

УДК 528.8.04:504.064.3] (477) КП 04778363

В. І. Лялько, В. С. Оголенко

Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ
E-mail: casre@casre.kiev.ua

Про науково-прикладну програму використання даних в результаті експлуатації космічного апарата «Січ-2»

Представлено 25.06.07

Розглядаються основні елементи та структурні особливості розробленої науково-прикладної програми використання даних КА «Січ-2», що є складовою частиною цільового проекту «Зондування» З(Н)КПУ на 2003—2007 рр, який виконувався Науковим центром аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАНУ в рамках Державного контракту з НКАУ.

За роки виконання Першої (1993—1997) та Другої (1998—2002) космічних програм України в рамках цільового проекту «Зондування», що виконувався з метою забезпечення науково-методичного супроводу робіт з ДЗЗ шляхом розробки та виконання наукових програм для космічних апаратів «Січ-1» та «Океан-О», створення нових методик та комп'ютерних технологій тематичної інтерпретації космоснімків, було вирішено цілий ряд актуальних для України природоресурсних та природоохоронних задач (пошуки нафтогазових покладів, оцінка впливу Чорнобильської катастрофи на довкілля, контроль екологічного стану та пожежонебезпечності лісів, прогнозування врожайності зернових культур, дослідження морів та океанів, синоптичних прогнозів та ін.).

Результати цих досліджень неодноразово доповідалися на вітчизняних та міжнародних наукових форумах, знайшли відображення у трьох Атласах тематично дешифрованих космоснімків України («Україна з Космосу», 1997, 1999 рр. та «Космос — Україні», 2001 р.), збірниках «Нові методи в аерокосмічному землезнавстві» (1999), «Аерокосмічні дослідження Землі» (2002), монографіях «Інформатизація аерокосмічного землезнавства» (2002) та «Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування» (2006), сотнях статей і були практично впроваджені в організаціях Міністерств екології і природних ресурсів, надзвичайних ситуацій, НАК «Нафтогаз України», держадміністраціях міста Києва і ряду областей України та ін.

При виконанні цільового проекту «Зондування» в

1998—2002 рр. виконано дослідження на основі застосування методу системного аналізу. Проведено системний аналіз апаратурних комплексів ДЗЗ, обґрунтовано методику та розроблено комп'ютерну програму оцінки ефективності апаратурного комплексу «Січ-1М» на основі системних досліджень та імітаційних технологій, виконано оцінку ефективності вирішення тематичних задач науково-прикладної програми ДЗЗ, створено концептуальну модель КС «Січ». Розроблено та узгоджено ТЗ на системний аналіз КС «Січ».

Науково-прикладну програму використання даних КА «Січ-2» (далі — Програма) розроблено згідно з З(Н)КПУ на 2003—2007 роки (цільова програма «Наукові космічні дослідження», напрям «Дослідження Землі та навколоземного простору» та цільова програма «Дистанційне зондування Землі», напрям «Створення та експлуатація системи геоінформаційного космічного забезпечення»).

Космічні експерименти (КЕ) Програми, відповідно до розв'язуваних у процесі їхнього проведення задач науково-методичного і прикладного характеру, цільового призначення та ареалів досліджень, об'єднані у три розділи:

- 1) науково-методичні дослідження;
- 2) прикладне використання даних;
- 3) науково-освітні заходи.

Сучасні супутникові системи ДЗЗ містять у своєму складі прилади зі значним числом спектральних каналів у видимому та інфрачервоному діапазонах, прилади для проведення радіолокаційних і радіометричних вимірювань, що дозволяє проводити дослідження в інтересах широкого кола науко-

вих і господарських задач.

Запуск і експлуатація КА «Січ-2», оснащеного комплексом приладів оптичного діапазону високої просторової розрізненості, дозволить створити систему безперервного забезпечення даними ДЗЗ суб'єктів виробничо-господарської, наукової та управлінської діяльності державного, регіонального і місцевого рівнів, зв'язаних із захистом і контролем навколишнього природного середовища, раціональним використанням природних ресурсів, захистом населення від несприятливих змін погодних умов і клімату.

Серед переліку робіт, які будуть виконані протягом 2003—2007 років, зупинимось більш детально на розробці науково-прикладної програми використання даних КА «Січ-2» (надалі — Програми).

ОСНОВНІ ЗАДАЧІ ПРОГРАМИ

Основним цільовим призначенням «Науково-прикладної програми використання даних КА «Січ-2» є:

- відпрацювання, апробація, дослідна експлуатація та атестація методик і технологій рішення тематичних задач ДЗЗ і задач моніторингу навколишнього середовища при безпосередньому залученні до участі в космічних експериментах організації-споживачів космічної інформації;

- підготовлення методик і технологій рішення тематичних задач ДЗЗ до впровадження у виробництво;

- практичне вирішення широкого кола тематичних задач ДЗЗ у конкретних регіонах України на основі використання даних КА «Січ-2» та інших космічних апаратів;

- підготовлення фахівців організацій-споживачів даних ДЗЗ для рішення природоресурсних, екологічних, народногосподарських і інших задач на основі космічної інформації;

- аерокосмічна освіта студентів вищих навчальних закладів України.

Проект Програми розроблено колективом авторів під керівництвом директора Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі НАН України, чл.-кор. НАН України В. І. Лялька.

Основний внесок у розробку проекту Програми зроблено колективами фахівців таких організацій:

- Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі (ЦАКДЗ) НАН України (наукові керівники: член-кореспондент НАН України В. І. Лялько і член-кореспондент НАН України О. Д. Федоровський);

- Морського гідрофізичного інституту НАН України (науковий керівник доктор фізико-математичних наук, професор Г. К. Коротаєв);

- Інституту космічних досліджень НАНУ та НКАУ (науковий керівник академік НАН України В. М. Кунцевич);

- ДП «Дніпрокосмос» (науковий керівник кандидат технічних наук В. І. Волошин);

- Конструкторського бюро космічних апаратів і космічних систем ДКБ «Південне» НКАУ (науковий керівник авторського колективу головний конструктор космічних апаратів та космічних систем ДКБ «Південне» О. Л. Макаров).

- Державного науково-природничого центру НКАУ — ДНВЦ «Природа» (науковий керівник кандидат геол.-мін. наук В. С. Готинян).

