НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНЕ КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ КОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Н.М. КУССУЛЬ, О.П. ФЕДОРОВ, А.Ю. ШЕЛЕСТОВ

МОНІТОРИНГ ДОСЯГНЕННЯ ЦІЛЕЙ СТАЛОГО РОЗВИТКУ УКРАЇНИ ЗА СУПУТНИКОВИМИ ДАНИМИ

ПРОЄКТ
«НАУКОВА КНИГА»

КИЇВ • НАУКОВА ДУМКА • 2023

https://doi.org/10.15407/978-966-00-1865-5
УДК 004.932, 528.854

У монографії розглянуто результати розроблення та впровадження українськими вченими інформаційних технологій та сервісів оцінювання індикаторів сталого розвитку на основі використання супутникових даних спостереження за Землею. Викладений матеріал спрямований на вирішення актуальних соціально-економічних проблем, зокрема, досягнення сформульованих ООН цілей сталого розвитку, моніторингу глобальних кліматичних змін, катастрофічних подій. Запропоновано методологію визначення індикаторів сталого розвитку, інформаційні технології їх обчислення на основі супутникових даних та продуктів їхнього оброблення з використанням сучасних хмарних технологій. Зокрема йдеться про впровадження в Україні ідеології створюваної міжнародної системи систем спостереження за Землею GEOSS та європейської програми Copernicus. Набутий досвід дає змогу запропонувати до реалізації ідеологію українського сегменту GEOSS — інформаційної системи UkrGEO, яка передбачає інтеграцію та експлуатацію багатьох нових наборів супутникових даних, а також істотну модернізацію національних статистичних і геопросторових систем у контексті цифровізації економіки та індустрії 4.0.

Для фахівців у галузі космічних інформаційних технологій, супутникових спостережень за Землею, геоінформаційних систем, екологічної безпеки, сталого розвитку, а також аспірантів та студентів відповідних спеціальностей вишів.

Р е ц е н з е н т и:
член-кореспондент НАН України В.Ф. ГУБАРЕВ,
член-кореспондент НАН України Н.Д. ПАНКРАТОВА,
член-кореспондент НАН України М.О. ПОПОВ

Рекомендовано до друку вченою радою
Інституту космічних досліджень НАН України та ДКА України
(*протокол № 4 від 26.08.2021 р.*)

Видання здійснено за кошти Цільової комплексної програми НАН України «Наукові основи функціонування та забезпечення умов розвитку науково-видавничого комплексу НАН України»

Науково-видавничий відділ фізико-математичної
та технічної літератури

Редактор *В.В. Вероцька*

© Н.М. Куссуль, О.П. Федоров,
А.Ю. Шелестов, 2023
© НВП «Видавництво “Наукова думка”
НАН України», дизайн, 2023

ISBN 978-966-00-1865-5

ПЕРЕДМОВА

Міжнародна програма створення системи систем спостереження за Землею GEOSS демонструє динамічний розвиток діяльності та низку позитивних конкретних результатів з вирішення актуальних соціально-економічних проблем, зокрема, сформульованих ООН цілей сталого розвитку, моніторингу глобальних кліматичних змін, катастрофічних подій. Сучасний рівень інформаційної діяльності свідчить про досягнення світовою спільнотою якісно нового технологічного рівня у створенні основ цифрової економіки, методології оброблення великих обсягів даних (Big Data) та ефективності використання супутникової інформації. Система моніторингу глобальної структури цільових показників є підґрунтям впровадження принципів сталого розвитку до національної політики, яка вимагатиме інтеграції та експлуатації багатьох нових наборів даних, а також істотної модернізації національних статистичних і геопросторових систем.

Для України залучення до міжнародних зусиль відповідно до прийнятої Генеральною Асамблеєю ООН Резолюції «Перетворення нашого світу: Порядок денний у сфері сталого розвитку на період до 2030 року» має принципове значення як з огляду національних інтересів, так і в контексті євроінтеграційних процесів. Українські фахівці протягом останніх років здійснили практичні кроки на шляху до широкомасштабного запровадження в Україні ідеології системи систем GEOSS та європейської програми COPEERNICUS. Протягом 2018—2021 років започатковано створення українського сегмента європейського дослідницького простору (ERA) у сфері космічних спостережень, з 2018 року започатковано структуру EuroGEOS, в яку входять і представники України, виконано низку пілотних проєктів у співпраці з міжнародними центрами, зокрема з оцінювання індикаторів:

2.4.1. Частка сільськогосподарських земель в умовах продуктивного та стійкого сільського господарства;

15.1.1. Лісова площа як частка загальної земельної площі;

15.3.1. Частка деградованих земель від загальної земельної площі;

11.3.1. Відношення показника землекористування до показника приросту населення.

Набутий досвід дає змогу запропонувати ідеологію українського сегмента GEOSS — інформаційної системи UkrGEO, що передбачає розроблення та впровадження інформаційних технологій та сервісів оцінювання індикаторів сталого розвитку у соціально значущих галузях (продовольчій, енергетичній, пожежній безпеці, моніторингу сільськогосподарських, лісових, водних енергетичних ресурсів, міських агломерацій, забруднень довкілля). Система базується на концепції спільного використання істотних змінних (Essential Variables) для оцінювання, прогнозування та моніторингу екосистем за допомогою використання даних спостереження за Землею. Такий підхід сприятиме досягненню макроскопічної стабільності, екологічного балансу та соціальної згуртованості суспільства відповідно до цілей сталого розвитку та забезпечить координацію інноваційної діяльності у межах різних предметних галузей на новому рівні використання інформаційних технологій.

Автори висловлюють щиру подяку співробітникам Інституту космічних досліджень НАН України та ДКА України за вагомий внесок у дослідження та оформлення матеріалів, викладених у монографії: д.т.н. Я.І. Зєлику, к.т.н. Л.М. Колос, к.т.н. Л.В. Підгородецькій, к.т.н. М.С. Лавренюку, к.т.н. Б.Я. Яйлимову, Ph.D. Г.О. Яйлимовій, к.т.н. Л.Л. Шумілу.

ВСТУП

Приймаючи «Порядок денний у сфері сталого розвитку на період до 2030 року», світові лідери визнали ключову роль, яку відіграють космічні спостереження та геопросторова інформація у забезпеченні принципово нового рівня екологічного моніторингу та досягненні цілей сталого розвитку. На виконання політичних рішень створено міжурядову групу GEO (Group of Earth Observation), яка забезпечує співпрацю провідних світових центрів та установ у сфері спостереження за Землею і налічує наразі 105 країн та понад 100 авторитетних міжнародних організацій, зокрема, Всесвітню метеорологічну організацію WMO, Європейське космічне агентство ESA та ін. Основною ідеєю цією масштабної та амбіційної ініціативи є спільне застосування даних дистанційних, наземних спостережень та результатів моделювання для розв'язання прикладних задач у сферах високої соціальної значущості: екологічній безпеці, енергетиці, змінах клімату, біорізноманітті, продовольчій безпеці, лісових і водних ресурсів в аграрному секторі тощо.

Методичний підхід, на якому ґрунтується створення всесвітньої системи систем зі спостереження за Землею GEOSS, передбачає створення єдиного ланцюга, що поєднує цільові показники, необхідні для ухвалення рішень політиками, і кількісні параметри з різних джерел моніторингу. Резолюція Саміту ООН зі сталого розвитку (жовтень 2019 року) визначила цей підхід як революційний прорив в ефективності моніторингу показників сталого розвитку. У документах Саміту GEO у Канберрі (2019 р.) сформульовано стратегічне завдання щодо орієнтації сервісів системи систем GEOSS на конкретні результати (Policy-Relevant knowledge-based services).

Українські фахівці активно залучились до нової діяльності, що поєднує національні та глобальні інтереси, орієнтуючись у першу чергу на європейський сегмент діяльності GEO. Європейським внеском у GEOSS є флагманський проєкт європейської космічної програми Copernicus, створення кількох консорціумів у рамках дослідницької програми HORIZON 2020. З 2016 року почалося створення європейського дослідницького простору (ERA) у сфері космічного моніторингу. У 2018 році започатковано структуру EuroGEOS, в яку входять і представники України. Великий проєкт за участю України ERA-PLANET (The European Network for Observing our Changing Planet) у рамках програми HORIZON-2020 передбачав створення спільного європейського дослідницького простору в сфері спостереження за Землею. Проєкт був розрахований для виконання до 2021 року, надалі його продовження планується в рамках нової структури EuroGEOSS.

Низка одержаних українськими фахівцями результатів у міжнародній кооперації свідчить про перспективність активної співпраці в рамках міжнародного мегапроєкту GEOSS. Так, співробітниками Інституту космічних досліджень НАН України та ДКА України одержано систематичні дані щодо впливу агротехнологій на довкілля в рамках проєкту FP-7 «SIGMA» (2013—2017 роки), побудовано карти наземного покриву та маски посівних площ на території України в рамках проєкту Sen2-Agri з Європейським космічним агентством; в проєкті зі Світовим банком (2018—2020 роки) показано використання даних Copernicus для моніторингу деградації земель та наслідків посух.

Одним із важливих результатів впровадження даних супутникового моніторингу є розроблення та впровадження спільних із світовою спільнотою методів оцінювання індикаторів сталого розвитку. Наразі українськими фахівцями розроблено, протестовано та наведено результати такого оцінювання для показників:

2.4.1. Частка сільськогосподарських земель в умовах продуктивного та стійкого сільського господарства;

15.1.1. Лісова площа як частка загальної земельної площі;

15.3.1. Частка деградованих земель від загальної земельної площі.

11.3.1. Відношення показника землекористування до показника приросту населення.

Розгортання робіт у цьому напрямі включає міжнародний проєкт «Методологія оцінювання цілей сталого розвитку для України, Аргентини та Індії» за участю 17 країн та підтримки фірми Амазон (GEO-AMAZON EARTH OBSERVATION CLOUD CREDITS PROGRAMME (2019—2022 роки), SDG Indicators calculation for Ukraine).

Активна робота в рамках створення всесвітньої системи систем зі спостереження за Землею GEOSS є важливою складовою частиною здійснення власної стратегії екологічного моніторингу, яка забезпечує міжнародний рівень цієї діяльності та виконання міжнародних зобов'язань України.

Доцільність гармонізації власних зусиль з планами GEO зумовлена можливістю спільного вироблення методології оцінювання індикаторів сталого розвитку, вирішення національних та регіональних проблем моніторингу довкілля, долучення до баз даних та знань, розроблених у рамках GEOSS, а також зацікавленістю європейських інституцій у співпраці з Україною у рамках створення регіональних структур EuroGEO.

ЦІЛІ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ТА КОСМІЧНІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ

1.1. НОВА ІДЕОЛОГІЯ МОНІТОРИНГУ ДОСЯГНЕННЯ ЦІЛЕЙ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Впровадження ідеології сталого розвитку (СР) набуло нової соціальної ваги з прийняттям на Саміті ООН у 2015 році документу «Порядок денний у сфері сталого розвитку на період до 2030 року» (Agenda 2030) [1]. У ньому визначено 17 глобальних цілей сталого розвитку (ЦСР), спрямованих на просування трьох взаємопов'язаних складових СР — економічного зростання, соціальної відповідальності, захисту довкілля. ЦСР окреслюють глобальні пріоритети, для їх досягнення сформульовано завдання та визначено глобальні індикатори для моніторингу параметрів сталого розвитку. Контроль поточної ситуації та покроковий аналіз ефективності реалізованих заходів на базі комплексу показників-індикаторів реалізує механізм керованості на основі зворотного зв'язку для коригування та актуалізації завдань і обраних стратегій просування до ЦСР. Загалом впровадження ідеології СР у суспільну практику відображає процес переходу від традиційних схем планування до керування адаптивною системою, яка здатна вдосконалюватися.

Парадигма СР має інклюзивний характер («нікого не залишити осторонь») і передбачає солідарні колективні дії на глобальному і національному рівнях. Глобальна структура показників — це засіб, за допомогою якого уряди можуть практично контролювати і звітувати про хід досягнення цілей. Тому цей підхід є підґрунтям інтеграції принципів сталого розвитку до національної політики. Очікується, що уряди країн світу сформують на основі ЦСР національні плани та ініціативи відповідно до наявних можливостей, а цілі, завдання та індикатори глобального рівня будуть адаптовані відповідно до пріоритетів розвитку та безпеки країн унаслідок

розроблення національних цілей, завдань та індикаторів. Передбачено проведення моніторингу досягнення ЦСР на глобальному, регіональному, національному та тематичному рівнях, при цьому в центрі уваги знаходиться національний моніторинг. За результатами моніторингу відповідні структури ООН готують щорічну доповідь, яку обговорюють на Політичному форумі високого рівня.

