоги, і що робитимемо, коли війна припиниться і поставити задачі відновлення. Не змінюючи своєї думки, що без фундаментальних досліджень нема і не може бути розвитку, все ж трошки зміню акценти.

Справа в тім, що під час, а особливо після війни, мені здається, нам всім треба буде переорієнтуватись. Може, не всім, і не знаю точно скільком, проте, мабуть, переважній більшості працівників Академії прийдеся направити свої сили і знання на прикладні роботи, оскільки відновлення надзвичайно сильно і незрозуміло за що зруйнованої держави вимагатиме зусиль саме в царині застосувань. Не думаю, що вироблення відповідної стратегії є метою нашого сьогоднішнього засідання, але те, що подібні розмови точаться у нашому середовищі, не є секретом. Цього чекає від нас влада і суспільство. Єдине, чого не вистачає, – чіткого розуміння, на що мають звернути увагу і чим зайнятися прекрасні фізики, переважна більшість яких, припускаю, мають необхідні компетенції для вирішення багатьох проблем, але не знають самих проблем.

Тим не менш, ми маємо приклади доволі успішних прикладних розробок. Так, в Інституті фізики розроблена іонно-плазмова технологія покриття певних металевих поверхонь, до яких, зокрема можна віднести артилерійські стволи.

Оброблені цією технологією стволи, збільшують час свого використання в реальних умовах до двох разів. Цікаво, що цій технології передували чисто фундаментальні дослідження **Олександра Габовича, Вячеслава Горшкова**, який нещодавно раптово пішов з життя, та інших, результати яких позаминулого року відзначені Державною премією України, а останні прийняв до друку такий науковий

гранд, як журнал *Nature*, і вже потім була подана Заявка на патент.

Інший приклад прикладної розробки, для якої була по суті використана близька технологія, надав Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова.

Вчені цього Інституту, завдяки застосуванню геліконних джерел плазми, яка має високу густину, отримали низку покриттів багатокомпонентних плівок із властивостями, близькими до вихідного матеріалу; синтезували діелектричні плівки нітриду алюмінію (AlN), що дало можливість використовувати їх в якості основи для отримання наноструктур і ефективних інтерфейсів.

Аналіз результатів довів реальність і стимулював створення покриттів інфрачервоного (ІЧ) маскування на основі AlN, плівки якого виявляють високу теплопровідність, що важливо, і особливий ІЧ-спектр. Покриті ними поверхні суттєво (у понад 10 разів) втрачають оптичний контраст порівняно з фоном у широкому температурному діапазоні – від -4°C до $+15^{\circ}\text{C}$. Це перевірено ВАТ «Мередіан» у польових умовах для маскування БПЛА, максимальна дальність визначення якого зменшилась більше, ніж у 2 рази (рис. 12).

Нарешті, в Інституті радіофізики і електроніки ім. О.Я. Усикова розробляються різні

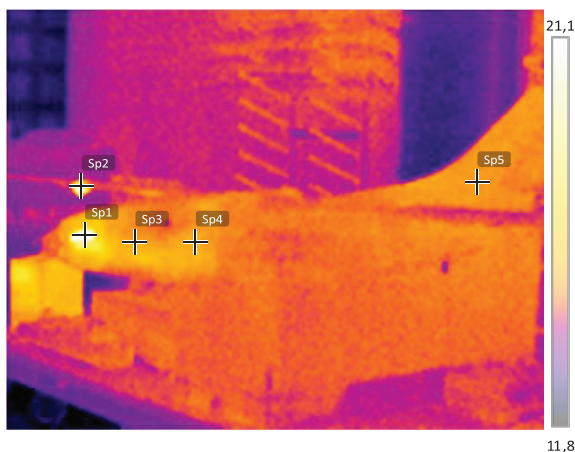


Рис. 12. БПЛА та його ІЧ-зображення з маскувальною плівкою Al N.

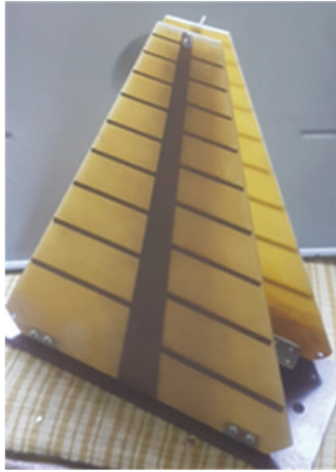
радіоелектронні технології, а на їхній основі засоби, включаючи мобільні, радіобороти з ворожими дронами та іншими БПЛА (рис. 13).

Найбільш цікавою і актуальною вважається розробка антидронові рушниці, яка пройшла польові перевірки і продемонструвала свою ефективність для ураження сучасних дронів типу FPV, Mavic та Mavic-3 на різних частотах. Далекодія цих пристроїв, що мають спеціально створену антену, яку ви бачите на екрані, сягає пів кілометра.

Додам також, що виразну прикладну або близьку до неї спрямованість мають кілька представлених мною кращих результатів установ. Якщо ж говорити в цілому, цікаві ідеї з приводу об'єднання пошукових і цілеспрямованих, зокрема на оборонні проблеми,

досліджень мають, наскільки знаю, Сергій Михайлович Рябченко, Ярослав Степанович Яцків, Ігор Миронович Мриглод, напевно, інші, і ми могли б обмінятися думками, сформулювати наші пропозиції Загальним зборам Академії чи, не виключаю, висловити інші думки. Такий обмін може виявитись тим більш цікавим і, сподіваюсь, корисним, що в залі присутній наш президент Анатолій Глібович Загородній, який, по-перше, може мати своє бачення, а по-друге, краще уявляє і наші можливості, і державну позицію, а також наміри МОН України.

Можна згадати наше недалеке минуле і те, що візитівкою Академії на протязі десятиліть були саме прикладні дослідження, якими вона, будьмо чесними, завоювала авторитет і, принаймні в радянські часи, була видима на



Зовнішній вигляд антени



Антидроноварушниця



Рис. 13. Мобільний засіб радіоелектронної боротьби з ворожими дронами.

фоні союзної і решти республіканських академій. Мається на увазі, що вона має відповідний досвід, але чи є він позитивним для нинішніх «капіталістичних» часів і обставин, сказати не можу. Якщо ні, то, як кажуть, треба діяти «від противного». Ні на чому не наполягаю, але дискусія з будь-яким результатом, ще раз наголошую, була б дуже бажаною. Не треба, та й небезпечно, коли все визначається лише у владних кабінетах. Навіть припустивши, що в них сидять тямущі люди, все одно вони не представляють суті наукової, а також прикладної роботи так, як їх розуміємо ми.

Тепер, як завжди роблю, коротко про світ, або яким був 2023-й рік в науковому аспекті. Для порівняння я наводив кращі наукові результати, спираючись на ті, які щорічно формулював журнал *Science*. При цьому вони стосувалися всієї науки, де близькі нам фізичні результати інколи взагалі не знаходились в топовій десятці. Тепер же подібні рейтинги стали модними і їх можна знайти у багатьох виданнях. Я сам переконався, що такі рейтинги не є об'єктивними, оскільки буквально одиниці результатів згадуються двічі, а тричі – майже завжди виняток типу народження мишенят у двох мишей-самців.

Таке народження від двох самок було серед найкращих досягнень, здається, 5 років тому.

І виявляється, що навіть у природі є винятки, коли дві самки народжують потомство, а от про самців таке невідомо і отримано вперше, що вважається ще одним проривом у генній інженерії, а на ній не зупинятимусь (рис. 14).



Рис. 14. Одностатева пара мишей-самців народила мишеня.

Подумав, що набагато доречнішим показати лише фізичні результати, для чого скористався переліком, який оприлюднив журнал *Physics World*. І це не рейтинг, а хронологічний список досягнень, які приписуються фізиці.

«Вирощування» електродів у живих тканинах

В Швеції винайдена технологія, що дозволяє не приєднувати, а «вирощувати» електроди у тканинах різних організмів. Для цього створено гель, що вприскується у необхідне

місце, а розчинені у ньому ферменти запускають процес полімеризації, результатом якої є утворення молекулярних електродів, що продемонстрували свою довгочасність (рис. 15).

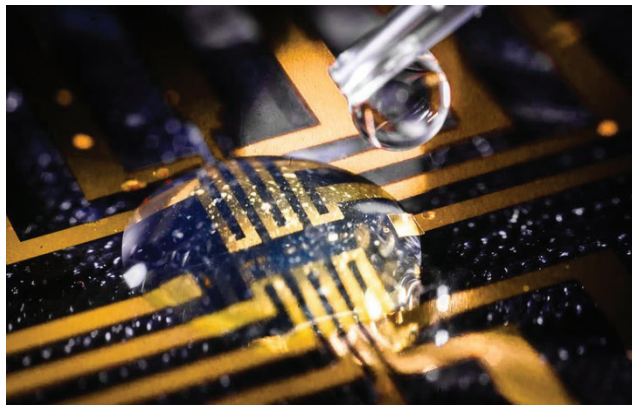


Рис. 15. Вирощування електродів у живих тканинах.

Експерименти проведені на рибах, але у дослідників не виникає сумнівів, що досить скоро ця технологія перейде до лікувальної медицини.

Наступний результат, на жаль, картинкою не супроводжується і полягає у **Симуляції розширення Всесвіту**, яку здійснила команда дослідників з Німеччини, Бельгії та Іспанії. Вони використали конденсат Бозе-Айнштайна, в якому знаходяться бозони при низьких температурах, який імітував Всесвіт, а поля моделювалися квазічастинками конденсату. Змінюючи в ньому довжину розсіяння атомів, вчені примусили «всесвіт» розширюватися з різною швидкістю і вивчати, як квазічастинки створюють флуктуації густини. За сучасними припущеннями схожі процеси мали місце після народження Всесвіту, а отже з'являються перспективи розкриття загадок його появи.

Відтворення досліду Юнга у часовій області

Як відомо, рівно 220 років тому, у 1803 році, Томасом Юнгом, який спостерігав інтерференцію світла, була встановлена його хвильова природа. Дві показані щілини і розповсюдження світла відомі нам зі школи або з університету. І от через понад два століття вчені Великої Британії, Німеччини та США повторили цей експеримент не у просторі,

а в часі. Для цього використовувалося напівпровідникове дзеркало зі змінним відбиттям. Двічі швидко переключаючи його, вони начебто створювали дві щілини у часі. Світло ж, відбиваючись від такого дзеркала, утворювало інтерференційні смуги вздовж частотного спектру відбитого світла, тобто інтерференція мала місце не в просторі, а на різних частотах. В повідомленні не пояснюється, чому відбите світло змінює частоту, але таке може в принципі бути, якщо мова про ефект Доплера. Натомість, стверджується, що результати є важливими для створення оптичних комп'ютерів (рис. 16).

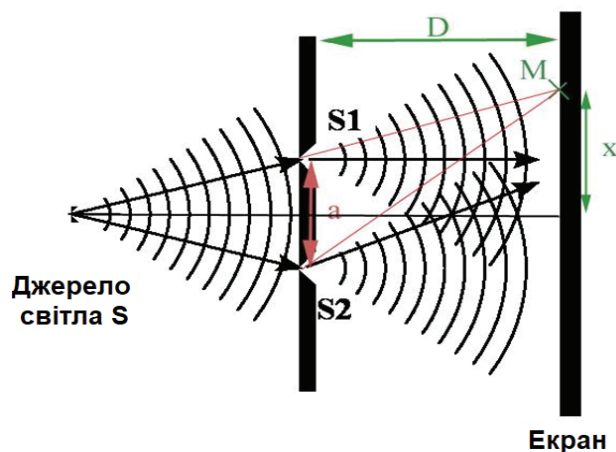


Рис. 16. Відтворення досліду Юнга у часовій області.

Створення масштабної квантової мережі

До кращих віднесено роботу вчених з Австрії та Франції, які створили оригінальний квантовий повторювач і змогли здійснити передачу даних на відстань 50 км через звичайну телекомунікаційну мережу. Цією роботою вперше продемонстрована фактична наявність елементів і технологій, які мають лягти в основу побудови багатовузельних квантових мереж.

Перше рентгенівське зображення єдиного атому

Колектив вчених з США, країн Європи та Китаю вперше за допомогою рентгенівської скануючої тунельної спектроскопії отримав знімок одного атому. До 2023 року вдавалося

знімати лише структури, що містять десятки тисяч атомів. Подолати обмеження допомогло додавання до детектору гострого металічного наконечника, який міг працювати на відстані 1 нм від зразка. Це, здавалося б, просте удосконалення дозволило фіксувати унікальні особливості розподілу заряду в околі кожного з хімічних елементів, що входили до зразка. Результати знайшли застосування в екології для визначення присутності в тому чи іншому середовищі присутності найдрібніших кількостей отруйних речовин.

Докази щодо того, що ранні галактики змінили Всесвіт

Телескоп «Джеймс Уебб» серед іншого досліджує еволюцію Всесвіту. Вірніше, відповідні експерименти здійснила міжнародна команда дослідників, яка знайшла переконливі аргументи, що ранні галактики зіграли ключову роль в процесах реіонізації Всесвіту, які почалися через приблизно 1 млрд років після великого вибуху. Іонізація нейтрального міжгалактичного гідрогену ультрафіолетовим випромінюванням цих галактик зробила Всесвіт прозорим. Зі знімків, що зроблені інфрачервоною камерою телескопу «Джеймс Уебб», впливає кореляція між розташуванням давніх галактик і «міхурів», де, власне, реіонізація і розпочиналася.

Треба зауважити, що близькі проблеми вивчає Юрій Іванович Ізотов з колегами, включаючи зарубіжних.

Антиматерія підпорядковується законам гравітації

Восени 2023 року група вчених, що працює в рамках проєкту *ALPHA*, присвяченого вивченню властивостей антиматерії, зробила відкриття. Вони спостерігали явище і вимірювали параметри вільного падіння атомів антигідрогену в полі земного тяжіння. Експерименти однозначно довели, що короткоживучий об'єкт, що складається з антипротону і позитрону при падінні відчуває силу саме притягнення, хоча й на 25% меншу, ніж відчувають атоми гідрогену. Відкриття полягає у тому, що антиатоми притягувалися до Землі, а не відштовхувалися від неї з силою, яка дорівнює притягання звичайної речовини, як гадали раніше. Що сто-

сується причин відмінності гравітаційних сил речовини і антиматерії, то наразі їх визначення вписано у план роботи цієї колаборації.