Склад космічних експериментів проекту Програми та їхні організації-виконавці наведені в табл. 1.

Доопрацьована Програма погоджена зі всіма зацікавленими організаціями та Радою з космічних досліджень НАН України; затверджена НАН України і передана на розгляд і затвердження в НКАУ.

У табл. 2 наведені дані про основні характеристики супутника спостереження Землі «Січ-2» та встановленої на ньому наукової апаратури ДЗЗ.

«Січ-2» є супутником дистанційного зондування Землі з оптико-електронними приладами багатозонального спостереження високої роздільної здатності. Це спеціалізований малогабаритний супутник, комплекс оптико-електронної апаратури якого дозволяє вирішувати ряд практичних і наукових завдань регіонального й локального рівня з моніторингу кризових ситуацій, рослинних і ґрунтових покривів суходолу, створення цифрових карт місцевості, керування ресурсами й планування в урбанізованих і прибережних зонах та ін. Споживачами інформації можуть бути: державні відомства, дослідницькі й екологічні організації, агропромислові, геологорозвідувальні, будівельні, транспортні, страхові, туристичні фірми, громадські організації, засоби масової інформації.

ПРОБЛЕМИ, ЩО БУДУТЬ ВИРІШУВАТИСЯ

При виконанні проекту буде вирішено одну з найважливіших проблем — проблему розроблення та виконання науково-прикладної програми використання даних КА «Січ-2».

Нові науково-технічні результати та розробки

Протягом 2003—2007 рр. буде

1. Розроблено «Науково-прикладну програму використання даних КА «Січ-2», розроблено та затверджено Національним космічним агентством України (НКАУ) технічне завдання (ТЗ) на космічні експерименти (КЕ) та Програми КЕ вказаних науково-прикладних програм.

2. З метою забезпечення науково-прикладних

Таблиця 1. Космічні експерименти проекту Програми та їхні виконавці

Назва розділу Програми і космічного експерименту	Шифр	Постановник
1. НАУКОВО-МЕТОДИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ		
1.1. Відпрацювання методів оцінки екологічного стану ландшафтів України	«Екологія суходолу»	ЦАКДЗ НАНУ
1.2. Відпрацювання методів оцінки стану і прогнозу врожайності озимої пшениці на основі комплексної обробки наземної і космічної інформації	«Прогноз урожаю»	ЦАКДЗ НАНУ
1.3. Відпрацювання методів оцінки екологічного стану водних екотонів (гирлових зон та ін.) на основі ландшафтно-системного підходу	«Вода»	ЦАКДЗ НАНУ
1.4. Відпрацювання методів оцінки впливу геодинамічних факторів на екологічний стан урбанізованих територій	«Місто»	ЦАКДЗ НАНУ
1.5. Відпрацювання методів моніторингу опадів на суходолі з використанням комплексної інформації КА «Січ-2» та КА ENVISAT	«Дош»	ЦРЗЗ НАНУ та НКАУ
1.6. Відпрацювання методів та супутникової технології пошуків покладів нафти і газу на суходолі	«Нафта та газ суходолу»	ЦАКДЗ НАНУ
1.7. Відпрацювання методів пошуку нафтогазових покладів на шельфі	«Нафта та газ шельфу»	ЦАКДЗ НАНУ
1.8. Відпрацювання методів комплексного моніторингу акваторій Чорного і Азовського морів та морів Середземномор'я	«Катран»	МГІ НАНУ
1.9. Відпрацювання методів зовнішнього контролю параметрів оптичної апаратури ДЗЗ КА «Січ-2»	«Контроль»	ЦАКДЗ НАНУ
1.10. Відпрацювання методів калібрування даних оптичних сенсорів	«Калібрування»	ІКД НАНУ та НКАУ
1.11. Оцінка геометричної та радіометричної точності космічних знімків з КА «Січ-2» за допомогою досліджень на науково-дослідному фотограмметричному полігоні	«Січ-Полігон»	ДНВЦ «Природа»
2. ПРИКЛАДНЕ ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ		
2.1. Дослідна експлуатація та атестація МОД «Визначення видового складу і стану лісів» (спільно з користувачем)	«Стан лісу»	ЦАКДЗ НАНУ
2.2. Дослідна експлуатація та атестація МОД «Виявлення лісових та степових пожеж» (спільно з користувачем)	«Ризик»	ЦАКДЗ НАНУ
2.3. Дослідна експлуатація та атестація МОД «Пошук родовищ нафти та газу» (спільно з користувачем)	«Пошук ВВ»	ЦАКДЗ НАНУ
2.4. Дослідна експлуатація та атестація МОД «Дистанційний контроль снігового покриву» (спільно з користувачем)	«Сніг»	ЦРЗЗ НАНУ та НКАУ
2.5. Дослідна експлуатація та атестація МОД «Класифікація підстильної поверхні за покривними елементами ландшафту» (спільно з користувачем)	ПЕЛ	ДП «Дніпрокосмос»
2.6. Дослідна експлуатація та атестація МОД «Оцінка стану озимих культур» (спільно з користувачем)	«Озимина»	ДП «Дніпрокосмос»
2.7. Дослідна експлуатація та атестація МОД «Високочастотна атмосферна корекція даних оптичних сенсорів» (спільно з користувачем)	«Атмосферна корекція»	ІКД НАНУ та НКАУ
2.8. Вивчення можливих потреб в інформації з КА «Січ-2» в регіонах України	«ДЗЗ в регіонах»	ДНВЦ «Природа»
3. НАУКОВО-ОСВІТНІ ЗАХОДИ		
3.1. Аерокосмічна освіта студентської молоді	«Освіта»	НЦАОМУ
3.2. Відпрацювання каналу наддальнього зв'язку з використанням апаратури електронної пошти КА «Січ-2»	«Полюс»	ДП «Дніпрокосмос» НЦАОМУ

Таблиця 2. Основні характеристики космічного апарата «Січ-2»