17 ЦСР, 169 завдань та 230 глобальних індикаторів визначають новий підхід до сталого розвитку, який керується конкретною інформацією та доказовою базою: «Якщо не вимірювати, то не можна й керувати». Реалізація ідеології «Порядку денного у сфері сталого розвитку на період до 2030 року» вимагатиме інтеграції та експлуатації багатьох нових наборів даних для моніторингу цілей та пов'язаних показників, а також істотної модернізації національних статистичних та геопросторових систем. На рис. 1.1 показано схему взаємодії різних підсистем, яка реалізує задекларований підхід [2]. Принципово важливе місце займають дані космічних спостережень завдяки унікальним можливостям щодо масштабності та оперативності огляду, отримання глобальної та локальної інформації про природні та господарські об'єкти, регулярності спостереження за Землею як системи. У резолюції Всесвітньої конференції ООН зі сталого розвитку (Йоганнесбург, 2002 р.) [3] вказано на неможливість забезпечення сталого розвитку без залучення дистанційних супутникових даних.

Міжнародною організаційною структурою, що має впроваджувати нову ідеологію, є Міжурядова група GEO, яка забезпечує співпрацю різних центрів та установ у сфері спостережень за Землею. Стратегічна мета цієї організації — забезпечити скоординовані спостереження за Землею за допомогою різних джерел, включаючи супутникові, повітряні, наземні платформи та обсерваторії. Таке об'єднання надає нові потужні інструменти для розуміння минулого і нинішнього стану наземних систем, а також взаємодії між ними. Ці інструменти та новий рівень отриманих знань разом із соціально-економічними даними, що описують людський фактор у глобальному навколишньому середовищі, сприятимуть вирішенню проблем, усуненню та пом'якшенню ризиків і виробленню кваліфікованих прогнозів майбутньої поведінки наземних систем.

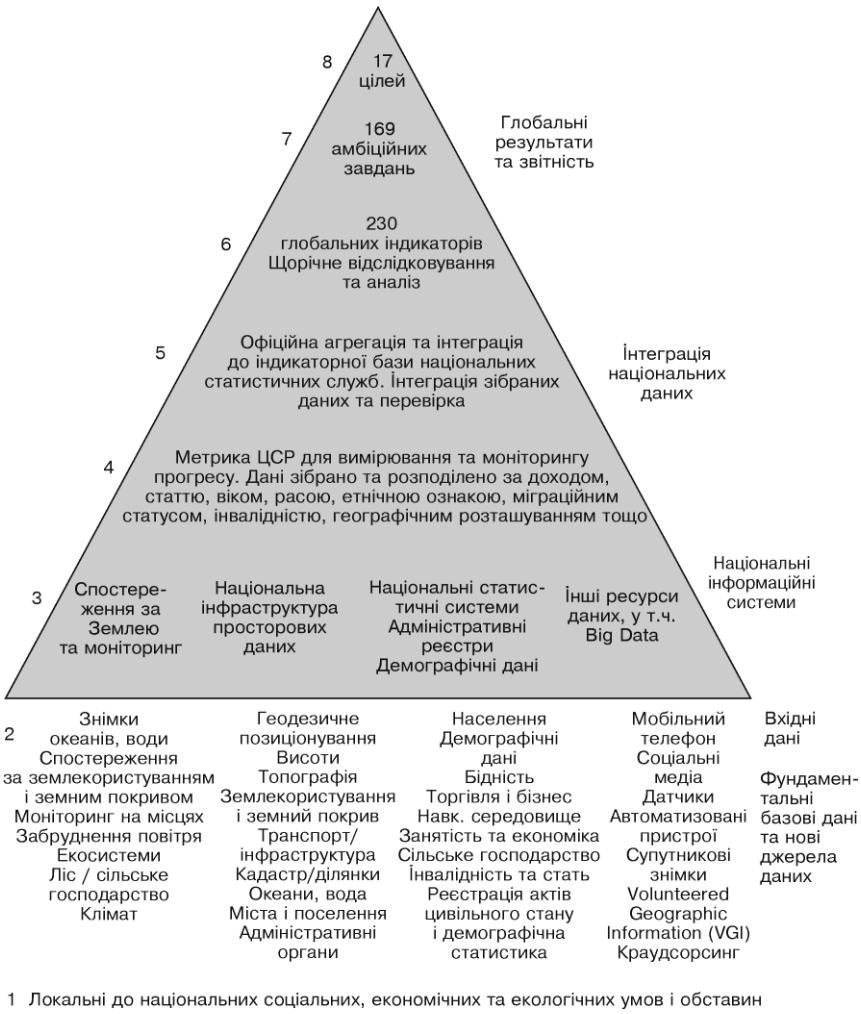

Рис. 1.1. Загальна структура «потоку даних» про сталий розвиток, яка забезпечує для кожної країни вимірювання індикаторів та моніторинг ЦСР за допомогою узгодження глобальної звітності

Стратегічним завданням є створення всесвітньої системи систем зі спостереження за Землею GEOSS, яка поєднує показники, необхідні для ухвалення рішень політиками, і дані моніторингу з різних джерел. GEOSS являє собою комплекс

скоординованих, незалежних систем спостереження за Землею, інформації і обробки, які взаємодіють і забезпечують доступ до різноманітної інформації для широкого кола користувачів як у державному, так і в приватному секторах. Створення GEOSS базується на розв'язанні прикладних задач у галузях високої соціальної значущості. Зокрема, в рамках десятилітнього «Плану впровадження на 2016—2025 роки» (GEO Strategic Plan 2016—2025: Implementing GEOSS) окреслені такі сфери: біорізноманіття та екологічна безпека; стійкість до стихійних лих; керування енергосистемами та мінеральними ресурсами; продовольча безпека та стале землеробство; інфраструктура та керування транспортом; заходи з охорони здоров'я.

На рис. 1.2 наведено структурну схему впровадження ідеології GEO і основні керувальні інституції та програми.

Наразі розроблено потужні інструменти збирання та оброблення даних, забезпечено новий рівень взаємодії інформаційної інфраструктури, засобів спостереження та наукових досліджень. Широке впровадження технологій дистанційного зондування Землі виступає як структурна перебудова геоінформаційного забезпечення економіки. В основу такої перебудови покладено суттєве поліпшення точності оцінок стану довкілля та ідентифікації загроз на базі нової методології прогнозних оцінок, яка використовує великі масиви спостереж-

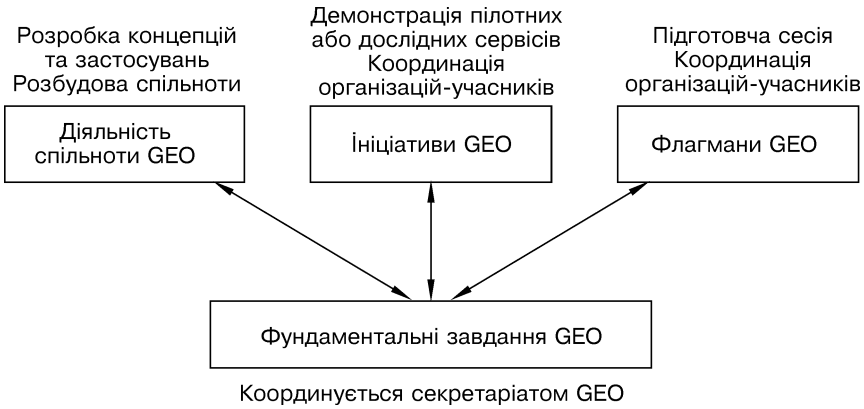

Рис. 1.2. Три механізми впровадження GEO

них аерокосмічних та наземних даних. Саміт GEO в Канберрі (2019 р.) зафіксував сучасну роль та пріоритетні завдання у сфері використання супутникової інформації, зокрема:

- супутникові спостереження є важливим інструментом визначення індикаторів сталого розвитку;
- приватно-публічне партнерство та залучення приватного сектору є актуальним завданням зі створення всесвітньої системи систем GEOSS;
- забезпечення переходу від ідеології створення інформаційної системи до системи знань як підґрунтя впровадження управлінських заходів.

У створюваній системі систем використання супутникових даних не виступає як суто засіб поліпшення існуючих методів, мова йде про інноваційний підхід, що ґрунтується на інтеграції наземних та космічних даних у моделях природних і техногенних процесів, який забезпечить якісно новий рівень вирішення завдань моделювання та прогнозування і в цілому — інформаційної підтримки управлінських рішень. Протягом останніх років ініційовано декілька проєктів з розроблення методологічних підходів до створення практично працюючих інформаційних сервісів, які реалізують ланцюг від спостережної інформації до істотних змінних відповідних моделей і до індикаторів СР. Найбільший прогрес досягнуто у сферах кліматичних змін та погоди, дослідження океану, а також моніторингу біорізноманіття [4].

1.2. ОСНОВНІ МЕТОДОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ МІЖНАРОДНОЇ ІНІЦІАТИВИ GEOSS

40-річна історія використання супутникових технологій демонструє, що наразі ми є свідками переходу до нового етапу, на якому дистанційні дані спричиняють трансформаційний вплив на вирішення низки глобальних завдань, таких як моніторинг та захист уразливих екосистем, забезпечення стійкості інфраструктури, управління кліматичними ризиками, охорона здоров'я, підвищення рівня продовольчої безпеки, створення більш стійких міст, зменшення бідності та поліпшення управління. Унікальне значення супутникових даних стало предме-

том розгляду на Першому всесвітньому форумі ООН з використання статистичних даних для досягнення цілей сталого розвитку (2017 р.), на якому було схвалено Кейптаунський глобальний план дій. Одним із стратегічних напрямів удосконалення системи глобальних індикаторів визначено застосування нових технологій і джерел даних у статистичній діяльності та інтеграція геопросторової інформації у підготовку статистичних даних. Цей загальний висновок зумовлює такі фундаментальні функції, які супутникові дані мають виконувати щодо вирішення проблеми моніторингу досягнення ЦСР [5]:

1) забезпечувати життєздатність створюваної системи індикаторів;

2) формувати підґрунтя для надання більш своєчасних статистичних результатів та зменшення частоти обстежень;

3) підвищувати точність звітування за рахунок просторового охоплення;

4) збільшувати обсяги статистичних даних, сприяти перевірці загальних статистичних даних та забезпечувати деталізацію індикаторів.

Міжвідомча група експертів з індикаторів ЦСР визначила **п'ять пріоритетних напрямів наукового забезпечення ефективності процесу досягнення ЦСР**: розроблення набору практичних показників; створення програми моніторингу досягнення цих показників; оцінювання процесу руху до поставлених цілей; вдосконалення інфраструктури спостережень; стандартизація джерел та якість даних. Експертною групою представлено пропозиції (Статистична комісія ООН, березень 2017 р. [6]) щодо доопрацювання глобальної індикаторної бази в контексті появи нових джерел інформації та розроблення методології їх визначення. З метою полегшення впровадження глобальних показників вони були класифіковані за ступенем методологічного опрацювання та загальної доступності даних на три рівні: 1 — є встановлена методологія визначення показника, дані надаються країнами на регулярній основі; 2 — є встановлена методологія визначення показника, дані надаються нерегулярно; 3 — відсутня встановлена методологія визначення показника. Станом на липень 2020 р. з 246 показників оновленої глобальної індикаторної бази 123 показники належать до рівня 1, 106 показників — до рівня 2 та 2 показники мають кілька рів-

Цілі, завдання та індикатори ООН за під

Завдання								
							1.4	1.5
						2.3	2.4	2.c
					3.3	3.4	3.9	3.d
								5.a
		6.1	6.3	6.4	6.5	6.6	6.a	6.b
					7.2	7.3	7.a	7.b
								8.4
			9.1	9.2	9.3	9.4	9.5	9.a
						10.6	10.7	10.a
	11.1	11.3	11.4	11.5	11.6	11.7	11.b	11.c
				12.2	12.4	12.8	12.a	12.b
					13.1	13.2	13.3	13.b
		14.1	14.2	14.3	14.4	14.6	14.7	14.a
	15.1	15.2	15.3	15.4	15.5	15.7	15.8	15.9
								16.8
17.2	17.3	17.6	17.7	17.8	17.9	17.16	17.17	17.18

Примітка. Верхнім символом біля індикатора позначено його належність до

нів (різні компоненти показника класифіковано за різними рівнями).

Фахівцями GEO та CEOS (Committee on Earth Observation Satelittes) оцінено роль супутникових спостережень у реалізації глобальної індикаторної бази сьогодні та в майбутньому. Результати аналізу наведено в табл. 1.1 [7, 8], яка містить перелік цілей, завдань та індикаторів глобального рівня, що прямо чи опосередковано можуть бути підтверджені даними спостереження за Землею. Як бачимо, супутникові дані на високому рівні відповідають вимогам глобальних спостережень і можуть використовуватися для визначення низки індикаторів ЦСР, при цьому, за даними експертів, 45 % з них належать до рівня 1, 24 % — до рівня 2 і 31 % — до рівня 3.

