СУЧАСНИЙ СТАН, СВІТОВІ ТЕНДЕНЦІЇ, ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ПОДАЛЬШОГО РОЗВИТКУ ГАЛУЗІ

АНАЛІТИЧНА ЗАПИСКА
до Стратегії розвитку
наукових досліджень
у НАН України за напрямом
«РАДІОФІЗИКА І МІКРОХВИЛЬОВА ЕЛЕКТРОНІКА»
(на період до 2030 року)

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ВІДДІЛЕННЯ ФІЗИКИ І АСТРОНОМІЇ НАН УКРАЇНИ
Наукова рада з проблеми «Радіофізика
і мікрохвильова електроніка»

СУЧАСНИЙ СТАН, СВІТОВІ ТЕНДЕНЦІЇ, ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ПОДАЛЬШОГО РОЗВИТКУ ГАЛУЗІ

АНАЛІТИЧНА ЗАПИСКА

до Стратегії розвитку
наукових досліджень
у НАН України за напрямом
«РАДІОФІЗИКА І МІКРОХВИЛЬОВА ЕЛЕКТРОНІКА»
(на період до 2030 року)

Електронне видання

Київ
Академперіодика
2026

https://doi.org/10.15407/akademperiodyka.605.060
УДК 537.86:621.37/.39
С89

Юрій ЛОГВІНОВ, голова Наукової ради з проблеми «Радіофізика і мікрохвильова електроніка», член-кореспондент НАН України, д-р фіз.-мат. наук, старш. наук. співроб.

Юрій АВЕРКОВ, заступник голови Ради, д-р фіз.-мат. наук, старш. наук. співроб.

Ірина ЛУЦЕНКО, вчений секретар Ради, канд. фіз.-мат. наук, старш. дослід.

Авторський колектив:

Аверков Ю.О., Васюта К.С., Дробахін О.О., Залевський Г.С., Кириленко А.О., Козак Л.В., Кулешов О.М., Логвінов Ю.Ф., Луценко В.І., Луценко І.В., Мележик П.М., Олійник С.В., Плаксін С.В., Пуляєв В.О., Тарапов С.І., Черпак М.Т., Чорногор Л.Ф., Ямпольський В.О., Яновський Ф.Й.

В обговоренні аналітичних матеріалів взяли участь усі члени Наукової ради з проблеми «Радіофізика і мікрохвильова електроніка». Затверджено до друку Вченою радою Інституту радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова НАН України (протокол від 24.09.2026 № 12).

Сучасний стан, світові тенденції, перспективні напрями досліджень та пропозиції щодо подальшого розвитку галузі: Аналітична записка до Стратегії розвитку наукових досліджень у НАН України за напрямом «Радіофізика і мікрохвильова електроніка» (на період до 2030 року): [електронний ресурс] / Інститут радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова НАН України; Логвінов Ю.Ф. (голова), Луценко І.В. (уч. секр.) та ін. — Київ: Академперіодика, 2026. — 60 с.

ISBN 978-966-360-605-7

Викладено результати аналізу сучасного стану радіофізики і мікрохвильової електроніки, а також основних світових та українських тенденцій розвитку галузі. Визначено найперспективніші фундаментальні й прикладні напрями досліджень до 2030 р. у галузі електродинаміки складних середовищ, штучних електромагнітних матеріалів і функціональних матеріалів, мікрохвильової, міліметрової та терагерцової електроніки, радіолокації, дистанційного зондування, телекомунікацій, квантових технологій і радіофізики навколоземного космічного простору.

Сформульовано пропозиції щодо подальшого розвитку галузі в НАН України, спрямовані на посилення фундаментальних і прикладних досліджень, розвиток критичних технологій та експериментальної бази, підвищення обороноздатності й технологічної незалежності України, інтеграцію науки, освіти та високотехнологічного виробництва, підготовку наукових кадрів і розширення міжнародної науково-технологічної співпраці.

© Наукова рада з проблеми «Радіофізика і мікрохвильова електроніка», 2026
ISBN 978-966-360-605-7
© Академперіодика, оформлення, 2026

ВСТУП

Президія Національної академії наук України доручила Науковій раді з проблеми «Радіофізика і мікрохвильова електроніка» наповнити й удосконалити проєкт «Концепції розвитку радіофізики та мікрохвильової електроніки в Україні на сучасному етапі» та подати конкретні пропозиції для колективного обговорення й узгодження [1—3]. Це доручення стало підставою для підготовки цієї Аналітичної записки щодо результатів аналізування сучасного стану та перспектив наукових досліджень, визначення основних світових і українських тенденцій, окреслення найперспективніших напрямів до 2030 року та формування пропозицій щодо подальшого розвитку відповідної галузі науки в НАН України.

Радіофізика XXI століття є фундаментальною галуззю фізики, яка досліджує закономірності генерації, випромінювання, поширення, розсіяння, локалізації, перетворення, детектування та вимірювання параметрів електромагнітних полів, а також їхню взаємодію з речовиною, технічними об'єктами й інформаційними системами. Мікрохвильова електроніка охоплює фізичні принципи, матеріали, компоненти, прилади, інтегровані схеми та системи, що працюють у радіочастотному, мікрохвильовому, міліметровому, субтерагерцовому і терагерцовому діапазонах. У сучасній науці ці напрями дедалі тісніше

інтегруються з фотонікою, фізикою конденсованого стану, квантовими технологіями, матеріалознавством, інформатикою, метрологією та високопродуктивними обчисленнями.

Аналітична записка базується на таких принципах:

- пріоритет фундаментальної наукової новизни;
- нерозривність ланцюга «теорія — моделювання — експеримент — метрологічна верифікація — прототип — випробування — стандартизація — впровадження»;
- конкурентний відбір дослідницьких програм;
- відкритість результатів за замовчуванням із обґрунтованим обмеженням доступу до чутливих даних;
- розподілений доступ до інфраструктури;
- відтворюваність обчислень і вимірювань;
- підтримка молодих учених та інженерів;
- міжнародна кооперація без критичної залежності від одного постачальника, платформи або зовнішнього центру.

Розділ **1**

СУЧАСНИЙ СТАН

Міжнародний розвиток галузі визначений переходом від окремих радіоелектронних пристроїв до керованих електромагнітних середовищ і багатофункціональних систем, у яких зв'язок, зондування, позиціонування, обчислення та керування спектром виконуються спільно. Рекомендація *ITU-R M*.2160 (документ Сектору радіозв'язку Міжнародного союзу електрозв'язку — *International Telecommunication Union Radiocommunication Sector*, *ITU-R*, що визначає рамки та загальні цілі розвитку міжнародних мобільних телекомунікацій на 2030 рік і далі) сформувала глобальну рамку *IMT*-2030 (*International Mobile Telecommunications for* 2030 *and beyond* — міжнародне бачення мобільних систем шостого покоління, 6*G*), а погоджені 2026 року проєктні вимоги до майбутніх радіоінтерфейсів передбачають шість сценаріїв використання: імерсивний зв'язок, наднадійний зв'язок із малою затримкою, масові комунікації, повсюдну зв'язність, інтеграцію штучного інтелекту (ШІ) з комунікаціями та інтегроване зондування і зв'язок [4, 5]. Європейська програма *Smart Networks and Services Joint Undertaking* (*SNS JU* — Спільне підприємство ЄС «Розумні мережі та послуги», державно-приватне партнерство для досліджень, випробувань і стандартизації мереж після п'ятого покоління та 6*G*), національні програми 6*G* Німеччини й Фін-

ляндії та стратегія бездротової інфраструктури Великої Британії пов'язують фундаментальні дослідження з відкритими тестовими середовищами, стандартизацією, підготовкою кадрів і демонстраціями у вертикальних галузях [6—10].

Другий системний тренд полягає у зближенні радіофізики з мікро- і наноелектронікою, фотонікою та квантовими технологіями. Європейський акт про чипи (*European Chips Act*, або *Chips Act*) — законодавча та інвестиційна рамка Європейського Союзу для зміцнення напівпровідникової екосистеми передбачає дизайн-платформи, пілотні лінії, мережу центрів компетенцій, підтримку квантових чипів і механізми доступу дослідників та малих підприємств до технологічної інфраструктури. Стратегія «Квантова Європа» (*Quantum Europe Strategy*) — стратегія ЄС щодо квантових досліджень, інфраструктур, промислової екосистеми, космічних і подвійних застосувань і підготовки фахівців поєднує фундаментальні дослідження, інфраструктури, промислову екосистему, технології космічні й подвійного застосування та підготовку фахівців [11—13]. У США Національна стратегія використання спектра, програми *National Science Foundation* (*NSF* — Національний науковий фонд США), *SpectrumX* (національний центр США з досліджень та інновацій у сфері радіочастотного спектра) і *National Radio Dynamic Zones* (*NRDZ* — національні зони динамічного використання радіочастотного спектра, тобто контрольовані полігони для експериментів зі спільним та адаптивним використанням спектра), метрологічні програми *National Institute of Standards and Technology* (*NIST* — Національний інститут стандартів і технологій США) та *Electronics Resurgence Initiative* (*ERI* — Ініціатива відродження електроніки), яку реалізує *Defense Advanced Research Projects Agency* (*DARPA* — Агентство передових оборонних дослідницьких проєктів США), розглядають спектр, вимірювання, тривимірну

(3*D*) гетерогенну інтеграцію, надійну апаратуру й експериментальні полігони як взаємопов'язані елементи технологічного лідерства [14—19].

Для України радіофізика та мікрохвильова електроніка мають подвійне значення. По-перше, вони є основою фундаментальних досліджень електромагнітних явищ і створення нових матеріалів, приладів, елементів і систем та методів вимірювання. По-друге, вони безпосередньо визначають спроможності держави у захищених комунікаціях, радіолокації, дистанційному зондуванні і безконтактних вимірюваннях, телекеруванні, електромагнітній сумісності, моніторингу спектра, стійкому позиціонуванні, космічних і безпілотних системах. Це відповідає Стратегії розвитку сфери електронних комунікацій України до 2030 року, Стратегії цифрового розвитку інноваційної діяльності *WINWIN* (офіційна коротка назва української стратегії, що передбачає взаємовигідну взаємодію держави, науки, освіти та бізнесу) та курсу на інтеграцію до Європейського дослідницького простору і програми «Горизонт Європа» (рамкова програма ЄС з досліджень та інновацій на 2021—2027 роки) [20—23].

В умовах тривалої війни й повоєнного відновлення розвиток галузі повинен спиратись на стійкість і розподіленість інфраструктури, сумісність із європейськими та євроатлантичними стандартами, захист критичних знань і обладнання, а також здатність швидко переводити фундаментальні результати у вимірювально підтверджені прототипи. НАТО розглядає науку і технології, квантові технології та електромагнітний спектр як складові збереження технологічної переваги, стійкості, взаємосумісності та обороноздатності; програма *Defence Innovation Accelerator for the North Atlantic* (*DIANA*, *NATO DIANA* — Акселератор оборонних інновацій для Північної Атлантики, мережа НАТО для випробування та прискорення технологій подвійного призначен-

ня) виокремлює стійкі комунікації, навігацію та спостереження в умовах завад і навмисного порушення електромагнітного середовища [24—27].

Важливим складником сучасної радіофізики є дослідження поширення та трансформації радіохвиль в атмосфері, іоносфері й навколоземному космічному просторі. Радіофізичні методи забезпечують діагностику стану тропосфери, іоносфери та плазмового середовища, моніторинг збурень, що впливають на супутниковий зв'язок, навігацію, радіолокацію та функціонування космічних систем. Перспективним є комплексне використання сигналів глобальних навігаційних супутникових систем (*GNSS*) для моніторингу тропосфери та іоносфери, побудови моделей їхнього впливу на точність позиціонування та розроблення методів підвищення точності й надійності навігаційних визначень. Особливого значення набуває інтеграція наземних радіофізичних спостережень зі супутниковими даними, *GNSS*-вимірюваннями, фізико-математичним моделюванням та методами машинного навчання. В умовах зростання залежності держави від супутникових і навігаційних технологій цей напрям має фундаментальне, прикладне та безпекове значення.

Важливим перспективним напрямом є моніторинг довкілля з використанням випромінювання наявних наземних та аерокосмічних систем зв'язку, телебачення, стільникових мереж і супутникової навігації. Використання сторонніх джерел радіовипромінювання дає змогу створювати пасивні та активно-пасивні системи радіолокації й дистанційного зондування з обмеженим власним енергоспоживанням та підвищеною прихованістю роботи.

