

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

КОСМІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ В УКРАЇНІ

2016–2018

**Звіт
до COSPAR**

*Звіт підготовлений
Інститутом космічних досліджень
НАН України та ДКА України*

Науковий редактор О.П. ФЕДОРОВ

УДК 001.891(15)
ББК 22.6
К71

ІКД НАНУ та ДКАУ
Інститут космічних досліджень
Національної академії наук України
та Державного космічного агентства України
Україна
03187, Київ
вул. Академіка Глушкова, 40
<http://www.ikd.kiev.ua>

НАН України
Національна академія наук України
Україна
01601, Київ-30
вул. Володимирська, 54
<http://www.nas.gov.ua>

Космічні дослідження в Україні. 2016—2018 / Наук. ред. :
К71 О.П. Федоров ; ІКД НАНУ та ДКАУ. — К. : Академперіодика,
2018. — 168 с.

ISBN 978-966-02-8589-7

У збірнику представлено короткий огляд основних результатів космічних досліджень, проведених українськими ученими у 2016—2018 роках. Висвітлюється поточний стан української космічної науки за тематичними напрямками: астрономія, вивчення Землі та навколосемного простору, науки про життя, космічні технології та матеріалознавство, суттєва увага приділяється актуальним прикладним аспектам космічного моніторингу Землі. Збірник є звітом України до Міжнародного комітету з космічних досліджень COSPAR.

Для читачів, які цікавляться космічними дослідженнями.

УДК 001.891(15)
ББК 22.6

ISBN 978-966-02-8589-7

© ІКД НАНУ та ДКАУ, 2018
© Академперіодика, оформлення, 2018

Космічна астрономія і астрофізика

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ ЮПІТЕРА НА УТР-2, УРАН, ГУРТ СИНХРОННО З МІСІЄЮ JUNO (В. Захаренко, С. Єрін, О. Коноваленко, А. Браженко, Б. Цекконі, Ф. Зарка, Х.О. Рюкер, М. Панченко, М. Імаї, А. Лекашо, В. Рябов, Г. Литвиненко, І. Бубнов, О. Ульянов, М. Сидорчук, С. Степкін, В. Колядін, В. Мельник, В. Доровський, О. Станіславський, О. Христенко, П. Токарський, М. Калініченко, О. Резніченко, В. Лісаченко, В. Борцов, Г. Квасов, Я. Васильєва, А. Скорик, А. Шевицова, К. Милостна, Р. Ващишин, А. Французенко, О. Івантишин, А. Лозинський)	7
--	---

Дослідження ближнього космосу

ВПЛИВ ІНФРАЗВУКУ НА ІОНОСФЕРУ: ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ІОНОСФЕРНОЇ РЕАКЦІЇ НА СИГНАЛ НАЗЕМНОГО АКУСТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАЧА (Ю.О. Селіванов, Ю.Г. Рапопорт, О.К. Черемних)	15
ЛОКАЛЬНИЙ ГЕОМАГНІТНИЙ ПРОГНОЗ (Д. Власов, О. Парновський)	20
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАРТ ВАРИАЦИЙ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ, СОЗДАНЫХ ПО ДАННЫМ ГЛОБАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ, ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЕННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ (Е.М. Занимонский, Ю.М. Ямпольский, Г. Ныкель, М. Фигурский)	22
ПОИСК СВЯЗИ МЕЖДУ ВАРИАЦИЯМИ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ И ПОТОКОВ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ПРИМЕРЕ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ 17 МАРТА 2013 г. (А.В. Дудник, Е.М. Занимонский)	26
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ НАД УКРАИНОЙ В 2016–2018 гг. (Л.Ф. Черногор, И.Ф. Домнин, Л.Я. Емельянов, Д.В. Котов, М.В. Ляшенко, С.В. Панасенко, А.В. Богомаз)	34
НАЗЕМНА ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА КОСМІЧНОГО ПРОЕКТУ «ІОНОСАТ–МІКРО» (О.В. П'янкova, О.М. Протас, Г.В. Лізунов)	42
ПЕРЕНЕСЕННЯ ЗАМАГНІЧЕНИХ ЧАСТИНОК У ВИПАДКОВОМУ ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ (О.М. Черняк, В.І. Засенко)	47

Космічна біологія

КОСМІЧНА БІОЛОГІЯ: РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ (Є.Л. Кордюм) ..	52
ОЦІНКА НЕЙРОТОКСИЧНОСТІ ЗБАГАЧЕНОГО НОВІТНИМИ КАРБОНОВИМИ НАНОЧАСТИНКАМИ НЕОРГАНІЧНОГО АНАЛОГУ МАРСІАНСЬКОГО ПИЛУ (Н. Позднякова, Т. Борисова)	62
ДОСЛІДЖЕННЯ КЛІТИННИХ ТА ТКАНИННИХ МЕХАНІЗМІВ АДАПТАЦІЇ РОСЛИН ДО ІМІТОВАНОЇ МІКРОГРАВІТАЦІЇ (О.А. Кравець, А.І. Ємець, І.І. Горюнова, С.Г. Плоховська, В.Д. Оленєва, Д.І. Литвин, С.І. Співак, Я.Б. Блом)	66

Дослідження Землі з космосу

ГЛИБИННИЙ ПІДХІД ДО КЛАСИФІКАЦІЇ СІЛЬСЬКО-ГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР НА ОСНОВІ ВЕЛИКИХ ОБСЯГІВ ДАНИХ (Н. Куссуль, А. Шелестов, М. Лавренюк, Б. Яйлимов, А. Колотій, Г. Яйлимова, С. Скакун, Л. Шуміло)	73
ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ ПОСІВІВ ОЗИМОЇ ПШЕНИЦІ ВПРОДОВЖ ВЕСНЯНО-ЛІТНЬОЇ ВЕГЕТАЦІЇ 2016 р. ЗА ВЕГЕТАЦІЙНИМИ ІНДЕКСАМИ СУПУТНИКА SENTINEL-2А (НА ПРИКЛАДІ ЛІСОСТЕПОВОЇ ЗОНИ УКРАЇНИ) (В.І. Лялько, О.І. Сахацький, Г.М. Жолобак, О.М. Сибірцева, С.С. Дугін, М.В. Ваколюк, Ю.В. Захарчук)	80

ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ КОСМІЧНОГО МОНИТОРИНГУ ДОВКІЛЛЯ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ТА ОЦІНКИ ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНИХ ЗМІН В ЗОНІ АТО УКРАЇНИ (В.І. Лялько, Л.О. Єлістратова, О.А. Апостолов)	83
ОЦІНКА ЕРОЗІЙНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ ЗА ДАНИМИ ДЗЗ, КЛІМАТИЧНИХ ФАКТОРІВ ТА РОСЛИННОСТІ (В.І. Лялько, Л.О. Єлістратова, А.Я. Ходоровський, О.А. Апостолов)	86
КОСМІЧНИЙ МОНИТОРИНГ НЕБЕЗПЕЧНОГО СТАНУ ПОВІТРЯНОГО БАСЕЙНУ В ЕКОСИСТЕМАХ ІНДУСТРІАЛЬНИХ ЦЕНТРІВ (О.Т. Азімов, А.Я. Буніна)	88
КАРТУВАННЯ ІНДЕКСУ ЛИСТКОВОЇ ПОВЕРХНІ ЗА ДОПОМОГОЮ РАДАРНИХ ЗНІМКІВ SENTINEL-1 З ПОДВІЙНОЮ ПОЛЯРИЗАЦІЄЮ В УМОВАХ ПЕРЕСІЧЕНОЇ МІСЦЕВОСТІ (С.А. Станкевич, А.О. Козлова, М.С. Лубський, М.О. Свіденюк, І.О. Пестова, О.П. Закусило)	92
ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ІНФОРМАТИВНИХ ОЗНАК ДЛЯ ПОШУКУ ПОКЛАДІВ ВУГЛЕВОДНІВ НА МОРСЬКОМУ ШЕЛЬФІ З КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ (А.В. Хижняк, А.Ю. Порушкевич, О.Д. Федоровський)	98
КОСМІЧНИЙ ГЕОМОНИТОРИНГ КЛІЙСЬКОЇ ДЕЛЬТИ ДУНАЮ (О.Д. Федоровський, А.В. Хижняк, О.В. Томченко, Т.М. Дьяченко, А.Ю. Порушкевич)	104
МЕТОДИКА ВИЯВЛЕННЯ ЛОКАЛЬНИХ ДІЛЯНОК НЕЛЕГАЛЬНОГО ВИДОБУТКУ БУРШТИНУ ЗА МАТЕРІАЛАМИ БАГАТОЗОНАЛЬНОЇ КОСМІЧНОЇ ЗЙОМКИ СИСТЕМИ LANDSAT (В.Є. Філіпович, Р.М. Шевчук)	109

Космічні технології та матеріалознавство

НАНОСПУТНИК PolyITAN-2-SAU: ДИНАМИЧЕСКИЙ И ПРОЧНОСТНОЙ АНАЛИЗ НА ЭТАПЕ ВЫВЕДЕНИЯ (А.С. Цыбенко, Б.М. Рассемакин, А.А. Рыбалка)	112
ТОНКОСТІННІ ЗВАРНІ КОНСТРУКЦІЇ ПЕРЕТВОРЮВАНОВОГО ОБ'ЄМУ КОСМІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ (Л.М. Лобанов, В.С. Волков)	119
СТВОРЕННЯ ІНТЕГРОВАНОГО УНІВЕРСАЛЬНОГО НАВІГАЦІЙНОГО КОМПЛЕКСУ НА ОСНОВІ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ГІРОСКОПІВ І МАЯТНИКОВИХ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ (О.Ю. Златкін, В.І. Чумаченко, С.В. Олійник, Ю.О. Кузнецов)	126
НАЗЕМНІ РАДІАЦІЙНІ ВИПРОБУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ ТА ПРИЛАДІВ КОСМІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ: ВИМОГИ ТА ПРАКТИКА (В.Т. Маслоук, М.І. Романюк, Й.Й. Гайніш, І.Г. Мегела, Г.Ф. Пітченко, О.М. Турховський, О.В. Доценко, В.М. Маслей, С.В. Луньов)	131
РАЗРАБОТКА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И КЕРАМИЧЕСКИХ ТЕПЛО-ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ МНОГОРАЗОВЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ (Г.А. Фролов, О.Н. Григорьев, В.П. Солнцев, Ю.И. Евдокименко, В.М. Кисель, И.П. Нешпор)	139
НАДЛЕГКА СИСТЕМА ТЕПЛОВОГО ЗАХИСТУ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ: КОНЦЕПЦІЯ, МЕТОДИ ТА МОДЕЛЮВАННЯ (В.О. Яценко, Ю.В. Фальченко, Л.В. Петрушинець)	148
ОКИСЛЕНИЕ ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ZrV ₂ НА УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ ПОДЛОЖКАХ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОТОКАХ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ (О. Григорьев, И. Подчерняева, Г. Фролов, М. Парко, И. Нешпор, Ю. Евдокименко, В. Кисель, Д. Ведель, М. Кютемейер)	153
ЗАСТОСУВАННЯ ПРЯМОГО МЕТОДУ ЛЯПУНОВА ТА АЛГОРИТМІВ ЕЛІПСОЇДАЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ В ЗАДАЧАХ КЕРУВАННЯ КОСМІЧНИМИ АПАРАТАМИ (В.М. Кунцевич, В.В. Волосов, В.М. Шевченко)	160
СПИСОК ОРГАНІЗАЦІЙ-ВИКОНАВЦІВ	166

ПЕРЕДМОВА

У збірнику представлені основні результати науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт в галузі вивчення та використання космосу, виконаних провідними українськими організаціями у 2016–2018 роках. Він є звітом України в Міжнародний комітет з космічних досліджень COSPAR, який видається українською та англійською мовами кожні два роки. Тематика робіт відображає пріоритети Програми космічних досліджень НАН України та Загальнодержавної цільової науково-технічної космічної програми України.

Розділи збірника включають, здебільшого, оглядові статті, які, відповідно до класифікації COSPAR, згруповані по наступних наукових напрямках: астрономія і астрофізика, дослідження ближнього космосу, космічна біологія, дослідження Землі з космосу, космічні технології і матеріалознавство.

Науковий напрям «Астрономія і астрофізика» представляє масштабна робота фахівців РІ НАНУ в співавторстві з колегами з Франції, Австрії, США, Японії та іншими українськими учасниками щодо результатів досліджень випромінювання Юпітера з використанням високочутливих українських радіотелескопів для наземної підтримки космічної місії JUNO. Проведено низькочастотні багатоантенні синхронні наземно-космічні спостереження, напрацьовано методи обробки даних різних астрономічних інструментів, що дозволить глибше вивчати фізичні процеси генерації радіовипромінювання Юпітера, його природних супутників, планет Сонячної системи, здійснювати пошук радіовипромінювання екзопланет.