Принципове значення для активізації впровадження супутникової інформації в метрики глобального управління має політика GEO та інших міжнародних структур щодо відкритості даних. Упродовж тривалого часу дослідники та користу-

ТАБЛИЦЯ 1.1

тримки даними космічних спостережень

Цілі	Індикатори				
1	1.4.2[2]				
2	2.4.1[2]				
3	3.9.1[1]				
4					
5	5.a.1[2]				
6	6.3.1[2]	6.3.2[2]	6.4.2[1]	6.5.1[1]	6.6.1[1]
7	7.1.1[1]				
8					
9	9.1.1[2]	9.4.1[1]			
10					
11	11.1.1[1]	11.2.1[2]	11.3.1[2]	11.6.2[1]	11.7.1[2]
12	12.a.1[1]				
13	13.1.1[2]				
14	14.3.1[2]	14.4.1[1]	14.5.1[1]		
15	15.1.1[1]	15.2.1[1]	15.3.1[1]	15.4.1[1]	15.4.2[1]
16					
17	17.6.1[1]	17.18.1[2]			

певного рівня класифікації.

вачі можуть одержувати у відкритому доступі та на регулярній основі оперативні та архівні дані супутників Sentinel, Landsat, Aura, Terra, Aqua та ін.

Наступним суттєвим кроком з впровадження супутникових даних є **визначення істотних змінних — Essential Variables (EVs)**, під якими розуміють «мінімальний набір змінних, які визначають стан системи та її розвиток, мають вирішальне значення для прогнозування розвитку системи та дають змогу визначати метрики, що контролюють траєкторію системи». Це поняття слугує характеристикою моделей екосистем і не включає технологічні характеристики, такі, наприклад, як просторове та часове розрізнення. Оскільки число показників моделі може бути великим, для моделювання відбирають головні, без яких модель втрачає сенс. Решта змінних при цьому не береться до уваги, проте вони «неістотні» не взагалі, а лише для конкретного завдання. З цього випливає, що істотні змінні повинні бути модулями, а не фізичними та/або біохімічними характеристиками. Тому кожну істотну змінну під час

побудови моделі системи потрібно визначати як за певними алгоритмами, так і вибором рівня організації, на якому виникає потрібний модуль, що однозначно забезпечує прогнозовану поведінку системи.

Визначення істотних змінних з точки зору методології побудови системи моніторингу ЦСР є ланцюгом, який поєднує дані вимірювань, моделі екосистем та індикатори сталого розвитку. Водночас це відносно самостійна проблема, оскільки EVs є потужним інструментом спілкування та оцінювання, який дає змогу вченим і практикам підвищувати рівень розуміння змін в екосистемах та формувати політичну систему. У більшості тематичних сфер розроблення наборів EVs передбачає процес узгодження того, що є важливим для цілей відповідної спільноти фахівців. Незважаючи на те, що різні спільноти мають багато відмінностей у критеріях та методологіях розроблення наборів EVs, існує також значне перехрещення в різних темах (найочевидніший приклад — теми «Клімат» та «Вода»).

На сьогодні тематичними галузями з практично сформованим списком EVs є «Клімат» (ECV), «Океан» (EOV) та «Біорізноманіття» (EBV). Наближається до узгодження комплекс EVs для тематики водного середовища та сільського господарства (в рамках GEOSS). Планується виконання додаткового узгодження наборів EV для катастроф, охорони здоров'я та екосистем. Українські фахівці на поточному етапі роботи користуються напрацьованим міжнародною спільнотою набором EVs, а власна робота (як і вироблення ЦСР) ще не розпочата. Очевидно, що скористатися лише напрацюваннями міжнародних груп фахівців не вдасться, оскільки для кожного регіону необхідно обрати найрелевантніші моделі та відповідні істотні змінні.

Важливою методичною проблемою, яка має вирішуватися на національному рівні, є застосування Nexus підходу (від лат. Nectare — зв'язувати), який став ключовим для опису складних взаємозв'язків між сферами продовольства, енергії та води (Food, Energy, Water — FEW) [9, 10]. Традиційно більшість глобальних викликів, хоча й взаємопов'язаних, вирішується окремо, при цьому рішення, реалізовані в одному секторі, можуть мати непередбачені та небезпечні наслідки в інших сек-

торах. Це зумовлено взаємопов'язаними характеристиками систем FEW (очевидно, що виробництво продуктів харчування або енергії обмежується, скажімо, наявністю води), заходи в яких зазвичай аналізуються та плануються незалежно.

Nexus підхід передбачає вивчення взаємодії між різними секторами і переведення управління ресурсами від ізольованих до інтегрованих та економічно ефективних заходів щодо визначення спільних переваг у рамках певних ланцюгів виробництва продукції [11]. Кількісні дослідження різних авторів показали, що підходи до взаємодії можуть виявити синергію та компроміси між секторами, зменшити негативні наслідки та сприяти інтегрованому плануванню і управлінню. Разом з тим, аналіз результатів досліджень свідчить, що сьогоднішній рівень є далеким від можливостей оцінювання прогресу з досягнення цілей сталого розвитку. Водночас визнано, що Nexus FEW прямо чи опосередковано стосується всіх без винятку ЦСР.

Труднощі застосування цього підходу можна розділити на фундаментальні та технологічні. До перших слід віднести складність формулювання економічних індикаторів, на які впливають компоненти систем FEW. Серед технологічних труднощів автори [12] вбачають три сфери. По-перше, обмежена спостережуваність ускладнює збирання даних у системах FEW як всередині, так і між ними (наприклад, дуже важко вивчати розподіл підземних вод та енергії вітру). По-друге, керування даними глобальних спостережень FEW не є адекватним: невеликі набори даних, зібрані з різних джерел та різних географічних регіонів, не можуть бути повністю використані разом. По-третє, сучасні дослідження ускладнюються відсутністю ефективних протоколів обміну даними між секторами та країнами.

Наведені проблеми дають змогу зрозуміти, чому на сьогодні розроблено здебільшого часткові підходи (вода — продовольство чи енергія — вода), а застосування Nexus FEW для оцінювання ЦСР потребує великих зусиль. У напрямах, що розроблюються науковою спільнотою, є певні успіхи з вирішення фізичних або соціальних проблем, однак вирішення проблем на рівні геоінформаційних задач (зокрема, збору, ін-

теграції, керування, аналізу та візуалізації просторових даних, пов'язаних з FEW-зв'язком) ще попереду.

Вирішення масштабного застосування Nexus підходу до оцінювання ЦСР провокує революцію в технології використання даних [14, 15]. Це, в першу чергу, пов'язано з **проблемою Big Data**, зумовленою не лише великим обсягом даних, а й їхньою різнорідністю, необхідною швидкістю оброблення, фільтрації, документування її якості та невизначеностей, а також вимогами до візуалізації (так звана проблема «5V»). Така проблема постає в різних галузях сучасної науки та має безпосереднє відношення до GEOSS — інтегрованої системи великого масштабу, що складається з безлічі діючих окремо підсистем, пов'язаних, однак, в інтересах вирішення спільних завдань. Варіант вирішення, запропонований у рамках створення EuroGEOSS, передбачає організацію посередницької (брокерської) підсистеми — DAB (Discovery and Access Broker), яка забезпечуватиме інтерфейс між користувачами і провайдерами [14]. Ця методологія передбачає ключові нововведення: повністю посередницький (брокерський) підхід, побудований на технології хмарних обчислень, що має забезпечити всі «5V» завдань. Інший інструмент роботи з використанням великих обсягів даних — створення так званих **кубів даних (Data Cube)** — тривимірних (3D або вище) наборів даних для інтерпретації часової послідовності зображень. При цьому використовується подання об'єкта мінімальним набором полів та методів, прийнятних для вирішуваних проблем, що зокрема передбачено у заходах EuroGEOSS.

Під час побудови української підсистеми моніторингу ЦСР з використанням супутникових даних постає питання щодо власних підходів до вирішення проблеми забезпечення європейського рівня надання інформаційних сервісів і гармонійного впровадження в розроблювані системи EuroGEOSS.

1.3. ПРОБЛЕМИ ЧИННИХ ПІДХОДІВ ТА ПОДАЛЬШІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Згідно з планами розвитку всесвітньої системи систем GEOSS до 2030 року працюватиме якісно новий інструмент, що забезпечуватиме узгоджені управлінські рішення на глобальному, регіональному та національному рівнях. Уже зараз методологічний підхід, стисло описаний вище, одержує найоптимістичніші оцінки на форумах політиків і науковців: «революція у застосуванні даних», «новий етап цифровізації економіки» тощо. Об'єктивно ідеологія GEOSS та плани розгортання супутникових спостережних угруповань є одним із найбільш значущих міжнародних заходів у прагненні виробити відповідь на виклики глобальній екологічній безпеці та кліматичним змінам. Більше того, затверджена ООН система цілей, завдань та індикаторів має слугувати не лише орієнтиром, а й метрикою досягнення гармонізації соціальної, екологічної та економічної складових суспільного розвитку. При цьому кожна країна має виробити свій підхід, компліментарний до міжнародного, і зробити внесок у загальні зусилля, виходячи із пріоритетності національних інтересів. Інтуїтивно зрозуміло, що така ідеалізована картина впровадження GEOSS стикатиметься з низкою проблем різного масштабу, очевидно, не лише технологічних.

Усвідомлення проблем, як і можливостей, що надає GEOSS, — необхідна умова побудови власної ідеології та засобів сучасного моніторингу. Наразі під впливом зовнішніх обставин Україна надає низку параметрів стану екосистем відповідно до вимог міжнародних організацій, тобто за методиками GEOSS. При цьому тема супутникового моніторингу та GEOSS у чинних документах розроблюваних концепцій щодо сталого розвитку геть відсутня (див., наприклад, [16, 17]). Загалом поступ України в сфері кліматичної та екологічної проблематики у звіті Єврокомісії за 2020 р. характеризується як повільний. Очевидно, що постала проблема побудови власної системи, компліментарної до міжнародної. Перехід від окремих розробок науковців до системного впровадження інноваційних технологій потребує бодай мінімального аналізу міжнародного досвіду, власних напрацювань, і, не в останню

чергу, загального бачення проблеми з урахуванням реалістичного погляду на можливості, обмеження та ризики створюваної системи. У попередніх підрозділах стисло викладено загальний контекст створення GEOSS, у наступних — розглянуто релевантні приклади власного доробку. У підрозділі 1.3 наведено міркування щодо вирішення проблем, які виникають у процесі запровадження ідеології досягнення цілей сталого розвитку взагалі та залучення супутникових спостережень зокрема.

1.3.1. Досягнення сталого розвитку: підходи до оцінювання

Запровадження нової ідеології моніторингу цілей сталого розвитку є частиною великої програми, розгляд якої виходить далеко за межі монографії. Тут йдеться лише про один із інструментів — інформаційний, який має наближати суспільство до умов, що відповідають уявленням про сталий розвиток. Водночас цей інструмент не є деякою допоміжною складовою чи просто метрикою для оцінювання основних заходів. GEOSS розглядається в документах GEO як системоутворювальний каркас цілої діяльності, як основа для ухвалення рішень та організаційних заходів. Отже, впроваджуючи новітні інформаційні технології у систему моніторингу, не можна уникнути наведення хоча б стислої характеристики загальних проблем створюваної системи.

Відомо, що систему індикаторів ЦСР ООН розроблено з урахуванням досвіду декількох міжнародно визнаних систем, які використовуються різними інституціями. Зокрема це системи індикаторів Світового банку [18], що включають понад 300 показників, розподілених за 16 категоріями; система індикаторів стратегії сталого розвитку Євростат [19] і система ОЕСР [20]. Остання містить близько 50 індикаторів і використовується для моніторингу навколишнього середовища, інтеграції екологічних процесів у політичні. До зазначених систем слід додати систему індикаторів, розроблену за керівництва академіка НАН України М.З. Згуровського [21]. Разом з тим, саме система індикаторів ЦСР ООН орієнтована переважно на залучення Big Data, для чого створено спеціалізовані екс-

пертні органи і власне міжурядова група GEO. Оскільки планується створення нової інформаційної системи систем, постає природна потреба проаналізувати потенційні обмеження, прогалини та необхідність виконання досліджень, які виникають під час запровадження Big Data, і особливо супутникових даних у вирішенні проблем сталого розвитку суспільства.

Використовуючи, зокрема, міркування попередників [22], можна розгорнути поставлене питання у перелік конкретніших.

1. Які принципи та основоположення мають бути вироблені для забезпечення сталого розвитку суспільства?

2. Як наука визначає межі сталого розвитку, щоб передбачати або запобігти катастрофічним подіям?

3. Як можна дослідити умови вразливості соціально-економічних систем?

4. Якою мірою наука про дані сприяє описанню та аналізу динамічного взаємозв'язку між соціальною, економічною та екологічною системами?

5. Чи можна розробити засоби підвищення ефективності моделей, що застосовуються?

6. Як ефективно інтегрувати наявні ізольовані системи дослідження, аналізу та ухвалення рішень?

7. Які міждисциплінарні проблеми постають стосовно залучення Data Science?

8. Які системи підтримки, правила, норми, наукова інформація можуть бути вироблені для підвищення стійкості соціально-економічних систем?

Усвідомлення зазначених питань і пошук відповідей спостерігаємо, починаючи принаймні з виходу доповіді Римському клубу «Межі зростання» у 1972 р. [23], а також із формулювання Всесвітньою комісією з питань довкілля та розвитку (1987 р.), яке наразі є усталеним: «Стале суспільство — це суспільство, яке задовольняє потреби сучасності, не ставлячи під загрозу здатність майбутніх поколінь задовольняти свої потреби». Системні дослідження в рамках Римського клубу, зокрема модернізована версія «Меж зростання» 2002 року та деякі інші [24, 25], визначають новий рівень аналізу статистичних даних, удосконалені математичні моделі та комп'ютерні технології.