Зокрема, технології *GNSS*-рефлектометрії дають можливість оцінювати стан водної поверхні, параметри приповерхневого вітру, висоту та переважний напрям поширення морських хвиль; досліджувати характеристики снігового й льодового покриву та

використовувати отриману інформацію для оцінювання ризиків весняних повеней; визначати характеристики рослинного покриву, динаміку біомаси та формувати дані для прогнозування стану сільськогосподарських культур. Розвиток спеціалізованих приймальних пристроїв для таких систем розширює можливості використання сигналів глобальних навігаційних супутникових систем як доступного джерела випромінювання для дистанційного моніторингу природних середовищ.

Радіолокація та мікрохвильове дистанційне зондування атмосфери належать до ключових напрямів сучасної радіофізики. Їх розвиток ґрунтується на поєднанні електродинаміки, фізики поширення та розсіяння радіохвиль, антенної техніки, мікрохвильової електроніки, цифрового оброблення сигналів, математичного моделювання та ШІ.

Сучасні дослідження охоплюють активні й пасивні радари, фазовані та цифрові антенні решітки, багатопозиційні й мережеві системи, багаточастотну, широкосмугову, надширокосмугову, шумову і поляриметричну радіолокацію, радари міліметрового діапазону, адаптивне виявлення, класифікацію та супроводження цілей, а також поєднання радіолокаційних даних з інформацією інших сенсорів.

Перспективним є розвиток мультистатичних активно-пасивних систем на основі програмно-визначуваних радіоприймачів (*SDR*), здатних використовувати сигнали різних частотних діапазонів і сторонніх джерел випромінювання. Широкий частотний діапазон таких систем створює можливості для виявлення малорозмірних об'єктів, зокрема низьколетючих БпЛА, у частотних областях, де їхні характеристики розсіяння є найсприятливішими для радіолокаційного спостереження.

Розширення дальності виявлення низьколетючих об'єктів може забезпечуватись також розміщенням

елементів багаточастотних активно-пасивних систем моніторингу на піднятих платформах, зокрема аеростатах і прив'язних кулях-зондах, що збільшує радіогоризонт та розширює можливості спостереження за низьколетючими БпЛА та іншими повітряними об'єктами. Перспективним напрямом мікрохвильової електроніки є також створення інтегрованих випромінювально-приймальних систем, у яких в одному функціональному модулі поєднуються генерація та випромінювання сигналу, приймання відбитого випромінювання і первинне оброблення отриманої інформації.

У дистанційному зондуванні атмосфери основними об'єктами досліджень є хмари, опади, атмосферна волога, вітер, турбулентність, аерозолі та небезпечні метеорологічні явища. Для цього використовуються наземні, авіаційні й космічні радари, профайлери, мікрохвильові радіометри, лідари, диздрометри та комбіновані багатосенсорні комплекси.

Важливим напрямом на межі фундаментальної радіофізики, матеріалознавства та оборонних технологій є дослідження метаматеріалів і метаповерхонь з керованими електромагнітними характеристиками. Такі структури можуть застосовуватись для цілеспрямованого формування характеристик розсіяння електромагнітних хвиль, зокрема для створення імітаторів та хибних цілей із заданою ефективною поверхнею розсіяння, а також для керування й зменшення радіолокаційної помітності об'єктів у визначених частотних діапазонах. Розвиток цього напряму потребує поєднання теоретичного електродинамічного моделювання з технологіями виготовлення та експериментальним вимірюванням характеристик реальних структур.

Для закладів вищої освіти (ЗВО) означені напрями є основою підготовки фахівців з електроніки, радіофізики, радіотехніки, телекомунікацій, авіаційних і кос-

мічних систем, метеорології, оборонних технологій та комп'ютерно-інтегрованих систем із застосуванням ШІ. Вони забезпечують можливості для міждисциплінарних магістерських і докторських програм, створення спільних лабораторій та залучення студентів до реальних науково-дослідних робіт.

Для промисловості результати досліджень мають значення для створення радарів контролю повітряного та наземного просторів, метеорологічних та авіаційних радіолокаторів, сенсорів для безпілотних і роботизованих систем, мікрохвильових модулів, антенних решіток і програмних засобів оброблення даних. Цікавими напрямами є використання електромагнітних хвиль у неруйнівному контролі (НК), забезпечення функціонування транспортних засобів і безпеки на транспорті, а також бездротове мікрохвильове передавання енергії.

В оборонній сфері радіолокація є критичною технологією виявлення, класифікації та супроводження літаків, ракет, безпілотних апаратів, наземних і морських об'єктів. Особливого значення набувають розподілені й мультистатичні сенсорні мережі, поєднання активних і пасивних засобів спостереження, використання зовнішніх джерел радіовипромінювання, мобільність систем, стійкість до радіоелектронної протидії, низька помітність їхньої роботи та можливість оперативного оновлення алгоритмів. Розвиток програмно-визначуваних радіосистем, багаточастотного моніторингу та багатосенсорного об'єднання даних створює передумови для підвищення ефективності виявлення малорозмірних і низьколетючих цілей. Нових властивостей набувають також системи телекерування та телеметрії, а одним із визначальних напрямів їх подальшого розвитку стає інтеграція з технологіями штучного інтелекту.

Розділ **2**

ОСНОВНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ У СВІТІ ТА В УКРАЇНІ

Метою розвитку радіофізики та мікрохвильової електроніки є формування в Україні сучасної конкурентоспроможної науково-технологічної платформи, здатної забезпечити:

- розвиток фундаментальних досліджень світового рівня;
- створення нових фізичних принципів побудови радіоелектронних систем;
- розроблення критичних технологій подвійного призначення;
- упровадження результатів досліджень у високотехнологічне виробництво;
- підготовку нового покоління науковців та інженерів.

Світовий розвиток радіолокації як важливої частини радіофізики зумовлений переходом до програмно визначених і когнітивних систем, активних фазованих та повністю цифрових антенних решіток, багатопозиційних і мережевих архітектур, а також широким використанням ШІ.

Основними тенденціями є:

- цифрове формування діаграм спрямованості та багатопроменева робота;
- адаптивний вибір сигналів, частот, смуги та режиму огляду;
- інтеграція активних, пасивних, оптичних та інших сенсорів;

▪ автоматична ідентифікація (розпізнавання, класифікація) класів (типів) об'єктів завдяки аналізу різних параметрів їхніх відгуків і параметрів руху;

▪ розвиток міліметрових і субтерагерцових систем;

▪ поєднання функцій радіолокації, зв'язку, навігації та радіомоніторингу;

▪ використання цифрових двійників і високоточних моделей;

▪ перехід від окремих радарів до розподілених сенсорних мереж.

У дистанційному зондуванні атмосфери пріоритетами є багаточастотні та поляриметричні вимірювання, інтеграція радарів, радіометрів, лідарів і супутникових спостережень, асиміляція даних у чисельні моделі погоди, автоматизоване калібрування та застосування фізично обґрунтованого машинного навчання.

В Україні зберігаються сильні наукові школи у галузі радіофізики, антен, мікрохвильової техніки, радіолокації та дистанційного зондування. Водночас значна частина експериментальної бази застаріла, а зв'язок між фундаментальними дослідженнями, дослідними зразками та серійним виробництвом недостатньо розвинений.

Поточні українські пріоритети визначені переважно оборонними потребами: виявлення малих безпілотних апаратів, розвиток пасивної та багатопозиційної радіолокації, підвищення мобільності та живучості систем, захист від завад, інтеграція радарів у мережі ситуаційної обізнаності. Для цивільної сфери важливими є відновлення метеорологічної радіолокаційної мережі, моніторинг небезпечних погодних явищ, пожеж, забруднення атмосфери та техногенних наслідків війни.

Однією зі світових тенденцій радіофізичних досліджень є розвиток комплексних систем моніторингу навколоземного космічного середовища та космічної погоди на основі інтеграції наземних і кос-

мічних радіофізичних спостережень, *GNSS*-даних, супутникових вимірювань та фізико-математичного моделювання. Зростає роль автоматизованого аналізу великих масивів даних, методів машинного навчання та фізично обґрунтованого ШІ для виявлення, класифікації та прогнозування збурень іоносфери й навколоземного плазмового середовища. Для України розвиток цього напряму є актуальним з огляду на необхідність забезпечення стійкості супутникового зв'язку, навігаційних систем, радіолокації та інших критичних радіотехнічних систем.

Розділ **3**

НАЙПЕРСПЕКТИВНІШІ НАПРЯМИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ до 2030 року

Метою розвитку радіофізики та мікрохвильової електроніки є формування в Україні до 2030 року стійкої, конкурентоспроможної й інтегрованої до Європейського дослідницького простору науково-технологічної платформи, здатної генерувати фундаментальні результати світового рівня, створювати критичні технології цивільного та подвійного призначення, забезпечувати метрологічно достовірні вимірювання та переводити наукові розробки у прототипи, стандарти, патенти й виробничі рішення.

Досягнення цієї мети передбачає виконання таких стратегічних завдань:

Фундаментальні дослідження. Підтримувати довгострокові дослідження з електродинаміки складних середовищ, фізики відкритих і нелінійних систем, метаматеріалів, функціональних і квантових матеріалів, спектральної інженерії та фізичних основ нових генераторів (вакуумних електронних та твердотільних), приймачів, сенсорів і перетворювачів.

Критичні технології. Розвивати власні фізичні принципи та ключові компоненти для радіолокації, захищених комунікацій, міліметрової та терагерцової техніки, антенних систем, радіочастотної електроніки, квантової сенсорики, електромагнітної сумісності та дистанційного зондування, а також безконтактні

вимірювання, включно з неруйнівним контролем, і передавання енергії бездротовими засобами.

Метрологія й експеримент. Створити узгоджену систему простежуваних вимірювань параметрів матеріалів, компонентів, антен, сигналів і систем від радіочастот до субтерагерцового і терагерцового діапазонів, включно з *on-wafer*-вимірюваннями (безпосередньо на напівпровідниковій пластині до розділення кристалів і корпусування) та *over-the-air* (*OTA*) вимірюваннями (безконтактними вимірюваннями параметрів радіосистем через випромінюваний радіоканал без кабельного підключення до антенного порту) [16, 17].

Математичне моделювання. Розвивати аналітичні методи, обчислювальну електродинаміку, багатофізичні моделі, високопродуктивні обчислення (*high-performance computing*, *HPC* — паралельні обчислення на кластерах, суперкомп'ютерах і спеціалізованих прискорювачах), оцінювання невизначеності, цифрові двійники та фізично обґрунтовані методи штучного інтелекту [18, 28, 30].

Національна безпека. Забезпечувати наукову основу для стійкого використання електромагнітного спектра, захищених комунікацій, радіолокаційного спостереження, телекерування, телеметрії, протидії завадам, електромагнітної сумісності, квантовобезпечних систем і зниження залежності від критичного імпорту [24, 27].

Технологічний трансфер. Організувати перехід від результатів низьких рівнів технологічної готовності до перевірених лабораторних і польових демонстраторів через спільні програми установ НАН України, ЗВО, промисловості та державних замовників, використовуючи досвід європейських пілотних ліній і центрів компетенцій [11, 12].

Кадри. Сформувати повний цикл підготовки фахівців — від студентських дослідницьких проєктів і спільної аспірантури до стабільних позицій для мо-

лодих учених, інженерів, операторів складного обладнання та фахівців зі стандартизації.

Міжнародна інтеграція. Забезпечити системну участь українських колективів у «Горизонт Європа», *SNS JU*, *Chips Joint Undertaking* (*Chips JU* — Спільне підприємство ЄС з чипів, державно-приватне партнерство та основний орган реалізації ініціативи *Chips for Europe* — програми ЄС зі створення пілотних ліній, дизайн-платформ, центрів компетенцій і доступу до напівпровідникової інфраструктури), ініціативах ЄС у межах *Quantum Europe Strategy* (далі *Quantum Europe*), програмі *NATO DIANA*, міжнародних метрологічних порівняннях, а також у роботі *ITU-R*; *European Telecommunications Standards Institute* (*ETSI* — Європейський інститут телекомунікаційних стандартів); *3rd Generation Partnership Project* (*3GPP* — міжнародне партнерство організацій стандартизації, яке розробляє специфікації мобільних систем); *IEEE Standards Association* (*IEEE SA* — Асоціація стандартів Інституту інженерів з електротехніки та електроніки); *European Conference of Postal and Telecommunications Administrations* (*CEPT* — Європейська конференція адміністрацій поштового зв'язку та електрозв'язку, що координує європейські підходи до спектра, телекомунікацій і поштового регулювання) [11, 13, 22, 24, 27, 31, 35, 47].