Південнокорейське «штучне сонце»

Звісно, що кожний з нас міг би доповнити цей престижний відбір. Наприклад, я б додав успіх фізиків і інженерів з Південної Кореї, які наприкінці минулого року досягли тривалість роботи термоядерного реактора при температурі 10^8 К до 48 секунд, що є рекордом для термоядерного синтезу на Токамаках. Попередня тривалість становила 31 секунду і була досягнута три роки тому. Нехай досягнення, начебто, невелике, але плазменщики вважають його принципово важливим на шляху до необмеженої і чистої енергії.

Спеціалісти поставили за мету досягти 300 секунд для тієї ж температури, щоб перейти на роботу реактора, коли він витрачає менше енергії, ніж віддає, що зуміли зробити інші дослідники, які задля підпалення плазми використовують конкуруючий лазерний спосіб. Про це я розповідав минулого року.

Підсумовуючи, звертаю увагу і припускаю, що ви це теж помітили, що коли не всі, то майже всі передові результати отримані у міжнародній співпраці. Не перевіряв, та й не міг, але впевнений, що у подібних колективних дослідженнях беруть участь і наші співвітчизники, що добре. Але було б ще краще, якби хоч щось ми могли робити, як кажуть вдома, а не далеко від нього.

Наступне питання звіту – наші показники. На рис. 17 ви бачите, що є наше відділення на 01.01.2024, де наведені деякі узагальнюючі дані за числом співробітників різних звань, ступенів і посад.

Ці показники можна коментувати, але і так, мені здається, все прозоро. Вони впродовж останніх років практично без змін. Хоча внаслідок воєнних дій багато хто від'їхав або в іншу місцевість, або країну. Деякі там знаходяться, щонайменше, весь час війни. Серед них достатньо багато членів Академії, які не прибули навіть на Загальні збори, причому їх стільки, що, зізнаюсь, ми не були впевнені, що нам вдасться задовольнити кворумної кількості, чого, на щастя, не сталося. На за-

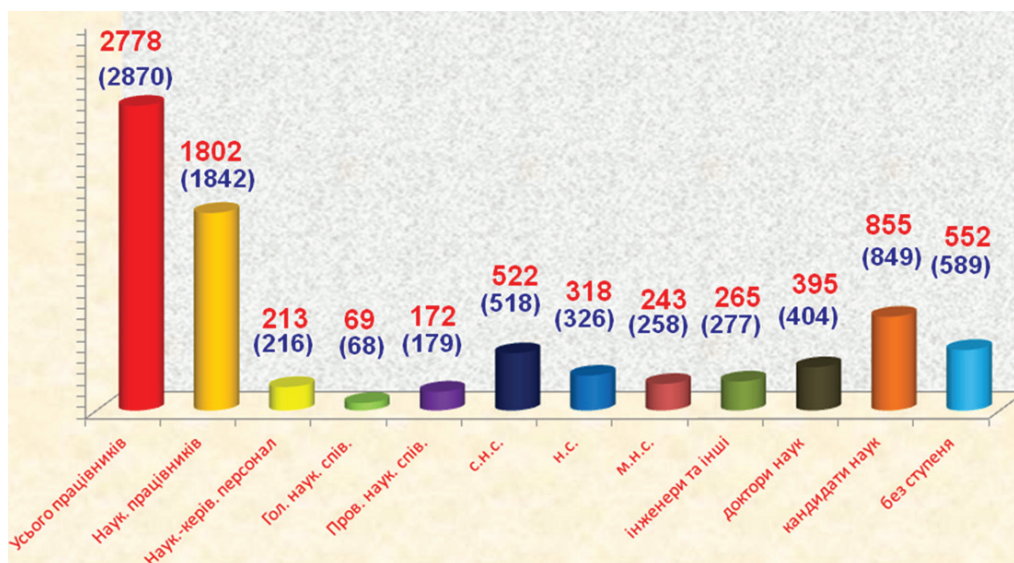


Рис. 17. Структура наукових кадрів ВФА НАН України.

гальні кількісні показники це впливає мало, якщо зменшення штату установ на 3% вважати несуттєвим. На діаграмі показані цьогорічні показники (червоним) і в дужках – минулорічні (синім). Не буду говорити про кожний, але легко переконатись, що майже по всіх позиціях спостерігається те чи інше зменшення.

Тенденція щодо середнього віку, яка, як кажуть у медицині, досить стабільно-важка і за вже класичним висловлюванням, маємо, що маємо. Дещо неоднорідне багаторічне зростання приблизно на рік в рік. І хоч впливати на вік ми не в змозі, тим не менш, наші доктори трошки помолодшали, хоча говорити про тенденцію зарано. Їхній середній вік 67,5, а кандидатів 50.

Далі монографії, видані нашими інститутами по роках. У звітному після минулорічного падіння їхнє загальне число можна вважати досить пристойним.

Якщо брати по інститутах, то видно, що крім ДонФТІ та ІЕФ, всі інститути мають чим звітувати, а перед ведуть Інститут фізики, ІТФ і ІнМаг (рис. 18).

Коротко про захисти. Загальна картина. Вона невтішна (рис. 19).

Мабуть, через ковід ми мали минулорічне провалля. Тепер війна, і якщо можна говорити, що щось зсунулось, то, скажу відверто, радіти нічому. Один захист докторської

на все відділення навіть у воєнні часи, коли ми так чи інакше працюємо, погодьтесь не та цифра, якою ми можемо бути задоволені. Кандидатські захисти теж впали, але якщо врахувати докторів філософії, то сумарна кількість оступенених зросла майже втричі. Хоча зрозуміло, що досягти показників кількарічної давнини навряд чи вдасться у найближчій перспективі.

Що стосується кандидатів і докторів філософії по інститутах, то ми показали їх однією – сумарною – цифрою. Тут, як зазначалося, ситуація дещо краща, але у третині інститутів не було й таких захистів. Це не може не турбувати і лише зайвий раз сигналізує про тривожну ситуацію з молоддю, що, на жаль, відчуває вся Академія.

Завершуватиму зізнанням, що не відаю, чого чекати від майбутнього. Натомість, не покидає думка, що без певної модернізації НАН України, оновлення її структури, напрямів діяльності, які б більше відповідали потребам сучасності та суспільства, відслідковували б русла світових тенденцій, не обійтись. Мені важко сформулювати дорожню карту – це головний промисел президента, крім того, мене легко звинуватити у певному популізмі, але я б остерігався б змін, які нам можуть бути нав'язані зверху або накреслить недавно створена Наукова рада. Треба діяти на виперед-

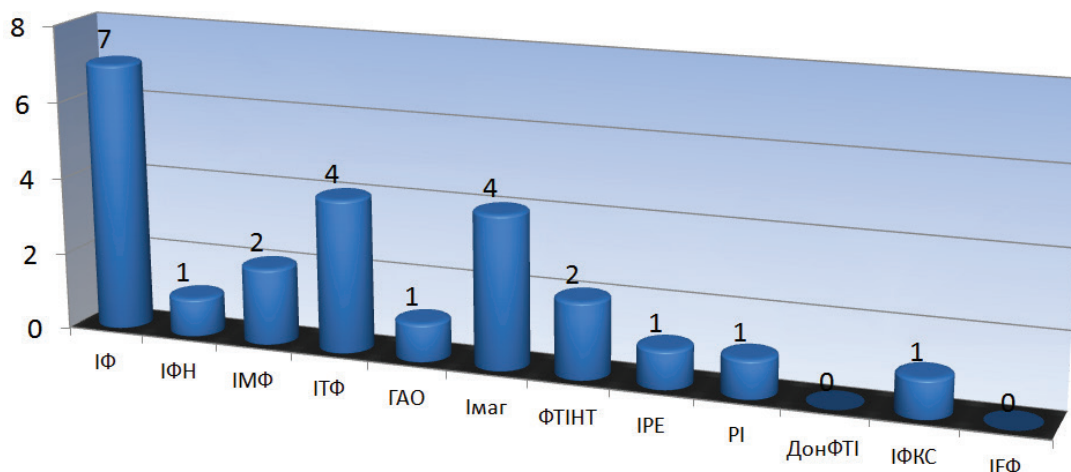


Рис. 18. Видання монографій в установах ВФА НАН України у 2023 році.

ження або в парі з Науковим комітетом, якому довіри більше.

Не виключаю, що питання про реформування Академії стоїть окремо, і коли починаєш розглядати його предметно, воно виявляється надзвичайно непростою справою. І не тому, що вона складна – ні, а тому, що передбачає демократичні процедури. Адміністративні методи керування в академії, з її академічною свободою, не проходять і треба намагатися знаходити консенсус між усіма зацікавленими сторонами, які часто-густо мають одну мету, але бачать різні, іноді протилежні, шляхи її досягнення. Мабуть, через це, попри м'який тиск президента стосовно явного опору змінам, не знайшли підтримки запропонованій нашим відділенням пропозиції щодо перетворення все ще до певної міри закритого «ручного» розподілу бюджетних коштів (який спирається, як говорять, на досягнутий раніше, часто ще в АН УРСР), а також стосовно оптимізації академічної структури.

Спонтанно такі метаморфози, як правило не стаються, і мені здається, що для їх здійснення необхідно дві умови: 1) чітке розуміння, що є слабкою і несучасною ланкою, яка не відповідає нормам незалежної держави, а залишилася від устрою з однопартійною системою і нав'язаними кожному громадянину певними поглядами; 2) наявність політичної волі. Перша умова по суті уособлює структуру і розподіл коштів в Академії, а другої явно бракує,



Рис. 19. Захист дисертацій.

коли йдеться про дії. При цьому не менш як 75–80% наукової частини Академії і практично вся її Президія вважають, що зміни не на часі, бо війна, і будь-які зміни можуть внести хаос у більш-менш стабільну роботу, яка тільки-но почала викликати інтерес з боку різних держструктур, підприємств і компаній. Проте, на мою думку, за яку можу вибачитись, такий опір Академії, її занадто твердий консерватизм стосовно навіть необхідних змін, не свідчить на її користь.

Безумовно, розподіл грошей має бути прозорим, зрозумілим, стимулюючим і гнучким, урахувувати якісні показники діяльності кожної установи, аби її співробітники мали уявлення, на що слід спрямовувати зусилля для отримання більшого фінансування (саме такі цілі, а не вигідність фізикам або астрономам ставила перед собою комісія ВФА). Про це ми

неодноразово говорили впродовж останніх не менше двох років, тому фінансування торкатися не буду. Єдине, що варто зазначити, що запропонована комісією ВФА схема розподілу базового фінансування саме між установами, а не між Секціями або відділеннями відповідає Закону про науку, на що керівництво не погоджується, маючи свої аргументи. Пізніше, в кінці засідання, сподіваюсь, ми обговоримо ці питання, оскільки, наприклад, Сергій Михайлович Рябченко має додаткові міркування щодо структури розподілу держбюджету.

Структура також має бути оптимальною, а не такою, коли є відділення з 2–3 установами і відділення, де установ на порядок більше, або є головний інститут, який свого часу великодушно відпустив у вільне плавання пару-трійку своїх відділів, які перетворилися на окремі юридичні особи.

Але перед тим, як говорити про структуру, покажу структуру АН деяких європейських країн. Вибрав більш-менш близькі до нашої. Ви бачите (рис. 20), що структури різні, а науки по відділенням об'єднуються так, як це

Польська АН	Чеська АН	Угорська АН
- Відділення математики, фізики, хімії та наук про Землю - Відділення біології та аграрних наук - Відділення медичних наук - Відділення гуманітарних та соціальних наук	- Секція неживої природи - Секція живої природи та хімії - Секція суспільних і гуманітарних наук	- Відділення математики - Відділення фізики - Відділення хімії - Відділення біології - Відділення медицини - Відділення сільського господарства - Відділення наук про Землю - Відділення технічних наук - Відділення філософії та історії - Відділення права і економічних наук - Відділення лінгвістики

Рис. 20. Структура АН деяких європейських країн.

приймається науковою спільнотою конкретної країни. Цікаво, що Болгарська АН ні Секцій, ні відділень не має, а об'єднує 39 інститутів, кількість яких до вступу в ЄС складала 86. Голова БАН очолює Раду директорів, в яку входять 27 осіб, яка і ділить кошти між інститутами.

Мої розмови з колегами показали, що у нас багато прибічників Польської АН з її 5-ма відділеннями, Секцій немає. Таку структуру вона сформувала після розвалу Варшавського блоку і страшенної скрути середини 90-х, коли майже припинила існування, але втрималася, зазнала деяких серйозних перетворень і наразі є шанованою і знаною в Європі. Цьому неабияк сприяв вступ до ЄС, коли уряду Польщі була висунута окрема умова стосовно видатків на науку, які не можуть бути нижчими за середні по ЄС 1.5% ВВП. Це означало їхнє зростання у 4 рази, на що Польща не

піти не могла, бо членство в ЄС було найголовнішою задачею. І коли це сталося, наука і її штаб ПАН, як кажуть піднялися з руїн і тепер Академія є дуже сильною і авторитетною організацією, яку поважають і керівництво Польщі, і її суспільство.

Для порівняння структура РАН, яка після злиття «старої» РАН з медичною і аграрною академіями організована 13-ма відділеннями. Але мені здався більш показовим приклад Академії наук Китаю, яку було організовано лише у 1949 році. Тобто ми на три десятиліття старші за неї. Я не буду говорити про її фінансування – воно для нас недосяжне навіть у далекій перспективі, а скажу таке. На початок 2024 року в ній було 806 членів, число яких не обмежується, але обертися до неї дуже складно, тому, напевно, членство є супервизнанням кожного дослідника і авторитет академіка

сумнівам не підлягає. В її складі 114, а не 150, як у нас, установ і 71 тисяча науковців (у нас приблизно 13 тисяч).