У «Межах зростання» використано математичну модель «World 3» [23], яка оперує з двома узагальненими індикаторами, що відображають соціально-економічну та екологічну складові розвитку суспільства, а саме — «індекс людського добробуту» та «екологічний відбиток людства». Ця модель досліджує поведінку взаємопов'язаної, нелінійної та обмеженої системи із затримками у відповідях. Зрозуміло, що вона не претендує на точні прогнози майбутнього або обґрунтування конкретного плану дій. Водночас виокремимо два принципових узагальнювальних висновки, які важливі в контексті питань, що розглядаються. Перший відображає загальний результат моделювання соціально-економічної системи людства, організацію якої визначено як некеровану і таку, що рухається у напрямку колапсу. І другий, не менш важливий, стосується можливості зміни парадигми: «Глобальний перехід до сталого суспільства цілком можливий без зменшення як поточної чисельності населення, так і обсягу промислового продукту». Тобто загальний тренд свідчить про катастрофічні наслідки, але існує можливість змінити цей тренд, причому заходи можуть бути прийнятними з точки зору економічного зростання.

Подальший розвиток цієї ідеології в іншій доповіді Римському клубу (за участю одного із співавторів «Меж зростання» [25]) свідчить про фундаментальний характер необхідних перетворень на шляху досягнення сталого розвитку. Йдеться про докорінну зміну економічної системи, що протирічить багатьом усталеним принципам сучасної економічної науки. Зокрема запропоновано низку політичних рішень (скорочення робочого часу, підвищення віку виходу на пенсію, підвищення соціального захисту — всього 13 заходів), які базуються на принциповому зростанні ролі державного управління. Автори [25] стверджують, що впровадження таких рішень, а саме «перехід від економічної системи, яка вже віджила, до більш сталої буде епічною соціальною, політичною та екологічною битвою XXI століття, і ставки дуже високі». Окрім посилення ролі державного управління пропонується досягти згоди щодо глобальної системи управління, яка б ефективніше вирішувала проблеми кліматичних змін, міграції та врегулювання конфліктів. Такий підхід має більше противників,

ніж прихильників. Думку авторів доповіді [25] наведено для ілюстрації рівня складності поставленої проблеми; дійсно, якщо фахівці в результаті аналізу глобальних трендів пропонують для вирішення проблеми запровадження інструменту на кшталт «глобального уряду», то виникають сумніви щодо реалістичності постановки цілої проблеми.

Те, що з проблемою такого рівня світова спільнота ще не стикалася, підтверджено фундаментальними дослідженнями Ч. Наїра [26], в яких обґрунтовано принципову різницю між розумінням сталості для багатих і бідних країн. Автор поділяє ключову думку доповіді [23] про визначальну роль державного управління, відкидаючи водночас можливість узгоджених спільних підходів на глобальному, регіональному та місцевому рівнях. Якщо багаті країни можуть зосередитися виключно на ефективному використанні ресурсів, то світ, що розвивається, має перш за все підвищувати рівень життя бідної більшості населення. Ця ситуація сфокусована у так званому «запитанні Індії»: «як Індія, країна з населенням у 1,2 мільярда людей, може вивести сотні мільйонів з бідності протягом 30 років, а також одночасно зменшити кількість шкідливих викидів та використовуваних ресурсів?». Фундаментальний характер різниці між розумінням сталості багатих і бідних країн полягає, у трактуванні автора [26], в неприйнятності для країн, що розвиваються, західної моделі розвитку, що базується на ідеології вільного ринку, необмежених правах і свободах людини. Отже, вирішення цієї проблеми «...вимагає створення нової політичної філософії, яка сприятиме перевазі спільного добробуту над правами окремої людини, відкидатиме ідею необмеженого індивідуального вибору та по новому трактуватиме визначення достатку в обмеженому світі». Цей висновок відповідає меті праці [26], яка є викликом баченню сталого розвитку, зафіксованих у документах міжнародних інституцій. Зазначимо, що категоричний підхід і окремі нереалістичні судження не є підґрунтям, щоб відкинути загальний підхід автора [26]. Зокрема, в ході активної дискусії із впровадження методології оцінювання ЦСР можна зустріти рекомендації із запровадження різних метрик для розвинених країн та країн, що розвиваються [27].

Складність проблеми оцінювання індикаторів ЦСР спонукає деяких дослідників принципово спростити постановку загальної проблеми. Так, у працях вітчизняних авторів [28—30] у результаті аналізу індикаторів ЦСР зроблено висновок про нереальність практичної реалізації їхнього моніторингу. Замість цього запропоновано «ресурсний підхід до визначення стану регіонального та національного розвитку і рівня його збалансованості, в межах якого визначаються кількісні та якісні характеристики ресурсів, їх агреговані оцінки». Такий підхід спирається на сформульовану авторами цих праць парадигму «збалансованого технологічного розвитку», яка полягає в максимізації створення суспільних та індивідуальних ресурсів за умови їх збалансованого використання. У результаті запропоновано використовувати систему індикаторів опису стану регіональних ресурсів та системи агрегованих оцінок, на основі якої передбачено здійснювати порівняльний аналіз, визначати та використовувати вагові коефіцієнти видів і категорій ресурсів та інтегральні індекси.

Ідея спрощення системи з 17 ЦСР та 169 індикаторів обговорюється, починаючи із затвердження такого підходу ООН і дотепер. Так, у [31] під впливом труднощів, пов'язаних з пандемією COVID-19, групою науковців — експертів ООН запропоновано розподілити ЦСР на 6 блоків: добробут людей (подолання бідності, поліпшення освіти та охорони здоров'я), стала економіка, доступ до продовольства, декарбонізація та стала енергетика, розвиток міст, екологія (біорізноманіття та кліматичні зміни). Висунуто й інші пропозиції щодо спрощення градації цілей (див., наприклад, [32]).

Окрім спрощення запропонованої метрики дослідники піддають критиці власне вироблений процес досягнення ЦСР. Так, у [33] наголошено, що встановлення цілей та моніторинг їх досягнення є вартісними і можуть мати неістотний або навіть негативний вплив. Розроблений підхід може бути прийнятним з точки зору підзвітності або повернення інвестицій, для організації допомоги чи підписання багатосторонніх угод. Як альтернативу запропоновано зосередити зусилля на заходах щодо вирішення проблеми, при цьому цілі є елементом процесу ухвалення рішень. Тобто основою стратегії моніторингу досягнення ЦСР є ухвалення конкретних управ-

лінських рішень, що потребує додаткового етапу аналізу варіантів. Цей етап потребуватиме інформації щодо найбільш ефективного шляху вирішення проблем сталого розвитку.

Наведений стислий огляд дискусійних питань щодо реалізації моніторингу ЦСР демонструє не лише складність, зокрема ідеологічну, їх вирішення, а й впровадження процесу загалом. Очевидною є необхідність визначення низки питань, що потребують ґрунтовних досліджень. При цьому завдання таких досліджень для кожної країни чи регіону суттєво різняться. Крім того, звертаючись до останньої із зазначених пропозицій [33], звернемо увагу, що інформація (зокрема супутникова) для вирішення проблем ЦСР залежить від того, які заходи передбачаються. Це особливо актуально для України, оскільки проблема забезпечення інформаційної підтримки у відповідних документах навіть не згадується. Конкретні приклади та попередні висновки для різних регіонів широко висвітлені у публікаціях у спеціалізованих виданнях Sustainability Science, Digital Earth, Frontiers in Environmental Sciences, International Journal of Sustainable Development & World Ecology, починаючи з 2015 року, що виникли в контексті створення GEOSS. Міркування різного рівня узагальнення не дають і не можуть дати вичерпних відповідей на питання, сформульовані вище. Водночас, деякі висновки щодо проблемних питань залучення Big Data вважаємо доцільним навести.

Розглянемо два рівня проблематики — системний та технологічний. На рівні створюваної системи систем йдеться про радикальний (навіть революційний) підхід, який передбачає зміну парадигми: «...ідеї, цілі, стимули, витрати на зворотні зв'язки, які заохочують певну поведінку або обмежують її» [24]. У такому системному перетворенні першочергового значення набувають інформаційні зв'язки, зміст і своєчасність даних, з якими працюватимуть учасники системи та користувачі. Завдяки новій інформаційній структурі мають поступово змінюватися фізичні та соціальні складові. Останнє і визначає інноваційний зміст перетворень.

Особливості технологічної ролі Data Science активно обговорюються дослідниками, що набувають нового досвіду в рамках GEOSS. Загальний тренд полягає в тому, що нові типи підходів потребують набагато складніших аналізу і моделей,

отже, на кілька порядків більше різнорідних даних [22]. Специфічні вимоги стосуються, зокрема, складності, просторового і часового розрізнення, а також зменшення невизначеності. З останнім чинником пов'язана цінність інформації (Value-of-information analysis), яка визначає якість моніторингу. Нові вимоги до даних та інформаційних технологій зумовлюють виконання цілеспрямованих досліджень у рамках розвинення Data Science як науки. Дорожню карту таких досліджень запропоновано в [34], де сформульовано 10 ключових проблем, врахування яких торує шлях сучасного розвитку Data Science. Серед новітніх технологій, які активно впроваджуються розробниками GEOSS, виокремимо запровадження машинного/глибокого навчання [35], а також спільне використання Big Data супутникового моніторингу та даних супутникових навігаційних систем.

Практичне впровадження даних супутникового моніторингу пов'язано із необхідністю їх системного використання в рамках усталеної статистичної звітності. Мабуть, це перша з проблем Data Science, яка визначатиме темпи побудови нової інформаційної системи.

1.3.2. Проблеми залучення дистанційних даних до статистичної звітності

Створення системи систем GEOSS на базі впровадження інноваційних технологій аерокосмічного моніторингу передбачає доповнення та вдосконалення офіційної статистики. Оскільки державними органами, що відповідають за моніторинг досягнення цілей сталого розвитку, є національні статистичні органи (НСО), дистанційні дані мають узгоджуватися з відповідними принципами і стандартами. Кожна країна вирішує цю проблему, виходячи з власних нормативів, водночас усвідомлюючи й деякі загальні засади, які формулюються на міжнародному рівні [36]. Досвід країн, які вже здійснили модернізацію власної статистичної звітності, свідчить про позитивні наслідки такого впровадження: одержання більш оперативної та своєчасної інформації; зниження навантаження на респондентів; модернізація процесу вироблення статистичної

інформації; нові продукти та послуги (наприклад, карти та візуалізація); зменшення загальних витрат [36].

Першим кроком модернізації статистичної звітності є визначення **спектра статистичних застосувань**, які мають перспективу поліпшення внаслідок залучення дистанційних даних. На цьому кроці мають бути визначені алгоритмічний підхід та статистичні додатки, де використання дистанційних даних матиме організаційні та економічні переваги. Очевидно, що спектр таких застосувань з часом збільшуватиметься із підвищенням якості, покриття, частоти та обсягів наявної супутникової інформації. Визначення переваг пов'язане **з оцінюванням якості інформації** та можливостей її застосування. Організації, що надають інформацію, орієнтуються на рівень точності та обґрунтованості відповідно до вимог чинних стандартів [37—39].

Водночас для НСО якість інформації означає перш за все «придатність за призначенням», тобто оцінку результату, виходячи з конкретної цілі або завдання. Отже, якість інформації є багатовимірною концепцією, яка включає не лише точність статистики, а й інші аспекти, такі як релевантність, доступність, своєчасність, цілісність, здатність до інтерпретації, просторове та часове покриття, незалежність респондентів, уникнення політичних чи інших упереджень тощо. У [40] визначено такі вимоги до якості інформації з точки зору користувача:

- повнота: наявність необхідних ознак, їх атрибутів та зв'язків;
- логічна узгодженість: ступінь дотримання логічних правил структури даних;
- просторова та часова точність;
- тематична релевантність: точність кількісних ознак та коректність некількісних ознак, їх класифікацій та взаємозв'язків;
- інформація про походження даних, включаючи деталі застосованого оброблення.

За останнє десятиліття було докладено значних зусиль для формулювання надійних вимог до дистанційних даних у статистиці. Зокрема австралійське бюро статистики затвердило матрицю якості (The ABS Data Quality Framework (ABS

DQF), 2009 р.), яка визначає сім вимірів якості даних, що відповідають вимогам НСО і водночас принципам стандартів ISO: інституційне середовище, актуальність, своєчасність, точність, узгодженість, доступність, придатність до інтерпретації.