Другий розділ збірника презентує результати фундаментальних і прикладних досліджень українських наукових шкіл за одним з актуальних напрямів світової космічної науки – вивчення процесів і взаємодій в системі атмосфера–іоносфера–магнітосфера Землі. Стаття фахівців ІКД НАНУ та ДКАУ присвячена розкриттю фізичної суті механізмів передачі енергії від поверхні Землі в іоносферу через акустичний канал; розроблено теоретичний опис процесу поширення інфразвукового сигналу від наземного джерела через атмосферу. В рамках розвитку наукових основ служби прогнозування космічної погоди отримано нову модель локальних геомагнітних збурень, придатну для впровадження в оперативну практику (ІКД НАНУ та ДКАУ, Головний центр спеціального контролю ДКАУ). Ряд статей з вивчення нестационарних процесів в навколосемному космосі представлено харківськими фізиками. Науковцями РІ НАНУ та їх польськими колегами обговорюються методи діагностики і візуалізації з високим розрізненням по простору і часу іоносферних неоднорідностей на основі даних з геостационарних та низькоорбітальних супутників, робота фахівців Інституту іоносфери НАНУ і МОНУ продовжує багаторічні системні теоретичні та експериментальні дослідження стану геокосмосу над територією України за даними наземної іоносферної обсерваторії. Наведено опис інформаційної системи збору, оброблення та розповсюдження даних космічного експерименту «Іоносат-Мікро», створеної в рамках підготовки національного іоносферного проекту «Іоносат» з використанням українського супутника «Мікросат-М» (ІКД НАНУ та ДКАУ), запропоновано підхід до моделювання процесів перенесення замагнічених частинок в низькочастотних хвилях, що поширюються в ближньому космосі (ІТФ НАНУ).

Наступний цикл статей висвітлює діяльність наукових центрів України в галузі космічної біології (профільні інститути НАНУ, КНУ ім. Т. Шевченка, Національний ботанічний сад НАНУ). Представлено результати робіт за напрямками біології рослин

на клітинному, молекулярному та тканинному рівнях в умовах модельованої мікрогравітації. Велися пошуки нових підходів до визначення властивостей субстратів, адекватних завданням космічного рослинництва, запропоновано оригінальний біологічний експеримент на наносупутнику, метою якого є з'ясування адаптивного потенціалу рослин в умовах космічного польоту за параметрами візуального спостереження, проведено оцінку нейротоксичності збагаченого новітніми карбоновими наночастинками неорганічного аналогу марсіанського пилу.

Наступний розділ збірника присвячений дослідженням в галузі супутникових спостережень Землі. У статті фахівців ІКД НАНУ та ДКАУ в співавторстві з іншими українськими та зарубіжними учасниками запропоновано багаторівневий підхід глибинного навчання для побудови карт земного покриття на основі великих обсягів даних з різних джерел (оптичних і радіолокаційних), що дозволило підвищити точність карт класифікації сільськогосподарських культур. Науковцями ЦАКДЗ ІГН НАНУ з метою вирішення актуальних екологічних та природоресурсних задач відпрацьовано методи космічного моніторингу стану посівів озимої пшениці у лісостеповій зоні України, небезпечного стану повітряного басейну в екосистемах індустриальних центрів, ерозійної небезпеки території України, пошуку покладів вуглеводнів на морському шельфі та ін.

Завершує збірник цикл статей щодо поточних результатів теоретичних і експериментальних досліджень з розвитку космічних технологій, створення приладів, матеріалів і систем для космічної техніки. В НТУУ «КПІ» в рамках міжнародного космічного проекту QB50 розроблено наносупутник PolyITAN-2-SAU, який запущений на орбіту і є частиною наукової мережі з вивчення термосфери Землі. В роботі ІЕЗ НАНУ обґрунтовано можливість створення суцільнозварних тонкостінних конструкцій перетворюваного об'єму з прийнятними технологічними і геометричними характеристиками, оптимізованих для застосування у відкритому космосі. В НВП ХАРТРОН-АРКОС створено дослідний зразок інтегрованого універсального навігаційного комплексу з високими характеристиками на основі волоконно-оптичних гіроскопів і маятникових акселерометрів для систем управління літальних апаратів. Серед результатів робіт – організація радіаційних випробувань матеріалів та приладів космічного призначення на базі електронного прискорювача (ІЕФ НАНУ, ДП КБ «Південне», Луцький національний технічний університет), технічні рішення по створенню систем теплового захисту космічної техніки (ІПМ НАНУ, ІЕЗ НАНУ, ІКД НАНУ та ДКАУ), нові ефективні методи та алгоритми керування орієнтацією космічних апаратів (ІКД НАНУ та ДКАУ).

В цілому, представлений у збірнику огляд ілюструє поточний потенціал і багатоаспектність тематики української космічної науки. Ряд результатів одержано в рамках міжнародних проектів, програм та грантів, зокрема, європейської програми Горизонт 2020, більшість робіт доповідалась на щорічній Українській конференції з космічних досліджень, міжнародних семінарах і конференціях.

Збірник призначений для фахівців в області вивчення космосу та читачів, які цікавляться космічними дослідженнями.

ГЛИБИННИЙ ПІДХІД ДО КЛАСИФІКАЦІЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР НА ОСНОВІ ВЕЛИКИХ ОБСЯГІВ ДАНИХ

Н. Куссуль^{1,2}, А. Шелестов^{2,1}, М. Лавренюк^{1,2}, Б. Яйлимов¹, А. Колотій^{1,2},

Г. Яйлимова^{1,3}, С. Скакун⁴, Л. Шуміло^{1,2}

¹ Інститут космічних досліджень НАН України та ДКА України (ІКД НАНУ та ДКАУ)

² Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського» (НТУУ «КПІ»)

³ Київський національний університет ім. Т. Шевченка (КНУ)

⁴ Університет Меріленда, Колледж Парк, Меріленд, США

Останні кілька років в дистанційному зондуванні Землі можна назвати роками «великих об'ємів даних». Протягом 2013–2016 рр. в межах європейської програми Copernicus були запущені декілька оптичних та радарних (SAR) супутників спостереження Землі з високим просторовим розрізненням (10–30 м), зокрема, Sentinel-1A/B та Sentinel-2A/B [1]. Відповідні набори даних є у вільному доступі та надаються в операційному режимі. При використанні оптичних даних часто виникають обмеження через хмари та тіні від них. Дані SAR Sentinel-1 (A і B) є незалежними від погодних умов. Все це, а також високе просторове розрізнення (10 м) і регулярне оновлення даних з шестиденним інтервалом супутників Sentinel-1 відкриває нові можливості для розв'язання широкого спектра прикладних задач моніторингу навколишнього середовища, в тому числі, в галузі сільського господарства, на основі високоякісних часових наборів супутникової інформації із застосуванням технологій злиття різнорідних геопросторових даних [2–4]. Створення карт земного покриву на основі супутникових даних з високим просторовим розрізненням є компонентом вирішення таких важливих задач як оцінка площ посівів [4], прогнозування урожаю [5] та оцінка ризиків [6–9].

