

# ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ СИСТЕМИ

УДК 528.85:519.724(043)

## ГІПЕРСПЕКТРАЛЬНЕ ЗНІМАННЯ В УПРАВЛІННІ ТЕРИТОРІЯМИ

**В. І. Зацерковний**, д-р техн. наук, проф.

Національний авіаційний університет

zvigis@mail.ru

*Розглянуто фізичні основи гіперспектрального знімання (ГСЗ), завдання, що вирішуються за їх допомогою. Ефективність реалізації більшості пріоритетних проектів в задачах управління територіями зазвичай зростає при впровадженні сучасних геоінформаційних систем, заснованих на одержуваній з космосу інформації. В основі класифікації об'єктів на аерокосмічних зображеннях лежить наявність відмінностей в їх оптико-спектральних властивостях — спектральних сигнатурах. Чим більше відрізняються об'єкти між собою за цими властивостями, а також від підстильної поверхні (фона), тим простіше їх виявлення і точніше результат класифікації. Щоб розрізнити різнокласові об'єкти, необхідно мати детальну інформацію про їх спектральні сигнатури, що й забезпечує ГСЗ. Гіперспектральні дані можуть використовуватись як спільно з інформацією про топологію спостережуваних об'єктів, так і самостійно. Істотне збільшення можливості одержання корисної інформації про цільові об'єкти при використанні ГСЗ, ґрунтується на спектральних відмінностях цільових об'єктів і фонів. Однак реалізація цього напрямку являє собою серйозну проблему, зумовлену вимогою обробки величезних об'ємів іконічної (видової) інформації (десятки і сотні гігабайт) практично в масштабі реального часу. Сучасні гіперспектрометри дозволяють отримувати високодетальну просторову і спектральну інформацію про тип і стан природних і антропогенних об'єктів земної поверхні, а також про різні динамічні процеси, що відбуваються на них, наприклад пожежі, засухи тощо.*

**Ключові слова:** гіперспектральне знімання, геоінформаційні технології (ГІТ), спектральний аналіз, управління територіями.

*The following is investigated — basics physics of hyperspectral mapping (HSM) and the tasks that are being solved with their help. The efficiency of majority prioritized projects fulfilment in tasks of territory management is usually increasing when there is an implementation of modern geo-information systems, which are founded on getting the information from space. Behind the classification of object's on aerospace pictures there are differences in their optic-spectral characteristics — spectral signatures. The more these objects differ from each other, and also from background surface (background), the easier it is possible to find them and the more precise is the result of classification. In order to differentiate the objects of different classes one should have details information about their spectral signatures, what is actually provided by HSM. Hyper-spectral data might be used both together with information about topology of inspected(observed) objects and separately.*

*Essential growth of possibility to get useful information about target objects when using HSM is based on spectral differences of target objects and backgrounds. But the realization (implementation) of this approach is a serious problem predetermined by requirement to process huge scope of iconic (image) information (tens and hundreds of gigabytes) practically in real time scale. Modern hyper-spectrometers allow to get highly detailed spatial and spectral information about type and condition of natural and anthropogenic objects of Earth surface, and also about different dynamic processes that are happening on it, e.g. fires, droughts, etc.*

**Keywords:** hyper-spectral shooting (mapping), geo-information technologies (GIT), spectral analysis, territory management.

### Вступ

Для ефективного управління територіями необхідні достовірні й актуальні дані про об'єкти, процеси та явища, що відбуваються на них, а також сучасні технології накопичення, обробки й подання просторової інформації.

Серед усього розмаїття джерел просторових даних тільки аерокосмічне зондування Землі (АКЗ) виступає єдиним джерелом об'єктивної і актуальної інформації про будь-які території поверхні Землі і процесів що відбуваються на них, завдяки об'єктивності, великій оглядовості,

генералізації зображень, комплексному відображенню всіх компонент геосфери. Тому створення й розвиток більш досконалих засобів і технологій АКЗ на сьогодні є одним з найважливіших напрямків застосування космічної техніки й для соціально-економічних і наукових цілей.