Фахівцями CEOS уведено загальну вимогу до супутникових даних із застосуванням спеціального визначення: «Аналіз готових даних» (Analysis Ready Data). ARD — це супутникові дані, оброблені відповідно до мінімально необхідного набору вимог користувача та організовані у форму, яка дає змогу безпосередньо використовувати дистанційні дані без додаткових зусиль користувача. Впровадження концепції ARD, досягнення глобального покриття та безперервності одержання дистанційних даних є ключовими чинниками для побудови куба дистанційних даних типу ARD. Очевидно, що ресурси на виконання цього плану виправдуються лише в тому випадку, якщо ці дані будуть використовуватися багаторазово для минулого, сьогодення та майбутнього.

Місце дистанційних даних у офіційній статистиці та вибір відповідних джерел одержання інформації. Дистанційні дані, як і інші масиви «великих даних», застосовують для поліпшення і заміни деяких процесів вироблення офіційної статистики. Аналогічно з налагодженим використанням адміністративних даних для офіційної статистики передбачається модернізація таких розділів [41]:

- створення вибіркових реєстрів, ідентифікація допоміжної інформації;
- часткова заміна даних, зменшення обсягу вибірки;
- зменшення тривалості обстеження та збільшення набору даних;
- заміна пропущених даних;
- коригування, виявлення та ліквідація аномалій;
- створення більш повних наборів даних;
- порівняння даних — забезпечення достовірності;
- генерування нових аналітичних візій, підвищення рівня розуміння економічних, соціальних та екологічних явищ.

Знаковою тенденцією останніх років є використання зростаючої кількості дистанційної інформації різного походження

та характеристик. Якщо донедавна типовим було використання загальнодоступних даних із датчиків (таких як MODIS та Landsat), то сьогодні працює значно більший їх набір із поліпшеними технічними характеристиками; ця тенденція призводить до виникнення епохи «Big Data», в якій точність та різноманітність вимагатимуть нових підходів до обрання джерел інформації. Наприклад, якщо сфера інтересів полягає в моніторингу таких процесів як ерозія, деградація земель, типи сільськогосподарських культур, лісовий покрив, ступінь заболоченості земель, евапотранспірація, розширення міст, то очевидно, що часові ряди Landsat залишаються прийнятними. Однак для спостереження, наприклад, опадів потрібні зображення SAR з високим розрізненням в інтерферометричному режимі. Якщо необхідно отримати геопросторову карту базової екологічної системи чи природних ресурсів, найліпше обрати доступні зображення найвищого просторового розрізнення.

Наявна на сьогодні супутникова інформація надається трьома типами постачальників: національними та багатонаціональними космічними агентствами (більшість з яких є частиною CEOS), комерційними індустріальними приватними постачальниками, а також приватними постачальниками, які пов'язані з національними космічними агентствами. Дані, що надаються у відповідних ресурсах, згадуються як «відкриті» або «обмежені» супутникові джерела даних. Більшість відкритих джерел — це національні та багатонаціональні космічні агентства, а найбільш обмежені джерела — комерційні провайдери, які зосереджуються на даних високого просторового розрізнення для завдань оборони, точного землеробства та точного картографування. Поява на ринку великої кількості малих космічних апаратів зі спостереження за Землею (наносати, кубсати, мікросати тощо) суттєво розширює діапазон вирішуваних проблем, оскільки доповнює можливості довготривалих місій з високоточними вимірюваннями. Революційні зміни у можливостях використання супутникової інформації спричинив вільний доступ до даних супутників ESA Sentinel.

Серед великих компаній, що володіють апаратами та надають сервіси, виокремимо Digital Globe (https://www.digital-

globe.com/), AIRBUS Industries (http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/other-satellite-sensors), Planet (https://www.planet.com/), Google Terra Bella (https://terrabella.google.com). Інший тип підходу — це компанії, які отримують дані та сервіси від постачальників: Google Earth Engine, Amazon Web Services, Facebook тощо. Детальну інформацію про джерела даних, які можуть бути використані для вирішення актуальних проблем України, наведено у додатках.

Висновки

Міжнародна програма створення системи систем спостереження за Землею GEOSS демонструє динамічний розвиток діяльності та низку позитивних конкретних результатів з вирішення актуальних соціально-економічних проблем, зокрема, сформульованих ООН цілей сталого розвитку, моніторингу глобальних кліматичних змін, запобігання катастрофічних подій. Досягнутий на сьогодні рівень діяльності свідчить про досягнення світовою спільнотою якісно нового технологічного рівня у створенні основ цифрової економіки, методології оброблення великих обсягів даних (Big Data) та ефективності використання супутникової інформації.

Система моніторингу глобальної структури показників є підґрунтям впровадження принципів сталого розвитку до національної політики, яка вимагатиме інтеграції та експлуатації багатьох нових наборів даних, а також істотної модернізації національних статистичних і геопросторових систем.

Для України залучення до міжнародних зусиль відповідно до «Порядку денного у сфері сталого розвитку на період до 2030 року» має принципове значення як з позицій національних інтересів, так і в контексті євроінтеграційних процесів. Загалом існуюча система документів лише частково відповідає ідеології «Порядку денного у сфері сталого розвитку на період до 2030 року», при цьому відзначається тенденція уникнення індикаторів або інших показників, які передбачають кількісне оцінювання. Вже зараз окремі органи виконавчої влади мають надавати поточну інформацію щодо індикаторів сталого розвитку з використанням супутникових даних. Відповідні зрушення на національному рівні тільки-но розпоча-

лися і потребуватимуть узгодженої співпраці різних інституцій та науковців, як і координації діяльності на міжнародному рівні.

Організація міжнародної співпраці, спільно розроблювані технології та методи моніторингу відповідають інтересам України і можуть суттєво сприяти вирішенню актуальних для нашої країни проблем екологічного та ресурсного моніторингу, передбаченню кризових явищ тощо. Серед актуальних для України завдань співпраці з GEO є вироблення нового плану власної діяльності як частини робочого плану GEO, а також активна участь у новій структурі EuroGEO.

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

GEO — Group of Earth Observation — міжурядова Група зі спостереження за Землею
ESA — European Space Agency — Європейське космічне агентство (ЄКА)
WMO — World Meteorological Organization — Всесвітня метеорологічна організація (ВМО)
GEOSS — Global Earth Observation System of Systems — Глобальна система систем зі спостереження за Землею
OECP — Організація економічного співробітництва та розвитку; за впливом належить до трійки провідних світових економічних установ разом із МВФ та Світовим банком
Римський клуб (Club of Rome) — міжнародна неурядова організація, аналітичний центр, що об'єднує вчених, громадських діячів, лідерів думок і ділових людей більш ніж з 30 країн світу, стурбованих перспективами розвитку людства
JRC — Joint Research Centre — об'єднаний дослідницький центр; є службою науки і знань Єврокомісії; залучає вчених для проведення досліджень з метою надання незалежних наукових консультацій та підтримки політики ЄС
COPERNICUS — Copernicus Programme — програма спостереження за Землею, яка координується та керується Європейською Комісією у партнерстві з Європейським космічним агентством (ЄКА), державами-членами ЄС та агенціями ЄС
HORIZON 2020 — Горизонт 2020 — рамкова програма Європейського Союзу (2014—2020) з фінансування науки та інновацій
FP-7 — Рамкова програма Європейського Союзу з розвитку наукових досліджень і технологій (2007—2013) — програма фінансування, створена Європейським Союзом з метою підтримки і заохочення досліджень в Європейському дослідницькому просторі
EuroGEOSS — Європейський регіональний кластер GEO — організація, що створює Глобальну систему систем зі спостереження за Землею GEOSS
ERA-PLANET — The European Network for Observing our Changing Planet — масштабний проєкт у рамках програми HORIZON-2020, який

передбачає створення спільного Європейського дослідницького простору в сфері спостереження за Землею

SMURBS — Smart Urban Solutions for Air Quality, Casties and City Growth — частина проєкту ERA-Planet

SDG — Sustainable Development Goals — **ЦСР** — цілі сталого розвитку

SDG Indicators — індикатори досягнення цілей сталого розвитку

CEOS — Committee on Earth Observation Satelittes — Міжнародний комітет з супутників у сфері спостереження за Землею

CORINE — Coordination of information on the environment — координація інформації про довкілля. Проєкт створений у 1980-х роках для стандартизації збирання даних про стан наземного покриву в Європі і підтримки екологічної політики; головне джерело інформації про біофізичні характеристики наземного покриву Європейського економічного простору

EV — Essential Variables — істотні змінні: мінімальний набір змінних, які визначають стан системи та її розвиток і мають вирішальне значення для прогнозування розвитку системи та дають змогу визначати метрики, що контролюють траєкторію системи

Big Data — великі дані — сфера інформаційних технологій, в якій розглядаються шляхи аналізу, систематичного отримання інформації з наборів даних або інші способи оброблення даних, які є занадто великими або складними для використання в рамках традиційного прикладного програмного забезпечення для оброблення даних

Data Cube — куби даних — тривимірні (3D або вище) набори даних для інтерпретації часової послідовності зображень

Sentinel — розроблена ЄКА серія місій спостереження за Землею в рамках спільної ініціативи ЄКА/Європейської комісії **Copernicus**. Кожна місія (Sentinel-1, -2, -3, -4, -5, -5P, -6, Copernicus Expansion Missions) фокусується на різних аспектах спостереження (https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions)

Landsat — найтриваліший проєкт з отримання супутникових знімків планети Земля (від Landsat-1 (1972 р.) до Landsat-9 (2021 р.))

MODIS — Moderate Resolution Imaging Spectoradiometer — ключовий інструмент на борту супутників Terra і Aqua. Близький за призначенням прилад **VIIRS** (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), розміщений на борту Suomi National Polar-orbiting Partnership (спільного проєкту з NASA/NOAA)

NDVI — Normalized Difference Vegetation Index — нормований відносний індекс рослинності, який формується через супутникові знімки зеленої маси; кількісний показник активної (здатної до фотосинтезу) біомаси

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

До розділу 1

1. Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года. 2015. URL: https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N15/291/92/PDF/N1529192.pdf?OpenElement.

2. Scott G., Rajabifard A. Sustainable development and geospatial information: a strategic framework for integrating a global policy agenda into national geospatial capabilities. *Geo-spatial Information Scienc*e. 2017. Vol. 20 (2). P. 59—76. URL: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10095020.2017.1325594.

3. Йоханнесбургская декларация по устойчивому развитию. Принята на Всемирной встрече на высшем уровне по устойчивому развитию, Йоханнесбург, Южная Африка, 26 августа—4 сентября 2002 года. URL: http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/declarations/decl_wssd.shtml.

4. Copernicus Climate Change Service (C3S). European Contribution to the Monitoring of Essential Climate Variables from Space. URL: https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2017/17860-european-contribution-monitoring-essential-climate-variables-space.pdf.

5. Cape Town Global Action Plan for Sustainable Development Data. URL: http://unstats.un.org/sdgs/hlg/Cape-Town-Global-Action-Plan.

6. Доклад Межучрежденческой и экспертной группы по показателям достижения целей в области устойчивого развития, 48-я сессия, март 2017 г. URL: https://unstats.un.org/unsd/statcom/49th-session/documents/2018-2-SDG-IAEG-R.pdf.

7. Earth Observations in Support of the 2030 Agenda for Sustainable Development. URL: http://www.earthobservations.org/documents/publications/201703_geo_eo_for_2030_agenda.pdf.

8. Федоров О.П., Самойленко Л.І., Колос Л.М., Підгородецька Л.В. Проблеми використання супутникових даних для моніторингу цілей сталого розвитку України. *Космічна наука і технологія*. 2019. Т. 25. № 3. С. 40—56. URL: http://doi.org/10.15407/knit2019.03.040.

9. Hoff H. Understanding the Nexus. *Background Paper for the Bonn 2011 Conference*: The Water, Energy and Food Security Nexus. 2011. Stockholm Environment Institute, Stockholm. URL: https://mediamanager.sei.org/documents/Publications/SEI-Paper-Hoff-UnderstandingTheNexus-2011.pdf.

10. Allouche J., Middleton C., Gyawali D. 2014. Nexus Nirvana or Nexus Nullity? A dynamic approach to security and sustainability in the water-energy-food nexus. STEPS Working Paper 63. Sussex, UK: Social, Technological and Environmental Pathways to Sustainability (STEPS) Center. URL: https://steps-centre.org/wp-content/uploads/Water-and-the-Nexus.pdf.

11. Biggs E.M. et al. Sustainable Development and the Water-Energy-Food Nexus: A Perspective on Livelihoods. *Environmental Science and Policy Journal*. 2015. Vol. 54. P. 389—397. URL: https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.002.

12. Eftelioglu E., Jiang Z., Tang X., Shekhar S. The nexus of food, energy, and water resources: Visions and challenges in spatial computing. In Advances in Geocomputation—Geocomputation 2015 — The 13th International Conference. Springer Heidelberg, 2017. P. 5—20. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-22786-3_2.

13. Simmons A., Fellous J., Ramaswamy V. et al. Observation and integrated Earth-system science: A roadmap for 2016—2025. *Advances in Space Research*. 2016. Vol. 57, N 10. P. 2037—2103. URL: https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.03.008.

14. Nativi S., Mazzetti P., Santoro M., Ochiai O. Big Data challenges in building the Global Earth Observation System of Systems. *Environmental Modelling and Software*. 2015. Vol. 68. P. 1—26. URL: https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.01.017.