Характеристика	Очікувані значення
Маса	160 кг
Тип орбіти	сонячно-синхронна
Висота орбіти	668 км
Нахилення орбіти	98.074°
Місцевий час низхідного вузла	10 год 30 хв
Термін активного існування	5 років
Ракета-носії	«Дніпро-1»
НАУКОВА АППАРАТУРА:	
Сканер середнього інфрачервоного діапазону (ССІК)	
Ширина спектрального діапазону	1.51—1.7 мкм
Проекція кроку пікселів в надирі	39.5 м
Кількість пікселів у сканері	1400
Кількість бітів для кодування одного пікселя	8
Ширина смуги огляду в надирі	55.5 км
Ширина охоплення	±500 км
Режими зйомки	режим інфрачервоної трасової зйомки
Багатозональний сканувальний пристрій (МСУ)	
Кількість спектральних діапазонів	4
Ширина діапазонів:	
— зелений	0.51—0.59 мкм
— червоний	0.61—0.68 мкм
— ближній ІЧ	0.80—0.89 мкм
— панхроматичний, інтегрований у багатозональний сканувальний пристрій	0.51—0.89 мкм
Розрізненість в надирі (проекція пікселя)	7.8 м
Розрізненість при відхиленні від надиру 35°	13 м
Ширина полоси огляду в надирі	46.6 км
Ширина охоплення	±500 км
Режими зйомки	режим панхроматичної трасової зйомки, режим багатоспектральної трасової зйомки, режим стереоскопічної панхроматичної трасової зйомки в полосі довжиною 140 км
АППАРАТУРА КОРИСНОГО НАВАНТАЖЕННЯ:	
Підсистема передачі даних	
Частотна смуга для радіолінії «Космос — Земля»	8025—8400 МГц
Тип модуляції	QPSK
Тип кодування	FEC
Ємність запам'ятовувального пристрою	2 Гбайт
Швидкість передачі	32 Мбіт/с
Електронна пошта (інтегрована)	
Частотна смуга радіолінії «Земля — Космос» для абонентського терміналу	144—146 МГц
Частотна смуга радіолінії «Космос — Земля» для абонентського терміналу	435—438 МГц
Частотна смуга радіолінії «Земля — Космос» для вузлової станції	2025—2110 МГц
Частотна смуга радіолінії «Космос — Земля» для вузлової станції	2200—2290 МГц
Потужність бортового передавача	10 Вт
Швидкість передачі повідомлень	9600 біт/с
Об'єм пам'яті	8 Мбайт

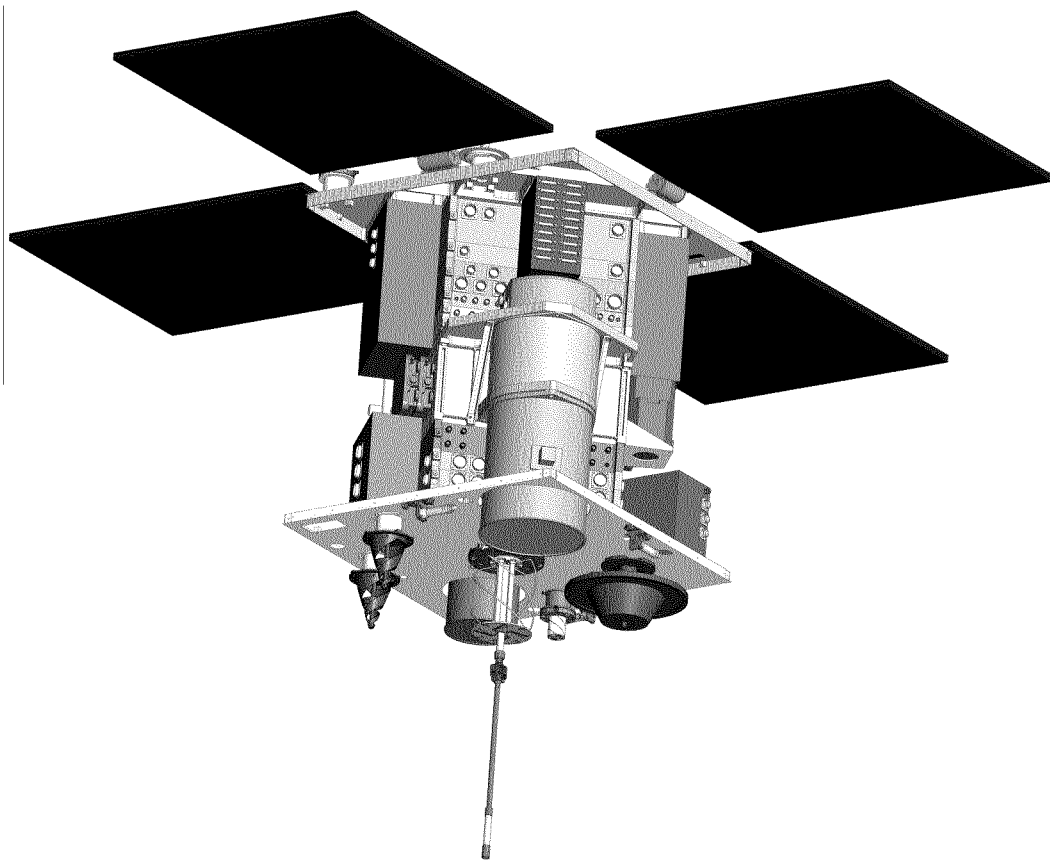


Рис. 1. Загальний вигляд супутника «Січ-2»

програм використання даних КА виконано наступні роботи:

— проведено імітаційне моделювання вирішення типових тематичних задач «Науково-прикладної програми використання даних КА «Січ-1М»;

— актуалізовано завіркові дані на тестових ділянках і полігонах;

— проведено субсинхронні авіаційні зйомки з АКДЗ-30 та наземні полігонні дослідження;

— виконано експериментальні дослідження з використанням океанічної платформи на полігоні Кацивелі;

— визначено актуальні для України задачі супутникового кризового моніторингу повеней, лісових пожеж та екологічного стану Чорного моря; обґрунтовано можливості їхнього вирішення за даними ДЗЗ.

3. Виконано «Науково-прикладну програму використання даних КА «Січ-1М» (в частині задач, вирішення яких дозволили функціональні можливості КА) та дослідження з використанням даних зйомок з КА «Метеор-3М».

4. Розроблено та відпрацьовано з використанням даних КА методи вирішення наступних тематичних задач ДЗЗ:

- визначення складу та стану лісів;
- дослідження снігового покриву;
- визначення вологості та вологозапасів ґрунтів.

