



УДК 528.813:(633.1:553.981)(477)

С. С. Дугін

Оцінка і вибір полігонів для наземної завірки інформації космічного геомоніторингу

(Представлено членом-кореспондентом НАН України О. Д. Федоровським)

Обґрунтовано методику формалізованого аналізу альтернативних варіантів існуючих наземних полігонів України на основі методу аналізу ієрархій. Подано їх критеріальну оцінку шляхом визначення пріоритетів для конкретної номенклатури тематичних задач дистанційного зондування Землі. Здійснено вибір полігонів наземної завірки інформації космічного геомоніторингу з наступним спектрометричним дослідженням об'єктів спостереження.

Для завірки результатів космічного геомоніторингу використовують наземні полігони з відповідними тест-ділянками та еталон-об'єктами. Оцінка і вибір мережі полігонів виконуються, враховуючи ландшафтно-кліматичні зони України, специфіку тематичних завдань дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та наявність діючої мережі наземних полігонів. Таким чином, щоб забезпечити необхідну наземну завірку космічної інформації ДЗЗ, полігони повинні задовольняти певним вимогам. У монографії [1] наводяться такі категорії вимог: структура, випромінювально-відбивні характеристики, географічне розташування і розміри, методичне і технічне забезпечення, сертифікація.

Структура полігону розробляється на етапі його створення відповідно до можливостей місцевої екосистеми та переліку тематичних задач ДЗЗ.

Випромінювально-відбивні характеристики підстилаючої поверхні тестових ділянок повинні мати коефіцієнт відбиття в заданому спектральному діапазоні не менше 0,3; поверхня має бути близькою до ламбертовської; форма спектральної характеристики повинна бути в межах робочого спектрального інтервалу досить плоскою і стабільною.

Географічне розташування і розміри. При виборі місця розташування наземного полігону ДЗЗ слід брати до уваги насамперед ландшафтно-кліматичні та геолого-геоморфологічні особливості території, оскільки місцевий клімат, характерна рослинність і рельєф визначають структуру полігону і склад тестових об'єктів.

Методичне і технічне забезпечення для нормального функціонування тестових ділянок полігонів має включати великий обсяг польових вимірювань і спостережень [2]. Це вибір параметрів, що підлягають вимірюванню, обґрунтування необхідної точності і періодичності вимірювань, а саме: інтегральних і спектральних характеристик відбиття, поглинання і пропускання, а також вологості і геохімічного складу ґрунту земної підстилаючої поверхні [3].

Сертифікація. Відповідно до міжнародних правил, кожен полігон ДЗЗ проходить процедуру сертифікації і паспортизується. В Україні загальні положення і порядок сертифікації викладені в стандартах [4, 5].

У зв'язку з тим, що в Україні існує мережа полігонів з тестовими ділянками різного призначення та технічного стану для наземної завірки (валідації) результатів дешифрування космічних знімків, верифікації нових методик ДЗЗ, формування тест-ділянок і дослідження випромінювально-відбивних спектральних характеристик об'єктів спостереження, виникає практична проблема оцінки й вибору відповідного складу полігонів і тестових ділянок, параметри яких найбільш відповідають заданим тематичним задачам і сформульованим вище вимогам.

Мета даної роботи полягає в обґрунтуванні методики формалізованого аналізу альтернативних варіантів існуючих полігонів, їх критеріальної оцінки і вибору на основі максимального значення пріоритетів для конкретної номенклатури тематичних задач ДЗЗ полігонів з відповідними тест-ділянками для подальшого профілювання і спектрометричних досліджень в рамках вирішення поставлених тематичних задач ДЗЗ. Так як аналіз і оцінка альтернативних варіантів полігонів неможливі за абсолютним значенням одного з параметрів (критеріїв), а лише за відносним зіставленням багатьох параметрів шляхом попарних експертних порівнянь ступеня переваги по кожному з них, то для досягнення поставленої мети найбільше підходить метод аналізу ієрархій (Analytic Hierarchy Process), заснований Сааті (США) на лінгвістичному підході та експертній інформації [6].

