



ФЕДОРОВ

Олег Павлович —

член-кореспондент НАН України, директор Інституту космічних досліджень НАН України та ДКА України, голова Наукової ради цільової програми наукових досліджень НАН України «Аерокосмічні спостереження довкілля в інтересах сталого розвитку та безпеки»

ПРО РЕЗУЛЬТАТИ ВИКОНАННЯ ЦІЛЬОВОЇ ПРОГРАМИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НАН УКРАЇНИ «АЕРОКОСМІЧНІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ДОВКІЛЛЯ В ІНТЕРЕСАХ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ТА БЕЗПЕКИ» У 2021 – 2023 рр.

За матеріалами доповіді на засіданні Президії НАН України 3 квітня 2024 року

У доповіді наведено основні результати, отримані під час виконання цільової програми наукових досліджень НАН України «Аерокосмічні спостереження довкілля в інтересах сталого розвитку та безпеки» (ERA-PLANET/UA) у 2021–2023 рр. Роботи за програмою мали на меті подальший розвиток українського сегменту європейського дослідницького простору в галузі супутникових спостережень, а також проблематики оцінювання шкоди довкіллю та продовольчій безпеці держави внаслідок воєнних дій. Отримані наукові й прикладні результати сприятимуть вирішенню нагальних проблем екологічного моніторингу в Україні та здійсненню оцінки шкоди, спричиненої воєнними діями, а також розвитку співпраці науковців НАН України з європейськими партнерами у сфері аерокосмічних спостережень Землі.

Україна приєдналася до міжнародних зусиль із впровадження ідеології сталого розвитку, які набули нової якості з прийняттям на Саміті ООН у 2015 р. Порядку денного в галузі сталого розвитку на період до 2030 року (Agenda 2030). Цей документ визначив 17 глобальних цілей сталого розвитку, спрямованих на просування трьох взаємопов'язаних складових — економічного зростання, соціальної відповідальності і захисту довкілля.

Цілі сталого розвитку окреслюють глобальні пріоритети, для досягнення яких сформульовано завдання та визначено глобальні індикатори для моніторингу параметрів розвитку. Контроль поточної ситуації та покроковий аналіз ефективності реалізованих заходів на основі комплексу показників-індикаторів забезпечує механізм керованості зі зворотним зв'язком для коригування і актуалізації завдань та обраних стратегій

просування до цілей сталого розвитку (ЦСР). Загалом впровадження ідеології сталого розвитку в суспільну практику відображає процес переходу від традиційних схем планування до управління адаптивною системою, яка здатна вдосконалюватися.

У 2019 р. Президент України підписав Указ про інтеграцію 17 ЦСР у державну політику як основу для досягнення сталого економічного та соціального розвитку. До початку повномасштабної війни в лютому 2022 р. Україна стабільно просувалася в досягненні 15 із 17 ЦСР.

В реалізації ідеології Порядку денного — 2030 значною проблемою для здійснення ефективного оцінювання індикаторів ЦСР залишається отримання даних необхідної якості та обсягу. Це потребує формування, інтеграції та спільного використання багатьох нових наборів даних для моніторингу цілей і пов'язаних індикаторів, а також істотної модернізації національних статистичних і геопросторових систем. Важливе місце в цьому посідають супутникові дані завдяки їхнім унікальним можливостям щодо масштабності та оперативності огляду, отримання глобальної та локальної інформації про природні й господарські об'єкти, регулярності спостереження Землі як системи.

Діяльність у межах міжнародної групи спостереження за Землею (Group on Earth Observations — GEO), що працює над розбудовою глобальної системи систем спостережень за Землею (Global Earth Observation System of Systems — GEOSS), продемонструвала низку конкретних результатів щодо ефективного використання супутникової інформації для моніторингу низки індикаторів ЦСР. Залучення України до міжнародних зусиль відповідно до Порядку денного — 2030 має принципове значення як з огляду на національні інтереси, так і в контексті євроінтеграційних процесів у країні. Українські фахівці останніми роками здійснили практичні кроки на шляху запровадження в Україні ідеології системи систем GEOSS та європейської програми Copernicus. Зокрема, було започатковано створення українського сегменту європейського дослідниць-

кого простору у сфері космічних спостережень і виконано низку пілотних проєктів у міжнародній кооперації, в тому числі проєкти з оцінювання індикаторів ЦСР на основі супутникових даних.