Мета Аналітичної записки не зводиться до механічного розширення переліку тем. Її реалізація повинна сформувати відтворюваний маршрут розвитку: фундаментальна ідея — математична модель — чисельний прогноз — експеримент — оцінка невизначеності — незалежна валідація — прототип — випробування у реальному середовищі — охорона інтелектуальної власності або внесок до стандарту — впровадження. Саме поєднання цих етапів характерне для сучасних міжнародних програм у бездротових мережах, мікроелектроніці, квантових технологіях і метрології [6, 7, 11, 19].

3.1.

ПРІОРИТЕТНІ ФУНДАМЕНТАЛЬНІ НАПРЯМИ

Фундаментальне ядро Аналітичної записки доцільно організувати за чотирма взаємопов'язаними напрямами. Вони охоплюють фізичні закони електромагнітної взаємодії, штучно сформовані середовища, матеріальну базу та методи цілеспрямованого керування спектром і модовою структурою. Горизонтальними складовими для всіх напрямів є метрологія, математичне моделювання, оцінювання невизначеності, технологічність виготовлення, енергоефективність, надійність і сумісність із системами керування.

Перший напрям

Електродинаміка складних середовищ

Напрям має охоплювати природні та штучні системи, властивості яких залежать від частоти, просторових координат, напряму поширення, поляризації, температури, зовнішніх полів, інтенсивності сигналу та часу. До таких об'єктів належать дисперсійні, анізотропні, гіротропні, біанізотропні, нелінійні, просторово дисперсійні, нестаціонарні, випадково неоднорідні, плазмові, напівпровідникові, надпровідні, магнітні, біологічні та квантові середовища.

Дослідження процесів взаємодії електромагнітного випромінювання зі складними природними та штучними середовищами. Розвиток теорії:

- ***відкритих електродинамічних систем;*** відкритих електродинамічних структур для генерації та приймання електромагнітних коливань на основі планарних діелектричних структур із перетворенням поверхневих хвиль на об'ємні для формування багатопелюсткових

діаграм спрямованості та радіолокаційних пристроїв на їх основі (малогабаритних радіолокаційних прицілів міліметрового діапазону хвиль для стрілецької зброї, ПТУРСів та об'єктів бронетанкової техніки, головок самонаведення безпілотних літальних апаратів);

▪ ***власних коливань;*** сповільнювальних систем генераторів ММ та субММ діапазонів зі змінним періодом для розширення смуги їхніх робочих частот і підвищення ефективності генерації; використання покриття поверхні сповільнювальних систем генераторів ММ та субММ діапазонів діелектричними шарами для збільшення простору взаємодії та ефективності генерації;

▪ резонансних явищ;

▪ поверхневих електромагнітних хвиль;

▪ нелінійних процесів;

▪ неермітової електродинаміки.

Напрям має сім пріоритетів.

Перший пріоритет — розвиток теорії відкритих електродинамічних систем, у яких енергія і сигнал обмінюються із зовнішнім середовищем. Необхідні строгі й обчислювально ефективні методи аналізу квазінормальних мод, полюсів і нулів матриці розсіяння, радіаційних втрат, добротності, каналів витоку та зв'язку дискретних станів із континуумом. Особливе значення мають зв'язані стани в континуумі (*bound states in the continuum*, *BIC* — локалізовані власні стани, частота яких лежить у спектрі випромінювального континууму, але які за ідеальних умов не випромінюють) та квазі-*BIC* (*quasi-bound states in the continuum* — високодобротні резонансні стани з малим, але ненульовим радіаційним витоком), що забезпечують сильну локалізацію поля, вузькі резонанси, підсилення нелінійної взаємодії, сенсинг і керування фронтом хвилі [36].

Другий пріоритет — неермітова електродинаміка відкритих, активних і дисипативних систем. Необхід-

но досліджувати комплексні спектри, біортогональні моди, виняткові точки, співіснування підсилення та втрат, порушення взаємності, неермітову топологію та межі чутливості з урахуванням шуму. Сучасні огляди підкреслюють, що виняткові точки й неермітові геометрії створюють нові механізми керування спектром, асиметричним перенесенням і модовою селекцією, але їхні прикладні переваги необхідно оцінювати разом із шумовими, стабілізаційними та технологічними обмеженнями [37, 38].

Третій пріоритет — топологічна електродинаміка. Топологічні інваріанти, симетрії та їх порушення дають змогу формувати стійкі крайові й поверхневі стани, однобічне поширення, захист від деяких видів дефектів і нові режими взаємодії світла або мікрохвиль із речовиною. Для радіофізики важливе перенесення цих ідей на мікрохвильові, магнонні, плазмонні, надпровідні й гібридні платформи, а також дослідження нелінійних, квантових і неермітових топологічних режимів [39].

Четвертий пріоритет — фізика поверхневих і локалізованих хвиль: поверхневих плазмон і фононполяритонів, магнітоплазмових, джозефсонівських плазмових, магнонних, гібридних фотонмагнонних і фотонфононних збуджень. Особливу увагу слід приділити сильному та ультрасильному зв'язку, гібридизації мод, негативній і аномальній дисперсії, повільним хвилям, локалізації поблизу меж і дефектів та керуванню перенесенням енергії у багатошарових і циліндричних структурах [40, 43].

П'ятий пріоритет — нелінійна й нестаціонарна електродинаміка. Необхідно розвивати теорію параметричних процесів, гармонічної генерації, частотного перетворення, самофазової і перехресної модуляції, нелінійного перемикання, солітонних режимів, часових кристалів і просторово-часово модульованих систем. Часова модуляція відкриває можливості керу-

вання спектральними гармоніками, напрямом перенесення, частотним перетворенням і програмованою невзаємністю [44].

Шостий пріоритет — електродинаміка випадкових, багатомасштабних і невпорядкованих середовищ, а також обернені задачі розсіяння. Потрібні методи відновлення параметрів середовища за неповними й зашумленими даними, з урахуванням технічних обмежень радіотехнічного обладнання, статистичні моделі каналів, теорія множинного розсіяння, оцінювання невизначеності, аналіз стійкості реконструкції й інтеграція фізичних обмежень у машинне навчання [29].

Сьомий пріоритет — квантова мікрохвильова електродинаміка: електродинаміка надпровідних резонаторів і джозефсонівських структур, *circuit quantum electrodynamics* (*circuit QED* — схемна квантова електродинаміка, платформа когерентної взаємодії штучних атомів або кубітів із квантованим мікрохвильовим полем резонаторів), квантове підсилення, квантова радіометрія, генерація й детектування слабких мікрохвильових полів, мікрохвильово-оптичне перетворення та гібридні квантові системи. *Circuit QED* вже сформувала фундаментальну платформу для когерентної взаємодії штучних атомів із мікрохвильовими фотонами, а квантово простежувані джозефсонівські джерела створюють нові можливості для калібрування складних сигналів [43, 45].

До 2030 року дослідження за цим напрямом мають забезпечити: узгоджену теорію мод і розсіяння для відкритих, дисипативних та активних систем; нові аналітичні результати щодо резонансів, виняткових точок, *BIC* і топологічних станів; моделі нелінійних і часово-модульованих середовищ; методи оберненого відновлення параметрів із кількісним оцінюванням похибок; фізичні основи високодобротних, малошумних, перебудовуваних і квантових мікрохвильових пристроїв.

Другий напрям
Штучні електромагнітні матеріали

До штучних електромагнітних матеріалів належать метаматеріали, метаповерхні, фотонні й магнонні кристали, топологічні структури та програмовані електромагнітні середовища. Вони дають змогу формувати ефективні параметри, граничні умови й закони розсіяння, недоступні або слабко виражені у природних матеріалах. Науковий акцент має зміщуватись від демонстрації конкретного незвичайного ефекту до створення керованих, широкосмугових, маловтратних, енергоефективних, технологічних і системно інтегрованих платформ.

Створення фізичних основ нових поколінь:

- метаматеріалів; використання метаматеріалів для створення імітаторів хибних цілей для маскування реальних цілей, зокрема БпЛА, з програмованою зміною їх ЕПР для імітації допплерівського зсуву рухомих цілей. Створення структур, що зменшують ЕПР літальних апаратів у резонансній області, та розширення їх робочих зон.
- фотонних кристалів;
- магнонних кристалів;
- топологічних структур;
- програмованих електромагнітних поверхонь.

Пріоритетними класами штучних середовищ є описані нижче.

Метаматеріали та метаповерхні з керованими електричними, магнітними й магнітоелектричними відгуками. Необхідні дослідження ефективної гомогенізації, просторової дисперсії, граничних умов, анізотропії, хіральності, нелокальності та фундаментальних обмежень смуги, втрат, добротності й потужності.

Цифрові, кодувальні та програмовані метаповерхні. Програмовані комбінації дискретних станів

метаатомів дають змогу у реальному часі змінювати діаграми розсіяння, фокусування, поляризацію, голографічні функції та маршрутизацію хвиль; розвиток цього напряму започаткував перехід від статичних метаматеріалів до інформаційних електромагнітних систем [46].

Просторово-часово модульовані та активні структури. Часова модуляція, підсилення, керовані нелінійності й перемикання дають змогу реалізувати частотне перетворення, гармонічне формування променю, невзаємність і динамічне керування спектром [44].

Реконфігуровані інтелектуальні поверхні та керовані радіосередовища. Для систем зв'язку й сенсингу необхідно спільно досліджувати електромагнітну фізику поверхні, архітектуру керування, калібрування, канальні моделі, алгоритми оптимізації, енергоспоживання та взаємодію з антенними решітками й мережею [47].

Фотонні й магнонні кристали. Потрібні структури з керованими забороненими зонами, повільними хвилями, дефектними модами, нелінійним і невзаємним перенесенням, а також інтеграцією фотонних, магнонних, фононних і електронних підсистем [39, 42, 48].

Топологічні та неермітові метаструктури. Слід розвивати платформи, у яких топологічна стійкість, керовані втрати, активність і виняткові точки використано для модової селекції, маршрутизації, випромінювання та сенсингу [37, 39].

Нелокальні та просторово дисперсійні середовища. Нелокальність потрібно розглядати не лише як поправку до локальної моделі, а як самостійний механізм створення нових статичних і динамічних властивостей, каналів перенесення та колективних мод [40].

Для кожного класу метаструктур дослідження повинні охоплювати весь рівень системної реалізації: фізичний принцип; синтез елементарної комірки; взаємодію комірок у скінченному масиві; вплив

підкладки, живлення, керувальних ліній, корпусу й температури; методи калібрування; електромагнітну сумісність; алгоритми керування; стійкість до виробничих відхилень; масштабованість виготовлення; надійність і деградацію параметрів.

Особливим завданням є розвиток метаповерхонь, що поєднують керування хвилею з аналоговою або нейроморфною обробкою інформації. Програмовані метаповерхні є перспективними апаратними платформами для просторових перетворень, розпізнавання, оптимізації та фотонного ШІ, але їхні переваги треба оцінювати за повним балансом точності, швидкості, енерговитрат, калібрування та технологічності [30, 47].

Результатом досліджень за напрямом має стати не лише виявлення нових фізичних ефектів, а й створення бібліотеки верифікованих метаатомів, модулів і методик проєктування для мікрохвильового, міліметрового та терагерцового діапазонів; відкриті еталонні задачі; прототипи програмованих поверхонь, антен, фільтрів, поглиначів, сенсорів і систем формування поля; методи оцінювання ефективності, втрат, потужності, шуму та невизначеності.

Третій напрям
Функціональні матеріали

Розвиток мікрохвильової електроніки визначено не лише геометрією пристрою, а й доступністю матеріалів із низькими втратами, високою рухливістю носіїв, великою пробивною напруженістю, керованою магнітною або діелектричною відповіддю, нелінійністю, фазовими переходами, квантовою когерентністю та сумісністю з технологіями інтеграції. Тому функціональні матеріали треба розглядати як самостійний фундаментальний напрям, пов'язаний із фізикою, синтезом, характеризацією, моделями параметрів і пристроями.

Пріоритетними є названі нижче групи матеріалів і структур.

Ферити, магнітні діелектрики та магнонні матеріали. Необхідні матеріали з малим магнітним загасанням, керованою анізотропією, нелінійністю та можливістю формування мікро- і нанорозмірних хвилеводів. Когерентна магноніка і дорожні карти спінхвильових обчислень визначають перспективи інформаційного перенесення, фільтрації, генерації, невзаємних пристроїв і гібридних квантових систем у діапазоні від гігагерц до терагерц [42, 48].

Графен, двовимірні матеріали та вандерваальсові гетероструктури. Шаруваті двовимірні (*two-dimensional*, 2*D*) матеріали підтримують електронні, плазмонні, фононполяритонні, екситонні та гібридні збудження з високою локалізацією поля й можливістю електричного, оптичного або механічного налаштування. Вандерваальсові гетероструктури забезпечують змогу комбінувати різні функції без традиційних обмежень узгодження кристалічних ґраток [41, 49].