Сьогодні вже немає необхідності переко-нувати будь-кого про величезну користь АКЗ для людства. Повсякденне життя доводить, що жодна глобальна проблема, будь то охорона навколишнього середовища, забезпечення всеосяжної міжнародної безпеки або розвиток національної інфраструктури, не може бути вирішена без використання результатів космічної діяльності. Більш того, ефективність реалізації всіх пріоритетних проектів зазвичай завжди зростає при впровадженні сучасних геоінформаційних систем, заснованих на одержуваній з космосу інформації і використанні систем моніторингу і управління територіями і всіма видами транспорту.

У світі вже успішно експлуатуються десятки космічних апаратів (КА) високої і надвисокої розрізненості. При цьому, швидкість удосконалення засобів і методів АКЗ за останні роки значно збільшилась.

Група штучних супутників Землі, що працюють на забезпечення її безперервного моніторингу, постійно зростає і якісно змінюється. У різних стадіях розробки перебувають від 200 до 300 нових проектів з реалізації перспективних можливостей спостереження й знімання Землі з космосу [1].

Розмаїття розв'язуваних прикладних і наукових завдань АКЗ, безперервне розширення складу бортових знімальних і зондувальних приладів, якісне зростання інформаційних характеристик, розвиток новітніх технологій класифікації, інтерпретації та використання отримуваних космічних даних, стрімкий процес технічного удосконалення і здешевлення вартості КА та отримуваних за їх допомогою знімків, інтенсифікація міжнародного співробітництва зі створення глобальних систем спостереження Землі дають усі підстави прогнозувати, що в період до 2025 р. космічні засоби АКЗ стануть найбільш пріоритетним і ефективним класом космічних апаратів цивільного призначення.

Спостерігається швидкий прогрес у сфері підвищення технічного рівня КА і скорочення витрат на їхнє створення й експлуатацію. Це забезпечується за рахунок застосування нових конструкційних матеріалів і методів проектування, мінімізації масогабаритних характерис-

тик, розробки уніфікованих орбітальних платформ, «інтелектуалізації» бортових функцій на основі сучасних комп'ютерних засобів і технологій, перспективних можливостей формування багатосупутникових «кластерних» космічних систем з різнотипних КА [1].

Просторова розрізненість підвищилась до десятків сантиметрів, спектральна розрізненість — до сотень каналів (гіперспектральне знімання). Точність орбітальної прив'язки підвищилась до 1–2 м.

Гіперспектральне знімання (ГСЗ) є результатом еволюційного розвитку багатоспектральних систем [2]. Так, завдяки новим технологіям кількість каналів збору інформації зросла з 3–7 до 200–1000, у результаті чого стало можливим формувати багатовимірне просторово-спектральне зображення.

Гіперспектральні знімки, на відміну від інших даних АКЗ, дозволяють добувати більш точну і детальну інформацію задовго до проявів їх у видимому спектрі.

Акцент, зроблений на застосування гіперспектральної апаратури в управлінні територіями, обумовлений її унікальними можливостями і перспективністю ринку гіперспектральних даних АКЗ.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Значний вклад у розвиток напряму аналізу даних АКЗ внесли вчені Аншаков Г. П., Асмус В. В., Бурачек В. Г., Виноградов Б. В., Вудс Р., Гонсалес Р., Злобін В. К., Кравцова В. І., Кринов Є. Л., Куссуль Н. М., Ландгребе Д. А., Лупян Є. О., Лялько В. І., Претт У., Свейн Ф., Сойфер В. А., Попов М. О., Станкевич С. А., Орлов А. Г., Овчинников О. М., Трофимчук О. М., Чапурский Л. І. Matthew M. W., Adler-Golden S. M., Berk A., Felde G., Anderson G. P., Gorodetzky D., Paswaters S., Shippert M. та багато інших.