Метод аналізу ієрархій (МАІ) дає змогу на основі експертних оцінок сформувати необхідну цільову функцію, рейтингувати альтернативні варіанти. Метод має кілька етапів [7, 8]. Перший — полягає в структуризації задачі у вигляді ієрархічної структури з кількома рівнями: цілі — критерії — альтернативи. На другому — експерт виконує попарні порівняння елементів кожного рівня. Найбільш відповідальним етапом є побудова ієрархії суджень між початковим (мета, яка буде досягнута в процесі розв'язання задачі) і останнім рівнями. Результати порівнянь елементів кожного рівня переводяться в числа. Далі обчислюються коефіцієнти важливості для елементів кожного рівня. Перевіряється узгодженість суджень експертів. Підраховується кількісний узагальнений критерій якості кожної з альтернатив і визначається найкраща альтернатива.

Згідно з вказаним методом, було розроблено ієрархічну модель (табл. 1), у якій на нульовому рівні сформульоване головне завдання — оцінка наземних полігонів для завірки інформації космічного геомоніторингу. Для кожного наступного рівня сформовані складові (критерії), оцінка яких повинна виконуватися, виходячи із принципів синергетики з урахуванням всіх аспектів функціонування наземних полігонів.

Коли розглянута проблема представлена ієрархічно, для формалізації експертної процедури будується множина матриць попарних порівнянь для кожного рівня і по кожній складовій даного ієрархічного рівня. Метою побудови множини матриць є кількісне визначення коефіцієнтів відносної пріоритетності показників, які утворюють ієрархію. Відповідно специфіки методу необхідно, щоб всі елементи лежачого нижче рівня ієрархії були порівняні експертом попарно стосовно кожного елемента лежачого вище рівня.

Таблиця 1. Ієрархічна модель оцінки і вибору космічних завірочних полігонів для забезпечення рішення тематичних завдань ДЗЗ

Рівень 0. Оцінка наземних полігонів для завірки інформації космічного геомоніторингу																	
Рівень 1. Основні напрями використання космічної інформації ДЗЗ																	
Екологія і НС				Геологія				Сільське господарство				Геодезія та картографія					
Рівень 2. Тематичні задачі космічного геомоніторингу ДЗЗ																	
2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	2.10	2.11							
Оцінка пожежної безпеки території	Моніторинг міських агломераций	Моніторинг екостану водойм	Моніторинг рослинного покриву	Визначення видового складу лісів	Пошук покладів корисних копалин	Дослідження геологічних структур ландшафтно-кліматичних зон	Окреслення видових угруповань	Оцінка агрокультур і врожайності	Картографування продуктивності екосистем	Картографування розповсюдження спричинених стресів							
Рівень 3. Основні вимоги до полігонів																	
Географічне положення			Відповідність даних наземної і космічної зйомки					Орбітальне покриття поверхні спостереження і періодичність КА					Випромінювально-відбивні характеристики				
Рівень 4. Основні наземні полігони України																	
4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	4.10	4.11	4.12	4.13	4.14	4.15	4.16	4.17	4.18
Шацький	Київський (Міський)	Київський (Агро)	Вінницький	Миколаївський	Роменський	Карпатський	Кримський (Тарханкут)	Кримський (Каївелі)	Кримський (Керч)	Яворівський	Степовий заповідник	Харківський лісний полігон	Заповідник “Асканія Нова”	Заповідник “Еланецький”	Дунайський заповідник	Полігон “Чауда”	Кримський (НЦУКВКЗ)
Значення узагальненого критерію $F \cdot 10^3$ для порівнюваних полігонів																	
14	5,7	7,1	12	9,0	4,3	6,0	9,5	3,5	2,3	2,8	6,9	3,4	4,3	2,5	5,6	3,8	2,3