5. Спільно з одним із провідних підрозділів ESA — Нансенівським центром дистанційного зондування навколишнього середовища (NERSC, Nansen Environmental Remote Sensing Centre, Norway, Bergen) у серпні — вересні 2005 р. проведено космічний експеримент з використанням океанографічної платформи (полігон Кацивелі), автономної буйкової станції та космічної зйомки з КА ENVISAT.

Експеримент проводився з метою відпрацювання організаційних питань при проведенні спільно з ESA оперативних супутникових спостережень та отримання натурних даних на океанографічній платформі синхронно із зйомками КА ENVISAT для їхнього подальшого аналізу в цілях розвитку алгоритмів оброблення радіолокаційних даних.

Таблиця 3. Рівні оброблення даних ДЗЗ

Етап оброблення	Рівень оброблення	Зміст операцій оброблення
Бортове оброблення	S (супутникове)	Аналого-цифрове перетворення, стиснення, упакування інформаційних та необхідних службових даних для передавання через радіоканал
Передавання	R (сирі дані)	Реєстрування інформації у вигляді, в якому вона приймається наземним інформаційним комплексом
Попереднє оброблення	рівень 0	Розпакування у відповідності до каналів і приладів; формування вихідного космознімка з первинних даних та доповнення його необхідними метаданими
	рівень 1	Здійснення необхідних процедур геометричного та радіометричного коригування і просторового прив'язування за орбітальними даними
Геореференціювання	рівень 2	Перетворення зображення у задану картографічну систему координат з використанням наземних опорних точок
Тематичне оброблення	рівень 3	Оброблення космознімка, змістом якого є отримання значень дешифрувальних ознак або визначення фізичних параметрів об'єктів зондування
	рівень 4	Оброблення космознімка, змістом якого є дешифрування космознімка та складання легенди

6. Виконано роботи щодо розширення міжнародного співробітництва з ДЗЗ:

- забезпечено участь НКАУ в CEOS;
- забезпечено участь НКАУ в GEO;
- визначено напрями та етапи розширення міжнародного співробітництва в GMES; розроблено програму «GMES-Україна» та робочі матеріали до семінару ЄК/ЄКА/НКАУ;
- разом з НКАУ та Президією НАНУ розроблено:
 - проект концепції та зміст Державної цільової програми раціонального природокористування із залученням сучасних космічних та інформаційних технологій дослідження Землі (Національний блок міжнародного проекту «Система систем глобального дослідження Землі — GEOSS»);
 - проект «Моніторинг навколишнього середовища та безпеки» (GEOSS-GMES-Україна);
 - проведено підготовку до співпраці Європейського Союзу і країн Причорноморського регіону в Сьомій рамковій програмі;
 - проведено підготовку до інтеграції Чорноморської системи спостережень в пан-європейську систему оперативного спостереження і прогнозу стану околичних та шельфових морів;
 - розроблено пропозиції щодо спільних досліджень в напрямку «Перспективи співробітництва Україна-НАТО у сфері космічного моніторингу і захисту довкілля».

ПЕРСПЕКТИВА ПРОДОВЖЕННЯ РОБІТ

Перспектива продовження робіт витікає з:

- необхідності постійного виконання науково-прикладних програм використання даних вітчизняних та закордонних КА для вирішення в інтересах України актуальних тематичних задач

ДЗЗ;

- необхідності створення на основі космічної інформації ДЗЗ комплексу інформаційних технологій та засобів підтримки прийняття рішень раціонального використання природних і соціально-економічних ресурсів України з урахуванням техногенного навантаження на природне середовище;
- необхідності постійної співпраці фахівців України з закордонними колегами для виконання міжнародних зобов'язань нашої держави щодо виконання програм GEO та GEOSS і міжнародних проектів, особливо в галузі вивчення та моніторингу трансрегіональних природних і техногенних процесів.

Запуск і експлуатація КА «Січ-2», оснащеного комплексом приладів оптичного діапазону високої просторової розрізненості дозволить створити систему безперервного забезпечення даними ДЗЗ суб'єктів виробничо-господарської, наукової та управлінської діяльності державного, регіонального і місцевого рівнів, зв'язаних із захистом і контролем навколишнього природного середовища, раціональним використанням природних ресурсів, захистом населення від несприятливих змін погодних умов і клімату.

ON THE SCIENTIFIC-APPLIED PROGRAM FOR THE USE OF «SICH-2» SATELLITE DATA

V. I. Lalko, V. S. Oholenko

The general elements and structural features of the developed scientific-applied program for the use of Sich-2 satellite data are considered. The program is a constituent part of the goal-oriented Project «Zonduvannya» for 2003—2007 which was performed by the Scientific Center for Aerospace Research of the Earth (CASRE) within the framework of the State Contract with the National Space Agency of Ukraine.

УДК 528.852.5

С. А. Станкевич, О. В. Шолоник

Научный центр аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины, Киев

Адаптивное многомерное вероятностное преобразование многоспектральных цифровых аэрокосмических снимков

Представлено 25.06.07

Предложено адаптивное многомерное вероятностное преобразование (АМВП) многоспектральных и гиперспектральных цифровых аэрокосмических снимков, реализующее оптимизацию состава спектральных каналов для каждого анализируемого пиксела цифрового изображения. Использование АМВП позволяет более качественно определять эквивалентные функции передачи модуляции многоспектральных цифровых аэрокосмических снимков, и следовательно, обеспечивать более высокое эквивалентное пространственное разрешение многоспектральной и гиперспектральной аэрокосмической съемки.

подавляющее большинство современных систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) оснащаются многоспектральными сенсорами на основе многоэлементных дискретных фотоприемников [10]. Широкое применение многоспектральных цифровых аэрокосмических снимков приводит к настоятельной необходимости разработки автоматизированной технологии количественной оценки их информативности [1]. Очень грубое представление о возможностях системы ДЗЗ дает величина геометрической проекции пиксела цифрового аэрокосмического снимка на поверхность Земли, которую почему-то называют пространственным разрешением. На самом деле пространственное разрешение — это минимальное расстояние между компактными элементами объектов ДЗЗ, еще позволяющее различать их на снимке [2]. Очевидно, что пространственное разрешение зависит не только от величины геометрической проекции пиксела, но и от ряда других факторов, например от радиометрических характеристик объектов и шумов тракта передачи оптического сигнала от объектов к изображению [11].