Мультифероїки й магнітоелектричні матеріали. Поєднання електричного й магнітного порядку та магнітоелектричний зв'язок створюють основу для електрично керованих надвисокочастотних (НВЧ) компонентів, сенсорів, пам'яті, фазообертачів і низькоенергетичних перетворювачів [50].

Надпровідники та джозефсонівські структури. Пріоритетами є високодобротні резонатори, джозефсонівська плазма, квантові підсилювачі, детектори, генератори квантово простежуваних сигналів, елементи *circuit QED*, кріогенна електроніка й мікрохвильово-оптичні інтерфейси [43, 45].

Широкозонні та III—V напівпровідники. Напівпровідникові сполуки елементів III та V груп періодичної системи (III—V), нітрид галію (GaN), карбід кремнію (SiC), фосфід індію (InP) та споріднені системи мають

ключове значення для потужної, високочастотної, малошумної й радіаційно стійкої електроніки, а гетерогенна інтеграція з кремнієвими, фотонними й антенними платформами є одним із міжнародних пріоритетів мікроелектроніки [11, 12, 19].

Фазозмінні, сегнетоелектричні, електрооптичні та нелінійні матеріали. Слід розвивати матеріали для енергонезалежного або швидкого перемикання, перебудови фази й амплітуди, нелінійного перетворення й адаптивних метаповерхонь із урахуванням циклічної стабільності, гістерезису, теплових ефектів і швидкодії [47].

Низьковтратні діелектрики, кераміки, композити та наноструктури. Необхідні матеріали для високодобротних резонаторів, фільтрів, антенних підкладок, поглиначів, захисних покриттів і конструкцій із заданою теплопровідністю, механічною міцністю й електромагнітною відповіддю.

Ключовою умовою є створення єдиної методології характеризації матеріалів. Вона повинна включати вимірювання комплексної діелектричної та магнітної проникностей, провідності, тангенса втрат, нелінійних параметрів, шуму, температурних і польових залежностей, параметрів анізотропії, старіння та відтворюваності партій. Дані мають бути супроводжені оцінкою невизначеності, описом зразка, технологічного маршруту й умов вимірювання та зберігатись у структурованій базі, придатній для моделювання та цифрових двійників [16, 18].

До 2030 року пріоритетом має бути не необмежене розширення номенклатури матеріалів, а формування кількох наскрізних платформ «матеріал — модель — технологія — вимірювання — пристрій». Для кожної платформи необхідно визначити цільовий діапазон частот, механізм керування, допустимі втрати, температурний режим, технологію інтеграції, методи калібрування та сценарії застосування.

Четвертий напрям
Спектральна інженерія електродинамічних систем

Спектральна інженерія електродинамічних систем — це цілеспрямоване керування власними частотами, комплексними власними значеннями, добротністю, шириною лінії, груповою швидкістю, локалізацією поля, симетрією мод, каналами випромінювання та силою взаємодії між модами. Вона об'єднує теорію операторів, модовий аналіз, теорію розсіяння, матеріалознавство, оптимізацію та експериментальну ідентифікацію параметрів.

Основними механізмами спектрального керування є зміна геометрії та топології структури; керування діелектричними, магнітними, плазмовими та надпровідними параметрами; електричні, магнітні, оптичні, температурні й механічні зовнішні впливи; просторово-часова модуляція; введення активності або контрольованих втрат; зміна граничних умов; керування взаємодією резонансів та каналами випромінювання.

Пріоритетними об'єктами дослідження є викладені нижче.

Гібридизація і взаємодія мод. Необхідно досліджувати уникнуті перетини, сильний зв'язок, перенесення енергії між фотонними, плазмонними, магнонними, фононними, екситонними та джозефсонівськими модами, а також формування негативної, аномальної і повільнохвильової дисперсії.

Радіаційні сингулярності та BIC. Зв'язані стани в континуумі, квазі-*BIC* і резонанси Фано дають змогу формувати високодобротні стани, підсилювати поле та керувати напрямом і поляризацією випромінювання [36].

Виняткові точки й неермітові спектри. Потрібні методи надійного проєктування, стабілізації та вимірювання виняткових точок з обов'язковим аналізом шумів, похибок і технологічної чутливості [37, 38].

Топологічна спектральна інженерія. Топологічні інваріанти, симетрії та дефекти треба використовувати для створення стійких каналів, модових фільтрів, граничних станів та гібридних класичних і квантових архітектур [39].

Інверсний дизайн. Методи спряжених рівнянь, топологічної оптимізації, глибокого навчання й генеративного проєктування повинні застосовуватись разом із виробничими обмеженнями, фізичними законами, оцінкою невизначеності та експериментальною верифікацією [28, 30].

Для України цей напрям є особливо перспективним, оскільки сильні теоретичні школи можуть створювати оригінальні принципи пристроїв ще до появи повного технологічного циклу. Водночас теоретичний результат повинен завершуватись параметричною моделлю, чисельним кодом, картою стійкості, методикою експериментальної перевірки та, за можливості, масштабованим прототипом.

Очікуваними результатами спектральної інженерії є нові високодобротні й перебудовувані резонатори, фільтри, мультиплексори, фазообертачі, сенсори, антенні й випромінювальні структури, малошумні генератори, квантові інтерфейси, пристрої уповільнення і маршрутизації хвиль, а також системи із програмованою модовою структурою.

3.2.

ПРИКЛАДНІ НАПРЯМИ

Прикладні дослідження мають організовуватись не як ізольований перелік пристроїв, а як місійні програми з чітко визначеними користувачами, сценаріями, умовами експлуатації, метриками, процедурами випробувань і маршрутом переходу між рівнями

технологічної готовності. Міжнародний досвід *6G*, *Chips Act*, квантових програм і *DARPA* демонструє ефективність поєднання фундаментальної науки, відкритих експериментальних стендів і полігонів (*testbeds* — керованих середовищ для відтворюваного випробування технологій), прототипування, стандартизації та участі промисловості [6, 7, 11, 13, 19].

Пріоритетними прикладними напрямами тут є такі.

Мобільний зв'язок 6G та наступних поколінь. Дослідження мають охоплювати міліметрові й субтерагерцові радіоінтерфейси, надширокосмугові компоненти, розподілені безстільникові (*cell-free*) антенні системи — мережі розподілених точок доступу, які спільно обслуговують користувачів без жорстких меж комірок; *massive multiple-input multiple-output* (*massive MIMO* — системи з дуже великою кількістю координовано керованих антенних каналів); ближньопольові режими великих апертур; реконфігуровані поверхні; інтегроване зондування і зв'язок (*integrated sensing and communication*, *ISAC* — спільне використання радіосигналів та апаратури для передавання даних і зондування); *AI-native* керування (*artificial-intelligence-native*; *artificial intelligence* (*AI*) — штучний інтелект; підхід, за якого алгоритми ШІ архітектурно вбудовані у проєктування, оптимізацію та керування мережею, а не додаються до неї як зовнішній модуль); точне позиціонування, енергоефективність та електромагнітну сумісність. Орієнтиром є шість сценаріїв *IMT*-2030 та процедура міжнародного оцінювання радіоінтерфейсів [47].

Супутниковий зв'язок і неназемні мережі. Необхідні високоефективні антени, електронне формування променю, міліметрові, терагерцові й оптичні лінії, інтеграція наземних, висотних, безпілотних і космічних платформ, точна синхронізація, стійке позиціонування та моделі каналів для складних атмосферних умов [4, 10].

Радіофізика навколоземного космічного простору та космічна погода. Пріоритетними мають бути дослідження поширення радіохвиль у неоднорідній і нестаціонарній іоносфері; радіофізична діагностика іоносфери та навколоземного плазмового середовища; дослідження впливу сонячної та геомагнітної активності на характеристики радіоканалів, супутниковий зв'язок і навігаційні системи; розвиток методів *GNSS*-діагностики іоносфери; інтеграція наземних і супутникових спостережень; створення фізико-математичних та інформаційних моделей стану іоносфери; застосування методів машинного навчання і фізично обґрунтованого ШІ для виявлення, класифікації та прогнозування збурень. Перспективним є створення комплексних систем моніторингу й прогнозування стану навколоземного середовища з використанням розподілених мереж спостережень та відкритих даних міжнародних космічних місій.

Радіолокація, пасивна локація та дистанційне зондування. Пріоритетами є багатопозиційні й когерентні системи, цифрові антенні решітки, поляриметрія, *synthetic aperture radar* (*SAR* — радіолокація із синтезованою апертурою, у якій рух носія використовується для формування ефективної великої апертури та високої просторової роздільної здатності) та *inverse synthetic aperture radar* (*ISAR* — інверсна радіолокація із синтезованою апертурою, у якій зображення формується завдяки відносному руху або обертанню цілі), пасивне використання сторонніх підсвічувачів, адаптивна обробка, атмосферна й іоносферна діагностика, підповерхневе зондування, а також кількісна оцінка ймовірності виявлення, просторової роздільної здатності, хибних тривог і стійкості до завад [51, 52]. Перспективною є також інтеграція зазначених систем із ШІ.

Перспективними є системи активно-пасивної радіолокації, що використовують для підсвічування навколишнього середовища випромінювання наявних

радіотехнічних систем зв'язку, телебачення та стільникового зв'язку наземного, повітряного та космічного базування. Використання електромагнітного поля від таких джерел дасть змогу виявляти БпЛА, які мають малу ефективну поверхню розсіяння та малу висоту польоту. Крім того, широкий частотний діапазон систем короткохвильового мовлення (довжини хвиль 10—100 м), ультракороткохвильового мовлення (одиниці метрів), наземного цифрового телебачення (174—230 МГц — МХ; 470—862 МГц — ДМХ), стільникового зв'язку 2*G*—4*G* — 900 МГц, 1800 МГц, 2100 МГц, 2600 МГц, а 5*G* — 700 МГц, 3400–3800 МГц (довжини хвиль від десятків метрів та, у перспективі, до міліметрів) дасть змогу ефективно виявляти БпЛА, створені з використанням стелс-технологій.

Використання для дистанційного зондування довкілля наявного випромінювання GNSS і геостаціонарних телевізійних супутникових систем дає змогу створювати наземні та бортові приймальні засоби для реєстрації відбитих від природних об'єктів і середовищ сигналів та використовувати отримані дані для їх моніторингу.

Перспективним напрямом є розвиток методів пасивного дистанційного зондування природних середовищ із використанням сигналів глобальних навігаційних супутникових систем, зокрема *GNSS*-рефлектометрії, для оцінювання стану водної поверхні, параметрів приповерхневого вітру та морського хвилювання, моніторингу снігового і льодового покриву, характеристик рослинності та інших параметрів довкілля. Особливим завданням є створення спеціалізованих приймальних засобів для: безпілотних систем; літальних апаратів; телекомунікацій; квантових комунікацій; медичної діагностики (використання акустичних шумів процесів дихання та серцебиття для діагностики патологій органів дихання та серця; цифрова оптична спектрометрія); систем безпеки; промислового неруйнівного контролю.

Безпілотні й автономні системи. Потрібні компактні радари, канали керування та обміну даними, автономна навігація, взаємна локалізація, радіочастотна ідентифікація, мережевий сенсинг, стійкість до втрати супутникової навігації й електромагнітна сумісність бортових систем.

Терагерцова спектроскопія, візуалізація і неруйнівний контроль. Перспективними є джерела, детектори, квазіоптичні системи, спектроскопія матеріалів, контроль композитів, покриттів і технологічних процесів, виявлення дефектів, дослідження атмосфери та навколоземного космічного простору, культурної спадщини та біологічних об'єктів. Прикладні розробки необхідно супроводжувати метрологією і стандартними зразками [5, 16, 17].

Медична діагностика та біомедичні технології. Доцільно розвивати неіонізаційні методи радіохвильової та терагерцової візуалізації, діелектричну спектроскопію тканин, біосенсори, контрольовану електромагнітну гіпертермію та моніторинг фізіологічних параметрів. Обов'язковими є міждисциплінарна валідація, біобезпека, етичні процедури та порівняння з клінічними стандартами.

Промисловість, енергетика й критична інфраструктура. Необхідні сенсори й радари для контролю стану конструкцій, мікрохвильова діагностика матеріалів і процесів, високочастотна силова електроніка, моніторинг ліній і підстанцій, електромагнітна сумісність, цифрові двійники радіоелектронних вузлів і систем технічної діагностики [18]. Окремим напрямом є передавання енергії для рухомих об'єктів та транспортних засобів.