Їх дослідження з АКЗ й обробки відеоінформації складають теоретичну основу для розв'язання поставлених задач. Проте, визнаючи наукову і практичну цінність розробок названих авторів, треба відзначити, що проблема впровадження ГСЗ в практику управління територіями не має достатньо глибокого системного опрацювання

#### **Постановка проблеми**

В основі класифікації об'єктів на аерокосмічних зображеннях лежить наявність відмінностей в їх оптико-спектральних властивостях — спектральних сигнатурах [3]. Чим більше відрізняються об'єкти між собою за цими властивостями, а також від підстильної

поверхні (фона), тим простіше їх виявлення і точніше результат класифікації. Однак подібна ситуація зустрічається на практиці далеко не завжди. Дуже часто природні і антропогенні об'єкти, які належать різним класам, мають близькі спектральні сигнатури [4]. Щоб розрізнити між собою такі різнокласові об'єкти, необхідно мати детальну інформацію про їх спектральні сигнатури, яку й забезпечує ГСЗ. Гіперспектральні дані можуть використовуватись як спільно з інформацією про топологію спостережуваних об'єктів, так і самостійно.

Істотне збільшення можливості одержання корисної інформації про цільові об'єкти при використанні ГСЗ ґрунтується на спектральних відмінностях цільових об'єктів і фонів. Однак реалізація цього напрямку являє собою серйозну проблему, зумовлену вимогою обробки величезних об'ємів іконічної (видової) інформації (десятки і сотні гігабайт) практично в масштабі реального часу [4].

Основними напрямками вирішення цієї проблеми є розвиток і впровадження комп'ютерних технологій обробки зображень, спроможних добувати корисну інформацію із гіперспектральних даних, а також оптимізація кількості спектральних каналів апаратури ГСЗ.

Аналіз джерел, у яких відображений досвід створення технологій обробки аерокосмічних зображень, як в Україні, так і за кордоном, свідчить, що розвиток за першим напрямком здійснюється шляхом створення швидких алгоритмів обробки гіперспектральних даних, які одночасно забезпечують розпаралелювання обчислень [5–7]. За другим напрямком — до зменшення кількості спектральних каналів (ознак) для розв'язання конкретних тематичних задач без втрати якості розв'язку [8]. Врешті-решт оцінка якості зображень, що одержуються таким чином, здійснюється візуально операторами, що дозволяє вже остаточно прийняти рішення стосовно вибору кінцевого набору спектральних каналів.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Однією з основних функцій органів державної влади суб'єктів держави є стимулювання і управління соціально-економічним розвитком регіону (області). Задачі управління територіями представлені на рис. 1. За сучасного рівня економіки і суспільства і зростаючої конкуренції регіонів таке управління має ґрунтуватися на технології одержання об'єктивної, достовірної, точної і своєчасної інформації, яка сукупно характеризує поточний стан, тенденції розвитку і взаємодії вказаних складових.

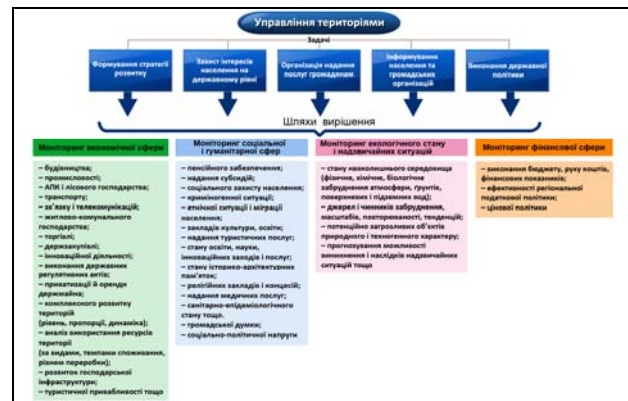


Рис. 1. Задачі управління територіями

До такої технології сьогодні можна віднести одержання даних АКЗ, яке є одним з найбільш передових і ефективних способів одержання актуальної інформації про властивості, характеристики і стан об'єктів територіального управління.

Отримувані при ГСЗ зображення, схожі з мультиспектральними, проте відрізняються від останніх тим, що у кожного пікселя кількість кольорних каналів не обмежується трьома основними: червоним, зеленим і синім.

Розрізнити гіпер- і мультиспектральні зображення можна за кількістю спектральних смуг або по типу виміру, яким одержано зображення.

При мультиспектральному способі одержання зображень відбувається дискретно і зі створенням декількох зображень.