Проблема количественной оценки пространственного разрешения многоспектральных аэрокосмических снимков усугубляется различиями радиометрических характеристик объектов и шумов в разных спектральных каналах. Например, в некоторых из них объект может вообще не обнаруживаться, то есть пространственное разрешение стремится к бесконечности, а совместное использование не-

скольких спектральных каналов может обеспечить лучшее обнаружение, чем любой из них по отдельности — синергетический эффект многоспектральности [3].

Однако указанные трудности сравнительно легко преодолеваются при исследовании характеристик достижимости конечного результата — выявления объектов по многоспектральным аэрокосмическим снимкам. Одинаковость характеристик выявления одних и тех же объектов на разных многоспектральных снимках должна свидетельствовать об одинаковости обеспечиваемого пространственного разрешения — принцип *эквивалентности*. Поскольку процессы выявления объектов на изображениях принципиально стохастические, то определение эквивалентного пространственного разрешения должно базироваться на статистических моделях [4].

Классическим методом оценки разрешения одномерных изображений, в том числе и дискретных, является пространственно-частотный анализ, основанный на функциях передачи модуляции (ФПМ) звеньев тракта передачи оптического сигнала. Суммарная ФПМ полностью описывает передаточные свойства иконических систем, имеет объективный характер измерения и базируется на хорошо разработанном математическом аппарате. Кроме того, ФПМ используются при синтезе иконических систем.

Функция передачи модуляции определяется как действительный модуль комплексной оптической передаточной функции системы — отношения ком-

плексного пространственно-частотного спектра сигнала на выходе системы к комплексному пространственно-частотному спектру сигнала на ее входе. Физически ФПМ представляет собой коэффициент изменения амплитуды пространственной синусоиды на различных пространственных частотах при передаче ее иконической системой.

Функция передачи модуляции растровой системы ДЗЗ может быть экспериментально определена по цифровому аэрокосмическому снимку этой системы как модуль комплексного дискретного преобразования Фурье (ДПФ) от дискретной производной нормированной переходной характеристики (пограничной кривой) — изображения на снимке идеального скачка радиометрических характеристик оптического сигнала [5]. Для панхроматического цифрового снимка — это скачок интенсивности, для многоспектрального — скачок интенсивностей всех спектральных каналов. Многомерная пограничная кривая может быть измерена по многоспектральному цифровому аэрокосмическому снимку автоматически — снятием отсчетов цифрового изображения вдоль нормали к разделу однородных полей яркости, соответствующих резкой границе раздела контрастных объектов на снимке [6].

Для выделения значащих границ раздела радиометрических полей на цифровых аэрокосмических снимках используется вероятностное преобразование, вычисляющее для каждого пиксела цифрового изображения вероятность P правильного разделения статистически различающихся радиометрических полей [9]:

$$P(x, \theta) = 1 - \exp[-B(x, \theta)], \quad (1)$$

где x — пространственная координата вдоль выбранного направления θ на снимке, B — статистическое расстояние Бхаттачария между вероятностными распределениями сигналов в радиометрических полях. Вероятностное преобразование легко обобщается для многоспектральных аэрокосмических снимков путем оценивания вероятности по многомерным статистическим распределениям радиометрических характеристик.

Если многоспектральный аэрокосмический снимок имеет всего несколько спектральных каналов, то все они, как правило, являются достаточно информативными и необходимыми при выявлении большинства объектов ДЗЗ. Гиперспектральные же (десятки-сотни спектральных каналов) аэрокосмические снимки для большинства объектов являются информационно-избыточными и имеют единицы (редко — десятки) оптимальных каналов, в которых обеспечивается максимальная вероятность обнаружения объектов, а добавление неинформативных каналов приводит к ее снижению. Информативность комбинации спектральных каналов много-

спектрального аэрокосмического снимка определяется статистическими характеристиками совместного распределения плотностей вероятности разделяемых объектов. Оптимизация состава спектральных каналов — необходимый этап решения тематических задач ДЗЗ с использованием гиперспектральных аэрокосмических снимков [7].

Нахождение оптимальной комбинации спектральных каналов само по себе представляет достаточно простую задачу, однако практическая сложность заключается в том, что оптимальный состав спектральных каналов гиперспектрального аэрокосмического снимка различен для разных пар объектов (фон). Обычно стараются обеспечить оптимальность состава спектральных каналов по некоторому общему критерию (средняя вероятность, суммарная информативность и т. д.), однако при этом не гарантируется максимум вероятности выявления всех объектов. Вместе с тем, для пары объектов, не граничащих между собой в пределах многоспектрального аэрокосмического снимка, выполнять оптимизацию не требуется. Поэтому, вообще говоря, оптимизация должна быть контекстуально зависимой от состава и взаиморасположения объектовых сегментов сцены ДЗЗ на снимке:

$$\Lambda^*(x, \theta) = \operatorname{argmax} P(x, \theta, \Lambda), \quad (2)$$

где Λ — логический вектор-селектор спектральных каналов размерности, равной их количеству в исходном многоспектральном изображении [8].

Концепция вероятностного преобразования (1) как раз и заключается в поэлементном анализе многоспектрального аэрокосмического снимка с учетом статистических характеристик некоторой окрестности текущего пиксела. И ничто не мешает выполнять оптимизацию состава спектральных каналов всякий раз при вычислении вероятности правильного разделения радиометрических полей.