Але абсолютні цифри мало про що свідчать, тому розглянемо нормовані показники: в Китаї 1 член академії припадає на 1,2 млн жителів, в Україні – на 50 тис. Іншою мовою, за «китайською нормою» ми мали б мати НАН України з 25 членами, а не 600-ма. З долею іронії зауважу, що або у них мало академіків, або у нас 20-кратний «перебір», хоча сказати, що їхня наука поступається нашій, було б нечесним. В АН Китаю 61 тис. аспірантів (у нас на порядок менше), три університети і від початку створення до 2020 було лише 5 відділень. При цьому треба все-таки сказати, що Китайська АН є найвищою в країні науковою організацією в галузі природничих наук, оскільки є набагато менша (4,2 тис. працівників) окрема Академія суспільних наук. Я говорю лише про природничу АН і прошу не робити жодних аналогій, а сприйняти наступну інформацію лише як факт.

Там, як і у нас, в 2020 році відбулися вибори президента АН, на посаду якого обрали теж фізика Хоу Цзяньго, до речі обраного на вакансію, від назви якої *«наноматеріали, мікроскопія, фізика і хімія одиничних молекул»*, особисто я відчув задоволення. А вже у 2021 році вона реструктурувалася, а вони вважають, що осучаснилася, і нова структура містить 6 відділень, і ви можете порівняти старі і нові їхні назви.

Не маю інформації, як таке вдалося зробити за рік, не виключаю адміністративного втручання, але для нас це все одно має бути певним закидом, бо швидкість наших дій незрівнянно менша ми все ще там – в АН УРСР. Китайці зуміли об'єднати математиків з фізиками, зберігши хіміків і дослідження Землі, виокремили розвиток ІТ та науки про життя, які раніше були в хімічному відділенні, тобто збільшили кількість відділень. Я не маю на увазі, що китайські колеги праві, але приклад переформатування відділень, гадаю, може бути цікавим.

Що мене навіть більше приваблює – це відсутність членів-кореспондентів, яких ця

академія ніколи не мала, за що я не втомлююся агітувати вжедесь два роки, або раніше, ніж дізнався про цю особливість Китайської АН. Проте ніхто не чує і не хоче визнавати, що «напівчленство» – це абсолютно совковий спадок, який нагадує практику річного випробувального терміну для кандидатів у члени компартії, тобто осіб.

Заради точності мушу нагадати, що члени-кореспонденти були ще в Петербурзькій академії і єдине, чим відрізнялися від членів (академіків), – це звітування перед колегами і керівництвом листуванням, а не очними виступами. Статус *всіх* членів був *однаковий!* Ніхто не бере чи не хоче брати до уваги, що в нашій Академії перші шість щорічних виборів у 1918–1923 роках також були виключно академічними і лише у 1924 році, коли радянський режим став всемогутнім, виборні процедури отримали логічну для нього «малесеньку» поправку, а саме: разом з академіками оголошувати вибори і членів-кореспондентів, які не листувалися з Академією, зате зразу погоджувалися на статус, нижчий за статус дійсних членів, що зберіглося й до наших незалежних часів, коли ми можемо і маємо щось змінити, обираючи лише її повноправних членів. Звісно, не шляхом перейменування звань нинішніх членів-кореспондентів, а просто не оголошуючи у виборах відповідних вакансій. При цьому останні, хто бажає, безумовно, мають мати право балотуватися, як і інші претенденти.

З цих змін можна було б почати. Проте мені здається, що є проблема, причому принципова, яку Академія також мала б підняти, більше того, відіграти ключову роль у її вирішенні – маю на увазі розширення і поглиблення *української ідентичності* через максимальне віддалення України від Росії на рівні менталітету українців, а не за географією, зрозуміло. Хотілося б, щоб ми якомога швидше позбавлялися російських наративів, їхнього імперського ставлення до інших країн і народів, наших уявлень, що росіяни в чомусь кращі за нас, розумніші, вправніші, вірили б в силу права, а не в право сили. Можливо, це не моя парафія, але бачу, що Академія тут ба-

гато чого могла б зробити або ініціювати. Наприклад, написати невикривлену, тобто під нашим кутом зору, історію Росії (ідею підказав член-кореспондент А. М. Негрійко), внести пропозицію щодо поступового переходу на латиницю, хоча вже чую заперечення, що кирилиця ніби не є російським винаходом, але, на мою думку, з міркувань доцільності така акція також сприяла б вкрай бажаному розриву. Нарешті, з цієї ж точки зору обґрунтувати заміну залізничних колій з радянської відстані між рейками на європейську.

Гадаю, через надто тривожну ситуацію, яка наразі склалася в нашій країні, «святкова», як припускав, стаття вийшла надто серйозною і задоволюю. Думав щось пояснити, про щось попередити. Важко сказати, чи почують в МОН пропозиції щодо нашої з ним когерентної роботи на кшталт АН СРСР і ДКНТ, але у всякому разі слід намагатися хоч якось донести до свідомості і влади, і пересічних громадян, що Академія, нехай не ідеальна і з серйозними проблемами, але в межах можливого працює і, безумовно, отримує результати, зокрема й ті, які Україні конче потрібні. Як зауважив Ярослав Степанович Яцків, Академія – це *«курка, яка несе золоті яйця»*. Нехай це образне перебільшення, але мораль проста – не треба її знищувати, вона має продовжувати свою справу.

На моє переконання, останні 32 роки довели необхідність зменшити свербіж «зовнішнього» реформування, яке за повної відсутності уваги до науки та її справжніх проблем, а також при мізерному фінансуванні поставили Академію на грань майже повного краху. Я б пропонував, хоча б на короткий час залишити її в спокої, надавши можливість вільно працювати, бо вчені мають бути розкутими у своїй творчості, позбавленими цілевказівок людей, які мало що в науці розуміють. Тільки самі вчені спроможні визначити, що в науці актуально, а що ні. Звісно, не без допомоги держави.

Розробляючи стратегію навіть для академії, ми маємо знати, на що розраховувати: хочемо ми бути серед розвинених країн або

тільки тримати рівень, не плануючи бути на передньому краї і користуючись чужими досягненнями. Таке теж не виключене. Або спиратися лише на себе. Не можна кидати нам кістки, а питати, як у ситих і гарно живущих. Це аморально!

З іншої сторони, розвиткові сприяють амбіційні задачі міжнародного рівня, які треба формулювати, створюючи відповідні умови для роботи. Як науковець, я відчуваю, що для дослідника участь у розв'язанні великих проблем є первинним. Другим, наголошу, є можливість проведення досліджень на сучасних інструментах, відкритість, мобільність, а вже потім рівень соціального забезпечення, але він не може бути ганебним, бо тоді нікого не утримаєш. Будь-який науковець, особливо молодий, має отримувати достойну зарплатню, бути впевненим у своєму і своїй сім'ї благополучному сьогоденні та майбутньому.

Приводи для оптимізму знайти важко. Вони у надії, що вистоїмо, збережемо академію і доведемо нашим урядовцям, депутатам різного рівня, а також пересічним громадянам, що без дбайливого захисту нашої праці щасливого майбутнього в Україні не буде. За втратою науки неминуче йде вмирання освіти, якісної медицини, оборонної могутності.

Треба всіляко намагатися донести до свідомості, насамперед пересічних громадян, що наука вимагає довіри і підтримки не тільки тому, що несе світло добра, знань, доброчесності та порядності, а через її прикладні можливості, які зрештою і змінюють світ.

При цьому в мене не має жодного сумніву, що, як і всі українці, вчені мають колосальну мотивацію робити все залежне від них, аби наблизити Перемогу над брутальними потворами, які прийшли нас нищити. Академія готова сумлінно займатися оборонними, медичними, екологічними та багатьма іншими нагальними проблемами країни, не забуваючи при цьому і про фундаментальну науку, яка також потребує відродження і без якої ніякі застосування неможливі.

Стаття надійшла до редакції 17.06.2024 р.

UDC: 53, 52

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.2.307065>

MAIN RESULTS OF SCIENTIFIC RESEARCH OF THE DEPARTMENT OF PHYSICS AND ASTRONOMY INSTITUTES OF THE NAS OF UKRAINE FOR 2023–2024

V.M. Loktev

National Academy of Sciences of Ukraine, Volodymyrska str., 64,
01601, Kyiv, vloktev@bitp.kiev.ua

Summary

Based on the analysis of the scientific activities of the institutes of the Department of Physics and Astronomy of the National Academy of Sciences of Ukraine, the main most significant results of fundamental and applied research obtained in accordance with the relevant thematic plans, as well as in cooperation on a contractual or grant basis with foreign organizations, including international programs, are presented.

An assessment is given to the obtained research results of the institutes of the department from the standpoint of the achievements of world science.

The importance of the activities of the Department of Physics and Astronomy, which should be strengthened in the conditions of waging an aggressive Russian-Ukrainian war for the needs of Ukraine's defense, is noted.

A significant part is devoted to the need for further work of the Department of Physics and Astronomy, the Presidium of the NAS of Ukraine, in general in the scientific sphere in Ukraine, and reform issues.

The uncertainty of government agencies in relation to the National Academy of Sciences of Ukraine and science in general is noted.

This is manifested in many aspects and, in particular, in the permanent meager financing, which in itself brings both the NAS of Ukraine and the scientific and technical sphere closer to a critical point.

Some of the presented research results of the department and their applied aspects directly relate to the topic, which is fundamental to our journal. Authors and readers of the journal can use the information for cooperation in solving current physical and technical problems.

Keywords: science, physics, National Academy of Sciences of Ukraine, achievements, problems

УДК: 53, 52

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.2.307065>

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ІНСТИТУТІВ ВФА НАН УКРАЇНИ ЗА 2023–2024 РОКИ

В. М. Локтєв

НАН України, вул. Володимирська, 64, 01601, Київ, vloktev@bitp.kiev.ua

Реферат

На основі аналізу наукової діяльності інститутів Відділення фізики і астрономії Національної академії наук України наведені основні найбільш вагомні результати фундаментальних і прикладних досліджень, отриманих згідно відповідних тематичних планів, а також у співпраці на договірній чи грантовій основі з зарубіжними організаціями включно за міжнародними програмами.

Дається оцінка отриманим результатам досліджень інститутів відділення з позиції досягнень світової науки.

Відзначається значимість діяльності ВФА, яка має в умовах ведення агресивної російсько-української війни для потреб оборони України посилитись.

Значна частина відведена необхідності подальшої роботи ВФА, Президії НАН України, в цілому в науковій сфері в Україні, питанням реформ.

Відзначається невизначеність державних структур у ставленні до Національної академії наук України і до науки загалом.

Це проявляється у багатьох аспектах і, зокрема, у перманентному мізерному фінансуванні, що саме по собі наближає і НАН України, і науково-технічну сферу до критичної межі.

Деякі представлені результати досліджень відділення і прикладні їх аспекти напряму стосуються тематики, яка є основною для нашого журналу, і автори та читачі журналу можуть скористатися інформацією для співпраці у розв'язанні актуальних фізико-технічних проблем.

Ключові слова: наука, фізика, Національна академія наук України, досягнення, проблеми

БІОСЕНСОРИ

BIOSENSORS

PACS 543.555+577.15+543.06

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.2.307066>

ПОКРАЩЕННЯ АНАЛІТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ БІОСЕНСОРІВ НА ОСНОВІ ФЕРМЕНТІВ КЛАСУ ОКСИДАЗ ЗА ДОПОМОГОЮ ДОДАВАННЯ У БІОСЕЛЕКТИВНУ МЕМБРАНУ ДОПОМІЖНОГО ФЕРМЕНТУ – КАТАЛАЗИ

Беркета Ксенія^{1,2}, Дзядевич Сергій^{1,2}, Солдаткін Олександр¹

¹ Інститут молекулярної біології та генетики НАНУ,
вул. Академіка Заболотного, 150, Київ, Україна, 03680

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
вул. Володимирська, 60, Київ, Україна, 01033
E-mail: ksenya.berketa.10@gmail.com

ПОКРАЩЕННЯ АНАЛІТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ БІОСЕНСОРІВ НА ОСНОВІ ФЕРМЕНТІВ КЛАСУ ОКСИДАЗ ЗА ДОПОМОГОЮ ДОДАВАННЯ У БІОСЕЛЕКТИВНУ МЕМБРАНУ ДОПОМІЖНОГО ФЕРМЕНТУ – КАТАЛАЗИ

Беркета Ксенія, Дзядевич Сергій, Солдаткін Олександр

Анотація. Запропоновано методику покращення аналітичних характеристик біосенсора на основі оксидаз, за якою в його біоселективну мембрану додається допоміжний фермент каталаза. В даному випадку каталаза використовується для збільшення насичення біомембрани киснем, і, відповідно, полегшення проходження реакції, що каталізується ферментами класу оксидаз. В роботі порівняно стандартний моноферментний кондуктометричний біосенсор на основі глюкозооксидази для визначення глюкози та новий – біферментний біосенсор на основі глюкозооксидази та каталази. Досліджено оптимальний метод коїмобілізації ферментів на поверхні кондуктометричного перетворювача, а також залежність роботи біосенсора від концентрації каталази в біоселективній мембрані. Перевірено стабільність процедури приготування біосенсора та відтворюваність його результатів. Порівняно аналітичні характеристики запропонованого біферментного біосенсора з моноферментним біосенсором.

Показано що додавання каталази до біоселективного елементу біосенсора в якості допоміжного ферменту суттєво покращує аналітичні характеристики біосенсора, в тому числі чутливість, відтворюваність результатів вимірювання і лінійний та динамічний діапазони роботи. Розроблений метод може бути в подальшому використаний для покращення параметрів інших біосенсорів на основі оксидаз.