Мультиспектральний сенсор може мати багато смуг, що охоплюють спектр від видимої до довгохвильової інфрачервоної зони спектру. Проте, мультиспектральні зображення не відтворюють «спектр» об'єкта, оскільки мультиспектральний сенсор формує декілька зображень на «окремій вузькій смузі частот» від видимого до інфрачервоного спектра.

При гіперспектральній обробці відбувається візуалізація вузьких спектральних ліній, тобто гіперспектральний сенсор одночасно формує зображення на всіх ділянках спектрального діапазону і одержує спектри всіх пікселів сцени.

При ГСЗ формується багатовимірне зображення, в якому два виміри характеризують просторове положення точок місцевості, а третє — їх спектральні властивості (рис. 2).

У площині XOY формується просторове зображення об'єкта АКЗ, для кожного пікселя якого існує розгортання по довжині хвилі  $\lambda$ .

Крім трьох зазначених координат, до них може додаватись і полярна координата.

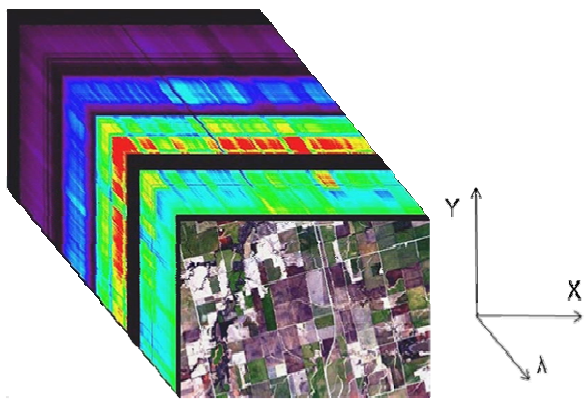


Рис. 2. Двовимірна проекція гіперкуба:  
X, Y — просторові координати; λ — кількість спектральних каналів, кожен з яких має власне спектральне значення

Спектри відбиття матеріалів за відомим складом розраховуються в лабораторних умовах, а потім збираються в бібліотеку спектрів, що суттєво спрощує аналіз гіперспектральних знімків. У відкритому доступі знаходиться декілька бібліотек [9, 10], що містять спектри відбиття природних і штучних матеріалів.

Щоб зрозуміти необхідність застосування ГСЗ, треба згадати, що око людини бачить видиме світло тільки в трьох діапазонах (червоному, зеленому і синьому), а при ГСЗ спектр поділяється на сотні діапазонів спектру, отже може більш ефективно виявляти об'єкти за їх фізико-хімічним складом, ідентифікувати видовий склад і стан рослинного покриву, визначати геологічну структуру, виявляти хімічний склад води тощо.

Гіперспектрометр багато в чому перевищує можливості ока людини (за спектральним і просторовим розрізненням, можливістю реєстрації інтенсивності, чутливості до ультрафіолетової і інфрачервоної зон випромінювання, до поляризації).

Гіперспектральне зображення трохи нагадує суперзір. За його допомогою можна не тільки ідентифікувати об'єкт, але й те, з чого він складається або зроблений. У сукупності з експертною системою (базою знань) гіперспектрометр можна вважати приладом, що володіє властивостями інтелектуального зору. В значному ступені інтелектуальність систем управління пов'язана з їх здатністю сприйняття як тривимірної картини навколишнього світу, так і одержання колірної (спектральної) картини про цей світ, а також підтримки управлінських рішень.

При ГСЗ території більшість об'єктів, що потрапляють у поле зору датчика, неоднорідні. Тобто спектральний склад обчислюваного

пікселя є комбінацією спектральних характеристик об'єктів, які цей піксель утворюють. У зв'язку з цим виникає ряд нових задач.

По-перше, потрібне «очищення» спектральної характеристики об'єкта для його більш надійної класифікації з використанням бібліотек спектральних еталонів.

По-друге, привабливою є можливість відновлення інформації про компонентний склад пікселів зображення, тобто субпіксельної класифікації.

Під субпіксельною класифікацією розуміють процедуру, в ході якої вимірний спектр пікселя розбивається на набір складових спектрів (кінцевих елементів, об'єктів) з визначенням відповідних часток (показників відносного вмісту), які показують пропорції кожного конкретного об'єкта, що входять до складу пікселя.