15. The Nexus Approach. UNU-FLORES Nexus Observatory. URL: https://flores.unu.edu/en/research/nexus.

16. Національна парадигма сталого розвитку України. За заг. ред. академіка НАН України, д.т.н., проф., засл. діяча науки і техніки України Б.Є. Патона. Київ: Державна установа «Інститут економіки природокористування та сталого розвитку Національної академії наук України», 2012. 72 с.

17. Національна парадигма сталого розвитку України. За заг. ред. акад. НАН України, д.т.н., проф., засл. діяча науки і техніки України Б.Є. Патона. Вид. 2-ге, переробл. і доповн. Київ: Державна установа «Інститут економіки природокористування та сталого розвитку Національної академії наук України», 2016. 72 с.

18. The World Development Indicators. URL: http://data.worldbank.org/indicator.

19. Eurostat Sustainable Development Indicators. URL: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/sdi/indicators.

20. OECD Key Environmental Indicators. OECD, Paris, 2008. 36 p. URL: www.oecd.org/env/indicators../37551205.pdf.

21. Сталий розвиток регіонів України. Наук. керівник М.З. Згуровський. Київ: НТУУ «КПІ». 2009. 197 с. URL: www.activity.wdc.org.ua/ukraine/Isd_ukr-2400dpi-10.pdf.

22. Sebestyйn V., Czvetkó T., Abonyi J. The Applicability of Big Data in Climate Change Research: The Importance of System of Systems Thinking.

Front. Environ. Sci. 2021. Vol. 9. Article 619092. doi: 10.3389/fenvs.2021. 619092.

23. Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J., Behrens W.W. III. The Limits to Growth: A report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind. New York: Universe Books, 1972. 205 p.

24. Медоуз Д., Рандерс Й. Медоуз Д. Межі зростання. 30 років потому. Київ: Пабулум, 2018. 464 с.

25. Макстон Г., Рандерс Й. У пошуках добробуту. Керування економічним розвитком для зменшення безробіття, нерівності та змін клімату. Доповідь Римському клубу. Київ: Пабулум, 2017. 320 с.

26. Наїр Ч. Держава сталого розвитку. Майбутнє урядування економіки та суспільства. Київ: Наш формат, 2020. 288 с.

27. Swain R.B, Yang-Wallentin F. Achieving sustainable development goals: predicaments and strategies. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology.* 2020. Vol. 27, N 2, P. 96—106. https://doi.org/10.1080/13504509.2019.1692316.

28. Полумієнко С.К., Рибаков Л.О. Індикативний аналіз сталості технологічного розвитку. За ред. С.О. Довгого. Київ: Логос, 2015. 191 с.

29. Горда С.Є. Методи ресурсного теоретико-ігрового аналізу процесів регіонального розвитку: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 08.00.04. Київ, 2018.

30. Полумієнко С.К., Стрижак О.Є., Трофимчук О.М. Ресурсно-онтологічний підхід до оцінки рівня національного розвитку. *Математичне моделювання в економіці.* 2016. № 3—4. С. 7—26.

31. Time to revise the Sustainable Development Goals. https://www.nature.com/articles/d41586-020-02002-3 JULY 2020.

32. https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/13504509.2019.1692316?needAccess=true.

33. Policy: Development goals should enable decision-making. Keith Shepherd, Douglas Hubbard, Norman Fenton, Karl Claxton, Eike Luedeling and Jan de Leeuw. 08 July 2015. *Nature*, Vol. 523, N 152. 9 July 2015. https://www.nature.com/news/policy-development-goals-should-enable-decision-making-1.17915.

34. Blair G.S, Henrys P., Leeson A., Watkins J., Eastoe E., Jarvis S. and Young P.J. Data Science of the Natural Environment: A Research Roadmap. *Front. Environ.* Sci. 2019. Vol. 121, N 7.

35. Monitoring sustainable development by means of earth observation data and machine learning: a review B. Ferreira1, M. Iten, R. Silva. *Environ. Sci. Eur.* 2020. 32:120. https://doi.org/10.1186/s12302-020-00397-4.

36. United Nations. Earth observations for official statistics: satellite imagery and geospatial data task team report. 2017. URL: https://unstats.un.org/bigdata/taskteams/satellite/UNGWG_Satellite_Task_Team_Report_WhiteCover.pdf.

37. International Organization for Standardization. 2011. ISO 19115-1: geographic information: metadata fundamentals (DIS). Geneva, Switzerland: ISO/TC211.

38. International Organization for Standardization. 2006. ISO 19138: geographic information: data quality measures. Geneva, Switzerland: ISO/TC211.

39. International Organization for Standardization. 2011. ISO 19157: geographic information: data quality (DIS). Geneva, Switzerland: ISO/TC211.

40. Yang X., Blower J.D., Bastin L., Lush V., Zabala A., Masó J., Cornford D., Díaz P., Lumsden J. An integrated view of data quality in Earth observation. *Philosofical Transactions of the Royal Society*. 2013. A 371: 20120072. URL: http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2012.0072.

41. Tam S.-M., Clarke F. Big Data, Official Statistics and Some Initiatives by the Australian Bureau of Statistics. *International Statistical Review*. 2015. Vol. 83 (3). P. 436—448. URL: https://doi.org/10.1111/insr.12105.

До розділу 2

1. Cowie A.L., Orr B.J., Sanchez V. M.C., Chasek P., Crossman N.D., Erlewein A., Louwagie G. et al. Land in Balance: The Scientific Conceptual Framework for Land Degradation Neutrality. *Environmental Science and Policy*. 2018. Vol. 79. P. 25—35.

2. Kussul N., Lavreniuk M., Skakun S., and Shelestov A. Deep Learning Classification of Land Cover and Crop Types Using Remote Sensing Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2017. Vol. 14 (5). P. 778—782.

3. Kingma D.P., Ba J. Adam. A Method for Stochastic Optimization. 2014. arXiv preprint. arXiv:1412.6980.

4. Skakun S., Kussul N., Shelestov A., Kussul O. The Use of Satellite Data for Agriculture Drought Risk Quantification in Ukraine. *Geomatics. Natural Hazards and Risk*. 2015 Vol. 7 (3). P. 901—917.

5. Kussul N., Lemoine G., Gallego F.J., Skakun S., Lavreniuk M., Shelestov A. Parcel-based Crop Classification in Ukraine Using Landsat-8 Data and Sentinel-1A Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2016. Vol. 9 (6). P. 2500—2508.

6. Kussul N., Lavreniuk M., Shelestov A., Skakun S. Crop Inventory at Regional Scale in Ukraine: Developing in Season and End of Season Crop Maps with Multi-temporal Optical and SAR Satellite Imagery. *European Journal of Remote Sensing*. 2018. Vol. 51 (1). P. 627—636.

7. Ghazaryan G., Dubovyk O., Löw F., Lavreniuk M., Kolotii A., Schellberg J., Kussul N. A Rule-based Approach for Crop Identification Using Multi-temporal and Multi-sensor Phenological Metrics. *European Journal of Remote Sensing*. 2018. Vol. 51 (1). P. 511—524.

8. Shelestov A., Lavreniuk M., Kussul N., Novikov A., Skakun S. Exploring Google Earth Engine Platform for Big Data Processing: Classification of Multi-temporal Satellite Imagery for Crop Mapping. *Frontiers in Earth Science*. 2017. Vol. 5. P. 17.

9. Skakun S., Kussul N., Shelestov A., Lavreniuk M., 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. Vol. 9 (8). P. 3712—3719.

10. Waldner F., Abelleyra D.De, Verón S.R., Zhang M., Wu B., Plotnikov D., Bartalev S. et al. Towards a Set of Agrosystem-specific Cropland Mapping Methods to Address the Global Cropland Diversity. *International Journal of Remote Sensing*. 2016. Vol. 37 (14). P. 3196—3231.

11. Kussul N., Kolotii A., Shelestov A., Yailymov B., Lavreniuk M. Land Degradation Estimation from Global and National Satellite based Datasets within UN Program. *In 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications* (*IDAACS*). 2017. Vol. 1. P. 383—386.

12. Gitelson A.A. Remote Sensing Estimation of Crop Biophysical Characteristics at Various Scales. In book: Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation. Edited by Prasad S. Thenkabail, John G. Lyon, Alfredo Huete. Boca Raton, FL: CRC Press, 2011. P. 329—358.

13. Monteith J.L. Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems. *The Journal of Applied Ecology*. 1972. Vol. 9 (3). P. 747—766. doi: 10.2307/2401901.

14. Bandaru V., West T.O., Ricciuto D.M., Izaurralde R.C. Estimating Crop Net Primary Production Using National Inventory Data and MODIS-derived Parameters. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2013. Vol. 80. P. 61—71. doi:10.1016/j.isprsjprs.2013.03.005.

15. Prince S.D., Goward S.N. Global Primary Production: A Remote Sensing Approach. *Journal of Biogeography*. 1995. Vol. 22 (4—5). P. 815—835. doi:10.2307/2845983.

16. He M., Kimball J.S., Maneta M.P., Maxwell B.D., Moreno A., Beguería S., Wu X. Regional Crop Gross Primary Productivity and Yield Estimation Using Fused Landsat-MODIS Data. *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10 (3), art. num. 372.

17. Prince S.D., Haskett J., Steininger M., Strand H., and Wright R. Net Primary Production of US Midwest Croplands from Agricultural Harvest Yield Data. *Ecological Applications*. 2001. Vol. 11 (4). P. 1194—1205.

18. Xin Q., Broich M., Suyker A.E., Yu L., Gong P. Multi-scale Evaluation of Light use Efficiency in MODIS Gross Primary Productivity for Croplands in the Midwestern United States. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2015. Vol. 201. P. 111—119.

19. Li J., Roy D.P. A Global Analysis of Sentinel-2A, Sentinel-2B and Landsat-8 Data Revisit Intervals and Implications for Terrestrial Monitoring. *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9 (9), art. num. 902.

20. López-Lozano R., Duveiller G., Seguini L., Meroni M., García-Condado S., Hooker J., Baruth B. Towards Regional Grain Yield Forecasting with 1 km-resolution EO Biophysical Products: Strengths and Limitations at Pan- European Level. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2015. Vol. 206. P. 12—32.

21. Shelestov A., Kolotii A., Skakun S., Baruth B., Lopez Lozano R., Yailymov B. Biophysical Parameters Mapping Within the SPOT-5 Take 5 Initiative. *European Journal of Remote Sensing*. 2017. Vol. 50 (1). P. 300—309.

22. Skakun S., Vermote E., Roger J.-C., Franch B. Combined Use of Landsat-8 and Sentinel-2A Images for Winter Crop Mapping and Winter Wheat Yield Assessment at Regional Scale. *AIMS Geosciences*. 2017. Vol. 3 (2). P. 163—186.

23. Claverie M., Ju J., Masek J.G., Dungan J.L., Vermote E.F., Roger J.-C., Skakun S., Justice C.O. The Harmonized Landsat and Sentinel-2 Surface Reflectance Data Set. *Remote Sensing of Environmen*t. 2018. Vol. 219. P. 145—161.

24. Molod A., Takacs L., Suarez M., Bacmeister J.. Development of the GEOS-5 Atmospheric General Circulation Model: Evolution from MERRA to MERRA2. *Geoscientific Model Development*. 2015. Vol. 8 (5). P. 1339—1356.

25. Fileccia T., Guadagni M., Hovhera V., Bernoux M. Ukraine: Soil Fertility to Strengthen Climate Resilience. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. 2014. Rome, Italy. http://www.fao.org/3/ai3905e.pdf.

26. Lesiv M., Schepaschenko D., Moltchanova E., Bun R., Dürauer M., Prishchepov A.V., Kussul N. Spatial Distribution of Arable and Abandoned Land Across Former Soviet Union Countries. *Scientific Data*. 2018. Vol. 5, art num. 180056.

27. Shelestov A., Sumilo L., Lavreniuk M., Vasiliev V., Bulanaya T., Gomilko I., Kolotii A., Medianovskyi K., Skakun S. Indoor and outdoor air quality monitoring on the base of intelligent sensors for smart city. *XVIII International Conference on Data Science and Intelligent Analysis of Information*. 2018. Vol. 836. P. 134—145.

28. Lavreniuk M., Shelestov A., Kolotii A., Vasiliev V., Bulanaya T., Gomilko I. Air Quality Monitoring in Smart City Using Intelligent Sensors. *EGU General Assembly Conference Abstracts*. 2018. Vol. 20. P. 17087.

29. Kussul N., Lavreniuk M., Kolotii A., Skakun S., Rakoid O., Shumilo L. A workflow for sustainable development goals indicators assessment based on high-resolution satellite data. *International Journal of Digital Earth*. 2019. Vol. 13, N 2. P. 309—321.

30. 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. Vol. 14 (5). P. 778—782.

31. Shelestov A., Lavreniuk M., Kussul N., Novikov A., Skakun S. Exploring Google Earth Engine platform for big data processing: Classification of multi-temporal satellite imagery for crop mapping. *Frontiers in Earth Science*. 2017. Vol. 5. P. 17.