Ключові слова: аналітичні методи, біферментний біосенсор, каталаза, кондуктометричний перетворювач, оксидоредуктази, аналітичні характеристики біосенсора

IMPROVEMENT OF THE ANALYTICAL CHARACTERISTICS OF OXIDASE-BASED ELECTROCHEMICAL BIOSENSORS BY ADDING AN ADDITIONAL ENZYME – CATALASE TO THE BIOSELECTIVE MEMBRANE

Kseniia Berketa, Sergiy Dzyadevych, Oleksandr Soldatkin

Abstract. In this study, the additional enzyme catalase is added to the bioselective membrane of the monoenzyme biosensor to improve the analytical characteristics of the biosensor. In this case, catalase is used to increase the saturate the biomembrane with oxygen, and, accordingly, facilitate the passage of the reaction catalyzed by enzymes of the oxidase class. A standard monoenzyme conductometric biosensor based on glucose oxidase for glucose determination and a new bi-enzyme biosensor based on glucose oxidase and catalase were compared. The optimal method of coimmobilization of enzymes on the surface of the conductometric transducer was investigated, as well as the dependence of the biosensor performance on the concentration of catalase in the bioselective membrane. The stability of the biosensor preparation procedure and the reproducibility of its results were verified. The analytical characteristics of the proposed bi-enzyme biosensor are compared with the monoenzyme biosensor.

It is shown that the addition of catalase to the bioselective element of the biosensor as an additional enzyme significantly improves the analytical characteristics of the biosensor, including sensitivity, reproducibility of measurement results, and linear and dynamic ranges of operation. The developed method could be used in future to improve the parameters of other oxidase-based biosensors.

Keywords: analytical methods, bi-enzyme biosensor, catalase, conductometric transducer, oxidoreductases, biosensor analytical characteristics

Вступ

В сучасному світі особливу увагу приділяють розробці нових методів точного та селективного аналізу різних речовин. Можливості застосування даних методів дуже різноманітні – від медичної діагностики різних хвороб та моніторингу навколишнього середовища до контролю якості продуктів харчування [1–5]. Наразі існує велике різноманіття традиційних методик якісного та кількісного аналізу – хімічні методи, імунологічний аналіз та хроматографія, спектрофотометрія, флуоресцентне та люмінесцентне визначення, ферментні методи аналізу тощо. Однак останнім часом широкого розповсюдження набувають біосенсорні методи. Активний розвиток даного напрямку досліджень викликаний тим, що згадані раніше традиційні методики вимірювання часто не відрізняються високою точністю аналізу, потребують громіздкого обладнання, що відрізняється високою вартістю та складністю роботи, тривалим часом аналізу та необхідністю комплексного процесу підготовки зразків до вимірювання. Деякі традиційні методи є

недостатньо чутливими та можуть мати значні похибки при вимірюванні низьких концентрацій аналіту, можуть відрізнятися низькою селективністю відносно інтерферуючих речовин.

У порівнянні з традиційними методами, електрохімічні біосенсори характеризуються невисокою вартістю аналізу та простотою виготовлення, відзначаються портативністю, швидкістю аналізу, що дозволяє проводити вимірювання в режимі реального часу. Іншою суттєвою перевагою є те, що біосенсори є високоселективними відносно можливих інтерферентів [7,8]. Біосенсори, зазвичай, використовують біологічні реакції перетворення для визначення концентрації аналіту, що дозволяє досягти високої точності та достовірності результатів.

Ферментні біосенсори є одними з найбільш розповсюджених серед електрохімічних біосенсорів через їхню високу селективність та швидкість аналізу. Звісно, існує ряд проблем, що можуть виникнути при розробці ферментних біосенсорних систем, зокрема, короткий лінійний діапазон визначення аналіту

або недостатня мінімальна границя його визначення. Як наслідок – покращення аналітичних характеристик ферментних біосенсорів є одним з головних завдань при їх розробці.

Наразі існує багато методів покращення аналітичних характеристик ферментних біосенсорів. Наприклад, вдосконалення перетворювачів та вимірювальних приладів призводить до підвищення їхньої роздільної здатності, стабільності сигналу та мінімізації шумів. Також можуть бути використані мікро- та міліфлюїдні системи або наноматеріали, що може суттєво покращити чутливість та точність результатів вимірювання та розширити лінійний діапазон роботи біосенсора [9–18]. Крім того, існує багато сучасних методик поліпшення процедури іммобілізації та/або оптимізації складу біоселективних елементів [19–20].

Іншим успішним підходом покращення параметрів біосенсорів є використання декількох ферментів в складі біоселективних елементів. Зазвичай цей підхід застосовують з метою або покращення селективності за рахунок розщеплення інтерферентів додатковим ферментом, або підвищення чутливості за рахунок перетворення продуктів базової ферментативної реакції назад у субстрат з використанням додаткового ферменту. Тож створення мультиферментних біоселективних елементів може бути корисним для покращення аналітичних характеристик вже існуючих біосенсорів, наприклад, через покращення їхньої чутливості або розширення лінійного діапазону роботи біосенсора за рахунок додаткових ферментативних реакцій [21, 22].

Мультиферментні системи, на основі незалежних ферментних реакцій складаються з двох (або більше) ензимів. Один з них є «головним» – що каталізує реакцію перетворення аналіту в електроактивний продукт. Інші ферменти є «допоміжними» – вони продукують додаткові субстрати головного ферменту, що покращують робочі характеристики та підсилюють реакцію біосенсора на цільовий аналіт.

Біферментний біосенсор, що розроблений в даному дослідженні, має в основі своєї роботи кілька незалежних ферментативних реакцій, що каталізуються каталазою (КАТ)

та глюкозооксидазою (ГОД). ГОД виступає в якості головного ферменту, що каталізує реакцію окиснення D-глюкози з утворенням пероксиду водню та D-глюконо-1,5-лактону, що спонтанно перетворюється до глюконової кислоти, що дисоціює на протон та кислотний залишок. Зміна іонного складу розчину спричиняє зміну провідності в приелектродному просторі біосенсора, яка фіксується кондуктометричним перетворювачем. Пероксид водню, що утворюється в ході головної реакції, в присутності каталази розкладається до води та кисню, який, в свою чергу, насичує ферментну мембрану, зменшуючи лімітування роботи ГОД через нестачу O_2 . За рахунок насичення ферментної мембрани киснем і досягаються основні ефекти по розширенню діапазону визначення глюкози та зменшення її мінімальної границі визначення.

Матеріали та методи

Матеріали

Для створення біосенсора були використані ферменти каталаза (КАТ) з бичачої печінки з активністю $\geq 10\,000$ од.акт./мл (Sigma-Aldrich, США) та глюкозооксидаза (ГОД) з *Aspergillus niger* з активністю 100–250 од.акт./мл (Sigma-Aldrich, Великобританія). Бичачий сироватковий альбумін (V фракція) (БСА) та 25% водного розчину глутарового альдегіду (ГА), гліцерол та KCl були отримані від Sigma-Aldrich (США). Як субстрат було використано стоковий розчин D-глюкози із концентрацією 500 мМ (Sigma-Aldrich, США). Для приготування буферного розчину був використаний KH_2PO_4 (Sigma-Aldrich, США). Інші неорганічні сполуки, що використовувалися в роботі, були вітчизняного виробництва та мали ступінь чистоти „х.ч.“ та „ч.д.а.“.

Для виготовлення мембран були використані наступні гелі:

– Гель на основі ГОД, що включав 20% глюкозооксидази, 5% БСА та 10% гліцеролу в 30 мМ фосфатному буферному розчині з рН 6,2.

– Гель на основі КАТ, що включав 15% каталази, 5% БСА та 10% гліцеролу в 30 мМ фосфатному буфері з рН 6,2.

– Білковий гель на основі БСА, що включав 10% БСА та 20% гліцеролу в 30 мМ фосфатному буфері з рН 6,2.

Кондуктометричні перетворювачі

Кондуктометричні перетворювачі, що були використані в роботі мають розміри 30x5 мм та складаються з двох ідентичних пар золотих гребінчастих електродів, нанесених на ситалову підкладку (рис. 1). Кожна пара електродів складається із 20 паралельних

растрових пальців, з їхньою шириною та відстанню між ними в 20 мкм. Загальна площа чутливої поверхні електрода становить 1,5 мм². Більше детально схема роботи перетворювачів описана в роботі [23].

Використання системи з двох пар електродів дозволяє виконувати вимірювання в диференційному режимі: одна з пар електродів (референтна) з мембраною на основі бичачого сироваткового альбуміну вимірює загальну

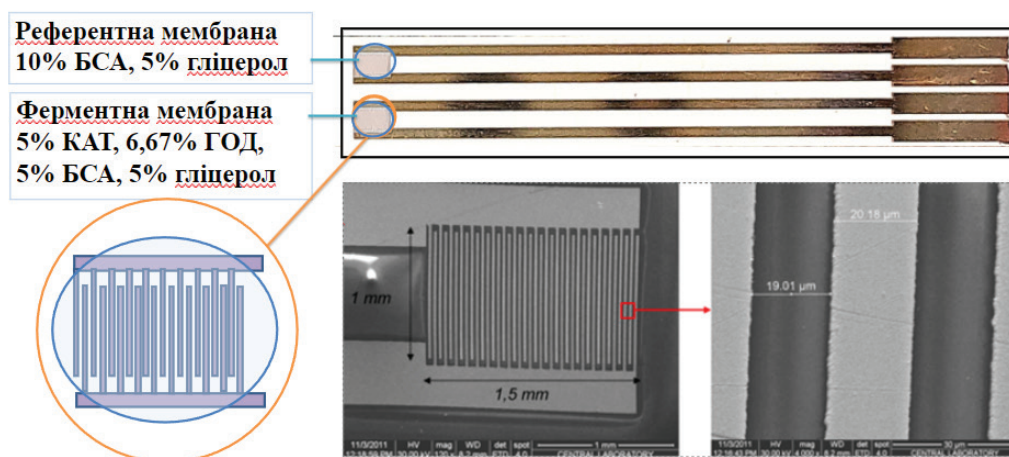


Рис. 1. Схема кондуктометричного перетворювача.

провідність розчину, в той час як друга, чутлива, з біоселективним елементом на основі суміші ферментних гелів, вимірює не тільки загальну провідність розчину, а й специфічний сигнал, що виникає внаслідок ензиматичних реакцій в мембрані на поверхні перетворювача. Використання диференційного режиму вимірювань дозволяє суттєво зменшити вплив неінформативних параметрів (температура, зміна загальної провідності розчину, освітлення та ін.) на результати вимірювань.

Портативний пристрій для кондуктометричних вимірювань

Кондуктометричний портативний вимірювальний прилад був розроблений з урахуванням наших рекомендацій та люб'язно наданий нам Інститутом електродинаміки НАН України.

В основі роботи приладу лежить вдосконалена диференційна вимірювальна схема кондуктометричної системи з автоматичним

балансуванням та діагностикою параметрів сенсора, що була детально описана в роботах [24, 25]. Робоча синусоїдальна напруга, що використовується в системі, становить 14 мВ, а її частота – 66 кГц. Прилад має спеціальне програмне забезпечення, що розроблене для його використання в біосенсоріці для реєстрації результатів кондуктометричних вимірювань. Даний пристрій дозволяє нівелювати фарадеївські процеси та ефекти поляризації мікроелектродів. Також, за рахунок використання диференційного режиму вимірювань можна скоротити до мінімуму вплив освітлення та температури на сигнали біосенсора.

Приготування біоселективних елементів

Моноферментний біоселективний елемент на основі ГОД

Біоселективну та референтну мембрани на поверхню кондуктометричних перетворювачів наносили мікродозаторами за наступ-

ною методикою. На першу пару електродів було нанесено 100 нл гелю з ГОД, на другу (референтну) пару наносили 100 нл гелю на основі лише БСА. Імобілізацію проводили в парах глутарового альдегіду, розміщуючи перетворювачі з нанесеними мембранами в ексікатор на 20 хвилин. Після імобілізації, мембрани біосенсора підсушували на повітрі впродовж 10 хвилин, після чого відмивали робочим буферним розчином від залишків незв'язаного глутарового альдегіду та інших компонентів мембрани впродовж 5 хвилин, кілька разів змінюючи буферний розчин. За рахунок імобілізації білків в парах глутарового альдегіду, створювалась тривимірною сітка ферменту в матриці БСА, що була скріплена за рахунок ковалентного зшивання глутаровим альдегідом.

Біферментний біоселективний елемент на основі ГОД та КАТ

Два ферментних гелі були використані для створення біферментного біоселективного елементу – на основі ГОД та КАТ. Вони були змішані у співвідношенні 2:1, після чого 100 нл суміші було нанесено на одну пару електродів. Нанесення референтної мембрани

та сам процес імобілізації були виконані ідентично тому, як описано вище.

Методика біосенсорних вимірювань

Вимірювання проводились у відкритій вимірювальній комірці об'ємом 2 мл. Як буферний розчин було використано 5 мМ фосфатний буфер з рН 6,2. Для досягнення необхідної концентрації аналіту до вимірювальної комірки додавали аліквоти стокового розчину D-глюкози з концентрацією 500 мМ. Неспецифічні зміни сигналу, викликані змінами температури, рівня освітлення, рН, сили струму та інших неінформативних чинників були виключені за рахунок використання диференційного режиму вимірювань. Тривалість отримання одного відгуку становила приблизно 2–3 хвилини, між відгуками біосенсор промивали впродовж 2-х хвилин, кілька разів змінюючи буферний розчин.

Відгук біосенсора на додавання у вимірювальну комірку аналіту може бути розрахований двома методами: в першому випадку вимірюється різниця провідності (dS) між базовими лініями до та після отримання відгуку на цільову молекулу, в другому – швидкість зміни провідності ($V_0 = dS/dt$) відносно стандартних відгуків (рис. 2).

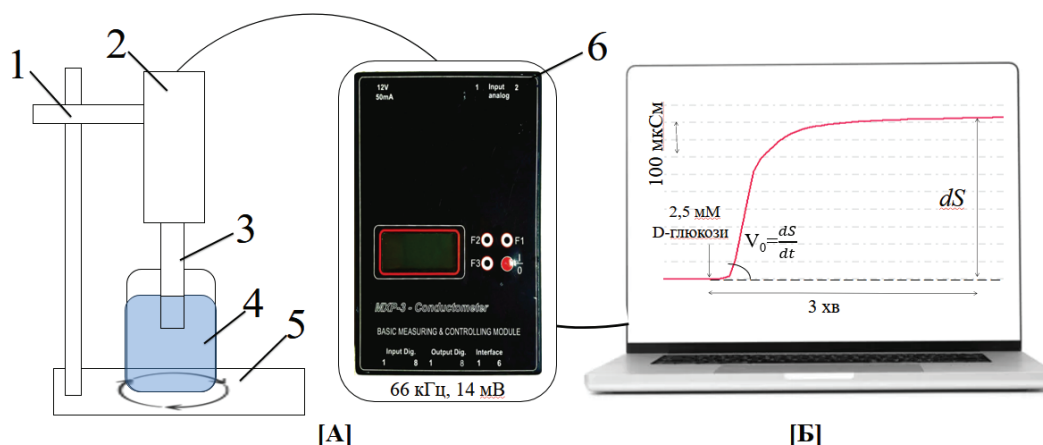


Рис. 2. Схема роботи портативного приладу для кондуктометричних вимірювань.