Робота, проведена у межах цього проєкту, спрямована на подальше впровадження в національну систему моніторингу індикаторів ЦСР науково-методичних основ оцінювання індикаторів з використанням супутникових даних та досвіду світових систем спостереження, що створюються відповідно до ідеології досягнення ЦСР. Це сприятиме розбудові підходів до моніторингу ЦСР на національному рівні, гармонізованих з міжнародними системами моніторингу ЦСР.

З огляду на нові виклики, що постали після широкомасштабного вторгнення РФ в Україну, напрями та завдання проєкту доповнено вивченням сучасного міжнародного та вітчизняного досвіду оцінювання шкоди та збитків, завданих довкіллю внаслідок стихійних лих і збройних конфліктів, та можливості застосування даних супутникового моніторингу в процесі такого оцінювання. Увагу зосереджено на міжнародній правовій базі у сфері регулювання захисту природного середовища під час збройних конфліктів; реальних прикладах постконфліктної оцінки стану навколишнього середовища низки країн світу, яку здійснювали експертні робочі групи та організації під егідою ООН; вивченні міжнародного та вітчизняного методологічного інструментарію оцінювання впливу збройних конфліктів; можливостях та практиці використання супутникових даних для постконфліктної оцінки стану довкілля та визначенні завданих воєнними діями шкоди та збитків. Особливу увагу зосереджено на розробленні методів оцінювання шкоди, завданої землям сільськогосподарського призначення України внаслідок збройної агресії РФ. Методи ґрунтуються на використанні супутникових даних та напрацюваннях з попереднього етапу робіт за проєктом. Запропоновано та апробовано метод оцінювання шкоди від пожеж, завданої землям сільськогосподарського призначення внаслідок воєнних дій, та метод моніторин-

гу сільськогосподарських земель, які зазнали безпосереднього впливу бойових дій.

Значну частину досліджень присвячено методології використання цілого ланцюга інформаційних технологій: від отримання і обробки супутникової інформації до застосування міжнародних практик визначення індикаторів ЦСР. З цією метою розпочато вироблення науково-технічних пропозицій з вдосконалення національної системи моніторингу індикаторів ЦСР на основі впровадження сучасних інноваційних технологій та супутникових даних.

Визначаючи місце чинної програми у загальних зусиллях наукової спільноти, слід зазначити таке. У процесі вироблення методології оцінювання індикаторів ЦСР до сьогодні зберігаються значні проблеми з отриманням даних необхідної якості для такого оцінювання. Одним з інноваційних способів отримання точних і надійних даних для досягнення ЦСР є освоєння нових технологій у сфері спостереження Землі (Earth Observation – EO). Низка міжнародних організацій виступають за використання даних EO як засобу скорочення витрат на традиційний моніторинг різних екологічних та інших параметрів (наприклад, стану лісових районів, водних об'єктів тощо) залежно від часу, масштабу, географічного розташування спостережуваних об'єктів та просторового розрізнення. Очевидно, що EO може підтримувати деякі індикатори в рамках ЦСР ООН, надаючи точні та надійні дані про стан атмосфери, океанів, сільськогосподарських культур, лісів, погоди, стихійні лиха (негайне, незалежне реагування в режимі реального часу), природні ресурси, льодовий покрив, урбанізацію та біорізноманіття. Спільнота EO через GEO та її підрозділ CEOS (Committee on Earth Observation Satellites) представила попередній погляд на те, як EO може підтримати (прямо чи опосередковано) сукупність індикаторів ЦСР, який свідчить, що EO може зробити особливий внесок у досягнення ЦСР (зокрема, ЦСР 2, 6, 11, 13, 14 та 15). Використання EO для забезпечення своєчасного й успішного виконання Порядку денного – 2030 ставить і низку питань: виявлення даних EO

та доступ до них, стандартизація, інтероперабельність, гармонізація, багаторазове використання даних EO, інфраструктурні послуги, а також створення та обслуговування місцевих мереж і обсерваторій громадянської науки.