32. Shelestov A., Kolotii A., Lavreniuk M., Yailymov B., Shumilo L., Korsunska Y. Smart City Services for Kiev City Within ERA-PLANET

SMURBS Project. *IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology* (*ELNANO*). 2019. P. 784—788.

33. Shelestov A., Raudner A., Kolotii A., Marinosci I., Attanasio A., Munafò M., Lavreniuk M., Speyer O., Yailymov B., Kussul N. Urban Growth Services Within ERA-PLANET SMURBS Project. *2019 Living Planet Symposium*, 13—17 May 2019, MiCo—Milano Congressi—Milan, Italy.

34. Kussul N., Skakun S., Shelestov A., Kussul O. The Use of Satellite SAR Imagery to Crop Classification in Ukraine within JECAM Project. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2014. P. 1497—1500.

35. Shelestov A., Lavreniuk M., Vasiliev V., Shumilo L., Kolotii A., Yailymov B., Yailymova H. Cloud approach to automated crop classification using Sentinel-1 imagery. *IEEE Transactions on Big Data*. 2019.

36. 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.

37. Shumilo L., Kussul N., Shelestov A., Korsunska Y., Yailymov B. Sentinel-3 Urban Heat Island Monitoring and analysis for Kyiv Based on Vector Data. *2019 10th International Conference on Dependable Systems*, *Services and Technologies* (*DESSERT*). Leeds, United Kingdom. 2019. P. 131—135.

38. Shumilo L., Yailymov B., Kussul N., Lavreniuk M., Shelestov A., Korsunska Y. Rivne City Land Cover and Land Surface Temperature Analysis Using Remote Sensing Data. *2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology* (*ELNANO*), 16—18 April 2019, Kyiv, Ukraine. 2019. P. 813—816.

39. Shumilo L., Shelestov A., Yailymov B., Korsunska Y., Kussul N. Land Surface Temperature estimation for Smart City. *2019 Living Planet Symposium*, 13—17 May 2019, MiCo—Milano Congressi—Milan, Italy.

40. Shelestov A., Kolotii A., Borisova T., Turos O., Milinevsky G., Gomilko I., Kolos L. Essential variables for air quality estimation. *International Journal of Digital Earth*. 2019. Vol. 13, N 2. P. 278—298.

41. Kussul N., Kolotii A., Shelestov A., Yailymov B., Lavreniuk M. Land degradation estimation from global and national satellite based datasets within UN program. *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications* (*IDAACS*), *9th IEEE International Conference*. 2017. Vol. 1. P. 383—386.

42. Korsunska Y., Shumilo L., Kolotii A., Shelestov A. Air Quality Estimation Using Satellite and In-situ Data for Kyiv City within ERA-PLANET Project. *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering* (*UKRCON*), 2—6 July 2019, Lviv, Ukraine. 2019. P. 1032—1036.

43. Shelestov A., Shumilo L., Kolotii A., Korsunska Y. Air Quality Estimation for the Kyiv City Within ERA-PLANET Project. *Earth Observation Phi-Week*, 9—13 September 2019, Rome, Italy.

44. Shelestov A., Kolotii A., Lavreniuk M., Medyanovskyi K., Vasiliev V., Bulanaya T., Gomilko I. Air Quality Monitoring in Urban Areas Using in-

Situ and Satellite Data Within Era-Planet Project. *IGARSS*, Valencia, Spain. 2018. P. 1668—1671.

До розділу 3

До п. 3.1

1. The SMURBS SDG Indicator 11.6.2 Earth Observation Platform. Available online: http://apcg.meteo.noa.gr/sdg1162/ (accessed on 4 October 2021).

2. Air Quality Monitoring Map EcoCity. Available online: https://ecocity.org.ua/ (accessed on 4 October 2021).

3. Air Pollution According to SaveDnipro. Available online: https://www.savednipro.org/about/ (accessed on 4 October 2021).

4. Shelestov A., Yailymova H., Yailymov B., Samoilenko O., Volynskii M., Shumilo L. Ground based validation of Copernicus atmosphere monitoring service data for Kyiv. *In Proceedings of the IEEE EUROCON 2021—19th International Conference on Smart Technologies*, Lviv, Ukraine, 6—8 July 2021. P. 88—91.

5. AQICN. Available online: https://aqicn.org/ (accessed on 4 October 2021).

6. Sensor Community. Available online: https://sensor.community/ (accessed on 4 October 2021).

7. Luftdaten Monitoring System. Available online: https://luftdaten.info/ (accessed on 4 October 2021).

8. Airly. Available online: https://airly.eu/ (accessed on 4 October 2021).

9. IQAIR. Available online: https://www.iqair.com/ (accessed on 4 October 2021).

10. Heymann Y. *CORINE Land Cover: Technical Guide*; Office for Official Publications of the European Communities. Luxembourg: 1994.

11. Kosmidis E., Syropoulou P., Tekes S., Schneider P., Spyromitros-Xioufis E., Riga M., Charitidis P., Moumtzidou A., Papadopoulos S., Vrochidis S. et al. hackAIR: Towards raising awareness about air quality in Europe by developing a collective online platform. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2018. Vol. 7. P. 187.

12. Sarigiannis D.A., Soulakellis N., Schäfer K., Tombrou, M., Sifakis N.I., Assimakopoulos D., Lointier M., Dantou A., Saisana M. ICAROS: An integrated computational environment for the assimilation of environmental data and models for urban and regional air quality. *Water Air Soli Pollut. Focus.* 2002. Vol. 2. P. 641—654.

13. Vohra K., Marais E.A., Suckra S., Kramer L., Bloss W.J., Sahu R., Gaur A., Tripathi S.N., Van Damm M., Clarisse L. et al. Long-term trends in air quality in major cities in the UK and India: A view from space. *Atmos. Chem. Phys.* 2021. Vol. 21. P. 6275—6296.

14. Ma G., Hofmann E.T. Population, immigration, and air quality in the USA: A spatial panel study. *Popul. Environ.* 2019. Vol. 40. P. 283—302.

15. SMURBS. Available online: https://smurbs.eu/the-project/ (accessed on 4 October 2021).

16. Shelestov A., Kolotii A., Borisova T., Turos O., Milinevsky G., Gomilko I., Bulanay T., Fedorov O., Shumilo L., Pidgorodetska L. et al. Essential variables for air quality estimation. *Int. J. Digit. Earth*. 2019. Vol. 13. P. 278—298.

17. Shelestov A., Kolotii A., Lavreniuk M., Yailymov B., Shumilo L., Korsunska Y. Smart city services for kiev city within ERA-PLANET SMURBS project. *In Proceedings of the 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology*, Kyiv, Ukraine, 16—18 April 2019. P. 784—788.

18. Copernicus Atmospheric Monitoring Service. Available online: https://www.regional.atmosphere.copernicus.eu/ (accessed on 4 October 2021).

19. Report Ambient Air Pollution: A Global Assessment of Exposure and Burden of Disease; World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2016. Available online: https://www.who.int/phe/publications/air-pollution-global-assessment/en/ (accessed on 4 October 2021).

20. Air Pollution in Ukraine. Available online: https://www.saveecobot.com/ (accessed on 4 October 2021).

21. Air Pollution in Europe: Real-Time Air Quality Index Visual Map. Available online: https://aqicn.org/map/europe/ (accessed on 4 October 2021).

22. LUN City Air Stations. Available online: https://misto.lun.ua/air (accessed on 4 October 2021).

23. Air Quality Sensor Performance Evaluation Center. Available online: https://www.aqmd.gov/aq-spec/sensors (accessed on 4 October 2021).

24. Air Quality Transmitter AQT420. Available online: https://www.vaisala.com/en/products/weather-environmental-sensors/air-quality-transmitter-aqt420 (accessed on 4 October 2021).

25. Register of Approved Types of Measuring Instruments. Available online: https://legalzvt.kiev.ua/ (accessed on 4 October 2021).

26. Data on Air Pollution in Kyiv from the Borys Sreznevsky Central Geophysical Observatory. Available online: http://cgo-sreznevskyi.kyiv.ua/index.php?fn=lsza&f=lsza (accessed on 4 October 2021).

27. Dijkstra L., Poelman H., Veneri P. The EU-OECD Definition of a Functional Urban Area. OECD iLibrary OECD Publishing. Paris, 2019.

28. Global Urban Centers. Available online: https://ghsl.jrc.ec.europa.eu/download.php?ds=smod (accessed on 4 October 2021).

29. The Humanitarian Data Exchange—Ukraine—Subnational Administrative Divisions. Available online: https://data.humdata.org/dataset/ukraine-administrative-boundaries-as-of-q2-2017 (accessed on 4 October 2021).

30. Wastes Generation in 2018, by Region. Available online: http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/ns/uv/uv_2018_u.htm (accessed on 4 October 2021).

31. Emissions of Pollutants and Greenhouse Gases into the Atmosphere from Stationary Sources of Pollution. Available online: http://www.ukrstat.

gov.ua/operativ/operativ2018/ns/vzap/arch_vzrap_u.htm (accessed on 4 October 2021).

32. Global Human Settlement Layer. Available online: https://ghsl.jrc.ec.europa.eu/ (accessed on 4 October 2021).

33. NASA Population Density. Available online: https://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=SEDAC_POP (accessed on 4 October 2021).

34. Kussul N., Yailymova H., Drozd S., Shelestov A. Validation of the global human settlement layer and NASA population data for Ukraine. *In Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications*. Cracow, Poland, 22—25 September 2021.

35. Validation Report of the CAMS Near-Real Time Global Atmospheric Composition Service. Available online: https://atmosphere.copernicus.eu/sites/default/files/2021-01/23_CAMS84_2018SC2_D1.1.1_JJA2020.pdf (accessed on 4 October 2021).

36. Shumilo L., Yailymov B., Shelestov A. Active fire monitoring service for Ukraine based on satellite data. *In Proceedings of the IGARSS 2020—2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Waikoloa, HI, USA, 26 September—2 October 2020. P. 2913—2916.

37. Kwak S.K., Kim J.H. Statistical data preparation: Management of missing values and outliers. *Korean J. Anesthesiol.* 2017. Vol. 70. P. 407—411.

38. The Current Population of Ukraine. Available online: https://ukrstat.org/uk/druk/publicat/Arhiv_u/13/Arch_nnas_zb.htm (accessed on 4 October 2021).

39. Population for Districts of Kyiv. Available online: http://www.kiev.ukrstat.gov.ua/p.php3?c=1123%26lang=1 (accessed on 4 October 2021).

40. Shelestov A., Lavreniuk M., Vasiliev V., Shumilo L., Kolotii A., Yailymov B., Kussul N., Yailymova H. Cloud approach to automated crop classification using Sentinel-1 imagery. *IEEE Trans. Big Data*. 2019. Vol. 6. P. 572—582.

41. Kussul N., Lavreniuk M., Skakun S., Shelesto A. Deep learning classification of land cover and crop types using remote sensing data. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 2017. Vol. 14. P. 778—782.

42. Meteosat Series. Available online: https://www.eumetsat.int/our-satellites/meteosat-series (accessed on 4 October 2021).

До п. 3.2

1. Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) System [Електронний ресурс]. URL: https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/background/summary/fwi.

2. European Forest Fire Information System [Електронний ресурс]. URL: http://effis.jrc.ec.europa.eu.

3. FIRMS FAQ—Earthdata—NASA. URL [Електронний ресурс]: https://earthdata.nasa.gov/faq/fims-faq.

4. Van Wagner C.E. Development and structure of the canadian forest fire weather index system. *Canadian Forest Service*. 1987. 48 p.

5. Stocks B.J., Lawson B.D., Alexander M.E., Van Wagner C.E., McAlpine R.S., Lynham T.J., Dube D.E. The Canadian Forest Fire Danger Rating System: an overview. *For. Chron*. 1989. Vol. 65. P. 450—457.

6. Dowdy A.J., Mills G.A., Finkele K., de Groot W. Australian fire weather as represented by the McArthur Forest Fire Danger Index and the Canadian Forest Fire Weather Index. Technical Report N 010, CAWCR. Melbourne, Australia, 2009. URL: http://www.cawcr.gov.au/technical-reports/CTR_010.pdf.

7. Інформаційна технологія оцінювання пожежної небезпеки та моніторингу пожеж у природних екосистемах на основі супутникових даних (Грантова підтримка Національного фонду досліджень України у межах конкурсу «Наука для безпеки людини та суспільства»): звіт про НДР (проміжний). Інститут космічних досліджень НАН України та ДКА України; кер. Н. Куссуль. Київ, 2021. 155 с. № ДР 0120U104886.

8. Pidgorodetska L., Zyelyk Y., Kolos L., Fedorov O. Surface soil moisture deficit assessment based on satellite data. *Geoinformatics 2021*: conference paper. Kyiv, Ukraine, 11—14 May, 2021.Vol. 2021. P. 1—6. DOI: http://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521114.

9. Keetch J.J., Byram G.M. A drought index for forest fire control. Res. Paper SE-38. U.S. Department of Agriculture Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, Asheville, NC, 1968. 32 p.