Предлагается *адаптивное* многомерное вероятностное преобразование (АМВП) многоспектральных цифровых аэрокосмических снимков, вычисляющее для каждого элемента цифрового изображения вероятность правильного разделения статистически различающихся радиометрических полей по оптимальной комбинации спектральных каналов (2). Адаптивное многомерное вероятностное преобразование, как и неадаптивное, может быть использовано при нахождении эквивалентных переходных характеристик на многоспектральных цифровых аэрокосмических снимках, однако возможности обнаружения объектов и разделения многомерных радиометрических полей при этом используются наиболее полно. Дальнейшее пространственное дифференцирование и применение ДПФ позволит перейти от эквивалентной вероятностной переходной характеристики к эквивалентной ФПМ много-



Рис. 1. Космический снимок гиперспектрального сенсора Hyperion спутника EO1 (центральная часть Киева, 1 сентября 2002 года)

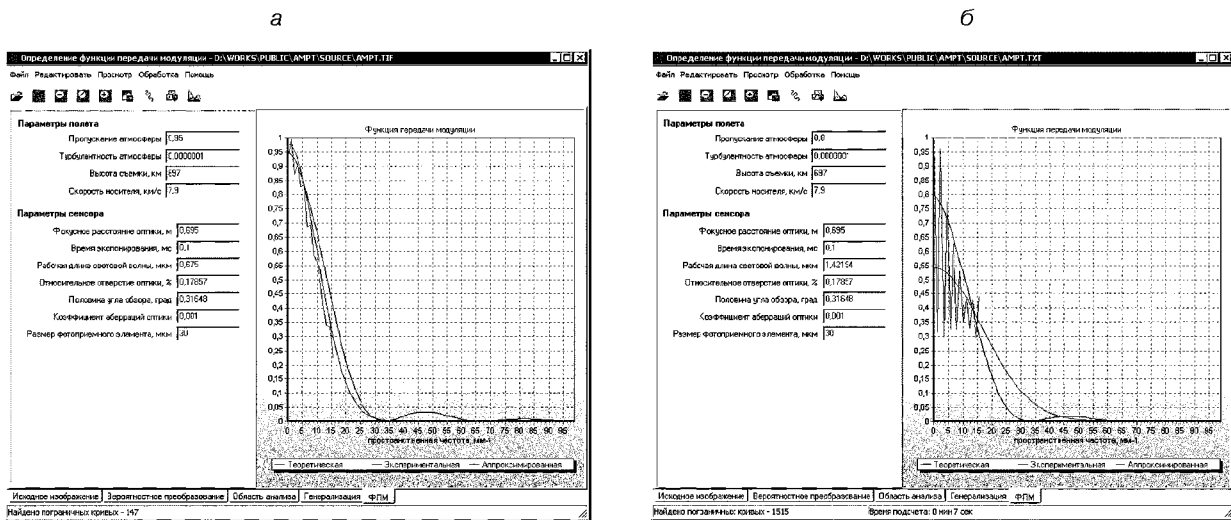


Рис. 2. Эквивалентные функции передачи модуляции гиперспектрального цифрового аэрокосмического снимка: *а* — для фиксированной комбинации спектральных каналов, *б* — для адаптивно-оптимальной комбинации спектральных каналов

спектрального цифрового аэрокосмического снимка и таким образом свести проблему определения его эквивалентного пространственного разрешения к классической задаче пространственно-частотного анализа.

Практический пример определения эквивалентной ФПМ гиперспектрального цифрового аэрокосмического снимка центра Киева (рис. 1, сенсор Нурегіон спутника EO1, 1 сентября 2002 г.) для среднеоптимальной (рис. 2, а) и адаптивно-оптимальных комбинаций (рис. 2, б) спектральных каналов показал, что использование АМВП позволяет получить более качественную эквивалентную ФПМ и обеспечить более высокое эквивалентное пространственное разрешение многоспектральных цифровых аэрокосмических снимков. Улучшение эквивалентного пространственного разрешения для названного снимка составило 15–30 %.

Таким образом, предложенное адаптивное многомерное вероятностное преобразование многоспектральных цифровых аэрокосмических снимков может быть использовано для повышения качества цифровой обработки и последующей интерпретации материалов многоспектральной аэрокосмической съемки при решении различных тематических задач ДЗЗ.

1. Волошин В. И., Корчинский В. М., Негода А. А. Повышение информативности панхромных цифровых изображений дистанционного зондирования Земли // Космична наука і технологія.—2004.—10, № 5/6.—С. 178—181.
2. ДСТУ 4220—2003. Дистанційне зондування Землі з космосу. Терміни та визначення. — Київ: Держспоживстандарт України, 2003.—18 с.
3. Лялько В. И., Попов М. И., Подорван В. Н., Сахацкий А. И. Методика классификации площадных объектов на многоспектральных космических изображениях на основе последовательного слияния информации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: Сб. науч. ст. — М.: ИКИ РАН, 2005.—Т. 1.—С. 88—94.

4. Станкевич С. А. Статистичний підхід до визначення порогової модуляції цифрових аерокосмічних зображень // Космічна наука і технологія.—2005.—11, № 3/4.—С. 81—84.
5. Станкевич С. А. Статичні аспекти визначення функції передавання модуляції аерокосмічних іконічних систем з дискретними фотоприймачами // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: Зб. наук. пр. — Львів: Львівська Політехніка, 2005.—Вип. II.—С. 142—147.
6. Станкевич С. А. Імовірісно—частотна оцінка еквівалентної просторової розрізненості багатоспектральних аерокосмічних знімків // Космічна наука і технологія.—2006.—12, № 2/3.—С. 79—82.
7. Станкевич С. А. Кількісне оцінювання інформативності гіперспектральних аерокосмічних знімків при вирішенні тематичних задач дистанційного зондування Землі // Доповіді НАН України.—2006.—№ 10.—С. 136—139.
8. Станкевич С. А. Оптимізація складу спектральних каналів гіперспектральних аерокосмічних зображень при розв'язанні тематических задач дистанційного зондування Землі // Космічна наука і технологія.—2007.—13, № 2.—С. 25—28.
9. Станкевич С. А., Шкляр С. В. Удосконалений алгоритм визначення перехідної функції на цифровому аерокосмічному зображенні // Ученые записки Таврического национального ун-та им. В. И. Вернадского.—2005.—18 (57), № 2.—С. 97—102.
10. Aspinall R. J., Marcus W. A., Boardman J. W. Considerations in collecting, processing, and analyzing high spatial resolution hyperspectral data for environmental investigations // J. Geograph. Syst.—2002.—N 4.—P. 15—29.
11. Nelson T., Wulder M., Niemann K. O. Spatial resolution implications of digitizing aerial photography for environmental applications // Imaging Sci. J.—2002.—49.—P. 223—232.