У даній роботі пропонується чотирьохрівнева архітектура глибинного навчання для класифікації багатоспектральних супутникових зображень як оптичних, так і радіолокаційних, на рівні пікселів [10, 11, 12]. Ядром архітектури є ансамбль згорткових нейронних мереж (CNN) [13, 14]. Запропонована архітектура

використана для класифікації сільськогосподарських культур на основі часових рядів даних Sentinel-1 та забезпечує достатньо високу точність для використання її в операційному режимі на національному рівні.

Опис даних

Розглядається проблема побудови карт земного покриву та карти класифікації сільськогосподарських культур для Київської області та території всієї України з використанням багатоспектральних зображень з різних джерел, зокрема, із супутників Sentinel-2 та Sentinel-1A [15]. Область дослідження класифікується на тринадцять класів, включаючи дев'ять основних сільськогосподарських культур (озима пшениця, озимий ріпак, ярі зернові, соя, кукурудза, соняшник, цукровий буряк, озимий ячмінь, горох), а також чотири класи несільськогосподарських об'єктів (вода, ліси, луки та гола земля). Це досить велика площа (28 тис. квадратних кілометрів для території Київської області та 603 тис. квадратних кілометрів для України) з різними типами земного покриву та сільськогосподарськими культурами.

Для вегетаційного сезону 2016 року (з жовтня 2015 по вересень 2016) для Київської області було використано 5 зображень Sentinel-2 і двадцять Sentinel-1. Зображення Sentinel-1A пройшли процедуру попередньої обробки, яка включала калібрування, некогерентне накопичення (multi-looking з вікном 2×2), фільтрацію (з вікном 3×3 і алгоритмом «Refined Lee») та корекцію рельєфу за допомогою SRTM DEM. В якості вхідних даних для класифікації в модель

подавався часовий ряд з чотирьох спектральних каналів для кожної сцени Sentinel-2 та двох каналів з поляризаціями VV та VH з кожної сцени Sentinel-1.

Для класифікації сільськогосподарських культур по всій території України використовувалася часовий ряд даних Sentinel-1 [16, 17, 18]. Для території України було використано 9 полос Sentinel-1. Кожна із цих полос складається з декількох зображень (табл. 1, рис. 1) і будується шляхом їх злиття за одну дату. Для покриття території України даними Sentinel-1A протягом вегетаційного сезону 2016 р. було використано більше 800 зображень, загальний обсяг даних склав понад 1,5 Тб.

Набори даних для побудови карти земного покриву та карти класифікації були зібрані під час двоетапного дослідження вздовж доріг окремо для озимих культур (навесні 2016 р.) та літніх культур (влітку 2016 р.) – 5526 зразків для калібрування та 2154 зразків для валідації для основних сільськогосподарських культур та несільськогосподарських об'єктів (рис. 2). Класи, що не є сільськогосподарськими культурами, були додані на основі фотоінтерпретації з використанням зображень високого просторового розрізнення від Google Maps. Збір даних здійснювався з урахуванням рекомендацій ЖЕСАМ у межах 4 основних кліматичних зон України (Полісся, лісостеп, степ та гори) (рис. 3).

Методологія та продукти

При класифікації культур з використанням багатоспектральних супутникових зображень слід враховувати наступні проблеми, що виникають при класифікації. По-перше, пікселі супутникового зображення містять фізичні значення. Зокрема, кожен піксель оптичного зображення містить значення спектральної відбивної здатності в декількох спектральних каналах і може бути покритий хмарами та тінями від них; в той час як кожен піксель радіолокаційних даних характеризується інтенсивністю зворотного розсіювання та фазою в кількох поляризаціях. Обидва джерела даних мають багатовимірний характер. Тому глибинне навчання має вирішальне значення для класифікації земного покриву, для злиття даних різномірної природи.

Для цього запропонована чотирьохрівнева архітектура для класифікації типів посівів на основі багатоспектральних супутникових зображень. Цими рівнями є: попередня обробка,

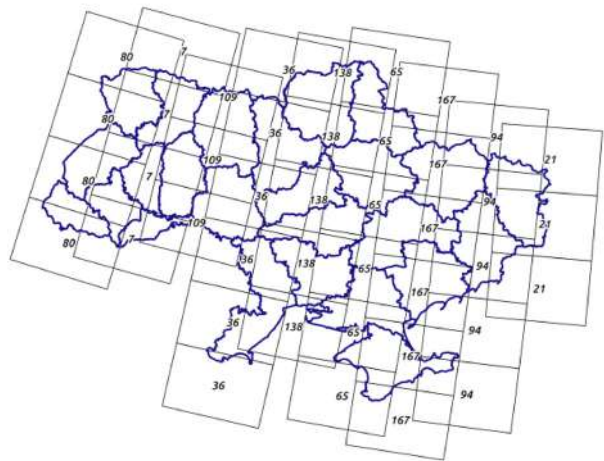


Рис. 1. Покриття території України даними Sentinel-1A

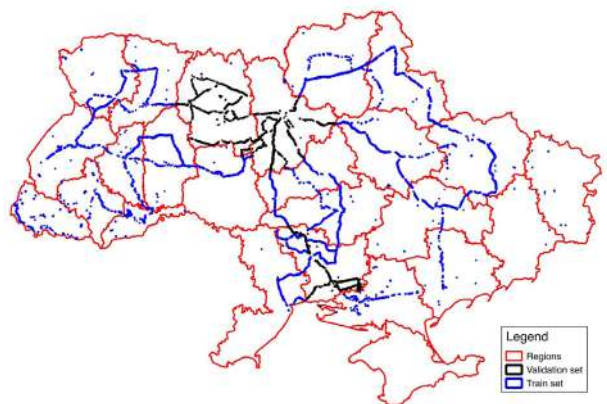


Рис. 2. Розподіл наземних даних по території України

Таблиця 1
Обсяг даних, необхідний для картографування земного покриву для території України

Україна			
Полоса	Кількість зображень для кожної полоси	Кількість полос 2016 р.	Розмір однієї полоси, Гб
7	4	19	7,19
21	3	21	2,32
36	6	20	11,31
65	6	19	12,08
80	4	19	7,14
94	5	20	8,26
109	3	22	6,69
138	5	22	11,89
167	5	23	10,67
Всього	41	185	1576,08

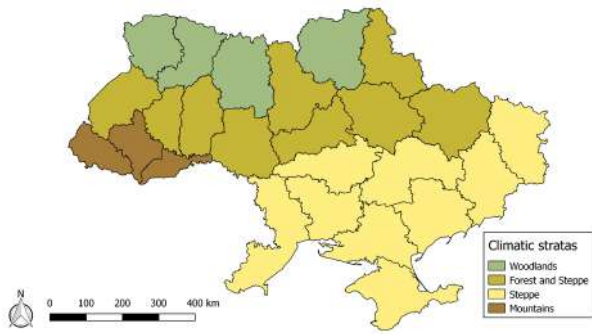


Рис. 3. Основні кліматичні зони України

контрольована класифікація, постобробка та геопросторовий аналіз результатів (рис. 4).