10. Костяков А.Н. Основы мелиорации. М.: Сельхозгиз, 1960. 622 с.

11. Власова О.В., Самойленко Л.І., Підгородецька Л.В., Колос Л.М. Дефіцит вологи кукурудзи за даними дистанційного зондування Землі. *Меліорація і водне господарство*. 2009. № 96. С. 58—64.

12. Campbell G.S., Campbell C.S. Water Content and Potential, Measurement. Encyclopedia of Soils in the Environment. Ed. D. Hillel. *Elsevier*. 2005. P 253—257. DOI: http://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00502-6.

13. Hengl T. et al. SoilGrids250m: Global Gridded Soil Information Based on Machine Learning. PLOS ONE. 2017. 21 p. DOI: http://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748.

14. Задорожній Ю.В., Смірнова І.В. Сільськогосподарська меліорація: методичні рекомендації до виконання практичних занять. URL: http://dspace.mnau.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/4355/1/Silskohospodarska%20melioratsiia.pdf.

15. Волков В.Н., Нариманянц Е.В. Состав, физические и физико-химические свойства грунтов: учебно-методическое пособие. URL: http://window.edu.ru/resource/887/68887/files/rsu664.pdf. (дата звернення: 28.08.2021).

16. Айвазян С.А. К методологиям измерения статистических категорий качества жизни населения. *Экономика и математические методы*. 2003. Т. 39, № 2. С. 33—53.

17. Айвазян С., Мхитарян В. Прикладная статистика. Основы эконометрики: в 2 т. М.: Юнити, 2001. Т. 1: Теория вероятностей и прикладная статистика. 656 с.

18. Keetch—Byram drought index. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Keetch%E2%80%93Byram_drought_index.

19. Garcia-Pratsa A., Del Campo A., Tarcísio Fernandes J. G., Antonio Molina J. Development of a Keetch and Byram-Based drought index sensitive to forest management in Mediterranean conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2015. Vol. 205. P. 40—50.

20. Burgan R.E. A method to initialize the Keetch—Byram drought index. *West. J. Appl. For.* 1993. Vol. 8 (4). P. 109—115.

21. National Fire Danger Rating System. URL: http://www.fs.usda.gov/detail/cibola/landmanagement/resourcemanagement/?cid=stelprdb5368839.

22. ERA5-Land hourly data from 1981 to present. URL: http://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land?tab=overview.

23. Tóth B., Weynants M., Pásztor L., Hengl T. 3D soil hydraulic database of Europe at 250 m resolution. *Hydrological Processes*. 2017. Vol. 31 (14). P. 2662—2666. DOI: http://doi.org/10.1002/hyp.11203. (Last accessed: 28.08.2021).

24. Panagos P., Van Liedekerke M., Jones A., Montanarella L. European Soil Data Centre: Response to European policy support and public data requirements. *Land. Use. Policy*. 2012. Vol. 29 (2). P 329—338. DOI: http://doi.org/10.1016/j.landusepol.2011.07.003. (Last accessed: 28.08.2021).

25. European Soil Data Centre (ESDAC). URL: http://esdac.jrc.ec.europa.eu.

26. Bosilovich M.G., Lucchesi R., Suarez M. MERRA-2: File Specification. GMAO Office Note N 9 (Version 1.1). 2016. 73 p. URL: http://gmao.gsfc.nasa.gov/pubs/docs/Bosilovich785.pdf.

27. Bauer-Marschallinger B., Paulik C. Surface Soil Moisture Collection 1 km Version 1. Product User Manual. Issue I1.30. 2019 URL: http://land.copernicus.eu/global/sites/cgls.vito.be/files/products/CGLOPS1_PUM_SSM1km-V1_I1.30.pdf.

28. Fire danger (Canadian Fire Weather Index system) in the Global Wildfire Information System (version 2-3-1). European Commission, Joint Research Centre (JRC) [Dataset]. 2018 URL: http://data.europa.eu/89h/4b4f1ea6-da7b-4870-9be4-aa5b9a2a4b70.

29. Olofsson P. et al. Making better use of accuracy data in land change studies: Estimating accuracy and area and quantifying uncertainty using stratified estimation. *Remote Sensing of Environment*. 2013. Vol. 129. P. 122—131.

30. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. URL:http://www.dsns.gov.ua/.

До розділу 4

1. Цілі сталого розвитку: Україна. Національна доповідь. Міністерство економічного розвитку і торгівлі України. 2017. 176 с. URL: http://menr.gov.ua/files/docs/Національна%20доповідь%20ЦСР%20України_липень%202017%20ukr.pdf.

2. Федоров О.П., Самойленко Л.І., Колос Л.М., Підгородецька Л.В. Проблеми використання супутникових даних для моніторингу цілей сталого розвитку України. *Космічна наука і технологія*. 2019. Т. 25, № 3. С. 40—56. URL: http://doi.org/10.15407/knit2019.03.040.

3. United Nations Economic and Social Council. Report of the Inter-Agency and Expert Group on Sustainable Development Goal Indicators, 49 session, 6—9 March 2018. URL: https://unstats.un.org/unsd/statcom/49th-session/documents/2018-2-SDG-IAEG-E.pdf.

4. Earth Observations in Support of the 2030 Agenda for Sustainable Development. URL: http://www.earthobservations.org/documents/publications/201703_geo_eo_for_2030_agenda.pdf.

5. Reyers B., Stafford-Smith M., Erb K.-H., Scholes R.J., Selomane O. Essential variables help to focus sustainable development goals monitoring. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 2017. Vol. 26. P. 97—105. URL: https://doi.org/10.1016/j.cosust.2017.05.003.

6. Lehmann et al. GEOEssential — mainstreaming workflows from data sources to environment policy indicators with essential variables. *International Journal of Digital Earth*. 2019. URL: https://doi.org/10.1080/17538947.2019.1585977.

7. Connecting GEO. 2016. D2.1: Navigating Sustainability in a changing planet. URL: https://ddd.uab.cat/pub/worpap/2016/146881/D2_1_SDG_workshop_report.pdf.

8. Mast, J., I. Serral, C. Domingo-Marimon, and A. Zabala Torres. 2019. Earth Observations for Sustainable Developement Goals Monitoring Based on Essential Variables and Driver-Pressure-State-Impact-Repsonse Indicators. *International Journal of Digital Earth*. 2019. URL: https://doi.org/10.1080/17538947.2019.1576787.

9. UN. SDG Indicators. Metadata repository. URL: https://unstats.un.org/sdgs/metadata.

10. Kuffer M., Wang J., Nagenborg M., Pfeffer K., Kohli D., Sliuzas R., Persello C. The Scope of Earth-Observation to Improve the Consistency of the SDG Slum Indicator. ISPRS Int. J. Geoinf. 2018. N 7. 428 p. URL: https://www.mdpi.com/2220-9964/7/11/428.

11. https://land.copernicus.eu/global/products/ba.

12. Shelestov A., Yailymova H., Yailymov B. et. al. The Wetland Map Validation for Ukraine. 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications. 2021. Cracow (virtual format). P. 343—376. DOI: 10.1109/IDAACS53288.2021.9661037.

13. Kolotii A., Kussul N., Shelestov A. et al. Comparison of biophysical and satellite predictors for wheat yield forecasting in Ukraine. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. *ISPRS Archives.* 2015. Vol. 40(7W3). P. 39—44. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-39-2015.

14. Kussul N., Mykola L., Shelestov A. et al. Crop inventory at regional scale in Ukraine: Developing in season and end of season crop maps with multi-temporal optical and SAR satellite imagery. *European Journal of Remote Sensing.* 2018. Vol. 51 (1). P. 627—636.

15. Hosseini M., McNairn H., Mitchell S. et al. A Comparison between Support Vector Machine and Water Cloud Model for Estimating Crop Leaf Area Index**.** *Remote Sensing.* 2021. Vol. 13, N 7. P. 1—20. DOI: 10.3390/rs13071348.

16. Kussul N., Shelestov A., Lavreniuk M. et. al. Deep learning approach for large scale land cover mapping based on remote sensing data fusion. Paper presented at the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). 2016. P. 198—201.

17. Shelestov A., Lavreniuk M., Vasiliev V. et. al. Cloud approach to automated crop classification using Sentinel-1 imagery. *IEEE Transactions on Big Data*. 2019. Vol. 6, N 3. P. 572—582. DOI: 10.1109/TBDATA. 2019. 2940237.

18. Куссуль Н.Н., Кравченко А.М., Скакун С.В. и др. Регрессионные модели оценки урожайности сельскохозяйственных культур по данным MODIS. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9, № 1. С. 95—107.

19. Куссуль Н.Н., Шелестов А.Ю. Grid-системы для задач исследования Земли: архитектура, модели и технологии. Киев: Наукова думка, 2008. 452 с.

20. Kussul N., Shelestov A., Yailymov B. et al. Crop minitoring technology based on time series of satellite imagery. *11th International Conference on Dependable Systems*, *Services and Technologies* (*DESSERT*). *IEEE.* 2020. P. 346—350.

21. Азарсков В.Н., Блохин Л.Н., Житецкий Л.С., Куссуль Н.Н. Робастные методы оценивания, идентификации и адаптивного управления. Киев: НАУ, 2004. 498 с.

22. Makarichev V., Vasilyeva I., Lukin V., Vozel B., Shelestov A., Kussul N. Discrete Atomic Transform-Based Lossy Compression of Three-Channel Remote Sensing Images with Quality Control Remote Sensing. 2022. Vol. 14 (1). P. 125. https://doi.org/10.3390/rs14010125.

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА 3

ВСТУП 5

Р О З Д І Л 1
ЦІЛІ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ТА КОСМІЧНІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ 8

1.1. Нова ідеологія моніторингу досягнення цілей сталого розвитку 8
1.2. Основні методологічні підходи міжнародної ініціативи GEOSS 12
1.3. Проблеми чинних підходів та подальші дослідження 19
Висновки 30

Р О З Д І Л 2
РОЗРОБЛЕНІ ТА ВПРОВАДЖЕНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОЦІНЮВАННЯ ІНДИКАТОРІВ ЦСР (2.4.1; 15.1.1; 15.3.1; 11.3.1) 32

2.1. Процес обчислення індикаторів 2.4.1, 15.1.1, 15.3.1 33
2.2. Попередні висновки щодо оцінювання та використання індикаторів 2.4.1, 15.1.1, 15.3.1 38
2.3. Оцінювання індикатора 11.3.1 «Відношення показника землекористування до показника приросту населення» 40

Р О З Д І Л 3
ПЕРСПЕКТИВНІ ПРОЄКТИ З ВПРОВАДЖЕННЯ СУПУТНИКОВОГО МОНІТОРИНГУ ЗА МЕТОДОЛОГІЄЮ GEOSS 46

3.1. Оцінювання якості повітря в Україні з використанням індикатора ЦСР 11.6.2 46
3.2. Оцінювання пожежної небезпеки із застосуванням супутникових даних високого розрізнення 70

Р О З Д І Л 4
ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ІНДИКАТОРІВ СТАЛОГО РОЗВИТКУ УКРАЇНИ 92

4.1. Національні цілі, завдання та індикатори для оцінювання із залученням супутникових даних 92
4.2. Джерела супутникової інформації для оцінювання індикаторів досягнення цілей сталого розвитку 96
4.3. Напрями побудови українського сегмента GEOSS 98
4.4. Українсько-німецький центр ключових компетенцій як інституційна модель розбудови українського сегмента GEOSS 102

Д О Д А Т О К

Список індикаторів досягнення цілей сталого розвитку (ЦСР) та істотних змінних, до обчислення яких залучаються супутникові дані 106

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ 145

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ 147

Наукове видання

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНЕ КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ КОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

КУССУЛЬ Наталія Миколаївна
ФЕДОРОВ Олег Павлович
ШЕЛЕСТОВ Андрій Юрійович

МОНІТОРИНГ ДОСЯГНЕННЯ ЦІЛЕЙ СТАЛОГО РОЗВИТКУ УКРАЇНИ ЗА СУПУТНИКОВИМИ ДАНИМИ

Київ, Науково-виробниче підприємство
«Видавництво “Наукова думка” НАН України», 2023

Оформлення художника *Л.О. Середи*
Художній редактор *І.П. Савицька*
Технічний редактор *Т.С. Березяк*
Оператор *В.Г. Каменькович*
Комп’ютерна верстка *Т.О. Ценцеус*

Підп. до друку 30.01.2023. Формат 60 × 90/16. Папір офс. № 1.
Гарн. Таймс. Друк. офс. Фіз. друк. арк. 10,25 + 1,0 вкл. на крейд. пап.
Ум. друк. арк. 11,25. Обл.-вид. арк. 12,0. Тираж 50 прим.
Зам. № ДФ-1231

Оригінал-макет виготовлено
у НВП «Видавництво “Наукова думка” НАН України»
Свідоцтво про внесення суб’єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготівників
і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 2440 від 15.03.2006 р.
01601 Київ 1, вул. Терещенківська, 3

ПП «Видавництво “Фенікс”»
03680 Київ 680, вул. Шутова, 13б
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
серія ДК № 271 від 07.12.2000 р.