Квантові комунікації, сенсорика і метрологія. Пріоритетами є надпровідні мікрохвильові кола, малошумні підсилювачі, квантова радіометрія, квантово простежувані джерела сигналів, мікрохвильово-оптичні перетворювачі, квантові магнітометри, за-

хищені комунікації та системи позиціонування, навігації й часу без повної залежності від супутникових сигналів [13, 25, 43, 45].

Для кожної прикладної програми необхідно визначити мінімальний набір результатів: обґрунтований сценарій; чисельну і фізичну моделі; експериментальний макет; методику калібрування; оцінку невизначеності; порівняння з доступними аналогами; випробування у репрезентативному середовищі; план стандартизації, сертифікації або передання технології.

3.3.

НАЦІОНАЛЬНА БЕЗПЕКА

Електромагнітний спектр є критичним ресурсом для державного управління, оборони, цивільного зв'язку, навігації, космічних систем, енергетики, транспорту й науки. НАТО розглядає електромагнітну боротьбу та стратегію електромагнітного спектра як окремі взаємопов'язані напрями розвитку спроможностей, випробувань, навчання і взаємосумісності [26]. Тому національна програма радіофізики повинна містити фундаментальні та прикладні дослідження стійкості систем у складному, перевантаженому й навмисно порушеному електромагнітному середовищі.

До пріоритетів національної безпеки належать такі.

Моніторинг і ситуаційна обізнаність у спектрі. Потрібні широкосмугові приймальні системи, геолокація випромінювачів, класифікація сигналів, карти зайнятості спектра, виявлення аномалій, оцінювання завад і узгодження даних різних сенсорів. Наукові результати мають спиратись на контрольовані набори даних, оцінку похибок і процедури перевірки.

Стійка радіолокація та протидія безпілотним загрозам. Необхідні багатодіапазонні, багатопозиційні,

пасивні й когерентні підходи, адаптивні антени, поляриметрія, об'єднання радіолокаційних, оптичних, акустичних і радіочастотних ознак і випробування в умовах складного фону.

Захищені й адаптивні комунікації. Пріоритетами є розподілені мережі, швидка перебудова амплітуди, частоти, поляризації та форми сигналу, просторове придушення завад, спрямовані й малопомітні канали, стійка синхронізація, криптографічна й фізична безпека, а також сумісність із цивільною інфраструктурою та стандартами *IMT*-2030.

Позиціонування, навігація і час без критичної залежності від супутникових систем. *Global Navigation Satellite System* (*GNSS* — загальний термін для глобальних навігаційних супутникових систем, що забезпечують визначення координат і точного часу в глобальному масштабі) не має бути єдиною опорою. Слід розвивати радіоінерціальні, наземні, астрономічні, квантові та кооперативні методи, точні генератори та стандарти часу, а також алгоритми виявлення підміни та подавлення навігаційних сигналів [25, 27, 53].

Перспективним є використання випромінювання *GNSS* (*GPS*, *Galileo*, *BeiDou*, *GLONASS*), геостаціонарних супутникових телевізійних і мовних систем для створення систем глобальної радіолокації та моніторингу повітряної, наземної й водної обстановки. Активно-пасивні системи можуть використовувати для підсвічування простору наявні джерела випромінювання та здійснювати моніторинг довкілля на основі приймання сигналів, відбитих від об'єктів.

В умовах сучасної війни особливого значення набувають дослідження у сферах:

- радіоелектронної боротьби;
- електромагнітної сумісності;
- захисту інформації;
- засобів виявлення;

- малопомітних електромагнітних технологій;
- автономних систем керування.

Електромагнітна сумісність і стійкість апаратури. Необхідні моделі, випробування й захисні рішення для сильних полів, імпульсних завад, взаємних перешкод, паразитних випромінювань, кабельних і корпусних зв'язків, а також для електроніки критичної інфраструктури. Розроблення імпульсних потужних засобів впливу на радіоапаратуру.

Керування електромагнітною сигнатурою. Доцільно досліджувати контроль розсіяння, поглинання, поляризації і теплового навантаження за допомогою матеріалів, метаповерхонь та адаптивних конструкцій, оцінюючи широкосмуговість, кутову стійкість, потужність, технологічність і довговічність.

Квантову готовність. Національна програма має охоплювати квантові сенсори, квантовобезпечні комунікації, перехід до постквантової криптографії, метрологію слабких сигналів, захист ланцюгів постачання й підготовку фахівців. НАТО прямо пов'язує квантову готовність із взаємосумісністю, кадрами, критичними технологіями та співпрацею держави, науки й промисловості [25].

Безпека дослідницької екосистеми. Потрібні класифікація чутливих даних, кіберзахист лабораторій, контроль доступу до обладнання та моделей, оцінка ризиків міжнародної співпраці, резервування даних, географічне рознесення критичних функцій і диверсифікація постачальників [24, 25].

Організаційним принципом має бути «відкритість за замовчуванням — обмеження за обґрунтованою необхідністю». Надмірне засекречування послаблює публікаційну активність, міжнародну кооперацію та підготовку кадрів; неконтрольована відкритість створює ризики витоку чутливих знань. Для кожної програми подвійного призначення необхідні правила публікації, доступу, патентування, експортного контролю й незалежної експертизи.

Найважливішим практичним механізмом повинні стати спільні дослідницькі полігони, на яких можна безпечно перевіряти стійкість комунікацій, навігації та спостереження в умовах завад, а також методи динамічного спільного використання спектра. Подібна логіка покладена в основу американських *National Radio Dynamic Zones* і виклику програми *NATO DIANA* «*Contested Electromagnetic Environments*» («Електромагнітні середовища в умовах протиборства» — конкурс для технологій стійкого зв'язку, навігації та спостереження за наявності завад і навмисного електромагнітного впливу) [15, 27].

3.4.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Математичне моделювання є не допоміжною, а системоутворювальною складовою Аналітичної записки. Воно повинно забезпечувати перехід від фундаментальної теорії до прогнозу, оптимізації, експериментальної інтерпретації та цифрової сертифікації пристроїв. Для складних електродинамічних систем необхідно поєднувати аналітичні, чисельні, статистичні й даноорієнтовані підходи, засоби штучного інтелекту.

Пріоритетними в цьому є названі нижче групи методів.

Аналітичні методи математичної фізики. Теорія крайових задач, функції Гріна, інтегральні рівняння, асимптотичні методи, теорія збурень, групова теорія, методи комплексного аналізу, теорія хвилеводів і резонаторів, моделі ефективного середовища та строгі обчислення.

Спектральна теорія операторів. Необхідні методи для самоспряжених і несамоспряжених операторів, відкритих систем, комплексних власних частот, квазі-

нормальних мод, виняткових точок, *BIC*, топологічних інваріантів і стійкості спектра до збурень [36, 39].

Обчислювальна електродинаміка. Слід розвивати методи скінченних різниць у часовій області, скінченних і граничних елементів, моментів, дискретних Галеркінських схем, спектральних і псевдоспектральних методів, швидких мультипольних алгоритмів, доменної декомпозиції й адаптивних сіток.

Багатофізичне моделювання. Для реальних пристроїв електромагнітні процеси треба розглядати разом із тепловими, механічними, акустичними, магнітними, носійними, плазмовими, кріогенними й квантовими ефектами, включно зі зворотними зв'язками та деградацією параметрів.

Високопродуктивні обчислення. Необхідні паралельні алгоритми, *GPU*-прискорення (*graphics processing unit*, *GPU* — використання графічних процесорів як масово-паралельних обчислювальних прискорювачів), хмарні й кластерні ресурси, автоматичне диференціювання, повторне використання моделей і стандартизовані тести продуктивності. Перевагу варто надавати кодам, які мають верифікаційні приклади, документовані похибки й відтворювані робочі процеси.

Обернені задачі, оптимізація й оцінювання невизначеності. Потрібні методи ідентифікації матеріальних параметрів, реконструкції джерел і об'єктів, спряженої оптимізації, байєвського оцінювання, чутливості, глобальної оптимізації, робастного дизайну та перенесення похибок від вимірювань до кінцевої характеристики.

Фізично обґрунтований штучний інтелект. *Physics-informed machine learning* (фізично обґрунтоване машинне навчання — підходи, що вбудовують у навчання диференціальні рівняння, закони збереження, симетрії, граничні умови та інші фізичні обмеження) інтегрує дані з фізичними моделями й є перспективним для прямих та обернених задач, але

потребує стандартних тестів, оцінки узагальнення та контролю фізичної коректності [29].

Інверсний і генеративний дизайн. Методи машинного навчання можуть прискорювати симуляції, створювати сурогатні моделі та пропонувати геометрії з потрібним відгуком, проте вони повинні працювати разом із точними розв'язувачами рівнянь Максвелла, виробничими обмеженнями та експериментальною перевіркою [28, 30].

Цифрові двійники. Цифровий двійник повинен бути синхронізованою віртуальною моделлю конкретного фізичного об'єкта або процесу, а не просто статичною симуляцією. Потрібні стандартизовані інтерфейси, верифікація, валідація, кількісна оцінка невизначеності, простежуваність даних і довіра до прогнозу [18].

Необхідно розвивати сучасні методи:

- математичної фізики;
- спектральної теорії операторів;
- обчислювальної електродинаміки;
- високопродуктивних обчислень;
- цифрових двійників;
- ШІ для проєктування електродинамічних систем.

Доцільно створити національну програмно-обчислювальну платформу для радіофізики, яка поєднає бібліотеки матеріалів, еталонні геометрії, відкриті й захищені набори даних, модулі чисельного розрахунку, інструменти оптимізації, цифрові журнали експерименту та засоби порівняння з вимірюваннями. Платформа не повинна дублювати універсальні комерційні пакети; її завданням є реалізація оригінальних українських методів, відтворюваність і незалежна перевірка критичних розрахунків.

Обов'язковими вимогами до результатів моделювання мають бути: верифікація коду на задачах з відомим розв'язком; збіжність; порівняння щонайменше з одним незалежним методом; оцінка чут-

ливості; опис діапазону застосовності; збереження вхідних даних і версії коду; експериментальна валідація, коли вона фізично можлива.

3.5.
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА БАЗА

Сучасна експериментальна база повинна забезпечувати не проведення поодиноких вимірювань, а повний цикл від матеріальної характеризації та *on-wafer*-тестів до оцінки дієвості антен, складних сигналів і систем у репрезентативному середовищі. Міжнародні програми *NIST*, *European Chips Act* і *SNS JU* показують, що наукове лідерство залежить від метрологічної простежуваності, відкритого доступу до пілотних ліній і випробувальних платформ і зв'язку лабораторій із виробничими процесами [6, 7, 11, 12, 16—18].

Пропонується створити Розподілений національний центр радіофізики та мікрохвильових технологій як мережу вузлів НАН України, університетів і партнерських підприємств із документованими компетенціями, узгодженими правилами доступу та, для метрологічних робіт, простежуваними або акредитованими методиками. Назва й конкретна організаційна конструкція Центру є пропозицією для України, а не дослівно запозиченою назвою готової міжнародної установи. Вона узагальнює модель *distributed research infrastructure* Європейського стратегічного форуму з дослідницьких інфраструктур (*European Strategy Forum on Research Infrastructures*, *ESFRI* — розподілена дослідницька інфраструктура з координаційним центром і взаємопов'язаними національними вузлами), мережу центрів компетенцій і пілотних ліній *Chips for Europe*, відкриті географічно розподілені експериментальні платформи *SNS JU*, полігони *NSF NRDZ* та

метрологічну кооперацію *NIST* [6, 7, 11, 12, 15, 17, 54]. Це має бути не нова централізована адміністративна установа, а система спільного реєстру обладнання, єдиних правил доступу, калібрування, бронювання, підготовки операторів, обміну зразками й даними та незалежної валідації результатів.

Необхідно створювати сучасні центри:

- мікрохвильових вимірювань;
- характеризації матеріалів;
- нанофабрикації;
- надвисокочастотної діагностики;
- приймання та оброблення супутникової інформації;
- вимірювання електромагнітних властивостей функціональних матеріалів;
- стендів для створення сучасних сповільнювальних систем для генераторів субММ діапазону хвиль, зокрема з нанесенням на них діелектричних плівок;
- стендів із використанням 3*D*-принтерів для створення на основі фотозображень тривимірних моделей сучасних БпЛА та дослідження їхньої ефективної поверхні розсіяння в широкому частотному діапазоні.