Оскільки оптичні супутникові зображення можуть містити хмари та тіні від них, виникає проблема відсутності даних на зображеннях. Більшість класифікаторів приймають лише дійсні значення пікселів у якості вхідних даних, тому слід виконувати попередню обробку, щоб визначити (або заповнити пропуски) відсутніх значень. Дана процедура виконується в межах першого рівня архітектури. Наступним кроком є контрольована класифікація (рівень II), яка є основою даної архітектури. Пропонується двовимірна структура CNN для вивчення спектральних та просторових особливостей.

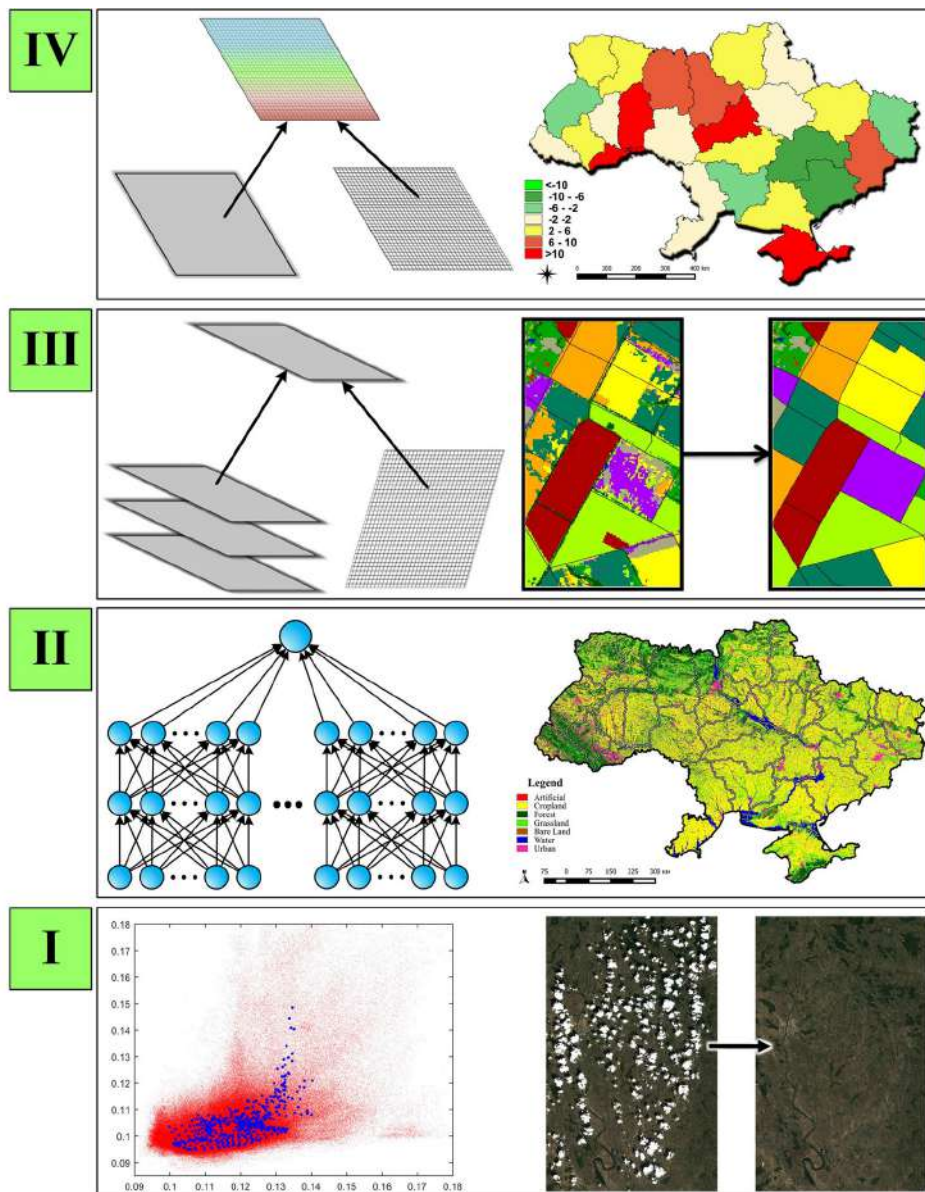


Рис. 4. Чотирирівнева модель глибокого навчання для класифікації супутникових даних та аналізу змін земного покриву / землекористування (I – попередня обробка та відновлення пропусків у оптичних зображеннях через хмари / тіні, II – контрольована класифікація, III – постобробка з використанням додаткових геопросторових даних для покращення карт класифікації, IV – геопросторовий аналіз продуктів високого рівня, наприклад, оцінка площ посівів)

Рівні III та IV спрямовані на покращення отриманої класифікації з наявними геопросторовими шарами та створення високорівневих продуктів.

Для попередньої обробки використовуються самоорганізовані карти Кохонена (SOM), проводиться сегментація оптичних зображень та подальше відновлення відсутніх даних у часовому ряді супутникових знімків [15]. SOM тренуються для кожного спектрального каналу окремо. Відсутні значення відновлюються за допомогою спеціальної процедури, яка замінює відсутні компоненти вхідного зразка ваговими коефіцієнтами нейронів. Пікселі, які були відновлені, маскуються, обчислюється кількість вільних сцен, доступних для кожного пікселя з оптичних зображень. Ці два шари використовуються для подальшої процедури обробки (на рівні III), щоб покращити отриману карту класифікації [19]. Детальний опис алгоритму відновлення наведено в джерелах [2, 15].

Основним елементом моделі є контрольована класифікація, яка виконується на другому етапі (рівень II). CNN створює ієрархічний набір функцій за допомогою локальної згортки та зняття зразків. Два канали з кожної з двадцяти сцен Sentinel-1A і чотири канали з кожної з п'яти сцен Sentinel-2 утворюють вхідний вектор CNN розмірністю 60 ($20 \times 2 + 5 \times 4$). CNN враховують значення на кожному зображенні та забезпечують більшу точність у порівнянні з традиційними підходами на рівні пікселів. В даному випадку CNN згладжує не лише деякі неправильно класифіковані пікселі, але й невеликі об'єкти, такі як дороги, ліси та інші (з лінійними розмірами в кілька пікселів).