ADAPTIVE MULTIDIMENSIONAL PROBABILISTIC TRANSFORMATION FOR MULTISPECTRAL DIGITAL AEROSPACE IMAGES

S. A. Stankevich, O. V. Sholonik

Adaptive multidimensional probabilistic transformation (AMPT) for multispectral and hyperspectral digital aerospace images is offered. This transformation realizes realized spectral bands optimal selection for every analyzing pixel of digital image. AMPT allows one to evaluate equivalent modulation transfer functions of multispectral digital aerospace images with higher accuracy and, hence, to provide higher equivalent spatial resolution of multispectral and hyperspectral aerospace imagery.

УДК 528.8.04:(550.361:504.43)

В. И. Лялько¹, Л. Д. Вульфсон², А. Л. Котляр²,
А. Д. Рябоконеко¹, В. Д. Фрейлихер²

¹Научный центр аэрокосмических исследований Земли НАН Украины, Киев²Бар-Иланский университет, Израиль

Подповерхностное зондирование в Р-диапазоне с целью определения влажности почвы в различных ландшафтно-климатических условиях

Представлено 25.06.07

Изложены результаты применения дистанционного подповерхностного зондирования с целью определения влажности в приповерхностных слоях почвы с использованием скаттерометра Р-диапазона. Разработанные модели формирования отраженного сигнала позволили получить зависимости для определения влажности почвы по данным зондирования как для произвольных установившихся вертикальных распределений влажности, так и в процессе их изменения в связи с поливами или осадками.

Оценка объемного влагосодержания W почв является одной из наиболее важных задач дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Наиболее эффективным методом решения этой задачи является активное зондирование в микроволновом диапазоне (МД) [1].

Настоящая работа посвящена дистанционному определению W в условиях аридного климата на севере пустыни Негев, на фермерских полях до, во время и после орошения, и в гумидных условиях центральной части Украинского Полесья в зоне отчуждения и обязательного отселения ЧАЭС, где значительная часть исследуемой территории скрыта под пологом леса. Исследования выполнялись с помощью скаттерометра Р-диапазона ($\lambda = 0.68$ м) [3] при зондировании в надир, что позволило минимизировать влияние шероховатости поверхности и растительного покрова на обратное рассеяние, а также достаточно просто учесть эти влияния с помощью модели малых возмущений и водного облака соответственно.

Скаттерометер измеряет напряжение $U = KR + U_0$, пропорциональное модулю коэффициента R отражения электрической составляющей сигнала, несущего информацию о величине W поверхностного слоя почвы. Значение K и U_0 , необходимые для вычисления R , определяются по данным внеш-

ней калибровки скаттерометра.

Для решения задачи восстановления влажности поверхностного слоя почвы по данным зондирования необходимо получить зависимости $R = R(W)$, и затем $W = W(R)$.

Значение \dot{R} для различных типов почвы с плоской поверхностью и произвольным вертикальным распределением W можно определить по формуле [3]

$$\dot{R} = (\dot{Z}_{in}^{(2)} - \dot{Z}_1) / (\dot{Z}_{in}^{(2)} + \dot{Z}_1), \quad (1)$$

где \dot{Z}_1 — импеданс в атмосфере (равен 1); $\dot{Z}_{in}^{(2)}$ — входной импеданс на верхней границе (атмосфера — почва), являющийся функцией вертикального профиля диэлектрической проницаемости $\dot{\epsilon}$, который в свою очередь определяется вертикальным профилем $W = W(z)$. Методика расчета $\dot{Z}_{in}^{(2)}$ и $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}(W, C, S)$, где C и S — содержания глины и песка в весовых частях, представлена в работе [3].

Согласно формуле (1) для наиболее распространенных случаев неоднородно увлажненной по вертикали почвы, когда значения W и $\dot{\epsilon}$ монотонно возрастают (убывают) от земной поверхности (ЗП) с глубиной. Последнее обуславливает хорошее согласование по волновому сопротивлению и отсутствие значительных отражений от лежащих ниже слоев и явлений интерференции. Отраженный сиг-