Пріоритетний інфраструктурний контур має охоплювати:

Радіочастотну, мікрохвильову, міліметрову й субтерагерцову метрологію. Необхідні векторні аналізатори кіл, модулі розширення частоти, вимірювання *S*-параметрів (*scattering parameters* — параметрів розсіяння, що описують відбиття і передавання хвиль у багатопортовому колі), потужності, шумової температури, коефіцієнта шуму, фазового шуму, нелінійності, компресії, інтермодуляції та модульованих сигналів. *NIST* підтримує калібрування антен і зондів до 220 гігагерц (ГГц), розширює калібрування потужності до 260 ГГц і розробляє *on-wafer* простежуваність до 1 терагерца (ТГц); це задає довгостроковий орієнтир для української інфраструктури [16, 17].

***On-wafer*-вимірювання та високочастотне пакування**. Потрібні зондові станції; методи *TRL* (*thru-reflect-line* — калібрування за еталонами «наскрізне з'єднання — відбиття — лінія») та *LRM* (*line-reflect-match* — калібрування за еталонами «лінія — відбиття — узгоджене навантаження») для перенесення площини відліку вимірювання до контактів досліджуваного пристрою; перевірка калібрування; температурні та потужнісні вимірювання; деембедінг (*de-embedding* — обчислювальне вилучення впливу зондів, контактних майданчиків, ліній підведення, переходів і корпусу з виміряних даних для відновлення характеристик самого пристрою); моделі переходів і корпусів; *antenna-in-package*, *AiP* (антена, інтегрована безпосередньо в корпус мікросхеми або модуля); гетерогенна інтеграція [11, 12, 17, 55].

Антенні й польові вимірювання. Необхідні безлунні камери, компактні полігони, ближньопольові сканери, вимірювання діаграм, поляризації, ефективності, *equivalent isotropically radiated power* (*EIRP* — еквівалентна ізотропно-випромінювана потужність, що характеризує потужність випромінювання в заданому напрямку відносно ізотропного випромінювача), *MIMO* та *over-the-air* параметрів, включно з великими апертурами й ближньопольовими режимами 6*G*. Оцінювання значення ефективної поверхні розсіяння (ЕПР) цілей на компактних полігонах за даними вимірювань у ближній і проміжній зонах випромінювання. З огляду на умови війни потрібні незалежні джерела живлення технологічного обладнання — генератори, вітрові, сонячні та інші станції.

Характеризацію матеріалів. Потрібні резонаторні, хвилеводні, коаксіальні, вільнопросторові й терагерцові методи для визначення комплексних параметрів матеріалів за контрольованих значень температури, магнітних і електричних полів, а також методи для тонких плівок, 2*D*-матеріалів і анізотропних зразків.

Терагерцову спектроскопію та квазіоптику. Слід розвивати часову й частотну спектроскопію, джерела й детектори, квазіоптичні тракти, камери й системи візуалізації, калібрувальні зразки та методики оцінки невизначеності.

Кріогенну й квантову мікрохвильову лабораторію. Необхідні кріостати, малошумні тракти, екранування, надпровідні резонатори, квантові підсилювачі, джозефсонівські джерела, вимірювання одиничних і субодиничних фотонних рівнів та мікрохвильово-оптичні інтерфейси [13, 43, 45].

Доступ до мікро- і нанофабрикації. Потрібні технологічні маршрути для тонких плівок, літографії, травлення, металізації, діелектричних і магнітних шарів, 2*D*-гетероструктур, *microelectromechanical systems* (*MEMS* — мікроелектромеханічних систем, у яких механічні елементи, сенсори, виконавчі структури та електроніка інтегровані на мікромасштабі), мікрозбирання та корпусування. За відсутності повного циклу в Україні необхідно забезпечувати інституційний доступ до європейських пілотних ліній і центрів компетенцій [11, 12].

Електромагнітну сумісність і випробування на стійкість. Потрібні камери й стенди для випромінюваної та кондуктивної емісії, сприйнятливості, імпульсних впливів, сильних полів, завадостійкості й оцінювання взаємних перешкод компонентів і систем.

Польові випробувальні платформи. Необхідні контрольовані середовища для експериментів зі спільним використанням спектра, 6*G*, *ISAC,* радіолокацією, неназемними мережами, безпілотними платформами та завадостійкістю. Досвід *NSF NRDZ* та *SNS JU* підтверджує важливість тривалих випробувань у масштабі системи [6, 7, 15].

Обчислювальну інфраструктуру та інфраструктуру даних. Експериментальні вузли повинні мати захищені сховища, автоматизовані журнали, ідентифікато-

ри зразків, контроль версій програм, засоби віддаленого доступу, оброблення даних і цифрових двійників [18].

Розвиток інфраструктури доцільно здійснювати поетапно.

Перший етап — інвентаризація обладнання, компетенцій, частотних діапазонів, невизначеностей і умов доступу.

Другий — відновлення калібрування, навчання операторів, уніфікація процедур і запуск спільного реєстру.

Третій — цільова модернізація «вузьких місць», насамперед *on-wafer*, *over-the-air*, міліметрових, субтерагерцових, кріогенних і матеріалознавчих вимірювань.

Четвертий — міжнародні порівняння, акредитація методик і включення українських вузлів до європейських мереж.

Повну вартість володіння обладнанням — сервіс, калібрування, витратні матеріали, програмні ліцензії, енергопостачання, захист даних і оплата операторів — треба закладати одночасно із закупівлею. Обладнання без довгострокового фінансування експлуатації не можна вважати створеною інфраструктурою.

3.6.

ІНТЕГРАЦІЯ НАУКИ, ОСВІТИ ТА ВИРОБНИЦТВА

Пріоритетом має стати формування єдиного інноваційного середовища, яке об'єднує установи НАН України, ЗВО, високотехнологічні підприємства, оборонно-промисловий комплекс, метрологічні організації, державних замовників, стартапи й міжнародні консорціуми. Європейський *Chips Act* використовує мережу центрів компетенцій, дизайн-платформи та пілотні лінії як точки доступу науки і малих підприємств до складної інфраструктури; ця модель є надзвичайно корисною для України [11, 12].

Доцільно запровадити такі механізми інтеграції:

Координацію на рівні Наукової ради. Наукова рада повинна підтримувати актуальну карту компетенцій, інфраструктури, міжнародних зв'язків і кадрових потреб; щороку переглядати пріоритети; формувати міжінституційні робочі групи та публічний аналітичний звіт у відкритій частині.

Місійні міжінституційні програми. Фінансування доцільно спрямовувати на обмежену кількість програм, де фундаментальні групи, експериментатори, матеріалознавці, інженери, метрологи й користувачі працюють за спільною дорожньою картою.

Спільний доступ до обладнання. Єдині правила доступу, прозорі тарифи для зовнішніх користувачів, навчання операторів, міжлабораторні порівняння та резервування критичних функцій повинні замінити модель замкненого використання обладнання одним підрозділом.

Перехід між рівнями технологічної готовності. Потрібні спеціальні конкурси для переходу від принципу до лабораторного макета, від макета до демонстратора і від демонстратора до випробувань. Оцінювання має враховувати не лише публікації, а й валідацію, патенти, стандарти, ліцензії та контракти.

Спільну освіту й кадрові траєкторії. Необхідні спільні аспірантські програми, подвійне наукове керівництво, літні школи з обчислювальної електродинаміки; *RF*-дизайну (*radiofrequency design* — проєктування радіочастотних кіл, компонентів і трактів); *VNA*-метрології (*vector network analyzer* — метрологія вимірювань векторними аналізаторами кіл); *FPGA* (*field-programmable gate array* — програмована користувачем вентильна матриця) і *SDR* (*software-defined radio* — програмно визначуване радіо, у якому ключові функції формування й обробки сигналів реалізуються програмно); *cryo-RF* (*cryogenic radiofrequency engineering* — кріогенна радіочастотна техніка та ви-

мірювання за низьких значень температури); наукового програмування; виокремлена кар'єрна траєкторія для інженерів та операторів інфраструктури.

Залучення промисловості на ранній стадії. Підприємства й державні користувачі мають брати участь у формулюванні сценаріїв, метрик і випробувань, але не підміняти довгострокову фундаментальну науку короткостроковими технічними дорученнями.

Інтелектуальну власність і стандартизацію. Кожна велика програма повинна мати план патентування, ліцензування, використання програмного коду та участі у стандартах. Доцільно створити при Науковій раді експертну групу для координації внесків до *ITU-R*, *ETSI*, *3GPP*, *IEEE* і *CEPT*.

Підтримку стартапів і спінофів. Спіноф (*spinoff*) у цьому контексті — це компанія, створена для комерціалізації результатів академічних досліджень. Потрібні ваучери доступу до академічного обладнання, консультації з дизайну й метрології, типові угоди про інтелектуальну власність, малі гранти на прототип і незалежні випробування.

Міжнародну кооперацію. Україна повинна використовувати асоціацію з «Горизонт Європа», участь у *SNS JU*, *Chips JU*, *Quantum Europe*, міжнародних метрологічних мережах і *NATO DIANA* для спільних проєктів, доступу до пілотних ліній, підготовки кадрів і випробувань [6, 7, 11, 13, 22, 24, 27].

Диверсифіковану модель фінансування. Вона має поєднувати захищене базове фінансування наукових шкіл та експлуатації критичної інфраструктури; конкурсні фундаментальні гранти; багаторічні місійні програми; контракти з державними й промисловими користувачами; міжнародні гранти; кошти на перехід між рівнями технологічної готовності.

Пріоритетом має стати формування єдиного інноваційного середовища, яке об'єднує:

- установи НАН України;

- заклади вищої освіти (ЗВО);
- оборонно-промисловий комплекс;
- високотехнологічні підприємства;
- міжнародні наукові консорціуми.

Організаційна модель повинна уникати двох крайнощів: фрагментації, коли кожна установа дублює обладнання й працює без спільних метрик, та надмірної централізації, коли доступ до інфраструктури, даних і рішень залежить від одного вузла. Розподілена мережа із загальними правилами, незалежною експертизою та цифровим реєстром є стійкішою в умовах війни й відповідає міжнародній практиці центрів компетенцій і випробувальних платформ [11, 12, 15].

Для контролю реалізації положень Аналітичної записки слід застосовувати збалансовані показники: міжнародне наукове визнання; координація консорціумів; спільне використання обладнання; метрологічна простежуваність; підготовка й утримання молодих фахівців; незалежно валідовані прототипи; участь у стандартах; патентні родини, ліцензії та впровадження. Кількісні цільові значення потрібно встановлювати спеціальним планом реалізації після інвентаризації вихідного стану, щоб уникнути довільних і необґрунтованих показників.

3.7.

ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Реалізація положень Аналітичної записки повинна забезпечити системний, а не декларативний розвиток радіофізики та мікрохвильової електроніки. Очікувані результати згруповано за сімома взаємопов'язаними вимірами.

Наукові результати. Нові теорії, моделі й експериментально підтверджені закономірності відкри-

тих, нелінійних, топологічних, неермітових, квантових і багатомасштабних електродинамічних систем; результати у провідних рецензованих виданнях; міжнародно визнані наукові школи.

Технологічні результати. Бібліотеки матеріалів, метаатомів і моделей; високодобротні та перебудовувані резонатори; фільтри, антени, метаповерхні, сенсори, джерела і приймачі міліметрового та терагерцового діапазонів; елементи радіолокаційних, комунікаційних, квантових і діагностичних систем; лабораторні й польові демонстратори.

Метрологічні результати. Простежувані методики вимірювання параметрів і характеристик матеріалів, *S*-параметрів, потужності, шуму, антен і модульованих сигналів; спроможності *on-wafer*- та *over-the-air*-вимірювань; міжлабораторні порівняння; стандартизовані зразки; кількісне оцінювання невизначеності [16, 18].

Інфраструктурні результати. Розподілений національний центр із реєстром обладнання, єдиними правилами доступу, підготовленими операторами, захищеними сховищами даних, польовими тестбенчами, доступом до мікро- і нанофабрикації та резервуванням критичних функцій.

Безпекові результати. Підвищення стійкості комунікацій, навігації, радіолокації й критичної інфраструктури до завад; наукові основи моніторингу спектра, електромагнітної сумісності, квантовобезпечних систем і керування електромагнітною сигнатурою; сумісність із євроатлантичними підходами [24, 27].

Кадрові результати. Стабільні позиції для молодих учених, інженерів та операторів; спільні аспірантури; сучасні навчальні курси; повернення й залучення українських дослідників; формування компетенцій у *RF/THz* (*radio frequency / terahertz* — радіочастотні і терагерцові технології), квантовій мікрохвильовій техніці, метрології, *HPC* та ШІ.

Інноваційні й міжнародні результати. Українські координатори міжнародних консорціумів; участь у «Горизонт Європа», *SNS JU*, *Chips JU*, *Quantum Europe* і *NATO DIANA*; внески до міжнародних стандартів; патенти, ліцензії, спінофи і контракти; інтеграція українських лабораторій до європейських мереж дослідницької інфраструктури [6, 7, 11, 13, 22, 24, 27].