Кожен CNN у відповідному ансамблі складається з двох згорткових шарів, за кожним з яких іде шар максимальної підвибірки і два повністю з'єднаних шари в кінці (рис. 5). В даному дослідженні використано функцію ReLU, яка є однією з найбільш популярних та ефективних функцій активації для нейронних мереж. Перевагами використання ReLU є біологічна правдоподібність, ефективне обчислення та градієнтне поширення. Таким чином, функція ReLU швидша та ефективніша для навчання CNN, у порівнянні з сигмоїдною функцією. Кожна з CNN має таку структуру згортки та шар максимальної підвибірки, але відрізняється навчальними фільтрами і кількістю нейронів у прихованому шарі: 60, 70, 80, 90 і 100 для п'яти CNN, відповідно.

Щоб покращити якість отриманої карти, розроблено кілька алгоритмів фільтрації, виходячи з наявної інформації про якість вхідних даних та меж полігонів [19].

Дані фільтри використовують попиксельну карту класифікації і спеціально розроблені правила для виявлення кількох ділянок класів в межах полігона. В результаті отримано чітку карту класифікації з використанням фільтрації. Остаточний рівень обробки даних забезпечує злиття даних з різномірною інформацією, зокрема, статистичними даними, векторними геопросторовими даними, соціально-економічною інформацією тощо. Це дозволяє інтерпретувати результати класифікації, вирішити прикладні задачі для різних галузей та надавати інформацію для підтримки та прийняття рішення. Наприклад, карта класифікації може бути використана для оцінки площ посівів [6].

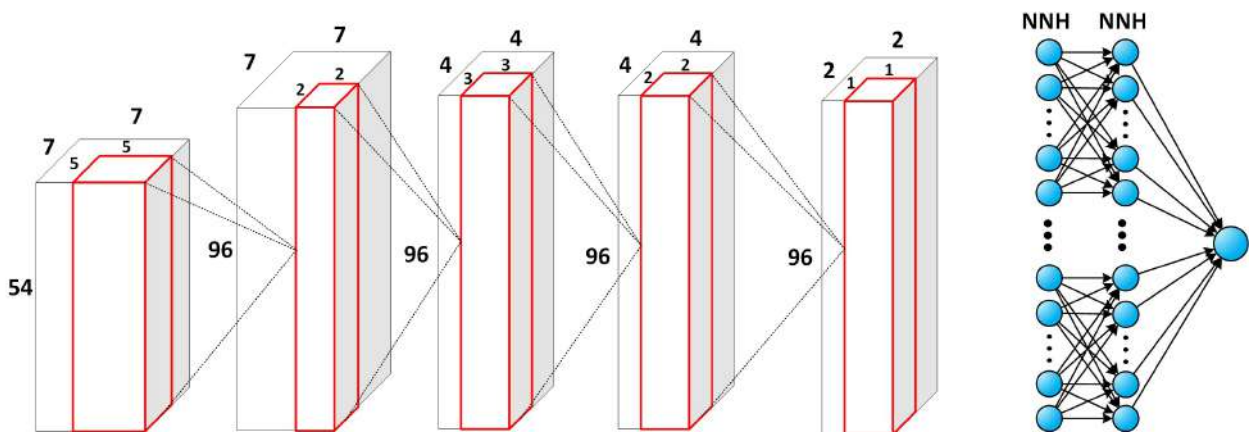


Рис. 5. Архітектура згорткової нейронної мережі

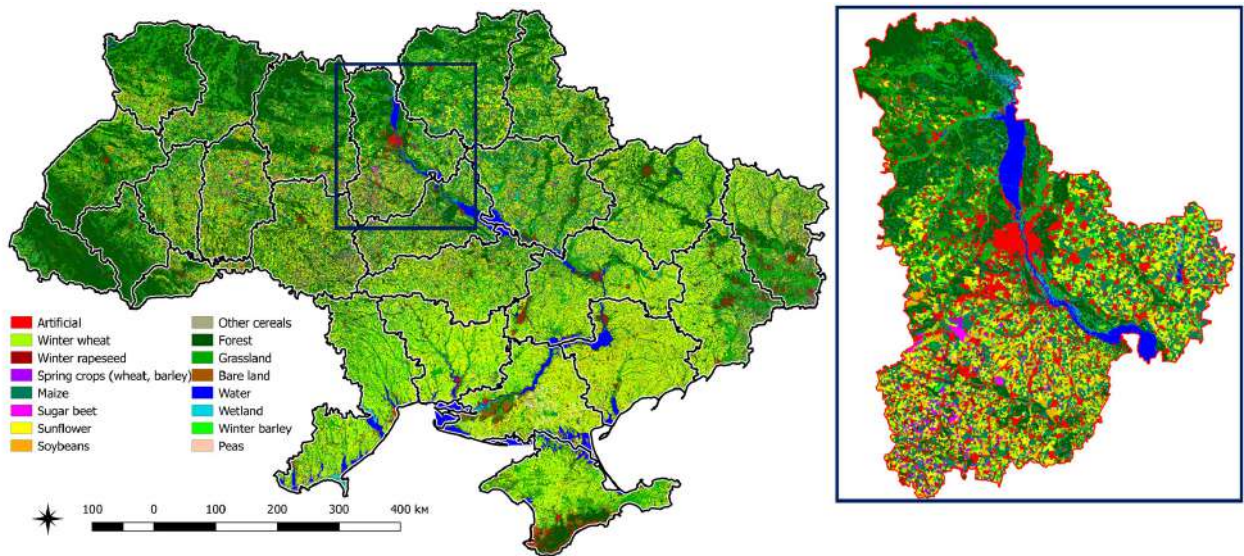


Рис. 6. Карта класифікації для України, 2016 р. (продукт ІКД)

Аналіз результатів

За допомогою запропонованої чотирьох-рівневої архітектури в ІКД НАНУ та ДКАУ отримана карта класифікації сільськогосподарських культур для Київської області та для території України. Дані карти були перевірені на основі незалежних тестових даних наземних досліджень. Загальна точність карти класифікації складає в 2016 році для Київської області більше 93% та більше 90% для всієї території України. Карти земного покриття для території України показані на рис. 6. Для основних сільськогосподарських культур була розрахована точність результатів класифікації на основі

незалежного тестового набору: озима пшениця – 90%, озимий ріпак – 83,6%, кукурудза – 93%, цукрових буряк – 93,6%, соняшник – 94, %, соя – 82,5%, горох – 70,9%.

Для підтвердження достовірності отриманих результатів проведено порівняння із статистичною інформацією Державної статистичної служби України. Також проведено перехресне порівняння площ оброблюваних земель, визначених в ІКД за допомогою методу глибинного навчання, з альтернативною картою, створеною у межах проекту Sen2-Agri (рис. 7).