При цьому зіставлення відбувається не за абсолютними значеннями, а за ступенем відносної переваги кожного параметра. Наведена процедура виконується на кожному ієрархічному рівні, включаючи останній, для якого вираховуються пріоритети з точки зору ступеня їх впливу на передостанній рівень. У результаті система переваг подається квадратною матрицею. Елементами матриці — відношення абсолютних пріоритетів експертів — є оцінки, судження експерта або їх групи про відносну важливість окремих параметрів, що порівнюються по відношенню до критерію, більш високого рівня, із заданою попередньо шкалою оцінок (шкали переваг від 1 до 9 балів). На нульовому рівні сформульована мета досліджень: оцінка наземних полігонів для завірки інформації космічного геомоніторингу. На першому рівні оцінюється вплив основних напрямів використання космічної інформації ДЗЗ на формування характеристик наземних полігонів завірки інформації космічного геомоніторингу. Це такі напрями: екологія і надзвичайні ситуації (НС), геологія (пошук корисних копалин і природні ресурси), сільське господарство, геодезія та картографія. При цьому враховуються вид та об'єми наземної завірки космічної інформації ДЗЗ, які в кожному напрямі різні.

У межах кожного напрямку використання космічної інформації ДЗЗ вирішуються різні тематичні задачі ДЗЗ. Їхня пріоритетність стосовно попереднього рівня також визначається експертом або групою експертів, що становить наступний другий рівень ієрархічної моделі. Розв'язання тематичних задач ДЗЗ пов'язане з завіркою космічної інформації геомоніторингу на наземних полігонах, характеристики яких повинні відповідати основним вимогам, що виходять з тематичних задач ДЗЗ. Ступінь впливу вимог до полігонів на якість наземної завірки і відповідно на виконання кожної тематичної задачі ДЗЗ визначається експертом на третьому рівні моделі. Відзначимо, що із наведених вище вимог до полігонів були використані такі: випромінювально-відбивні характеристики і географічне положення (відповідність ландшафтно-кліматичним зонам). Додатково були включені: орбітальне покриття поверхні спостереження і періодичність космічних апаратів (КА) та відповідність даних наземної і космічної гіперспектральних зйомок.

Можливість орбітального покриття певних районів є ключовим елементом при виборі географічного положення полігону. Виділяють два важливих елементи при оцінці покриття: миттєве поле зору — площа, що переглядається приладом у будь-який довільний момент, і швидкість покриття — швидкість, із якою нова поверхня потрапляє в поле зору при русі супутника. Час повторного огляду (Revisit time-RT) — це показник, звичайно використовуваний для оцінки орбітальних угруповань, які не досягають безперервного покриття області на поверхні Землі. Час повторного огляду це час, за який дане місце розташування на Землі не спостерігається орбітальною системою КА. Кращим визнається такий варіант угруповання, для якого значення критерію покриття (RT) найменше. Максимальний час повторного огляду всіх об'єктів, розташованих на території України, становить 2,7 доби [9]. Відповідність даних наземної і космічної гіперспектральних зйомок при наявності відмінностей в геометрії їх спостережень забезпечується створенням бази еталонних спектрів шляхом спектрометрування об'єктів спостереження під різними кутами [10–13].

На четвертому рівні ієрархічної моделі виконується попарне порівняння полігонів з точки зору їх відповідності вищезгаданим вимогам. У тому числі, враховувалась експертна інформація, яка була отримана в результаті аналізу тематичних задач ДЗЗ і характеристик полігонів.

На наступному етапі для кожної з матриць попарних порівнянь розраховуються компоненти власного вектора матриці [6]:

$$\alpha_1 = \left(\prod_{j=1}^n \alpha_{1j} \right)^{1/n}, \quad \dots, \quad \alpha_n = \left(\prod_{j=1}^n \alpha_{nj} \right)^{1/n}, \quad (1)$$

де $i, j = 1, \dots, n$ — число критеріїв, порівнюваних на кожному рівні.