Реалізація положень Аналітичної записки дасть змогу:

- зміцнити позиції України у світовій науці;
- створити власні критичні технології;
- підвищити обороноздатність держави;
- забезпечити технологічну незалежність;
- підготувати висококваліфіковані кадри;
- збільшити обсяги міжнародних досліджень та інновацій.

У підсумку Україна має зберегти й розвинути власні наукові школи, підвищити технологічну незалежність у критичних сегментах, зміцнити обороноздатність, створити умови для високотехнологічного виробництва й післявоєнного відновлення та посилити присутність у Європейському дослідницькому просторі.

Положення Аналітичної записки мають бути доповнені Планом реалізації на 2026—2030 роки. У ньому необхідно визначити відповідальних виконавців, вихідний стан, ресурси, послідовність етапів, контрольні результати, показники, процедури незалежного оцінювання та щорічного оновлення. Модель публічного плану з відповідальними органами, строками й конкретними результатами використана, зокрема, у Національній стратегії спектра США та британській стратегії бездротової інфраструктури [8, 14].

Розділ **4**

ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ПОДАЛЬШОГО РОЗВИТКУ ГАЛУЗІ В НАН УКРАЇНИ

Доцільно започаткувати цільову комплексну програму Національної академії наук України як загальну рамку для всієї компетенції Наукової ради з проблеми «Радіофізика і мікрохвильова електроніка». Ця цільова комплексна програма НАН України «Радіофізика та мікрохвильові технології — 2030» повинна охоплювати такі напрями:

1. Фундаментальна електродинаміка складних, відкритих, нелінійних, неермітових і квантових систем; спектральна інженерія;

2. Метаматеріали, метаповерхні, фотонні й магнонні структури, функціональні та квантові матеріали;

3. Мікрохвильова, міліметрова, субтерагерцова і терагерцова електроніка; гетерогенна інтеграція та мікрохвильова фотоніка;

4. Радіолокація, пасивна локація, дистанційне зондування атмосфери й Землі, безпілотні та автономні сенсорні системи;

5. 6*G*/*IMT*-2030 (6*G* / *International Mobile Telecommunications for 2030 and beyond*), *ISAC* (*Integrated Sensing and Communication* — інтегроване зондування та зв'язок, тобто спільне використання радіосигналів і апаратури для передавання даних і зондування), супутникові й неназемні мережі, керування електромагнітним спектром;

6. Квантова мікрохвильова електродинаміка, сенсорика, метрологія та мікрохвильово-оптичні інтерфейси;

7. Математичне моделювання, *HPC* (*High-Performance Computing* — високопродуктивні обчислення, тобто використання багатоядерних процесорів, графічних прискорювачів, обчислювальних кластерів і суперкомп'ютерів для розв'язання ресурсоємних наукових та інженерних задач), фізично обґрунтоване машинне навчання, інверсний дизайн і цифрові двійники;

8. Метрологія, експериментальна інфраструктура, *on-wafer*-вимірювання та *over-the-air* (*OTA* — безконтактні вимірювання через випромінюваний радіоканал без кабельного підключення до антенного порту), електромагнітна сумісність, випробувальні полігони й технологічний трансфер.

Доцільно започаткувати додатково місійну комплексну підпрограму НАН України «Інтелектуальні радіолокаційні та мікрохвильові системи дистанційного зондування — 2030» — як один із пріоритетних прикладних блоків. Основними її напрямами мають бути:

1. Цифрові та когнітивні радари;

2. Фазовані та цифрові антенні решітки;

3. Пасивна, багатопозиційна та мережева радіолокація;

4. Виявлення безпілотних і малопомітних цілей;

5. Завадозахищене оброблення сигналів;

6. Міліметрова електроніка;

7. Багаточастотне та поляриметричне зондування атмосфери та іоносфери;

8. Калібрування та метрологія;

9. Штучний інтелект і цифрові двійники;

10. Інтеграція наземних, авіаційних і космічних спостережень.

При Науковій раді доцільно сформувати постійну міжвідомчу координаційну платформу (робочу групу) із представників установ НАН України, ЗВО, промисловості, оборонного сектору, гідрометеорологічної та космічної сфер для підготовки спільних програм, кар-

тування компетенцій, узгодження експериментальної інфраструктури та формування консорціумів. Важливими організаційними кроками мають бути:

- створення спільних лабораторій НАН України та ЗВО;
- проведення конкурсів для консорціумів «НАН України — ЗВО — підприємство»;
- формування мережі дослідних полігонів;
- створення програмних платформ моделювання радарів;
- підтримка молодих дослідників та інженерів;
- розвиток міжнародної співпраці, зокрема участь у «Горизонт Європа» та *European Defence Fund*; використання доступних механізмів співпраці з *European Space Agency*; взаємодія з *WMO* та орієнтація метеорологічної радіолокації на міжнародні практики обміну і контролю якості даних, зокрема напрацювання *EUMETNET OPERA*; співпраця з *EUMETSAT* за доступними для України форматами.

Для прикладних проєктів оцінювання результатів не повинно обмежуватись кількістю публікацій і цитувань. Основними критеріями мають бути:

- наукова новизна;
- експериментальна перевірка;
- створення прототипу або демонстратора;
- рівень технологічної готовності;
- використання результатів промисловістю;
- підготовка фахівців;
- створення програмного забезпечення і баз даних;
- практичне впровадження;

Для обороноздатності країни пріоритетними мають бути:

- дослідження електрофізичних та фотоелектричних властивостей напівпровідникових кристалів сполук II—VI в діапазоні частот 1—100 ГГц, що зумовлено необхідністю побудови малогабаритних засобів радіолокації, зокрема бортових для БпЛА;

▪ дослідження питань формування спеціальних НВЧ-компонентів для радіолокації в діапазоні частот 1–100 ГГц на основі кристалів сполук II–VI в топології мікросмужкових ліній або *SIW*-структур;

▪ дослідження у галузі створення спеціальної елементної бази на основі кристалів сполук II–VI для фотонних радарів;

▪ прикладні дослідження у галузі проєктування та виробництва вітчизняних фотонних радарів;

▪ дослідження у галузі створення композитних матеріалів на основі напівпровідникових частинок для створення вітчизняної спеціальної елементної бази у галузі радіолокації;

▪ радіолокація та дистанційне зондування атмосфери та іоносфери для контролю повітряного та навколоземного космічного простору, захисту критичної інфраструктури, прогнозування небезпечних погодних явищ і повоєнного відновлення;

▪ розвиток багаточастотних пасивних і активно-пасивних радіолокаційних систем на основі програмно-визначуваних приймачів (*SDR*) з використанням сигналів наявних наземних та аерокосмічних систем зв'язку, телебачення і супутникової навігації, зокрема з розміщенням приймальних засобів на висотних та аеростатних платформах для збільшення радіогоризонту та підвищення ефективності виявлення малорозмірних низьколетючих об'єктів;

▪ розвиток розподіленої системи радіофізичного моніторингу атмосфери, іоносфери та навколоземного космічного простору з інтеграцією наземних спостережень, *GNSS*-даних і даних космічних місій для фундаментальних досліджень, завдань космічної погоди, навігації, зв'язку та національної безпеки;

▪ підтримка спільних дослідницьких програм установ НАН України та ЗВО у галузі космічної радіофізики, фізики іоносфери та космічної погоди із залученням молодих учених і використанням між-

народних дослідницьких інфраструктур та відкритих даних космічних місій.

Основним завданням до 2030 року має стати перехід від розрізнених досліджень до координованої національної системи, що об'єднує установи НАН України, ЗВО, промисловість, оборонний сектор та міжнародних партнерів.

Формулювання рекомендацій в Аналітичній записці є узагальненням зазначених офіційних стратегій, міжнародних дорожніх карт і рецензованих наукових оглядів. Пропозиція щодо Розподіленого національного центру є адаптованим для України організаційним висновком із моделей ESFRI, Chips for Europe, SNS JU, NSF NRDZ і NIST.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Лист Відділення фізики і астрономії НАН України головам наукових рад від 07.07.2026 № 59/66.

[2] Лист голови Наукової ради з проблеми «Радіофізика і мікрохвильова електроніка» Ю.Ф. Логвінова щодо підготовки пропозицій до Концепції.

[3] Вихідний проєкт «Концепція розвитку радіофізики та мікрохвильової електроніки в Україні на сучасному етапі».

[4] ITU-R Recommendation M.2160-0. Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond, 2023. https://www.itu.int/rec/R-REC-M.2160-0-202311-I/en

[5] International Telecommunication Union. IMT-2030: Technical requirements for the 6G future, 17 March 2026. https://www.itu.int/hub/2026/03/imt-2030-technical-requirements-for-the-6g-future/

[6] Smart Networks and Services Joint Undertaking. Reference Documents: Strategic Research and Innovation Agenda and work programmes. https://smart-networks.europa.eu/reference-documents/

[7] Smart Networks and Services Joint Undertaking. SNS JU Research and Innovation Work Programme 2025. https://smart-networks.europa.eu/sns-ju-work-programme-2025-released/

[8] UK Government. UK Wireless Infrastructure Strategy, 2023. https://www.gov.uk/government/publications/uk-wireless-infrastructure-strategy/uk-wireless-infrastructure-strategy

[9] German 6G Research and Innovation Cluster (6G-RIC). Technical Innovation Areas. https://6g-ric.de/research/

[10] University of Oulu 6G Flagship. White Paper on Validation and Trials for Verticals towards 2030s. https://www.6gflagship.com/6g-white-paper-on-validation-and-trials-for-verticals-towards-2030s/

[11] European Commission. European Chips Act. https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/european-chips-act

[12] European Commission. European Chips Act: The Chips for Europe Initiative. https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/factpages/european-chips-act-chips-europe-initiative

[13] European Commission. Quantum Europe Strategy, 2 July 2025. https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/quantum-europe-strategy

[14] National Telecommunications and Information Administration. National Spectrum Strategy Implementation Plan, 12 March 2024. https://www.ntia.gov/report/2024/national-spectrum-strategy-implementation-plan

[15] U.S. National Science Foundation. Spectrum Management and Innovation: SpectrumX, NewSpectrum and National Radio Dynamic Zones. https://www.nsf.gov/mps/spectrum

[16] National Institute of Standards and Technology. Metrology and Calibration Services at NIST CTL: Past, Present, and Future, 2025. https://www.nist.gov/news-events/news/2025/06/metrology-and-calibration-services-nist-ctl-past-present-and-future

[17] National Institute of Standards and Technology. On-Wafer Calibration, Measurement, and Measurement Verification. https://www.nist.gov/ctl/wafer-calibration-measurement-and-measurement-verification

[18] National Institute of Standards and Technology. Digital Twins for Advanced Manufacturing. https://www.nist.gov/programs-projects/digital-twins-advanced-manufacturing

[19] DARPA. Electronics Resurgence Initiative. https://eri-summit.darpa.mil/what-is-eri

[20] Кабінет Міністрів України. Стратегія розвитку сфери електронних комунікацій України до 2030 року, розпорядження від 04.06.2025 № 546-р. https://zakon.rada.gov.ua/go/546-2025-%D1%80

[21] Кабінет Міністрів України. Стратегія цифрового розвитку інноваційної діяльності України на період до 2030 року (WINWIN), розпорядження від 31.12.2024 № 1351-р. https://zakon.rada.gov.ua/go/1351-2024-%D1%80

[22] European Commission. Ukraine joins Horizon Europe and the Euratom Research and Training Programme. https://research-and-innovation.ec.europa.eu/news/all-research-and-innovation-news/ukraine-joins-horizon-europe-and-euratom-research-and-training-programme-2021-10-12_en

[23] European Commission. Horizon Europe — the EU framework programme for research and innovation. https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe_en

[24] NATO. NATO releases new Science & Technology Strategy, 5 June 2025. https://www.nato.int/en

[25] NATO. Summary of NATO's Quantum Technologies Strategy, 2024. https://www.nato.int/en/about-us/official-texts-and-resources/official-texts/2024/01/16/summary-of-natos-quantum-technologies-strategy

[26] NATO. Electromagnetic warfare. https://www.nato.int/en/what-we-do/deterrence-and-defence/electromagnetic-warfare

[27] NATO DIANA. Breakthrough solutions for secure communication and navigation: Contested Electromagnetic Environments 2026 challenge. https://www.diana.nato.int/connect/nato-dianas-breakthrough-solutions-for-secure-communication-and-navigation-4.html

[28] Molesky S. et al. Inverse design in nanophotonics. Nature Photonics. 2018. Vol. 12. P. 659-670. https://doi.org/10.1038/s41566-018-0246-9