А – схематичне зображення устаткування для вимірювань: 1 – тримач, 2 – контактний пристрій, 3 – кондуктометричний перетворювач, 4 – вимірювальна комірка, наповнена буферним розчином, 5 – магнітна мішалка, 6 – портативний прилад для кондуктометричних вимірювань.

Б – типовий відгук біосенсора на додавання 2,5 мМ D-глюкози у вимірювальну комірку (вимірювання проводились в 5 мМ фосфатному буфері з рН 6,2).

Всі розрахунки, аналіз результатів, статистика та побудова графіків проводились в програмі OriginLab OriginPro 8,5.

Результати та обговорення

Принцип функціонування моно- та біферментних біосенсорів

В основі функціонування моноферментного біосенсора для вимірювання концентрації глюкози лежить ензиматична реакція за участі ГОД. Глюкозооксидаза – це фермент класу оксидоредуктаз, що каталізує реакцію окиснення D-глюкози до глюконо-1,5-лактону (реакція 1 – рис. 3), що в подальшому спон-

танно перетворюється до глюконової кислоти, яка в свою чергу, дисоціює з утворенням протону та аніону глюконової кислоти (реакція 3 – рис. 3), що призводить до зміни електропровідності всередині моноферментної мембрани біосенсора. Ця зміна фіксується портативним кондуктометричним вимірювальним приладом за допомогою кондуктометричного перетворювача.

Для покращення аналітичних характеристик моноферментного біосенсора на основі ГОД, було вирішено додати до біоселективної мембрани каталазу в якості допоміжного ферменту. КАТ також є ферментом класу

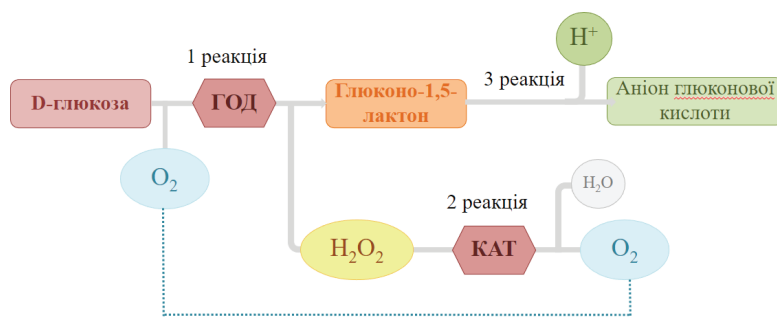


Рисунок 3. Схематичний вигляд реакцій, що лежать в основі роботи моно- та біферментного біосенсорів.

Реакція 1 – окиснення бета-D-глюкози у присутності ГОД.

Реакція 2 – розпад пероксиду водню під дією каталази.

Реакція 3 – гідролітична дисоціація глюконо-1,5-лактону (продукт реакції 1) з утворенням електроактивних сполук, що змінюють провідність у біоселективному елементі біосенсора.

оксидоредуктаз, який каталізує розкладання пероксиду водню на воду і кисень (реакція 2 – рис. 3). В результаті цієї реакції концентрація кисню всередині мембрани в приелектродному просторі перетворювача відновлюється, відповідно зникають обмеження роботи глюкозооксидази внаслідок недостатчі кисню, що призводить до поліпшення аналітичних характеристик біосенсора.

Підбір методу ко-імобілізації КАТ і ГОД

Важливим етапом розробки мультиферментних біосенсорів є вибір методу ко-імобілізації двох ферментів на поверхні перетворювача. Для перевірки ми обрали такі варіанти приготування біосенсорів:

1) Одношарова мембрана на основі суміші двох ферментів. У цьому випадку ферменти змішували у співвідношенні 1:2 (ферментний гель КАТ: ферментний гель ГОД) перед нанесенням на поверхню перетворювача; 2) Двошарова мембрана, утворена двома гелями ферментів, які іммобілізуються на поверхні перетворювача в два етапи. Нижній шар – ферментний гель на основі КАТ, верхній шар – ферментний гель на основі ГОД; 3) Двошарова мембрана, нижній шар – ферментний гель на основі ГОД, верхній – ферментний гель на основі КАТ; 4) Одношарова мембрана на основі одного ферменту – ферментний гель ГОД. До робочого буферного розчину додавали нативну КАТ; 5) Одношарова мембрана на основі

одного ферменту – ферментний гелі ГОД, без додавання в систему інших ферментів.

Відповідно, було створено ряд біосенсорів з описаними вище варіантами приготування біоселективних елементів (1–5). Калібрувальні криві визначення глюкози для всіх варіантів наведено на рис. 4.

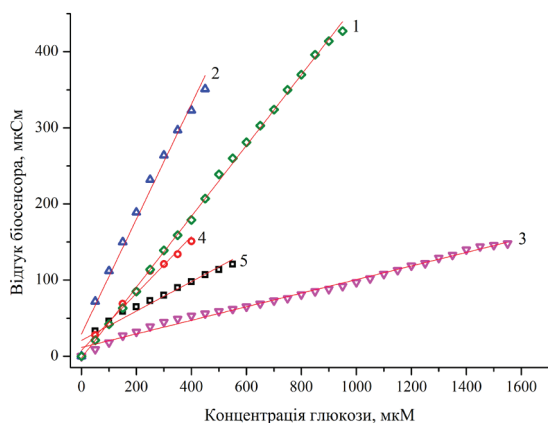


Рис. 4. Лінійні діапазони калібрувальних кривих біосенсорів на основі різних методів коїмобілізації ферментів в складі біоселективного елементу (варіанти 1–5). Вимірювання проводились в 5 мМ фосфатному буфері з рН 6,2.

З рисунку видно, що біосенсиори, створені за варіантами приготування 2, 4 та 5 (двошарова мембрана з нижнім шаром КАТ, моноферментна мембрана ГОД з додаванням нативної КАТ до розчину та моноферментна мембрана ГОД, відповідно) характеризувалися досить вузькими лінійними діапазонами роботи. Порівняно з ними біосенсиори, створені за варіантами підготовки 1 і 3 (двоферментна одношарова мембрана і двошарова біомембрана з нижнім шаром на основі ГОД), мають більш широкий діапазон роботи. Лінійний діапазон біосенсора варіанту 3 розширюється приблизно в 3–3,5 рази порівняно з біосенсором варіанту 5, що, ймовірно, пов'язано з довшим часом, протягом якого субстрат надходить від буфера до активного центру ГОД, оскільки дифузія ускладнюється наявністю верхньої мембрани на основі КАТ. Порівняно з цим, біосенсор на основі мембрани з сумішшю ферментів (варіант 1) мав діапазон приблизно в 1,5 рази більший, ніж у одноферментного біосен-

сора (варіант 5), що було викликано ефектом каталази на проходження основної ферментативної реакції.

Чутливість біосенсорів на основі всіх 5 варіантів приготування також відрізнялася – найбільш чутливим виявився біосенсор на основі 1 варіанту. І, враховуючи те, що він має широкий лінійний діапазон визначення глюкози, варіант 1 біосенсора було обрано як найбільш оптимальний. Відповідно, для створення біосенсорів у подальших експериментах був використаний метод коїмобілізації каталази та глюкозооксидази в одношаровій мембрані на поверхні кондуктометричного перетворювача.

Підбір оптимальної концентрації ферментів в біоселективній мембрані біосенсора

Наступним важливим етапом розробки мультиферментних біосенсорів є підбір оптимальної концентрації ферментів у біоселективній мембрані. Концентрація ГОД (10%) у мембрані була обрана за результатами досліджень, отриманих у попередніх роботах [26,27,28]. Тому було досліджено вплив концентрації каталази в біоселективній мембрані на відгук біосенсора. Величину відгуків на додавання у вимірювальну комірку 2,5 мМ глюкози порівнювали для низки біосенсорів на основі різної кількості КАТ у мембрані. Концентрація глюкози була обрана такою, щоб відповідати абсолютному насиченню фермента субстратом та косубстратом (кисень), коли кожна молекула іммобілізованого ферменту задіяна у перетворенні молекул субстрату (рис. 5).

Результати, приведені на рис. 5 доводять, що найвища чутливість біосенсора до глюкози спостерігалася при використанні ферментного гелю з 5% КАТ. Біферментний біосенсор характеризувався аналогічною чутливістю при концентрації 7,5% КАТ у гелі. Однак, за такого варіанту, зростала середньоквадратична похибка вимірювань, тому оптимальною концентрацією КАТ було обрано 5%.

Додатково, в рамках експерименту по підборі оптимальної концентрації КАТ було досліджено як змінюється лінійний діапазон

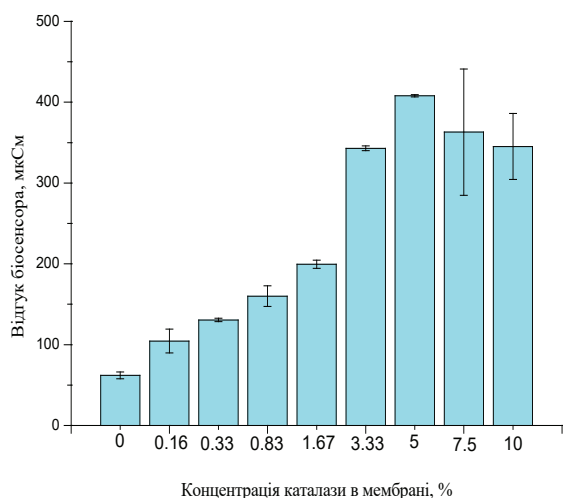


Рис. 5. Залежність відгуку біферментного біосенсора від концентрації каталази в біоселективній мембрані. Концентрація глюкози 2,5 мМ. Вимірювання проводились в 5 мМ фосфатному буфері з рН 6,2.

роботи біосенсора при різних концентраціях КАТ в біоселективній мембрані біферментного біосенсора. Для вивчення даного параметру було отримано деталізовані калібрувальні криві з кроком концентрації субстрату в 100 мкМ для групи біосенсорів на основі різних концентрацій КАТ (рис. 6).

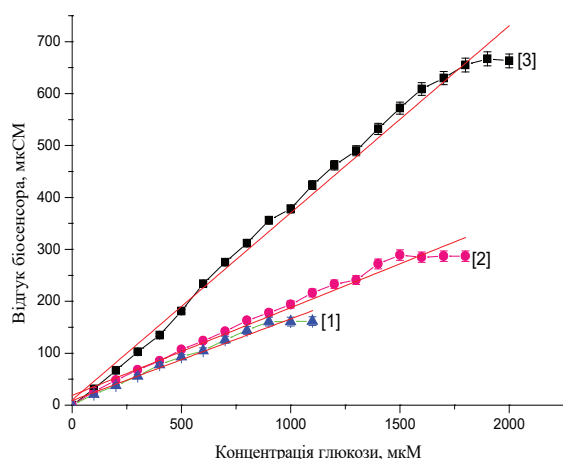


Рис. 6. Калібрувальні криві розроблених біосенсорів на основі 5% ГОД та різних концентраціях КАТ (1–0%, 2–1.33%, 3–5%) в біоселективних елементах. Вимірювання проводились в 5 мМ фосфатному буфері з рН 6,2.

На підставі результатів, відображених на рисунку 6, можна зробити висновок, що присутність КАТ в мембрані значно розширює лінійний діапазон роботи біосенсора, а величина такого збільшення діапазону залежить від концентрації допоміжного ферменту (КАТ). Таким чином, результати цього експерименту підтверджують попередні твердження, що кількість каталази впливає на чутливість біосенсора (відгук біферментного біосенсора на основі 5% КАТ збільшується приблизно в 2–2,5 рази порівняно з моноферментним біосенсором).

Перевірка стабільності функціонування біферментного біосенсора

Важливою характеристикою будь-якого біосенсора є відтворюваність відгуків під час безперервної роботи. Досліджувались відгуки моно- та біферментних біосенсорів на однакову концентрацію субстрату протягом кількох годин безперервної роботи (рис. 7). Експеримент для кожного з варіантів біосенсорів проводили в 15 повторях. Для обох варіантів біосенсора значного зниження величини відгуку не спостерігалось, але похибка вимірювання була різною: RSD біферментного біосенсора становила 1,7%, а моноферментного біосенсора – 5,2%. Обидва показники знаходяться в межах норми, але похибка для біосенсора на основі КАТ-ГОД приблизно в 3 рази менша. Скоріше за все покращення відтворюваності

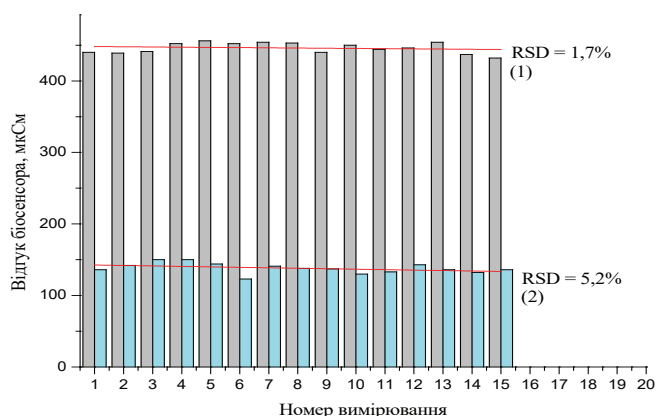


Рис. 7. Відтворюваність відгуків біферментного (1) та моноферментного (2) біосенсора при безперервній роботі впродовж 1 дня. Концентрація глюкози – 2,5 мМ. Вимірювання проводились в 5 мМ фосфатному буфері з рН 6,2.

відгуків мультиферментного біосенсора можна пояснити саме нівеляцією нестачі кисню у біоселективній мембрані.