З отриманих груп матриць визначаються нормальні оцінки вектора локальних пріоритетів:

$$K_i = \frac{\alpha_1}{\sum_i \alpha_i}, \quad \dots, \quad K_n = \frac{\alpha_n}{\sum_i \alpha_i}. \quad (2)$$

Як приклад, розглянемо докладніше перший рівень. Згідно з ієрархічною моделлю, кожний з чотирьох напрямів характеризується своєю питомою вагою (коефіцієнтом важливості) з точки зору використання наземних полігонів для завірки інформації космічного геомоніторингу. Для розрахунку цих коефіцієнтів будується таблиця переваг (табл. 2), яка складається з матриці (4-го порядку) попарних порівнянь напрямів використання космічної інформації ДЗЗ, стовпчиків послідовного обчислення (2) вагових коефіцієнтів (вектора переваг) та стовпчика обчислення максимального (головного) власного значення матриці порівнянь $\lambda_{\max}$, яке використовується для оцінки узгодженості [6].

До клітин матриці записуються результати попарних порівнянь складових залежно від їхньої значущості стосовно мети (оцінка наземних завірочних полігонів ДЗЗ). У результаті обробки матриць визначалися вектори пріоритетів для кожного рівня, компоненти яких визначають їхні пріоритети з погляду експерта. Після того як компоненти власного вектора отримані для всіх n рядів матриці за формулою (2) визначається вектор локальних пріоритетів критеріальних складових кожного рівня ієрархії. Далі за значеннями векторів локальних пріоритетів K^1 , K^2 , K^3 і K^4 знаходяться значення згортки узагальненого критерію для порівнюваних полігонів:

$$F = \sum K_l^1 \sum K_m^2 \sum K_r^3 \sum K_p^4 x_p^s, \quad (3)$$

де верхнім індексом критеріального пріоритету позначений рівень ієрархії; x_p^s — коефіцієнт переваги полігону s за показником p .

Таблиця 2. Матриця попарних порівнянь першого рівня

Основні напрями використання космічної інформації ДЗЗ	Екологія і НС	Геологія	Сільське господарство	Геодезія та картографія	$\prod_{j=1}^n \alpha_{1j}$	$\alpha_n = \left(\prod_{j=1}^n \alpha_{nj} \right)^{1/n}$	$K_i = \frac{\alpha_1}{\sum_i \alpha_i}$	$\lambda_{\max}$
Екологія і НС	1	2	3	4	24	2,2133638	0,466851	0,972591
Геологія	0,5	1	2	3	3	1,3160740	0,277591	1,064091
Сільське господарство	0,3333	0,5	1	2	0,3333	0,7598166	0,1602635	1,041713
Геодезія та картографія	0,25	0,3333	0,5	1	0,04166	0,4517897	0,095293	0,952932
Сума	2,0833	3,8333	6,5	10		4,74104	1	4,031329

Отже, після отримання всіх необхідних вагових коефіцієнтів маємо формулу згортки узагальненого критерію для порівнюваних полігонів. Зіставлення значень згортки узагальненого критерію F для порівнюваних полігонів дозволяє оцінити їх придатність для завірки інформації космічного геомоніторингу і вирішення тематичних завдань ДЗЗ за всією сукупністю складових (див. значення F , ієрархічну модель у табл. 1).

На основі отриманих критеріальних оцінок F з урахуванням ландшафтно-кліматичних зон України та фактичного стану полігонів для їх досліджень і використання були вибрані такі наземні полігони: Київський міський та Київський агрообласний, Шацький, Вінницький, Миколаївський та Кримський (Тарханкут). На цих шести полігонах були вибрані контрольні точки, які визначають найбільш характерні ландшафтні угруповання та найбільш повно описують притаманну місцевості рослинність.

На тест-ділянках Київського міського та Київського агрообласного полігонів вибрано точки для наземної спектрометрії рослинності з метою зіставлення даних наземної гіперспектральної зйомки та даних супутникового сенсору “Hyperion” для визначення змін наземного покриття за індексами червоного краю, оскільки ДЗЗ за допомогою супутникових гіперспектральних сенсорів є ефективним інформативним інструментом для тривалого моніторингу рослинного покриття.