[29] Karniadakis G. E. et al. Physics-informed machine learning. Nature Reviews Physics. 2021. Vol. 3. P. 422-440. https://doi.org/10.1038/s42254-021-00314-5

[30] Ma W. et al. Deep learning for the design of photonic structures. Nature Photonics. 2021. Vol. 15. P. 77-90. https://doi.org/10.1038/s41566-020-0685-y

[31] Chips Joint Undertaking. About us. https://www.chips-ju.europa.eu/About-us/

[32] European Telecommunications Standards Institute. About ETSI. https://www.etsi.org/about/

[33] 3rd Generation Partnership Project. Introducing 3GPP. https://www.3gpp.org/about-us/introducing-3gpp

[34] IEEE Standards Association. About IEEE SA. https://standards.ieee.org/about/

[35] European Conference of Postal and Telecommunications Administrations. CEPT official website. https://www.cept.org/cept/

[36] Kang M. et al. Applications of bound states in the continuum in photonics. Nature Reviews Physics. 2023. Vol. 5. P. 659-678. https://doi.org/10.1038/s42254-023-00642-8

[37] Ding K., Fang C., Ma G. Non-Hermitian topology and exceptional-point geometries. Nature Reviews Physics. 2022. Vol. 4. P. 745-760. https://doi.org/10.1038/s42254-022-00516-5

[38] Li A. et al. Exceptional points and non-Hermitian photonics at the nanoscale. Nature Nanotechnology. 2023. Vol. 18. P. 706-720. https://doi.org/10.1038/s41565-023-01408-0

[39] Ozawa T. et al. Topological photonics. Reviews of Modern Physics. 2019. Vol. 91. 015006. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.91.015006

[40] Chen Y. et al. Nonlocal metamaterials and metasurfaces. Nature Reviews Physics. 2025. Vol. 7. P. 299-312. https://doi.org/10.1038/s42254-025-00829-1

[41] Low T. et al. Polaritons in layered two-dimensional materials. Nature Materials. 2017. Vol. 16. P. 182-194. https://doi.org/10.1038/nmat4792

[42] Pirro P. et al. Advances in coherent magnonics. Nature Reviews Materials. 2021. Vol. 6. P. 1114-1135. https://doi.org/10.1038/s41578-021-00332-w

[43] Blais A. et al. Circuit quantum electrodynamics. Reviews of Modern Physics. 2021. Vol. 93. 025005. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.93.025005

[44] Zhang L., Cui T. J. Space-Time-Coding Digital Metasurfaces: Principles and Applications. Research. 2021. Article 9802673. https://doi.org/10.34133/2021/9802673

[45] Babenko A. et al. Quantum-Based Microwave Modulated Waveforms. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2023. https://doi.org/10.1109/TMTT.2023.3297364

[46] Cui T. J. et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials. Light: Science & Applications. 2014. Vol. 3. e218. https://doi.org/10.1038/lsa.2014.99

[47] Gu T. et al. Reconfigurable metasurfaces towards commercial success. Nature Photonics. 2023. Vol. 17. P. 48-58. https://doi.org/10.1038/s41566-022-01099-4

[48] Chumak A. V. et al. Advances in Magnetics Roadmap on Spin-Wave Computing. IEEE Transactions on Magnetics. 2022. Vol. 58, No. 6. 0800172. https://doi.org/10.1109/TMAG.2022.3149664

[49] Castellanos-Gomez A. et al. Van der Waals heterostructures. Nature Reviews Methods Primers. 2022. Vol. 2. Article 58. https://doi.org/10.1038/s43586-022-00139-1

[50] Spaldin N. A., Ramesh R. Advances in magnetoelectric multiferroics. Nature Materials. 2019. Vol. 18. P. 203-212. https://doi.org/10.1038/s41563-018-0275-2

[51] NASA Science. Get to Know Synthetic Aperture Radar (SAR). https://science.nasa.gov/mission/nisar/get-to-know-sar/

[52] IEEE Technology Navigator. Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR): definition and principles. https://technav.ieee.org/topic/inverse-synthetic-aperture-radar/

[53] European Space Agency Navigation Office. GNSS — Global Navigation Satellite System. https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS

[54] European Strategy Forum on Research Infrastructures. ESFRI Glossary: Distributed Research Infrastructure. https://www.esfri.eu/glossary

[55] Jungwirth N. et al. Characterizing interconnects to 325 GHz. National Institute of Standards and Technology, 2024. https://www.nist.gov/publications/characterizing-interconnects-325-ghz

[56] European Commission, Directorate-General for Defence Industry and Space. Support to Ukraine — European Defence Fund / EU-Ukraine defence industrial cooperation (current information, 2026). https://defence-industry-space.ec.europa.eu/support-ukraine_en

[57] European Space Agency. Key outcomes of the 345th ESA Council meeting: ESA–State Space Agency of Ukraine project fund and seven demonstrator projects, 19 March 2026. https://www.esa.int/Newsroom/Press_Releases/Key_outcomes_of_the_345th_ESA_Council_meeting

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

АВЕРКОВ Юрій Олегович — ORCID 0000-0002-1169-9393
ВАСЮТА Костянтин Станіславович — ORCID 0000-0002-1978-3717
ДРОБАХІН Олег Олегович — ORCID 0009-0006-9738-4515
ЗАЛЕВСЬКИЙ Геннадій Станіславович — ORCID 0000-0002-6173-0571
КИРИЛЕНКО Анатолій Опанасович — ORCID 0000-0002-8717-5334
КОЗАК Людмила Володимирівна — ORCID 0000-0001-9448-0030
КУЛЕШОВ Олексій Миколайович — ORCID 0000-0001-7939-3641
ЛОГВІНОВ Юрій Федорович — ORCID 0000-0002-6011-8823
ЛУЦЕНКО Владислав Іванович — ORCID 0000-0003-3753-7074
ЛУЦЕНКО Ірина Владиславівна — ORCID 0000-0002-8568-0652
МЕЛЕЖИК Петро Миколайович — ORCID 0000-0002-0503-5160
ОЛІЙНИК Сергій Володимирович — ORCID 0000-0001-6073-8531
ПЛАКСІН Сергій Вікторович — ORCID 0000-0001-8302-0186
ПУЛЯЄВ Валерій Олександрович — ORCID 0000-0001-6705-2006
ТАРАПОВ Сергій Іванович — ORCID 0000-0002-8958-5003
ЧЕРПАК Микола Тимофійович — ORCID 0000-0001-5214-5015
ЧОРНОГОР Леонід Феоктистович — ORCID 0000-0001-5777-2392
ЯМПОЛЬСЬКИЙ Валерій Олександрович — ORCID 0000-0003-3702-4551
ЯНОВСЬКИЙ Фелікс Йосипович — ORCID 0000-0002-9529-5969

ЗМІСТ

ВСТУП
3

Розділ 1. СУЧАСНИЙ СТАН
5

Розділ 2. ОСНОВНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ У СВІТІ ТА В УКРАЇНІ
12

Розділ 3. НАЙПЕРСПЕКТИВНІШІ НАПРЯМИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ до 2030 року
15

3.1. Пріоритетні фундаментальні напрями
18

3.2. Прикладні напрями
28

3.3. Національна безпека
33

3.4. Математичне моделювання
36

3.5. Експериментальна база
39

3.6. Інтеграція науки, освіти та виробництва
43

3.7. Очікувані результати
46

Розділ 4. ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ПОДАЛЬШОГО РОЗВИТКУ ГАЛУЗІ В НАН УКРАЇНИ
49

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ
54

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ
58

Наукове електронне видання

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ВІДДІЛЕННЯ ФІЗИКИ І АСТРОНОМІЇ НАН УКРАЇНИ
Наукова рада з проблеми «Радіофізика
і мікрохвильова електроніка»

СУЧАСНИЙ СТАН, СВІТОВІ ТЕНДЕНЦІЇ, ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ПОДАЛЬШОГО РОЗВИТКУ ГАЛУЗІ

АНАЛІТИЧНА ЗАПИСКА

до Стратегії розвитку
наукових досліджень
у НАН України за напрямом
«РАДІОФІЗИКА І МІКРОХВИЛЬОВА ЕЛЕКТРОНІКА»
(на період до 2030 року)

Редактор *Анастасія Мережко*

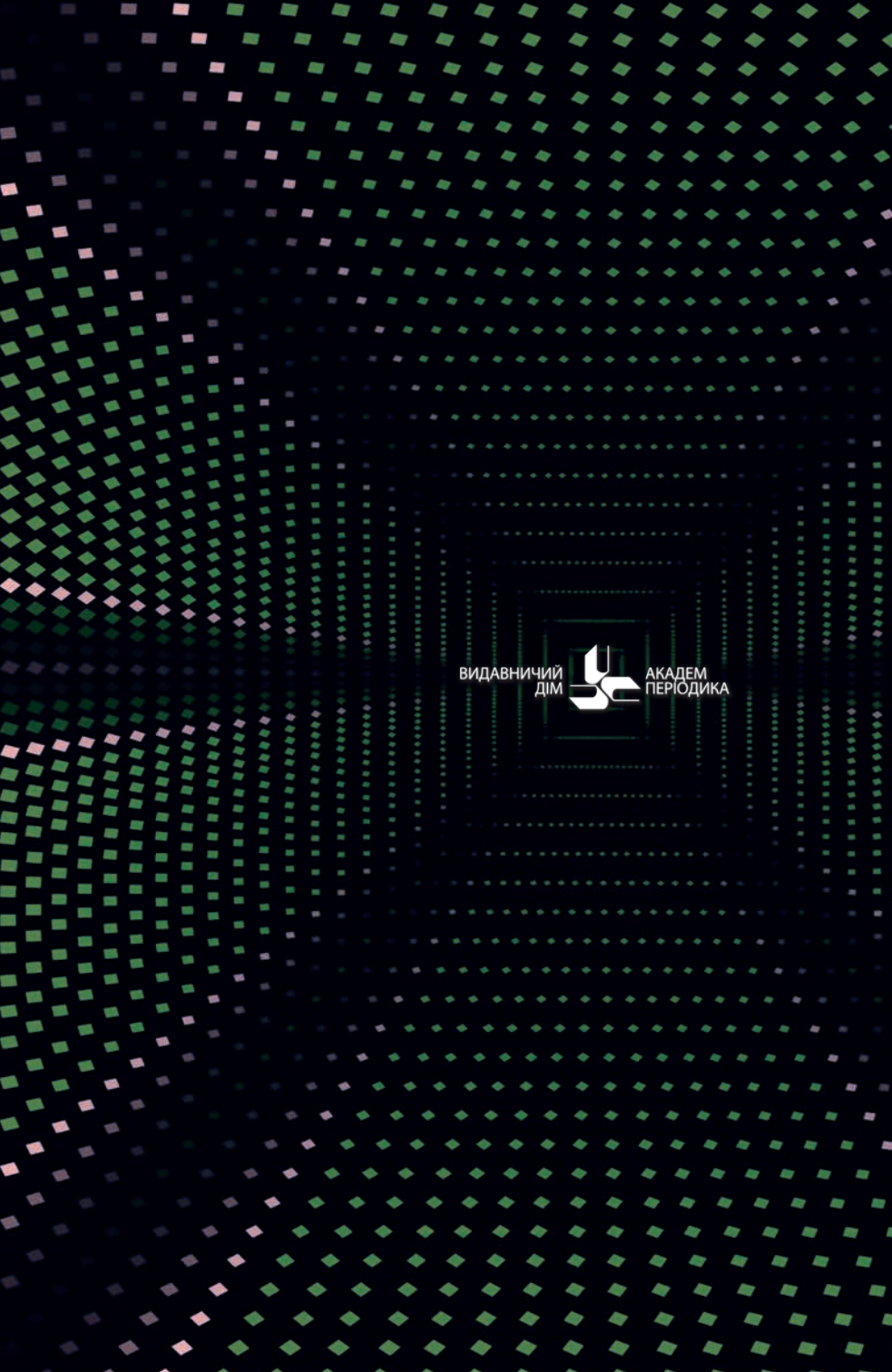
Коректор *Анастасія Дубровіна*

Художньо-технічне оформлення *Ольги Бурдік*
Верстка *Олени В. Вакаренко*

Підписано до друку 30.09.2026. Формат 84 × 108/32.
Гарн. Bandera Pro. Об'єм даних 973 Кб. Зам. № 8194е.

Видавець і виготовлювач
Видавничий дім «Академперіодика» НАН України
01024, Київ, вул. Терещенківська, 4

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
видавничої справи серії ДК № 544 від 27.07.2001


ВИДАВНИЧИЙ ДІМ
АКАДЕМ ПЕРІОДИКА