Власний аналіз наявних методологій оцінювання індикаторів ЦСР з використанням супутникових даних автори зазначеної програми провели на основі дослідження великого обсягу фактичного матеріалу, до якого входять науково-дослідні роботи в галузі природокористування, виконані міжнародними організаціями та установами; матеріали, що містяться в доповідях ООН, Європейського космічного агентства, науковій літературі та публікаціях, присвячених цій тематиці. На цій основі визначено методи та інформаційні технології для обчислення індикаторів ЦСР із використанням супутникових та геопросторових даних, що стосуються сфери природокористування (індикатори 2.4.1, 6.6.1, 11.3.1, 15.1.1, 15.3.1), якості повітря в контексті змін клімату (індикатори 11.6.2, 13.2.2). Вибір індикаторів здійснювали зважаючи на те, що фахівці Інституту космічних досліджень (ІКД) НАН України та ДКА України поліпшили або можуть поліпшити оцінювання даних індикаторів ЦСР на основі використання розроблених ними сучасних методів просторово-часового поєднання мультисенсорних супутникових даних і методів машинного/глибинного навчання для даних супутникових спостережень, що є у відкритому доступі.

Слід зазначити, що над програмою працював консорціум з 11 організацій-виконавців: ІКД НАН України та ДКА України, Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Навчально-науковий комплекс «Інститут прикладного системного аналізу» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України, Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем НАН України

та МОН України, Інститут морської біології НАН України, Інститут біохімії ім. О.В. Палладіна НАН України, Національний ботанічний сад ім. М.М. Гришка НАН України, Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Інститут ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України. Серед низки вагомих результатів відзначимо такі досягнення.

Уперше вдалося розробити і впровадити науково-методичний інструментарій оцінювання індикаторів ЦСР 15.3.1 («Частка землі, яка деградувала, у загальній площі землі») та 2.4.1 («Відношення продуктивних та стійких сільськогосподарських земель до всієї площі сільськогосподарських земель»). При цьому розроблено та апробовано методи для оцінювання шкоди, завданої землям сільськогосподарського призначення України внаслідок збройної агресії РФ. Для оцінювання ступеня деградації земель, спричиненої війною, розроблено інформаційну технологію та побудовано геопросторові продукти для оцінки істотних змінних ЦСР 15.3.1 та 2.4.1. Розроблена методологія ґрунтується на машинному навчанні, злитті даних різної природи та об'єднанні з результатами моделювання. Методологію реалізовано у хмарному середовищі DIAS і протестовано для великих територій України і Німеччини (ІКД НАН України та ДКА України).

За результатами робіт з моніторингу пожеж створено сайт та геопортал Системи моніторингу пожеж, а також бібліотеку карт потенційно небезпечних пожеж*. Створено базу даних великих лісових і потенційно небезпечних пожеж на території України з набором кількісних і якісних характеристик виявлених великих лісових пожеж за увесь період супутникових спостережень (з 1 листопада 2000 р.). Розроблено алгоритм виявлення пожеж за супутниковими даними і здійснено оцінку його точності. Встановлено просторові і часові закономірності розподілу викидів тепла і великих пожеж по території України, розроблено методики класифікації і відокремлення пожеж, які виникли внаслідок бойових дій, від пожеж,

що мають інше походження. Розроблено методу розрахунку кількості згорілих матеріалів для оцінки збитків, завданих навколишньому середовищу в результаті бойових дій, та рекомендації з використання Системи моніторингу для зацікавлених сторін.