На Шацькому полігоні (*Полісся*) було проведено спектрометричне вимірювання земних покривів для подальшої обробки та відпрацювання методик верифікації та калібрування даних супутникового спостереження Землі.

Вінницький полігон (*Лісостеп*) розташований на горбистій рівнині і має широко хвилястий характер поверхні. Відноситься до лесових рівнин поза льодовикової області, сильно розчленованих та терасованих долиною Пд. Бугу.

У межах Миколаївського полігону (*Степ*) було обстежено 114 посівів сільськогосподарських культур Новоодеського, Миколаївського, Жовтневого та Очаківського районів, з них 35 посівів соняшнику, 13 — ярого ячменю, 12 — озимого ячменю, 24 — озимої пшениці, 10 — озимого ріпаку. Зафіксовано також посіви озимого жита, ярої пшениці, вівса, гречки, кукурудзи, помідорів на зрошенні та полях, що перебувають під паром.

На Кримському (Тарханкут) полігоні (*Степ*) виконувались вимірювання спектральних характеристик для виявлення зон глибинних розломів за даними гіперспектральних супутникових зйомок. Відомо, що більш високі об’єми міграції вуглеводнів із родовищ нафти і газу звичайно спостерігаються в зонах розломів, а найбільш активно ці процеси відбуваються з газових родовищ.

Достовірність отриманих розрахункових даних істотно залежить від виконання умов узгодженості в матрицях порівнянь. Оцінка ступеня узгодженості вихідних даних здійснювалася шляхом розрахунку індексу узгодженості (ІУ) та обчислення відносної узгодженості (ВУ) для кожної матриці. ІУ надає інформацію про ступінь порушення числової та транзитивної узгодженості. ІУ й ВУ розраховуються за формулами [14]:

$$IU = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (4)$$

$$BU = \frac{IU}{I_n}, \quad (5)$$

де $\lambda_{\max}$ — максимальне власне значення матриці порівняння; n — порядок матриці, що визначається числом порівнюваних елементів; I_n — індекс узгодженості для оберненої метричної матриці порядку n випадкових оцінок. Значення I_n визначаються: 1 — 0,00; 2 — 0,00;

3 — 0,58; 4 — 0,90; 5 — 1,12; 6 — 1,24; 7 — 1,32; 8 — 1,41; 9 — 1,45; 10 — 1,49; 11 — 1,51; 12 — 1,48; 13 — 1,56; 14 — 1,57; 15 — 1,59.

Для прийнятної узгодженості необхідне виконання умови:

$$ВУ < 0,2. \quad (6)$$

У разі, якби умова (6) не виконувалася, слід було б повернутися до етапу формування матриць попарних порівнянь і покращити узгодженість оцінок експерта.

Наприклад, для матриці першого рівня індекс узгодженості такий (ВУ дорівнює $\approx 1\%$):

$$IU = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{4,031329 - 4}{3} = 0,010443.$$

Таким чином, обґрунтовано методику експертних оцінок для моделювання та визначення інформаційно-технічних характеристик наземних завіркових полігонів ДЗЗ. Відносна узгодженість для системи в цілому характеризує зважене середнє ВУ за всіма 19 матрицями порівнянь. При цьому узгодженість всієї ієрархії становить 0,097836, тобто $\approx 9,8\%$, що менше припустимих за теорією МАІ 10%.

На цій основі вибрано шість полігонів (Київський міський та Київський агрообласний, Шацький, Вінницький, Миколаївський та Кримський (Тарханкут)) для завірки результатів космічного геомоніторингу. У подальшому з урахуванням отриманого досвіду передбачається продовжити спектрометричні дослідження інших завіркових полігонів ДЗЗ України з метою їх оцінки і використання для наземної завірки інформації космічного геомоніторингу.