Стабільність біферментного біосенсора під час зберігання була дещо гіршою порівняно з моноферментним біосенсором. Після місяця зберігання в сухому стані при температурі -18°C значення відгуку моноферментного біосенсора знизилося на 15% відносно початкового, а падіння активності біферментного біосенсора склало 19%. Однак це не є суттєвою проблемою, оскільки кожне використання біосенсора вимагає калібрування для досягнення максимальної надійності результатів вимірювання.

Іншою важливою характеристикою біосенсора, яку необхідно було дослідити в рамках розробки нового біферментного біосенсора, є відтворюваність процедури приготування біосенсора (інтер-відтворюваність). Для вивчення цієї характеристики було проведено низку іммобілізацій біферментних біосенсорів згідно з оптимізованою методикою, описаною вище. Відразу після кожної іммобілізації було отримано 3 відгуки біосенсорів на однакову концентрацію глюкози. З рисунка 8 видно, що суттєвої різниці в процедурі приготування біосенсорів не спостерігалось, а RSD для 11 серій приготування біосенсора становило 10,7%.

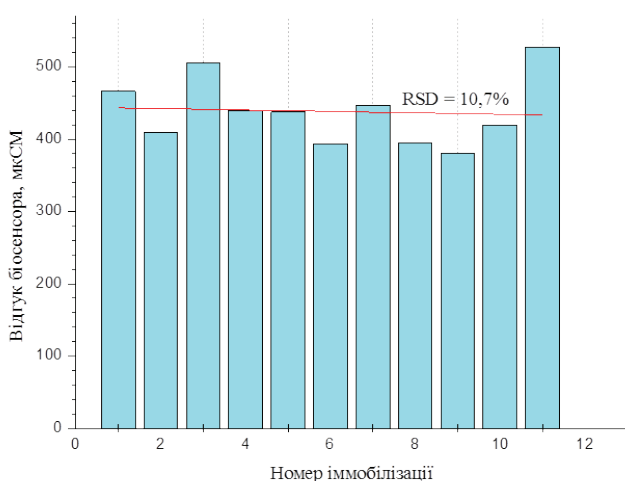


Рис. 8. Інтер-відтворюваність процедури приготування біферментного біосенсора. Концентрація глюкози 2,5 мМ. Вимірювання проводились в 5 мМ фосфатному буфері з рН 6,2.

Для моноферментного біосенсора похибка приготування була, приблизно, на тому ж рівні ($\text{RSD} = 10\%$).

Дослідження основних аналітичних характеристик розробленого біферментного біосенсора

Останньою стадією розробки біферментного біосенсора було вивчення його аналітичних характеристик. Для цього були проаналізовані особливості відгуків та калібрувальної кривої за різних умов використання. Отримані аналітичні характеристики були порівняні з такими для референтного методу вимірювань (стандартним моноферментним біосенсором на основі ГОД для вимірювання глюкози). Порівняння аналітичних характеристик обох варіантів біосенсорів для вимірювання глюкози проводилось по таким параметрам: чутливість, динамічний та лінійний діапазони роботи, мінімальна межа визначення, час та стабільність отримання відгуку (час отримання відгуку, тривалість аналізу в цілому, відтворюваність результатів, шум та дрейф базової лінії). Вимірювання проводились в 5 мМ фосфатному буфері з рН 6,2. Мінімальна межа визначення розраховувалась як мінімальна величина відгуку, яка перевищує шум базової лінії втричі. Для моно- та біферментного біосенсорів мінімальні концентрації аналіту становили 16 та 8 мкМ відповідно.

Найбільш істотною відмінністю між моно- та біферментними біосенсорами були параметри, пов'язані з чутливістю біосенсора до глюкози та лінійним діапазоном його функціонування. Чутливість біосенсорів визначалась, як величина відгуку біосенсора на 1 мМ субстрату і становила 378 мкСм/мМ для біферментного біосенсора на основі суміші КАТ-ГОД порівняно з 161 мкСм/мМ для моноферментного біосенсора на основі тільки ГОД. Лінійний діапазон роботи в результаті додавання КАТ до біоселективного елемента розширився більш ніж у два рази і знаходився в діапазоні 0–1700 мкМ для біферментного біосенсора порівняно з 0–800 мкМ для моноферментного. Також було визначено шум та дрейф базової лінії, час отримання одного відгуку та час аналізу в цілому, але між цими

параметрами не спостерігалось суттєвої відмінності.

Ми припускаємо, що таке суттєве покращення характеристик спостерігається за рахунок насичення киснем приелектродного простору біосенсора внаслідок розкладання пероксиду водню каталазою та одночасним усуненням продуктів реакції ГОД. Поки ми уникаємо обмеження ферментативної реакції, що каталізується глюкозооксидазою через нестачу кисню та інгібування зворотної реакції, концентрація аналіту (глюкози) є єдиним обмежуючим фактором для роботи ГОД і біосенсора, відповідно.

ВИСНОВКИ

У роботі запропоновано метод покращення аналітичних характеристик моноферментного біосенсора на основі ферменту групи оксидаз шляхом коімобілізації з додатковим ферментом (каталазою) з метою підвищення насичення мембрани киснем для кращої роботи оксидази. Зокрема, розроблено та оптимізовано для кількісного визначення глюкози новий високочутливий кондуктометричний біферментний біосенсор на основі ГОД і КАТ. Проаналізовано різні методи коімобілізації ферментів КАТ і ГОД та визначено оптимальну конфігурацію біоселективного елемента.

Було показано, що біосенсор характеризується високою відтворюваністю результатів вимірювань впродовж одного дня ($RSD = 1.7\%$). Також біосенсор характеризувався гарною інтер-відтворюваністю ($RSD = 10.7\%$).

Після оптимізації біосенсора було проведено аналіз основних характеристик біферментного біосенсора у порівнянні з моноферментним. Показано, що розроблений біосенсор характеризується високою чутливістю (378 мкСм/мМ , що приблизно в 2,3 рази вище порівняно з 161 мкСм/мМ для моноферментного біосенсора) до цільового аналіту. При цьому спостерігалось значне розширення лінійного діапазону від 0–800 (моноферментний) до 0–1700 мкМ (біферментний). Також було досліджено інші аналітичні характеристики.

За результатами досліджень встановлено, що використання каталази покращило роботу

біосенсора на основі ферменту ГОД, а також підтвердило, що технологія додавання додаткового ферменту до біомембрани біосенсора може бути використана для покращення його аналітичних характеристик. У свою чергу, покращення характеристик біосенсорів на основі ферментів класу оксидаз дозволяє більш ефективно використовувати їх у різних галузях: медицині, виробництві та контролі якості фармацевтичних препаратів тощо.

ПОДЯКА

Роботу виконано за підтримки Національного фонду досліджень України в рамках конкурсу проектів НДР «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди» (проект 2022.01/0043) та фонду Саймонс (США).

Список використаної літератури

- [1]. A. Haleem, M. Javaid, R. P. Singh, R. Suman, S. Rab, *Sensors International*, 2021, 2, 100121.
- [2]. S. Gavrilas, C.Ş. Ursachi, S. Perța-Crișan, F.D. Munteanu, *Sensors (Basel)*, 2022, 22(4), 1513.
- [3]. R. Shams, J. Singh, S. Ashraf, M. Manzoor, A. Dar, *Journal of Postharvest Technology*, 2020, 08(1), pp.53–74.
- [4]. A. Woldu, *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 2022, 13, pp.12–29.
- [5]. P. Mehrotra, *Oral. Biol. Craniofac. Res.*, 2016, 6(2), pp.153–159.
- [6]. B. Bucur, C. Purcarea, S. Andreescu, A. Vasilescu, *Sensors*, 2021, 21(9), 3038.
- [7]. J. Wu, H. Liu, W. Chen, B. Ma, H. Ju, *Nat. Rev. Bioeng.*, 2023, 1, pp.346–360.
- [8]. P. Lippa, G. Proll, M. Imhoff, T. Koschinsky, in *Point-of-care testing Principles and Clinical Applications, Analytical methods, biosensor technology* (Eds: P. Lippa, R. Junker), Springer Berlin, Heidelberg 2018, pp.37–46.
- [9]. V. Melnyk, A. Vasylenko, L. Semenycheva, O. Slitskyi, O. Saiapina, S. Dzyadevych, *Engineering Research Express*, 2021, 3, 045008.

- [10]. Y. Li, H.J. Schluesener, S. Xu, *Gold Bull*, 2010, 43, p.29–41.
- [11]. J. Wang, Y. Ren, B., in *Advances in Microfluidic Technologies for Energy and Environmental Applications, Application of Microfluidics in Biosensors* (Ed: Y. Ren), IntechOpen, 2020, ch.4.
- [12]. S. Vigneshvar, C.C. Sudhakumari, B. Senthilkumaran, H. Prakash, *Sec. Bioprocess Engineering*, 2016, 4, 20163.
- [13]. O. O. Soldatkin, O. V. Soldatkina, I. I. Piliponski, L. S. Rieznichenko, T. G. Gruzina, S. M. Dybkova, S. V. Dzyadevych, A. P. Soldatkin, *Appl Nanosci*, 2022, 12, pp. 995–1003.
- [14]. O. O. Soldatkin, E. Soy, A. Errachid, N. Jaffrezic-Renault, B. Akata, A. P. Soldatkin, S. V. Dzyadevych, *Sensor Letters*, 2011, 9(6), pp.2320–2326.
- [15]. Ramanavicius, S.; Ramanavicius, A., *Nanomaterials*, 2021, 11, p.371.
- [16]. Ramanaviciene, A.; German, N.; Kausaite-Minkstimiene, A.; Ramanavicius, A., *Chemosensors*, 2021, 9, p.188.
- [17]. Sakalauskiene, L.; Popov, A.; Kausaite-Minkstimiene, A.; Ramanavicius, A.; Ramanaviciene, A., *Biosensors*, 2022, 12, p.320.
- [18]. Sobolevskiy, M.S., Soldatkin, O.O., Lopatynskiy, A.M. et al. Application of modified gold nanoparticles to improve characteristics of DNA hybridization biosensor based on surface plasmon resonance spectrometry. *Appl Nanosci* 13, 7521–7529 (2023). <https://doi.org/10.1007/s13204-023-02930-2>
- [19]. O. Soldatkin, V. Arkhypova, I. Kucherenko, D. Kucherenko, S. Dzyadevych, *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, 2021, 18, pp. 11–26.
- [20]. O. Soldatkina, I. Kucherenko, O. Soldatkin, V. Pyeshkova, O. Dudchenko, B. Akata Kurç, S. Dzyadevych, *Applied Nanoscience*, 2018, 9, pp. 737–747.
- [21]. I. S. Kucherenko, O. O. Soldatkin, S. V. Dzyadevych, A. P. Soldatkin, *Analytica Chimica Acta*, 2020, 1111, pp. 114–131.
- [22]. U. Wollenberger, F. Schubert, D. Pfeiffer, F. W. Scheller, *Trends in Biotechnology*, 1993, 11, pp. 255–262.
- [23]. K. Berketa, O. Saiapina, L. Fayura, A. Sibirny, S. Dzyadevych, O. Soldatkin, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, 367, 132023.
- [24]. V. G. Melnyk, A. D. Vasilenko, A. V. Slitskiy, S. V. Dzyadevych, *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, 2015, 12, pp. 51–59
- [25]. O. Soldatkin, O. Soldatkina, I. Piliponskiy, L. Rieznichenko, T. Gruzina, S. Dybkova, S. Dzyadevych, A. Soldatkin., *Applied Nanoscience*, 2021, 12.
- [26]. S. V. Dzyadevych, A. P. Soldatkin, V. M. Arkhypova, O. A. Shul'ga, G. V. El'skaya, *Ukr.Biochem.J.*, 1995, 67, pp.53–59.
- [27]. A. P. Soldatkin, A. V. El'skaya, A. A. Shul'ga, A. S. Jdanova, S. V. Dzyadevich, N. Jaffrezic-Renault, C. Martelet, P. Clechet, *Analytica Chimica Acta*, 1994, 288(3), pp.197–203.
- [28]. O. Y. Dudchenko, V. M. Pyeshkova, O. O. Soldatkin, B. Akata Kurç, B. O. Kasap, A. P. Soldatkin, S. V. Dzyadevych, *Nanoscale Res Lett*, 2016, 11, 59.

Стаття надійшла до редакції 15.05.2024 р.

PACS 543.555+577.15+543.06

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.2.307066>

**IMPROVEMENT OF THE ANALYTICAL CHARACTERISTICS OF
OXIDASE-BASED ELECTROCHEMICAL BIOSENSORS BY ADDING AN
ADDITIONAL ENZYME – CATALASE TO THE BIOSELECTIVE
MEMBRANE**

Kseniia Berketa^{1,2}, Sergiy Dzyadevych^{1,2}, Oleksandr Soldatkin¹

¹ Institute of Molecular Biology and Genetics, National Academy of Sciences of Ukraine,
150 Zabolotnogo Str., 03680, Kyiv, Ukraine

² Taras Shevchenko National University of Kyiv, 60 Volodymyrska Street, Kyiv, Ukraine, 01033
E-mail: ksenya.berketa.10@gmail.com

Summary

Enzymatic biosensors are the most widespread among electrochemical biosensors due to their high selectivity and speed of analysis. Of course, there are a number of problems that may arise in the development of enzyme biosensor systems, in particular, a short linear range of analyte determination or an insufficient minimum limit of its determination. As a result, improving the analytical characteristics of enzyme biosensors is one of the main tasks in their development.

One of the successful approaches to improving the parameters of biosensors is the use of several enzymes in the composition of bioselective elements. The creation of multi-enzyme bioselective elements can be useful for improving the analytical characteristics of already existing biosensors, for example, by improving their sensitivity or expanding the linear range of biosensor operation due to additional enzymatic reactions.

Therefore, we proposed a method of improving the analytical characteristics of a mono-enzyme biosensor based on an enzyme of the oxidase group by coimmobilization with an additional enzyme (catalase) in order to increase the oxygen saturation of the membrane for better oxidase performance. In particular, a new highly sensitive conductometric bienzymatic biosensor based on GOx and CAT was developed and optimized for the quantitative determination of glucose. Different methods of coimmobilization of CAT and GOx enzymes were analyzed and the optimal configuration of the bioselective element was determined.