Кінцеві елементи можуть відповідати відомим макроскопічним елементам середовища, таким як вода, ґрунт, метал, рослинність або іншим об'єктам.

Для розв'язку зазначених задач (як для класифікації об'єктів розміром у декілька пікселів, так і для субпіксельної класифікації) доцільно використовувати методи штучного інтелекту: нечіткої логіки, еволюційних обчислень тощо. Зазначені підходи дозволяють гнучко адаптуватись до розв'язуваної задачі, особливо в умовах невизначеності.

Також треба враховувати, що при проходженні сонячного випромінювання через атмосферу відбувається зміна його інтенсивності, спричинене впливом молекул газів і наявних в атмосфері частинок. Тому гіперспектральні дані містять інформацію не тільки про поверхню, але й про стан атмосфери.

Для усунення цього фактора спотворення і переведення зображення з одиниць спектральної яскравості в одиниці спектрального коефіцієнта відбиття необхідно проводити процедуру атмосферного корегування.

Для одержання ГСЗ використовуються спеціальні гіперспектральні камери, принцип дії яких можна зрозуміти з рис. 3.



Рис. 3. Принцип дії гіперспектральної камери



Прилад працює за таким алгоритмом. Відбитий від об'єкта досліджуваний сигнал потрапляє на вхідний об'єктив 1, що фокусує його на щілину 2, яка встановлюється перпендикулярно напрямку руху носія з гіперспектрометром і «вирізує» вузьку смужку поверхні знімання. Далі, вирізана смужка попадає на диспергуючий елемент 3, який розташований так, щоб площина розташування світла була перпендикулярна щілині. Таким чином, смужка світла розкладається по довжинах хвиль, утворюючи спектральну координату зображення. Розкладений сигнал попадає на оптичну систему 4 (вихідний об'єктив), що проєктує його на приймач цифрової камери, де зображення фіксується і зберігається в вигляді безперервної послідовності відеокадрів або одного чи декількох кадрів відеозапису в програмі, що задається оператором, що виконує роботу в цей момент часу.

Далі вже оцифрований сигнал записується керуючим комп'ютером на жорсткий диск, флешкарту або інший пристрій для довготривалого збереження і наступного відтворення або обробки або ж для видачі на монітор для перегляду оператором.

Для кожного пікселя одержаного зображення, таким чином, визначається яскравість, яка є третьою «координатою» точки в гіперкубі.

По руху апарата (наприклад, прольоту над досліджуваною поверхнею) знімається нова смуга поверхні, створюючи послідовність кадрів, які пізніше об'єднуються в цільне зображення відзнятої поверхні — спектральне зображення.

Диспергуючими елементами можуть бути призма (рис. 3), дифракційна решітка (рис. 4), набір вузькосмугових фільтрів (рис. 5) або клин (рис. 6), які розкладають вхідний світловий пучок у кутовий спектр.

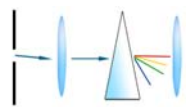


Рис. 3. Призмний спектрометр

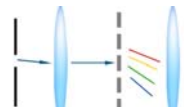


Рис. 4. Решітчастий спектрометр

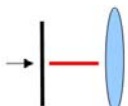


Рис. 5. Фільтровий спектрометр

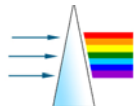


Рис. 6. Клиновий спектрометр

Інтерференційні спектрометри використовують статичний і динамічний Фур'є-спектрометри (ФС). Одержання спектра відбувається в два етапи: спочатку, реєструється інтерферограма

досліджуваного випромінювання, а потім шляхом її Фур'є-перетворення обчислюється спектр. Зміна різниці ходу інтерферуючих пучків приводить до модуляції інтенсивності монохроматичних складових випромінювання, причому частота модуляції однозначно визначається довжиною хвилі.

Сигнал, що виникає при цьому на приймачі, представляє собою Фур'є-перетворення від функції розподілу енергії по частотах, тобто від спектра досліджуваного випромінювання.

Для одержання звичайного спектра необхідно здійснити зворотне Фур'є-перетворення. Статичний ФС (рис. 7) є двопроменевим інтерференційним спектрометром, у якого диспергуючим пристроєм є інтерферометр бокового зсуву.