1. Апостолов А. А., Белокопытов В. Н., Богуславский А. С. и др. Изменения земных систем в Восточной Европе / Под ред. В. И. Лялько. – Киев: ПП “Фолиант”, 2010. – 581 с.
2. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі / За ред. В. І. Лялька і М. О. Попова. – Київ: Наук. думка, 2006. – 358 с.
3. Лялько В. И., Попов М. А. Полигоны ДЗЗ в Украине как элемент глобальной системы GEOSS/GMES // Косм. наука і технологія. – 2008. – **14**, № 2. – С. 3–12.
4. Попов М. О., Цимбал Т. В. Правила та процедура сертифікації методик використання даних дистанційного зондування Землі при вирішенні тематичних задач // Там само. – 2004. – **10**, № 4. – С. 104–112.
5. ДСТУ 2462-94. Сертифікація. Основні поняття. Терміни та визначення. – Київ: Держспоживстандарт, 1994.
6. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – Москва: Радио и связь, 1993. – 278 с.
7. Батъковский А. М., Коробов С. П., Хрусталева Е. Ю. Об одном подходе к оценке вариантов реструктуризации оборонно-промышленного комплекса // Экономика и мат. методы. – 2004. – **40**, № 1. – С. 50–68.
8. Федоровский А. Д., Якимчук В. Г., Боднар Е. Н., Козлов З. В. Оценка эффективности космических систем ДЗЗ на основе метода анализа иерархий // Косм. наука і технологія. – 2005. – **11**, № 3./4. – С. 75–60.
9. Артюшенко М. В., Дугин С. С., Федоровский А. Д. Моделирование и синтез орбитальной группировки космических аппаратов зонального наблюдения территории Украины // Там само. – 2011. – **17**, № 5. – С. 50–57.
10. Лялько В. І., Шпортюк З. М., Сибірцева О. М. та ін. Дослідження варіацій індексів червоного краю спектрів відбиття пшениці над газовим родовищем // Там само. – 2010. – **6**, № 6. – С. 5–10.
11. Лялько В. І., Сахацький О. І., Шпортюк З. М., Сибірцева О. М. Використання індексів червоного краю та водних індексів за гіперспектральними даними ЕО-1 “Hyperion” для класифікації земного покриву // Там само. – 2008. – **14**, № 3. – С. 55–68.

12. Лялько В. І., Шпортюк З. М., Сахацький О. І. та ін. Зіставлення супутникових та наземних гіпер-спектральних даних при визначенні позиції червоного краю спектрів відбиття // Там само. – 2010. – **16**, № 3. – С. 39–45.
13. Hilker T., Lyapustin A., Hall F. G. Remote Sensing of Environment An assessment of photosynthetic light use efficiency from space: Modeling the atmospheric and directional impacts on PRI reflectance (США, Канада) // RSE. – 2009. – **113**. – Р. 2463–2475.
14. Саати Т., Аернс К. Аналитическое планирование. – Москва: Радио и связь, 1991. – 186 с.

ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі
Інституту геологічних наук НАН України”, Київ

Надійшло до редакції 09.10.2013

С. С. Дугин

Оценка и выбор полигонов для наземной заверки информации космического геомониторинга

Обоснована методика формализованного анализа альтернативных вариантов существующих наземных полигонов Украины. На основе метода анализа иерархий приведена их критериальная оценка путем определения приоритетов для задач дистанционного зондирования Земли. Осуществлен выбор полигонов наземной заверки информации космического геомониторинга с дальнейшими спектроскопическими исследованиями объектов наблюдений.

S. S. Dugin

Evaluation and choice of polygons for the ground-based certification of the information of space geomonitoring

We substantiate the method of formalized analysis of alternatives for the existing land polygons of Ukraine. Based on the method of analytic hierarchy, we calculated their criterial evaluation. The choice of polygons for the ground-based certification (verification) of the space geomonitoring information with the following spectrometric investigation of the objects of observation is made. For this, we calculated the priorities for a specific nomenclature of thematic tasks of the Earth Remote Sensing.