Розроблено та запущено в автоматичну роботу систему оперативного моніторингу забруднення атмосферного повітря над містами Дніпро, Донецьк, Запоріжжя, Київ, Кривий Ріг, Львів, Миколаїв, Одеса, Харків за даними супутникових спостережень Sentinel-5P. Встановлено закономірності зміни якості атмосферного повітря за вмістом діоксиду азоту (NO_2) та монооксиду вуглецю (CO) в містах України, що відбулися внаслідок повномасштабного російського вторгнення (Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України).

Вдалося вдосконалити методи комплексного аналізу аерокосмічних і наземних спостережень різних регіонів, у тому числі промислових комплексів великих міст та міських агломерацій, ОТГ, методи моделювання та прогнозування змін стану довкілля з урахуванням їх просторово-часових особливостей, методи комплексного оцінювання ризиків життєдіяльності в умовах можливих аварій на хімічно небезпечних об'єктах та прогнозування довгострокових ризиків надзвичайних ситуацій гідрологічного і гідрометеорологічного характеру для регіонів з використанням дистанційних даних (Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України).

Важливим результатом є розроблення методології моніторингу надзвичайних ситуацій, які можуть бути спричинені воєнними діями, у важкодоступних районах земної поверхні з використанням даних аерокосмічної зйомки. Розроблено програмно-алгоритмічні складові інформаційної технології моніторингу надзвичайних ситуацій, які можуть бути спричинені воєнними діями; програмне забезпечення для виявлення та аналізу потенційних надзвичайних ситуацій на основі аналізу супутникових знімків та інформації про воєнні дії, яка збирається та агрегується з різних джерел вільного доступу.

* <https://geoportals.uhmi.org.ua>

Протестовано новітній інструментарій для моделювання процесів сталого розвитку з використанням істотних змінних у глобальному та регіональному контекстах. Зокрема, створено базу даних для визначення показників, що характеризують три виміри якості життя людей та сукупність глобальних загроз. Визначено вплив на сталий розвиток країн Європи повномасштабного вторгнення РФ в Україну. Проаналізовано загрозу продовольчої кризи в результаті окупації Херсонської та Запорізької областей шляхом оцінки і аналізу стану розораних земель за даними дистанційного зондування Землі.

Проведено безперервний моніторинг аерозольного забруднення атмосфери приладом мережі AERONET NASA та загального вмісту озону в атмосфері над Києвом приладом мережі GAW (Global Atmosphere Watch). На основі цих даних визначено динаміку аерозольного забруднення атмосфери та змін якості повітря. Проведено наземні дистанційні визначення фізичних властивостей аерозолі за допомогою приладів, розроблених та виготовлених у ГАО НАН України для космічного експерименту «Аерозоль UA». Синхронні вимірювання з приладом мережі AERONET дали можливість зробити обнадійливі висновки щодо ефективності розроблених приладів як у космічних місіях, так і у наземних дослідженнях (Головна астрономічна обсерваторія НАН України).

Визначено характеристики істотних змінних у технологіях оцінювання індикаторів ЦСР та оцінки ризиків за умов мультикомпонентного забруднення твердими частинками аерозолі і важкими металами. Розроблено алгоритм визначення спільного нейротоксичного ефекту забруднювачів. Спільна дія ртуті і наночастинок заліза призводить до більш значного ефекту в нервових терміналях порівняно з дією окремого забруднювача. Показано складний комбінований ефект забруднювачів — твердих частинок аерозолі, що утворюються під час воєнних дій, а також ртуті і міді.

Отримано покрововий алгоритм виявлення морських донних тіл та субаквальних ландшафтів за багатофакторним геоінформаційним

аналізом супутникових даних Sentinel2(MSI) та Sentinel3(OLCI) в акваторії Українського сектору Північно-західної частини Чорного моря. Проведено просторово-часову оцінку динаміки площ покриття нафтопродуктами та «цвітінням» води морських акваторій регіону внаслідок воєнних дій (руйнування Каховської ГЕС), а також зонування морських субаквальних ландшафтів за вразливістю до забруднення.