У динамічного ФС (рис. 8) — диспергуючим пристроєм слугує інтерферометр Майкельсона.



Рис. 7. Статичний Фур'є-спектрометр

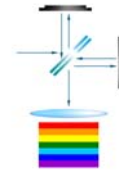


Рис. 8. Динамічний Фур'є-спектрометр

Переваги ФС перед дисперсійними приладами визначаються перед усім енергетичними перевагами. По-перше, вхідний отвір ФС набагато більше вхідного отвору дисперсійних приладів. По-друге, у ФС час реєстрації кожного спектрального інтервалу дорівнює часу реєстрації всього спектра (виграш Фелжета — мультиплекс фактор), в той час як у дисперсійних приладів кожний спектральний інтервал реєструється окремо. Перераховані чинники дають виграш у реєстрації випромінюваної енергії в чотири рази (рис. 9).

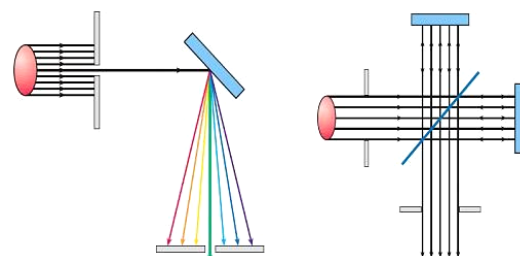


Рис. 9. Спектрографи: ліворуч — дисперсійний, праворуч — Фур'є-спектрограф

По-третє, в ФС відсутні обмеження спектрального розрізнення через розміри оптичних елементів. Тому максимальна межа розрізнення дисперсійних приладів обмежується величиною  $0,02 \text{ см}^{-1}$ , а в ФС ця межа досягає  $0,0002 \text{ см}^{-1}$ .

По-четверте, через відсутність вимог вузьких вхідних і вихідних щілин знижуються вимоги до конструкції оптичних схем без аберацій, а враховуючи, що в спектральних приладах для одержання більш широкого спектрального діапазону використовується дзеркальна оптика, для якої безаберацийні схеми створюються набагато складніше, чим для лінз, то цей чинник є дуже важливим (виграш Жакіно — геометричний фактор).

У ФС можна використовувати більші тілесні кути в джерела і в приймача, тим самим пропускати більшу кількість енергії при високому розрізненні.

По-п'яте, зменшення вимог до конструкції оптичних схем робить можливим створення оптичних схем з великим відношенням діаметра об'єктива до його фокусу (1:3), що апіорі робить ФС більш компактними порівняно з дисперсійними приладами.

По-шосте, висока чутливість ФС дає можливість використання світловодів для передачі інформації, а отже, й дослідження зразків дистанційно від лабораторії.

Способи ГСЗ представлені на рис. 10.

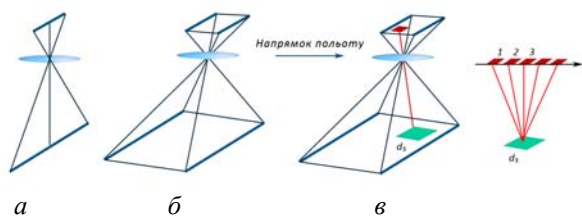


Рис. 10. Способи знімання:

*a* — щілинний (push-broom),

*б* — кадровий (framing); *в* — віконний (windowing)

Проекти, в яких використовуються гіперспектральні знімки, зазвичай, розв'язують такі задачі:

— *виявлення цілі (об'єкта)*: виділення об'єкта з множини подібних або виявлення об'єктів, розмір яких менше номінального розміру пікселя;

— *розпізнавання матеріалів*: аналіз даних гіперспектральних знімків для розпізнавання невідомих матеріалів. Складання карт матеріалів з вказівкою географічних зон їх розповсюдження;

— *диференціація матеріалів*: розрізнення матеріалів із схожими спектральними характеристиками;

— *відображення поверхні*: відображення особливостей поверхні, що не розрізняється на інших знімках.