According to the results of the research, it was established that the use of catalase improved the work of the biosensor based on the GOx enzyme, and also confirmed that the technology of adding an additional enzyme to the biomembrane of the biosensor can be used to improve its analytical characteristics. In turn, improving the characteristics of biosensors based on enzymes of the oxidase class allows them to be used more effectively in various fields: medicine, production and quality control of pharmaceuticals, etc.

Keywords: analytical methods, bi-enzyme biosensor, catalase, conductometric transducer, oxidoreductases, biosensor analytical characteristics

PACS 543.555+577.15+543.06

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.2.307066>

ПОКРАЩЕННЯ АНАЛІТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ БІОСЕНСОРІВ НА ОСНОВІ ФЕРМЕНТІВ КЛАСУ ОКСИДАЗ ЗА ДОПОМОГОЮ ДОДАВАННЯ У БІОСЕЛЕКТИВНУ МЕМБРАНУ ДОПОМІЖНОГО ФЕРМЕНТУ – КАТАЛАЗИ

Беркета Ксенія^{1,2}, Дзядевич Сергій^{1,2}, Солдаткін Олександр¹

¹ Інститут молекулярної біології та генетики НАНУ, вул. Академіка Заболотного, 150, Київ, Україна, 03680

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка, вул. Володимирська, 60, Київ, Україна, 01033

E-mail: ksenya.berketa.10@gmail.com

Реферат

Ферментні біосенсори є одними з найбільш розповсюджених серед електрохімічних біосенсорів через їхню високу селективність та швидкість аналізу. Звісно, існує ряд проблем, що можуть виникнути при розробці ферментних біосенсорних систем, зокрема, короткий лінійний діапазон визначення аналіту або недостатня мінімальна границя його визначення. Як наслідок – покращення аналітичних характеристик ферментних біосенсорів є одним з головних завдань при їх розробці.

Одним з успішних підходів покращення параметрів біосенсорів є використання декількох ферментів в складі біоселективних елементів. Створення мультиферментних біоселективних елементів може бути корисним для покращення аналітичних характеристик вже існуючих біосенсорів, наприклад, через покращення їхньої чутливості або розширення лінійного діапазону роботи біосенсора за рахунок додаткових ферментативних реакцій.

Тож, нами було запропоновано метод покращення аналітичних характеристик моноферментного біосенсора на основі ферменту групи оксидаз шляхом коїмобілізації з додатковим ферментом (каталазою) з метою підвищення насичення мембрани киснем для кращої роботи оксидази. Зокрема, розроблено та оптимізовано для кількісного визначення глюкози новий високочутливий кондуктометричний біферментний біосенсор на основі ГОД і КАТ. Проаналізовано різні методи коїмобілізації ферментів КАТ і ГОД та визначено оптимальну конфігурацію біоселективного елемента.

За результатами досліджень встановлено, що використання каталази покращило роботу біосенсора на основі ферменту ГОД, а також підтвердило, що технологія додавання додаткового ферменту до біомембрани біосенсора може бути використана для покращення його аналітичних характеристик. У свою чергу, покращення характеристик біосенсорів на основі ферментів класу оксидаз дозволяє більш ефективно використовувати їх у різних галузях: медицині, виробництві та контролі якості фармацевтичних препаратів тощо.

Ключові слова: аналітичні методи, біферментний біосенсор, каталаза, кондуктометричний перетворювач, оксидоредуктази, аналітичні характеристики біосенсора

СЕНСОРИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ

SENSORS AND INFORMATION SYSTEMS

УДК: 621.391

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.2.307067>

ПРОБЛЕМИ ВИБОРУ ЕФЕКТИВНИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ СЕЙСМОСИГНАЛІВ ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ

М. А. Глауберман¹, Я. І. Леніх², О. С. Максимов¹, А. П. Балабан²

¹ Навчально-науково-виробничий центр ОНУ імені І. І. Мечникова, mik_ag@i.ua

² Міжвідомчий науково-навчальний фізико-технічний центр МОН і НАН України, ОНУ імені І. І. Мечникова, ndl_lepikh@onu.edu.ua

ПРОБЛЕМИ ВИБОРУ ЕФЕКТИВНИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ СЕЙСМОСИГНАЛІВ ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ

М. А. Глауберман, Я. І. Леніх, О. С. Максимов, А. П. Балабан

Анотація: У роботі проведено аналіз проблеми обробки сейсмосигналів інтелектуальної автономної сейсмічної системи для розвідувально-сигналізаційних і охоронних цілей та визначено основні напрямки створення нової енергетично мало витратної сейсмічної системи подвійного призначення з підвищеною розпізнавальною дальністю виявлення рухомих об'єктів. Розглянуто різні методи обробки сейсмосигналів, їх порівняння з точки зору ефективності виходячи з особливостей їх характеристик і енергозатрат.

Ключові слова: сейсмосигнали, ідентифікаційні ознаки, сейсмічні системи, часові методи обробки сигналів

PROBLEMS OF CHOICE EFFECTIVE METHODS OF TREATMENT OF SEISMO SIGNALS FOR INTELLECTUAL OF SYSTEMS

M. A. Glauberman, Ya. I. Lepikh, O. S. Maksimov, A. P. Balaban

Abstract. The paper analyzes the problem of processing seismic signals an intellectual autonomous seismic system for reconnaissance, signaling and security purposes and identifies the main directions for creating a new energy-efficient dual-use seismic system with an increased identification range for detecting moving objects. Various methods of processing seismic signals are considered, their comparison in terms of efficiency based on the characteristics of their characteristics and energy consumption.

Keywords: seismic signals, identification features, seismic systems, temporary signal processing methods

© М. А. Глауберман, Я. І. Леніх, О. С. Максимов, А. П. Балабан, 2024

ВСТУП

Існуючі системи виявлення руху людини та транспортних засобів як для цілей охорони кордону, різних об'єктів, так і для розвідувально-сигналізаційних цілей відносяться до великого класу розвідувально-сигналізаційних засобів (РСЗ) і характеризуються малою величиною відстані виявлення, відносно великою вагою, недостатньою завадостійкістю та значним енергоспоживанням.

Як правило, до основного складу таких РСЗ входять три типи сенсорів – акустичний, магнітометричний і пасивний інфрачервоний.

Одною з основних причин необхідності розробки технології автоматичних наземних сенсорів полягає в тому, що жоден сенсор не може забезпечити повне покриття всіх цілей на всіх дистанціях. Для цього застосовується багаторівневий підхід, тобто одночасне розгортання кількох різних типів взаємопов'язаних сенсорів з метою отримання якомога більшого обсягу інформації з місця дії, що знаходиться під наглядом.

Охоронні та розвідувально-сигналізаційні сейсмічні системи (ОРССС) це окремий клас РСЗ, які призначені як для розвідувально-сигналізаційних цілей, так і для встановлення факту порушення межі території, що контролюється. При цьому, на основі аналізу сигналів від сейсмічних коливань ґрунту, визначається тип об'єкту проникнення (людина, тварина, транспортний засіб).

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Сучасні сейсмічні системи, які призначені для виявлення рухомих об'єктів можна розділити за цільовим призначенням на два типи - розвідувально-сигналізаційні (далі розвідувальні) та охоронні. Цей поділ фактично є наслідком відмінності локалізації робочих зон встановлених систем: встановлені вони на нейтральній території або території противника для розвідувальних цілей, чи на своїй території для охорони режимних об'єктів. Такий поділ зумовлює також відповідні відмінності у вимогах до систем виявлення [1].

Розвідувальні системи характеризуються скритністю та автономністю на значний період роботи, зокрема, це означає і визначає необхідність здійснювати тривалу роботу на одному комплекті джерел живлення.

Найчастіше така вимога виконується за рахунок точності класифікації (розпізнавання типу) об'єкта та зменшення максимальної дистанції виявлення [2].

Для охоронних систем основна вимога дещо протилежна - максимальна дистанція виявлення та високі характеристики точності системи за рахунок можливості використання потужнішого джерела живлення.

В усьому класі РСЗ вагому і перспективну частину займають інтелектуальні сейсмічні системи (ІСС), які спроможні працювати на необхідній віддалі та розпізнавати рухомі об'єкти у зоні їх дії. Такі системи характеризуються скритністю (сейсмічні засоби виявлення відносяться до засобів пасивного типу) та автономністю на значний час роботи.

Відзначимо, що джерелом інформації для сейсмічних систем про об'єкт виявлення є поверхневі сейсмічні хвилі - хвилі Релея.

При переміщеннях по поверхні землі різних об'єктів (людей, тварин, транспорту) відбувається їх силовий вплив на ґрунт, в результаті чого в ґрунті виникають сейсмічні коливання двох типів: *об'ємні і поверхневі*, останні у свою чергу діляться на два типи: хвилі Лява (L-хвилі) і хвилі Релея (R-хвилі) [3].

Відомо, що внесок хвиль Релея в розподіл енергій між різними типами хвиль в приповерхневому шарі є визначальним. На хвилі Релея припадає близько 70% енергії поверхневих хвиль і саме тому при виявленні наземних рухомих об'єктів сейсмічні перетворювачі реєструють сейсмічні поверхневі хвилі Релея.

Використання сейсмічних сигналів у наземних сенсорних системах потребує вирішення низки проблем, пов'язаних зі складністю характеристик сейсмічної хвилі та її залежністю від базової геології – властивості ґрунту, його неоднорідність, залежність від кліматичних умов, температури, вологості тощо [4, 5].

Відомо, що параметри хвиль Релея, при збільшенні відстані від джерела сейсмічних

коливань до сейсмоприймача змінюються, зокрема в спектрі сигналу, що приймається, високочастотні складові згасають більш інтенсивно. Навіть при незмінній відстані на тому ж самому ґрунті при зміні кліматичних умов спектри відрізняються як граничними частотами, так і структурою [6, 7].

Найбільш складною проблемою раннього виявлення та надійної класифікації рухомих об'єктів (джерел сеймосигналів), яка розглянута в даній роботі, є виділення надійного набору ідентифікаційних ознак об'єкта і створення оптимального алгоритму, який може ефективно охарактеризувати конкретне джерело [8, 9].

Розробка алгоритмів виділення ознак сеймосигналів в системі розпізнавання об'єктів полягає в тому, щоб зібрати набір інформації, яка ефективно і оптимально представляє основні характеристики вхідних даних. Ефективний алгоритм вибору ознак може зменшити загальний об'єм даних, зберігаючи характеристики сигналу, властиві кожному класу, щоб підвищити ефективність класифікації об'єктів. Отже, для успішного функціонування системи важливо розробити такий алгоритм за вимогами конкретного застосування, щоб певний об'єкт міг бути виявлений і ідентифікований відповідним чином. Це складне завдання дослідження, яке вимагає розуміння, які ознаки є найбільше характерними і стабільними, для розробки системи точного розпізнавання об'єктів.

Методи виділення ідентифікаційних ознак часто групуються в три категорії з точки зору області обробки сигналів, а саме: часова, частотна і частотно-часова області.

У класичному варіанті побудова простору ідентифікаційних ознак здійснюється шляхом аналізу особливостей сеймосигналів від об'єктів в часовій, частотній і частотно-часовій областях.

В даний час найбільш використовуваними є системи зі складною обробкою сигналу та використанням складних класифікаторів ідентифікаційних ознак об'єктів (нейромережевий, метод опорних векторів, тощо).

У більшості сучасних віддалених сейсмічних системах використовується обробка сигналу в частотній та/або частотно-часовій областях і ці методи передбачають використання трудомістких енергоємних обчислювальних засобів [10, 11].

Зважаючи на це, обробка сейсмічних сигналів повинна здійснюватися в реальному часі. У віддалених автономних сейсмічних системах при використанні малопотужних мікроконтролерів її бажано проводити базуючись на швидкі оптимальні алгоритми виявлення та розпізнавання об'єктів, наприклад, такі, як швидке перетворення Фур'є (ШПФ) у частотній області, або алгоритм Малла у вейвлет-просторі. Можливий також спектральний аналіз з використанням менш складних алгоритмів - за допомогою аналізу сингулярного спектра. Цей метод є часовим методом обробки сигналу, перевагою якого є відносна простота обчислювальних алгоритмів, можливість побудови образів об'єктів виявлення для кореляційного аналізу сигналів [11, 12].

Можливість використання цього методу та його ефективність була експериментально показана нами у роботах [13, 14]. Встановлено, що для віддалених автономних СС у якості методів розпізнавання людини і транспортних засобів, що рухаються, можуть застосовуватися методи, які використовують часові параметри сейсмічних сигналів від цих об'єктів [15].

Однак, при аналізі нестационарних процесів, якими є сеймосигнали від рухомих об'єктів, цей метод має певні недоліки, а саме - аналіз сингулярного спектру потребує хоч і меншого, ніж у ШПФ і вейвлет-аналізу, однак все ж значного залучення обчислювальних ресурсів мікропроцесора сейсмічної системи, що суттєво позначається на енергоспоживанні системи. Як альтернатива обробки спектрів, також пропонується програмна або апаратна фільтрація сеймосигналу [10, 16].

Необхідно відзначити, що етап попередньої обробки сигналу, що складається зі збору даних і зменшення шуму, дозволяє видаляти небажані сигнали зібраних даних, в той час як корисні сигнали можуть бути підсилені [17, 20].

Подальша обробка сигналів передбачає виділення ряду вибраних характеристик, що представляють деякі специфічні характеристики джерела, які можуть бути не очевидні при первинному аналізі. Після збору ці вектори ознак можна нормалізувати, якщо це збільшує загальну продуктивність обробки сигналу.

В даний час системи для виявлення рухомих об'єктів по сейсмічному сигналу використовують переважно спектральні та спектрально-часові методи обробки сейсмосигналу. Однак, використання цих методів призводить до значного ускладнення обробки сигналів, що суттєво збільшує обчислювальні та енергетичні витрати пристроїв і систем виявлення. Очевидно, що для розвідувально-сигналізаційних цілей, тобто виявлення віддалених об'єктів, що рухаються, де використовується автономний режим роботи, потрібні системи з мінімальними енергетичними витратами, тобто потрібні нові рішення на базі швидких оптимальних алгоритмів виявлення та розпізнавання об'єктів, що рухаються, з високими характеристиками достовірного виявлення, нові конструктивні та схемотехнічні рішення.