За офіційними даними, найбільша різниця посівних площ має місце для областей східної частини України (Донецька та Луганська області,

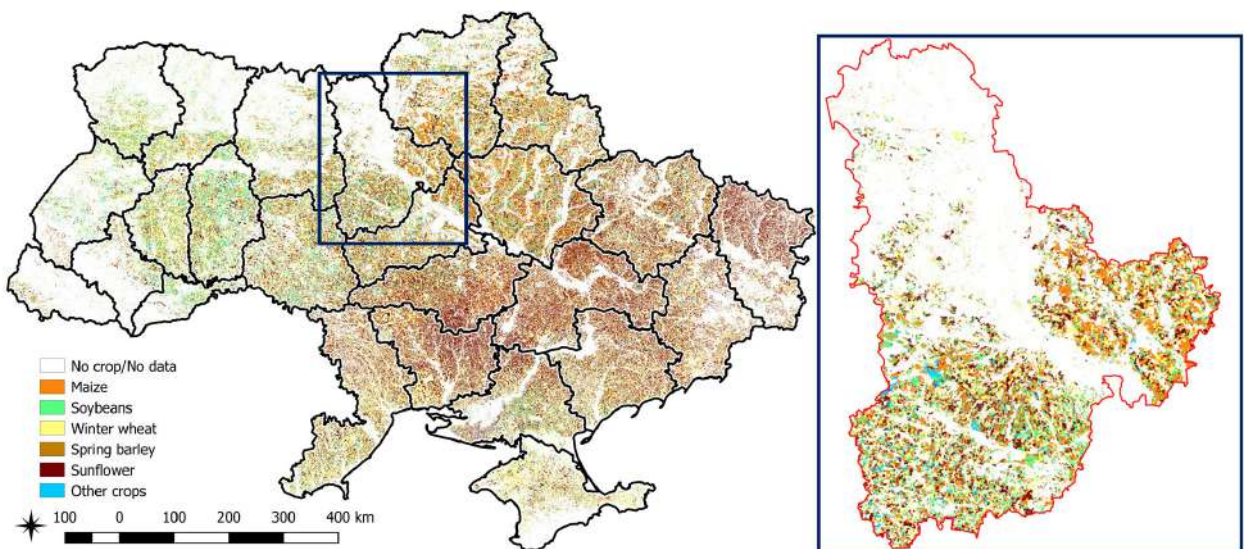


Рис. 7. Карта класифікації для України, 2016 р. (продукт Sen2-Agri)

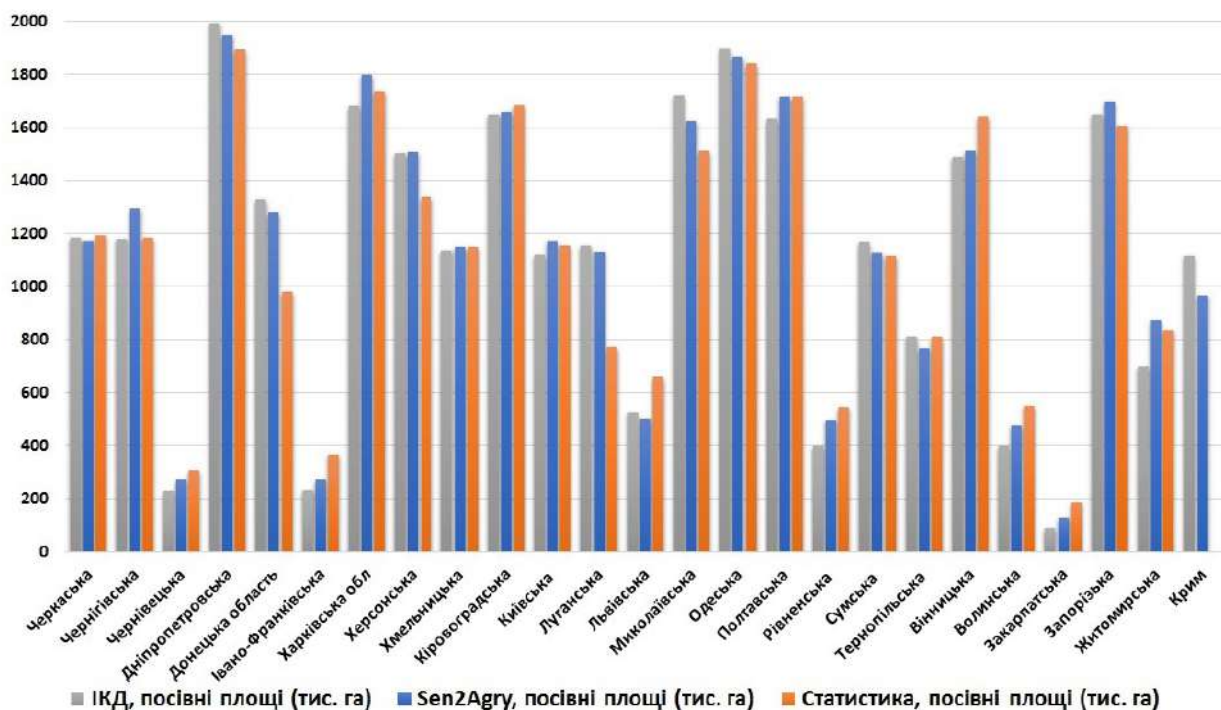


Рис. 8. Порівняння площ оброблюваних земель з офіційною статистикою

рис. 8). Це може бути обумовлено такими причинами як неповне охоплення області статистичною інформацією та суттєве зниження сільськогосподарської діяльності у цих областях [13].

Щодо західної частини України – розбіжності є звичайними для даного регіону і обумовлені специфікою сільського господарства та збору статистичних даних у цьому регіоні.

Для основних культур (кукурудза та озима пшениця) проведено порівняння карт класифікації ІКД та Sen2-Agri з офіційною статистикою по двох областях (табл. 2). Для Київської області добре корелює площа кукурудзи, для Миколаївської області – озимої пшениці.

Таблиця 2

Порівняння карт класифікації культур з офіційною статистикою по двох областях

Вид культури	Площа, тис. га		
	ІКД	Sen2-Agri	Статистика
Київська область			
Кукурудза	314,9	312,6	268
Озима пшениця	204,5	262,4	197,2
Миколаївська область			
Кукурудза	99,7	166,4	132,8
Озима пшениця	480,6	481,0	331,8

Висновки

У даній роботі запропоновано багаторівневий підхід глибинного навчання для побудови карт земного покриву та класифікації типів культур за допомогою багатоспектральних супутникових зображень з різномірних джерел. У його архітектурі використовуються як неконтрольовані, так і контрольовані нейронні мережі для сегментації та подальшої класифікації супутникових зображень. Для цього дослідження використані супутникові дані Sentinel-2 та Sentinel-1A для Київської області та всієї України. В цілому, використання методів глибинного навчання дозволило досягти загальної точності понад 90% для всієї території України в 2016 році (на 9% більше, ніж результати, отримані в межах проекту Sen2-Agri). У майбутньому планується впровадити розроблену архітектуру на основі високопродуктивних хмарних технологій [20] для оперативного оновлення карт земного покриву для всієї території України.