Під час досліджень забруднення і спектральних характеристик поверхневих вод встановлено пари довжин хвиль, для яких прості співвідношення відбиття достовірно корелюють з показниками якості води. Проведено моделювання окремих параметрів якості води з використанням набору спектротемпоральних даних. Показано можливість використання таких моделей для екстраполяції в просторі під час вегетаційного сезону. Створено карти модельованого забруднення поверхневих вод на річках України в ділянках, ширших за 40 м, на 2018—2023 рр. Здійснюється додаткова валідація та аналіз впливу бойових дій на рівень забруднення поверхневих вод, а також аналіз взаємозв'язків між забрудненням і «цвітінням» води.

Результати досліджень впливу аерогенного та світлового забруднення, отримані за оцінкою стану урбоєкосистем, дозволили запропонувати алгоритм дій для захисту та відновлення ґрунтів у повоєнний період. Використання розроблених кремнієвмісних комплексних добрив забезпечує оптимізацію і збалансування ґрунтових процесів, збереження вологи в ґрунті, стимуляцію розвитку рослин та підвищення їх адаптаційного потенціалу до стресових факторів. Аналіз розподілу хімічних елементів у листках рослин уможливив створення першого в Україні мікродобрива на основі титану, перспективного для підвищення стійкості рослин до фітопатогенів. Визначено діагностичні ознаки для пошуку рослин, перспективних для санації, іонізації та очищення забрудненого повітря урбоєкосистем.

Зазначені вище результати було представлено на тематичних конференціях, а також на Міжнародному тижні GEO-2023 та Міністерському

саміті GEO (6–10 листопада 2023 р., Кейптаун, ПАР). Загалом за програмою підготовлено 10 монографій та 4 розділи в монографіях, 89 статей, зареєстрованих у міжнародних базах, 36 статей у фахових журналах України та 48 тез доповідей. Основні висновки, резюме розроблених методів, а також пропозиції щодо розвитку інформаційних космічних технологій наведено в оглядовій монографії, присвяченій підсумкам виконання програми, — Куссульт Н.М., Федоров О.П., Шелестов А.Ю. «Моніторинг досягнення цілей сталого розвитку України за супутниковими даними» (Наукова думка, 2023).

Важливо, що результати, отримані за програмою, є затребуваними міжнародною спільнотою. Продовження досліджень, які проводи-

лися в межах програми, передбачено в проєктах «Горизонт Європа» E-Share (оцінки показників ЦСР 2.4.1 та 15.3.1 на основі методології оцінки продуктивності сільськогосподарських земель та картографування типів культур за даними Sentinel-2) та SWIFT (супутникові дані для інспекції дикої природи та відстеження загрози лісам). Плануються спільні роботи академічної спільноти та фахівців Національного центру управління та випробування космічних засобів ДКА України. Нагальні проблеми сьогодення потребують швидкого й ефективного удосконалення методик і технологій використання супутникових даних для моніторингу наслідків воєнних дій в екосистемах, об'єктах інфраструктури, енергосистемах.

Oleg P. Fedorov

Space Research Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0245-6509>

ON THE RESULTS OF THE TARGETED RESEARCH PROGRAM OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE “AEROSPACE ENVIRONMENTAL SURVEILLANCE FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND SECURITY” IN 2021-2023

According to the materials of scientific report at the meeting of the Presidium of the NAS of Ukraine, April 3, 2024

The report presents the main results obtained during the implementation of the targeted research program of the National Academy of Sciences of Ukraine “Aerospace environmental surveillance for sustainable development and security” (ERA-PLANET-UA) in 2021–2023. The program was aimed at further development of the Ukrainian segment of the European research area in the field of satellite observations, as well as the issues of assessing environmental damage and food security of the state in the context of military operations. The scientific and applied results obtained will contribute to solving urgent problems of environmental monitoring in Ukraine and assessing the damage caused by military operations, as well as to the development of cooperation between NAS of Ukraine scientists and European partners in the field of aerospace Earth observation.

Cite this article: Fedorov O.P. On the results of the targeted research program of the National Academy of Sciences of Ukraine “Aerospace environmental surveillance for sustainable development and security” in 2021-2023. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2024. (6): 69–74. <https://doi.org/10.15407/visn2024.06.069>