Визначення простору ознак доцільно здійснювати шляхом аналізу відмінних рис сигналів різного походження в часовій та частотних областях з використанням програмної або апаратної фільтрації в частотній області, що значно простіше та економніше за використання ШПФ і вейвлет-аналізу.

Завдання обмеження споживання можливо вирішити шляхом використання першого етапу виявлення порогового методу у часовій області. Далі алгоритми відсіву шуму чи перешкоди очевидно повинні працювати послідовно, причому в залежності від загального «споживання» конкретного алгоритму за повний цикл його роботи.

На етапі класифікації пари сигнал/(шум, перешкода) (завдання - виявлення), і на етапі класифікації корисного сигналу за вектором «людина, транспорт колісний, транспорт гусеничний» можливо використовувати алгоритми як в часовій, так і в частотній області. Чим більше алгоритм споживає за цикл, тим

далі він має перебувати від «первинного виявлення».

Перші мають, як правило, низьке загальне «споживання» при порівняно скромних параметрах ймовірностей отримання правильного результату, особливо з великих дистанцій.

Другі вимагають використання спеціальних апаратних можливостей обчислювача, так званий цифровий процесор обробки сигналів (ЦПОС), що значно збільшує споживання енергії.

Пошук оптимальних, з погляду розпізнавання ознак, і навіть оцінка часу виконання кожного алгоритму розпізнавання проводиться методом моделювання в середовищі MATLAB.

Збільшення кількості одержаних ознак, що використовуються для представлення вхідних даних, може призвести до поганих результатів класифікації. Застосування відповідних алгоритмів зменшення розмірності зібраних векторів ознак перед виконанням алгоритмів остаточного прийняття рішення дозволить покращити загальну продуктивність розпізнавання об'єктів з точки зору точності та обчислювальної ефективності. Переваги використання таких алгоритмів пов'язані із зменшенням обсягу даних чи шуму.

При цьому необхідно розглянути можливість зменшення розмірності оптимізації продуктивності прийняття рішень.

У цілому на даний час поширеними методами зменшення розмірності є: метод головних компонент, метод незалежних компонент, багатовимірне шкалювання, і навіть численні нейромережеві методи, карти Кохонена, що самоорганізуються, тощо.

Таким чином при знаходженні оптимального балансу використання алгоритмів в часовій і частотній областях можливо значно скоротити час роботи обчислювального пристрою, а отже загальне енергоспоживання системи зменшується, а вдосконалені часові методи розпізнавання дозволяють віддаленим автономним СС при незначному енергоспоживанні мати значну величину вірогідності коректного розпізнавання рухомих об'єктів.

ВИСНОВКИ

Задача створення інтелектуальної автономної сейсмічної системи для розвідувально-сигналізаційних та охоронних цілей пов'язана з вирішенням проблеми знаходження балансу застосування різних методів виявлення та класифікації рухомих об'єктів у межах робочої зони сейсмічної системи, визначення простору ознак, які будуть використовуватися для вирішення задачі виявлення та класифікації корисного сейсмічного сигналу.

Збільшення кількості одержаних ознак, що використовуються для представлення вхідних даних, може фактично призвести до негативних результатів класифікації. Застосування відповідних алгоритмів зменшення розмірності зібраних векторів ознак перед виконанням алгоритмів остаточного прийняття рішення дозволить покращити загальну продуктивність розпізнавання і класифікації об'єктів. Переваги використання таких алгоритмів пов'язані із зменшенням обсягу даних чи шуму.

Визначення простору ознак доцільно здійснювати шляхом аналізу відмінних рис сигналів різного походження в часовій і частотній областях з використанням програмної або апаратної фільтрації в частотній області, що суттєво спрощує процес обробки сигналів, ніж використання ШПФ і вейвлет-аналізу, і разом з тим зменшує енергозатрати.

Список використаної літератури

[1]. P. Fastyskovsky, M. Glauberman, Ya. Lepikh. Point seismic system for detection and recognition of moving person and vehicles. TheFourth Internat.Conf. on Information and TelecommunicationTechnologies and Radio Electronics(UkrMiCo'2019), 09-13 Sept. 2019, Odesa,Ukraine, PP. 1-4.

[2]. Yuxin Tian, Hairong Qi, X.Wang. Target detection and classification using seismic signal processing in unattended ground sensor systems // IEEE International Conference on Acoustics. Speech and Signal Processing, May 2002.

[3]. G. A. Athanasopoulos, P. C. Pelekis, G. A. Anagnostopoulos. Effect of soil stiffness in the attenuation of Rayleigh-wave motions from

field measurements // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2000. – Vol. 19, issue 4. – P. 277–288.

[4]. O. Kegyess-Brassai, Z. Szilvagyai, A. Wolf, R. Ray. Effects of local ground conditions on site response analysis results in Hungary // Proc. 19th Int. Conf. Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul, Repub. Korea, pp. 252-255 (2017).

[5]. R. Karmakar. Potential effects of climate change on soil properties: A Review // Science Int., 4 (2), PP. 51-73 (2016), doi: 10.17311/sciintl.2016.51.73.

[6]. Pavel P. Fastyskovsky and Yaroslav I. Lepikh. Influence of Soil State on Characteristics of Seismic Signals from Moving Objects // Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics, Kyiv, Ukraine, Nov. 29 – Dec. 3, 2021. – PP. 172-175.

[7]. P. P. Fastyskovsky, M. A. Hlauberman. Vplyv pohlynannia v gruntі na spektralni kharakterystyky seismichnykh syhnaliv vid rukhomykh obiektiv // Tezy dopovidei VI Vseukr. nauk.- prakt. konf. "Perspektyvni napriamky suchasnoi elektroniky, informatsiinykh i kompiuternykh system" (MEICS-2021), Ukraine, Dnipro, 24.11 – 26.11.2021. - s. 10 (in ukrainian).

[8]. Kostenko K. V., Shevcov V. F. Klasifikaciya ob"ektov v sejsmicheskikh sistemah ohrany // Cifrovaya obrabotka signalov, No. 2, 2009, p. 25-29 (in russian).

[9]. E. Kose, A. Hocaoglu. A new spectral estimation-based feature extraction method for vehicle classification in distributed sensor networks // Turk. J. Elec. Eng. & Comp. Sci., 27, PP. 1120 – 1131 (2019).

[10]. R. Berešik. Hilbert-Huang Transform and its Application in Seismic Signal Processing // Proc. 13 th IEEE Int. Conf. New Trends in Signal Processing (NTSP). - Demänovská dolina, Slovakia, 12-14 October 2016. - PP. 9-14. - Nov 21, 2016, Slovakia. - doi: 10.1109/NTSP.2016.7747776.

[11]. E. Köse, A. K. Hocaoglu. A new spectral estimation-based feature extraction method for vehicle classification in distributed sensor net-

works // Turk J Elec Eng & Comp Sci. – 2019. – vol. 27. – PP. 1120-1131. - doi:10.3906/elk-1807-49).

[12]. Morozov Yu. V., Spektor A. A. Klassifikaciya ob'ektov na osnove analiza spektral'nyh harakteristik ogibayushchih seismicheskikh signalov // Avtometriya, T. 53, No.6, 2017, p. 49-56 (*in russian*).

[13]. P. P. Fastyskovsky, O. V. Tkachenko, Ya. I. Lepikh, M. A. Glauberman. Use of seismic signals' time parameters for moving objects recognition by remote seismic devices // Sensor Electronics and Microsystem Technologies. – 2020 – T. 17, №3.

[14]. Fastyskovsky P. P. Sposib vyivlennia liudyny ta transportnykh zasobiv, shcho rukhaiutsia, po seismychnomu syhnalu. Patent na korysnu model No. 150754. Zareiestrovano v Derzhavnomu reiestri Ukrainy korysnykh modelei 13.04.2022 (*in ukrainian*).

[15]. Pavel P. Fastyskovsky, Michael A. Glauberman, Yaroslav I. Lepikh. Autonomous Seismic Sensor with a New Temporal Method of a Moving Person Detection // Proceedings of IEEE XIIth International Conference Electronics and Information Technologies, Lviv, Ukraine,

May 19-21, 2021. – PP. 17-21. DOI: 10.1109/ELIT53502.2021.9501092.

[16]. J. Peng, P. Zhang, and N. Riedel. Discriminant learning analysis. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 38(6):1614–1625, 2008. ISSN 1083-4419.

[17]. P. P. Fastyskovsky, Ya. I. Lepikh. Portable seismic systems (overview) // Sensor Electronics and Microsystem Technologies. – 2021. - Vol. 18, No. 4. – P. 27 – 42, DOI: 10.18524/1815-7459.2021.4.248178.

[18]. P. P. Fastyskovsky, M. A. Glauberman, Ya.I. Lepikh. Compact smart seismic sensor for the detection of a moving person // "Sensor Electronics and Microsystem Technologies"(SEMST-9) conference abstracts, Ukraine, Odesa, 20.09 – 24.09.2021. - p. 71.

[19]. J. Clemente, F. Li, M. Valero, W. Song. Smart seismic sensing for indoor fall detection, location and notification // IEEE J. Biomed. and Health Inform., pp. 1-9 (2019), doi: 10.1109/JBHI.2019.2907498).

[20]. P. P. Fastyskovsky, Ya. I. Lepikh. Remote Compact Seismic Sensor for the Moving Person Detection // IEEE Sensors Letters. – 2020. - Vol.4, No 8. - P. 1-3, ASN 2500903, doi: 10.1109/LSSENS.2020.3007831.

Стаття надійшла до редакції 11.12.2023 р.

UDC: 621.391

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.2.307067>

PROBLEMS OF CHOICE EFFECTIVE METHODS OF TREATMENT OF SEISMO SIGNALS FOR INTELLECTUAL OF SYSTEMS

M. A. Glauberman¹, Ya. I. Lepikh², O. S. Maksimov¹, A. P. Balaban²

¹Training, Scientific & Production Center of Odesa I. I. Mechnikov National University, mik_ag@i.ua

² Interdepartmental Scientific-Educational Physics and Technical Center of MES and NAS of Ukraine at the Odesa I. I. Mechnikov National University, ndl_lepikh@onu.edu.ua

Summary

Currently, Ukraine is under-resourced with small-sized secretive autonomous devices for reconnaissance purposes (detecting and recognizing the movements of people and vehicles in certain remote areas), and for protecting the border, guarding military depots and other facilities. Among the various detection tools, seismic systems are one of the most promising, as they are passive type tools. This detection systems is highly informative and makes it possible to solve a wide range of problems of detecting and recognizing moving objects.

However, seismic signal processing methods used in existing systems do not provide maximum reliability in classifying objects that are their sources.

The work gives characteristics of different processing methods based on both the characteristics of seismic signal parameters and the energy costs of processing systems, which can provide high reliability of object classification.

Keywords: seismic signals, identification features, seismic systems, temporary signal processing methods

УДК: 621.391

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.2.307067>

ПРОБЛЕМИ ВИБОРУ ЕФЕКТИВНИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ СЕЙСМОСИГНАЛІВ ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ

М. А. Глауберман¹, Я. І. Лепіх², О. С. Максимов¹, А. П. Балабан²

¹ Навчально-науково-виробничий центр ОНУ імені І. І. Мечникова, mik_ag@i.ua

² Міжвідомчий науково-навчальний фізико-технічний центр МОН і НАН України, ОНУ імені І. І. Мечникова, ndl_lepikh@onu.edu.ua

Реферат

Наразі Україна недостатньо забезпечена малогабаритними потайними автономними пристроями як для розвідувальних цілей (виявлення та розпізнавання переміщень людей та транспортних засобів на певних віддалених ділянках), так і для захисту кордону, охорони військових складів та інших об'єктів. Серед різних засобів виявлення сейсмічні системи є одними з найперспективніших, оскільки належать до засобів пасивного типу. Такі системи виявлення є високо інформативним і дозволяють вирішувати широкий спектр завдань виявлення та розпізнавання рухомих об'єктів.

Однак, методи обробки сейсмосигналів, що використовуються в існуючих системах, не дають максимальної достовірності при класифікації об'єктів, які є їх джерелами.

В роботі даються характеристики різним методам обробки виходячи як з особливостей параметрів сейсмосигналів, так і з енергетичних витрат систем обробки, які можуть забезпечити високу достовірність класифікації об'єктів.

Ключові слова: сейсмосигнали, ідентифікаційні ознаки, сейсмічні системи, часові методи обробки сигналів

ВІТАННЯ!



16 травня відбулося урочисте вручення дипломів дійсним членам (академікам) і членам-кореспондентам Національної академії наук України, обраним Загальними зборами НАН України 25 квітня 2024 року.

Президент Національної академії наук України академік **Анатолій Загородній** вручав дипломи, а членам-кореспондентам Академії, які вперше вступають до її лав, – також академічні значки з барельєфом академіка Володимира Івановича Вернадського.

Редакція з приємністю вітає члена редколегії нашого журналу і активного автора статей члена-кореспондента НАН України, доктора біологічних наук, професора, лауреата Державної премії України у галузі науки і техніки **Дзядевича Сергія Вікторовича** з обранням дійсним членом (академіком) НАН України і зичить йому здоров'я, наснаги і подальших творчих успіхів!

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. Акустoeлектронні 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,
<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. PAPER PREPARATION REQUIREMENTS

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 narrow profile 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. Mechnikov 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 example:

[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 25.06.2024 р. Формат 60×84/8.
Ум.-друк. арк. 6,05. Тираж 50 прим.
Зам. № 2804.

Видавець – Одеський національний університет імені І. І. Мечникова
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4215 від 22.11.2011 р.
Україна, 65082, м. Одеса, вул. Університетська, 12
Тел.: (048) 723 28 39

Надруковано з готового оригінал-макета у друкарні «Апрель»
ФОП Галуза Н. М.

65045, м. Одеса, вул. В. Арнаутська, 60
Тел.: +38 (048) 703 11 86
info@aprel.od.ua