Сфери застосування гіперспектральних знімків:

- *розвідка корисних копалин* (складання літологічних карт; складання геоботанічних карт, ресурсно-сировинне картографування, ідентифікація мінералів, встановлення коридорних аномалій тощо);

- *сільське господарство* (оцінка стресових впливів на сільськогосподарські культури, прогноз урожайності, моніторинг ґрунтів, оцінка впливу сільськогосподарської діяльності на навколишнє середовище);

- *лісове господарство* (лісова таксація, лісова хімія тощо);

- *моніторинг морських і узбережних вод* (моніторинг інфраструктури морських портів, стану їх акваторії, вплив землекористування і річних стоків, моніторинг евтрофікації і поширення шкідливих водоростей, моніторинг риболовних господарств і їх продуктивності, оцінка хлорофілу, фітопланктону, органічних сполук, що містяться у воді, моніторинг зважених наносів тощо);

- *моніторинг території і навколишнього середовища* (моніторинг заболочених територій, управління і переробка шахтних відходів, моніторинг деградації земель і складання карт ґрунтів, оцінка кліматичних змін, оцінка фракцій сніжного покриву, оцінка розміру кристалів, прогнозування танення снігу, екологічний моніторинг підприємств, моніторинг якості води, зсуву ґрунтів, моніторинг місць несанкціонованого збереження твердих побутових відходів, інвентаризація зелених насаджень, моніторинг стану і ремонту автомобільних доріг тощо);

- *збройні сили* (картографування рельєфу, виявлення цілей, виявлення мін і боєприпасів, що не розірвались, оцінка театру бойових дій тощо).

## Висновки

Результати ГСЗ надзвичайно корисні для розв'язання задач управління територіями, складних задач виявлення об'єктів, ідентифікації їх складу, процесів, що відбуваються в них, виділення відмінностей між дуже близькими класами предметів, оцінки біохімічних і геофізичних параметрів тощо, результати яких широко використовуються в моніторингу і управлінні станом об'єкта.

Сучасні вимоги до управління територіями потребують використання новітніх технологій і методів.

Перехід від традиційного багатозонального знімання до гіперспектрального не тільки

збільшує кількість інформації, але й забезпечує якісно новий, унікальний характер даних.

Застосування ГСЗ в управлінні територіями дає можливість отримати нову актуальну неупереджену інформацію, комплексно і системно вирішувати проблеми, здійснювати ефективне управління та прогнози. Характер розвитку сучасних наукових тенденцій свідчить про перспективність застосування методів ГСЗ у сфері управління територій і земельних ресурсів.

Такі методи здатні не лише підвищити рівень інформативності управлінських служб, а й дозволяють отримувати інформацію, яку взагалі не можна добути іншими методами.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. <http://refdb.ru/look/3251673-pall.html>
2. *Green, R. O.* Imaging spectroscopy and the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) / R. O. Green [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. — 1998. — V. 65(3). — P. 227–248.
3. *Tso B.* Classification Methods for Remote Sensed Data / B. Tso, P.M. Mather. — London: Tailor and Francis. 2001. — 332 p.
4. <http://naukovedenie.ru/sbornik1/1-5.pdf>
5. *Овчинников А. М.* Аппаратно-программный комплекс для обработки спектральной информации / А. М. Овчинников, Д. С. Ролдугин, М. Ю. Овчинников // Препринт ИПИМ им. М. В. Келдыша РАН. — М. — 26 с.
6. *Обработка гиперспектральных изображений в программном комплексе ENVI.* Сайт компании «Совзонд» <http://www.sovzond.ru/dzz/publications/542/2345.html>.
7. *Кочнова И. В.* Разработка технологии высокопроизводительной обработки аэрокосмических изображений методом параллельных вычислений: дисс. канд. техн. наук. — М., 2004. — 170 с.
8. *Попов М. А.* Методы оптимизации числа спектральных каналов в задачах обработки и анализа данных дистанционного зондирования Земли / М. А. Попов, С. А. Станкевич // *Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса*. — М. : ИКИ РАН, 2006. — Т. 2. — № 1. — С. 61–63.
9. <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib04/spectral-lib04.html>
10. <http://speclib.jpl.nasa.gov>

Стаття надійшла до редакції 24.05.2015