1. Kussul N., Kolotii A., Shelestov A., Lavreniuk M., Bellemans N., Bontemps S., Defourny P., Koetz B. Sentinel-2 for agriculture national demonstration in Ukraine: Results and further steps // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). – 2017. – P. 5842–5845. DOI: 10.1109/IGARSS.2017.8128337.
2. Kussul N., Skakun S., Shelestov A., Lavreniuk M., Yailymov B., Kussul O. Regional scale crop mapping using multi-temporal satellite imagery // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences. – 2015. – P. 45–52.
3. Lavreniuk M.S., Skakun S.V., Shelestov A.Ju., Yalimov B.Ya., Yanchevskii S.L., Yaschuk D.Ju. and Kosteckiy A.M. Large-Scale Classification of Land Cover Using Retrospective Satellite Data // Cybernetics and Systems Analysis. – 2016. – V. 52. – No. 1. – P. 127–138. DOI: 10.1007/s10559-016-9807-4.
4. Francois W., Kussul N., Gueric le Maire, Dupuy S. Towards a set of agrosystem-specific cropland mapping methods to address the global cropland diversity // International Journal of Remote Sensing. – July 2016. – V. 3714, No. 14. – P. 3196–3231. DOI: 10.1080/01431161.2016.1194545.
5. Kogan F., Kussul N., Adamenko T., Skakun S., Kravchenko O., Kryvobok O., Shelestov A., Kolotii A., Kussul O., Lavrenyuk A. Winter wheat yield forecasting: A comparative analysis of results of regression and biophysical models // Journal of Automation and Information Sciences. – 2013. – V. 45. – No. 6. – P. 68–81.
6. Gallego J., Kussul N., Skakun S., Kravchenko O., Shelestov A., Kussul O. Efficiency assessment of using satellite data for crop area estimation in Ukraine // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2014. – V. 29. – P. 22–30.
7. Kussul N., Skakun S., Shelestov A., Kussul O., Yailymov B. Resilience Aspects in the Sensor Web Infrastructure for Natural Disaster Monitoring and Risk Assessment Based on Earth Observation Data // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2014. – V. 7. – No. 9. – P. 3826–3832.
8. Kussul N., Shelestov A., Skakun S. Flood Monitoring from SAR Data // NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. – 2011. – P. 19–29. DOI: 10.1007/978-90-481-9618-0_3.
9. Kravchenko A., Kussul N., Lupian E., Savorsky V., Hluchy L., Shelestov A. Water resource quality monitoring using heterogeneous data and high-performance computations // Cybernetics and Systems Analysis. – 2008. – V. 44. – No. 4. – P. 616–624. DOI:10.1007/s10559-008-9032-x.
10. Kussul N., Shelestov A., Skakun S., Kravchenko O. High-performance intelligent computations for environmental and disaster monitoring // Int. J. Information Technologies & Knowledge. – 2009. – V. 3. – P. 135–156.
11. Kussul N., Shelestov A., Basarab R., Skakun S., Kussul O., Lavreniuk M. Geospatial intelligence and data fusion techniques for sustainable development problems // 11th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications: Integration, Harmonization and Knowledge Transfer (ICTERI 2015), May 14–16, 2015, Lviv, Ukraine. – 2015. – V. 1356. – P. 196–203.
12. Lavreniuk M., Kussul N., Skakun S., Shelestov A., Yailymov B. Regional Retrospective High Resolution Land Cover For Ukraine: Methodology And Results // International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2015 (IGARSS 2015), № 15599383. – P. 3965–3968. DOI: 10.1109/IGARSS.2015.7326693.
13. Kussul N., Lavreniuk N., Shelestov A., Yailymov B., Butko I. Land Cover Changes Analysis Based on Deep Machine Learning Technique // Journal of Automation and Information Sciences. – 2016. – V. 48. No. 5. – P. 42–54. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v48.i5.40.
14. Kussul N., Lavreniuk M., Skakun S., Shelestov A. Deep Learning Classification of Land Cover and Crop Types Using Remote Sensing Data // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2017. – V. 12. – No. 5. – P. 778–782. DOI: 10.1109/LGRS.2017.2681128.
15. Skakun S.V., Basarab R.M. Reconstruction of Missing Data in Time-Series of Optical Satellite Images Using Self-Organizing Kohonen Maps // Journal of Automation and Information Sciences. – 2014. – V. 46. – No. 12. – P. 19–26.
16. Kussul N., Skakun S., Shelestov A., Kussul O. The use of satellite SAR imagery to crop classification in Ukraine within JECAM project // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). – 2014. – P. 1497–1500.
17. Skakun S., Kussul N., Shelestov A.Y., Lavreniuk M. and Kussul O. Efficiency Assessment of Multitemporal C-Band Radarsat-2 Intensity and Landsat-8 Surface Reflectance Satellite Imagery for Crop Classification in Ukraine // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2016. – V. 9. – No. 8. – P. 3712–3719. DOI:10.1109/JSTARS.2015.2454297.
18. Abramov S., Rubel O., Lukin V., Kozhemiakin R., Kussul N., Shelestov A., Lavreniuk M. Speckle reducing for Sentinel-1 SAR data // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). – 2017. – P. 2353–2356. DOI: 10.1109/IGARSS.2017.8127463.
19. Kussul N., Lemoine G., Gallego J., Skakun S., Lavreniuk M. Parcel based classification for agricultural mapping and monitoring using multi-temporal satellite image sequences // The International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2015 IEEE International. – 2015. – P. 165–168. DOI: 10.1109/IGARSS.2015.7325725.
20. Kussul N., Shelestov A., Skakun S. Grid technologies for satellite data processing and management within international disaster monitoring projects // Grid and Cloud Database Management. – 2011. – P. 279–305.

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

**КОСМІЧНІ
ДОСЛІДЖЕННЯ
В УКРАЇНІ
2016—2018**

**Звіт підготовлений
Інститутом космічних досліджень
НАН України та ДКА України**

Науковий редактор
ФЕДОРОВ Олег Павлович

Упорядник
САМОЙЛЕНКО Людмила Іванівна

Видається в авторській редакції

Комп'ютерна верстка
Т.В. Скороход

Підписано до друку 11.07.2016. Формат 60 × 84/8.
Ум. друк. арк. 16,74+1,86 вкл. Обл.-вид. арк. 19,36.
Тираж 100 прим. Зам. № 4612

Видавець і виготовлювач
Видавничий дім «Академперіодика» НАН України
01004, Київ-4, вул. Терещенківська, 4
Свідоцтво про внесення до державного реєстру суб'єктів
видавничої справи серії ДК № 544 від 27.07.2001 р.