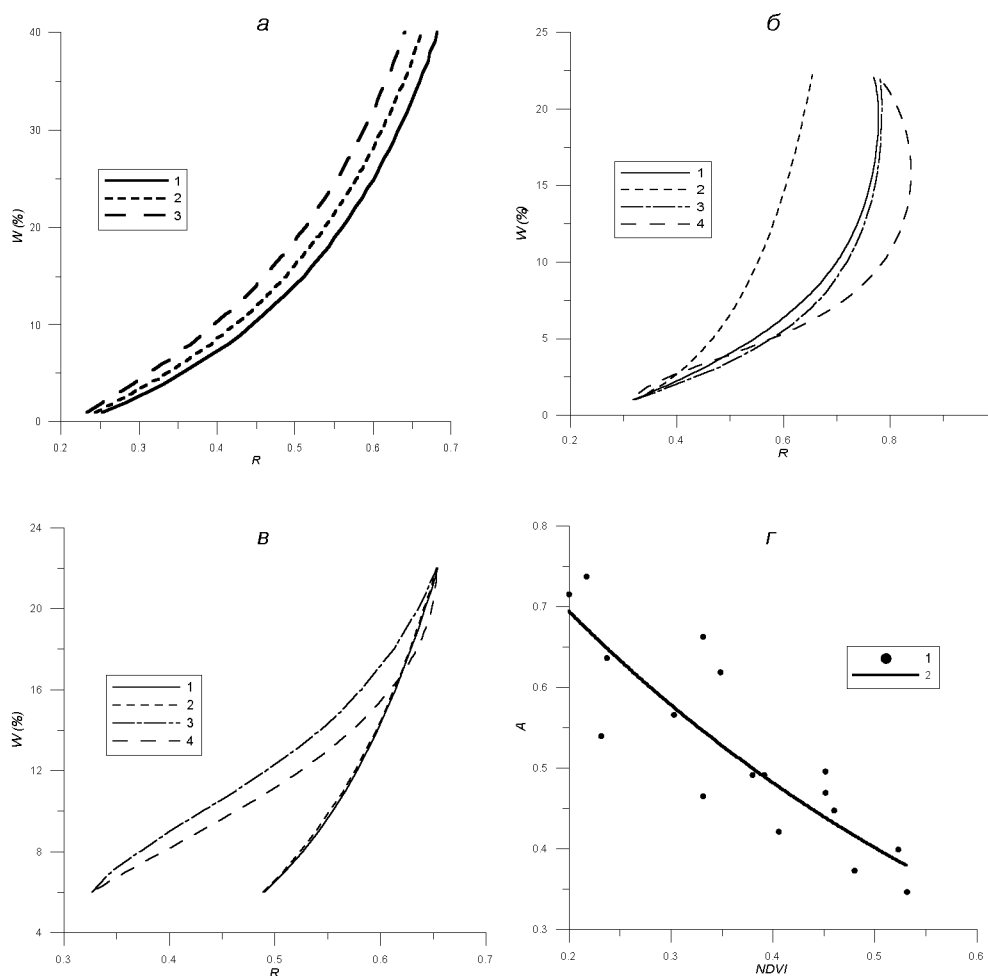


Рис. 1. Зависимость $W=W(R)$: *a* — для полубесконечного однородного слоя почвы (1 — песчаная почва, 2 — супесчаная, 3 — суглинистая); *б* — для стадии увлажнения (1 — эксперимент, 2 — модель i, 3 — модель ii, 4 — модель iii); *в* — для стадии увлажнения (1 — эксперимент, 2 — модель i, 3 — модель ii, 4 — модель iii); *г* — экспериментальная зависимость $A=A(NDVI)$ для соснового леса (линия — сглаживающая кривая)

нал формируется в поверхностном слое, толщина которого уменьшается с увеличением W и dW/dz на ЗП и, как правило, находится в пределах 0.1—0.15 м. Значение R для такого неоднородного слоя соответствует значению R для однородного полубесконечного слоя с влажностью, равной средней влажности в указанном интервале. Значение R вычисляется с помощью формулы Френеля [2, 3], которая является частным случаем формулы (1), где $Z_{in}^{(2)} = 120\pi(\dot{\epsilon}_2)^{-0.5}$ и $Z_1 = 1$. Зависимости $W = W(R)$, рассчитанные для однородно увлажненной песчаной, супесчаной и суглинистой почв, приведены на рис. 1, *a*.

Для получения зависимостей $W = W(R)$, которые позволяют определять влажность в поверхностном слое почвы при увлажнении (полив, выпадение

осадков) и высыхании после увлажнения, т. е. при неустановившемся процессе влагопереноса, было рассмотрено три модели. Согласно первой модели (i) при поливе (высыхании) W возрастает (убывает) одновременно в пределах тонкого поверхностного слоя с толщиной H , который подстилается сухим (предельно увлажненным) однородным полубесконечным слоем. Согласно второй модели (ii) фронт увлажнения (высыхания) верхнего тонкого слоя продвигается постепенно от поверхности до дна на глубине H . Для модели (ii) среднее значение влажности в верхнем слое рассчитывается по формуле

$$W = \frac{hW_i + (H - h)W_i}{H}, \quad (2)$$

где для процесса увлажнения $W_i = W_s$ и $W_j = W_r^{nv}$, для процесса высыхания $W_i = W_r^{d}$ и $W_j = W_s$; h — глубина фронта увлажнения (высыхания), W_s — влажность при полном влагонасыщении, W_r^{nv} — остаточная влажность перед началом увлажнения, W_r^{d} — остаточная влажность после высыхания. Зависимости $W = W(R)$ для моделей (i) и (ii) рассчитываются с использованием формулы (1), в которой $Z_{in}^{(2)}$ определяется по рекуррентной формуле (5) для $n = 2$ в работе [3]. В третьей модели (iii) предполагается, что значение W в верхнем тонком слое можно распространить на все полупространство. Это позволяет рассчитывать зависимость $W = W(R)$ для рассмотренного выше однородного полубесконечного слоя. Расчетные зависимости для моделей (i), (ii) и (iii) приведены на рис. 1, б и в.

В условиях горизонтальной ЗП при зондировании в надир на длине волны $\lambda = 68$ см учет влияния шероховатости ЗП и растительного покрова (РП) возможен с помощью метода малых возмущений (ММВ) [2] и модели водного облака (МВО) [4]. Далее, учитывая, что основной параметр МВО — содержание воды в растениях (M_v , кг/м²) — является линейной функцией нормализованного цифрового вегетационного индекса (NDVI), который, в свою очередь, определяется по данным многозональных космических съемок [5], можем записать:

$$R_e = R \exp[-\alpha(NDVI) + \beta] = R \cdot A, \quad (3)$$

где R_e — коэффициент отражения от шероховатой покрытой растительностью ЗП, α — коэффициент, определяемый видом РП, β — коэффициент, определяемый видом РП и средней квадратичной высотой σ_h шероховатости ЗП, A — функция, учитывающая влияние шероховатости и РП.

Для восстановления влажности почвы W с учетом искажающего влияния шероховатости ЗП и растительности необходимо по значениям R_e , определяемым непосредственно по данным съемки, определить значения R . Для этого выполняется классификация исследуемой территории с целью выделения однородных участков по виду растительного покрова с использованием многозональных космических снимков. Далее для каждого из участков по крайней мере на двух пикетах с различными известными средними значениями $NDVI_{1,2}$, $R_{e1,2}$, $W_{1,2}$, а также S и C , рассчитываются значения $R_{1,2}$ по формуле (1). Затем в предположении, что α и β являются в пределах каждого однородного участка постоянными величинами, находятся их значения с использованием двух уравнений типа (3), записанных для каждого из пикетов. Полученные таким образом значения α и β позволяют в соответствии с (3) восстановить значения $R = R_e/A$, и затем по

одной из зависимостей $W = W(R)$ восстановить W . Пример зависимостей для $A = A(NDVI)$ приведены на рис. 1, г (сосновый лес).

Первые серии дистанционных определений W проводились с помощью скаттерометра расположенного на высоте 8 м над поверхностью высыхающей почвы, предварительно увлажненной до полного насыщения. Они сопровождались синхронными наземными определениями объемной влажности почвы в интервалах глубин 0—5, 0—15, 0—30 см, а также значений σ_h [3] с использованием автоматической лазерной установки для измерения параметров шероховатости (BGU GSS 1800). Согласно полученным данным значения σ_h не превышали 0.6 см и практически не влияли на отраженный сигнал [2, 3]. Сравнительный анализ дистанционных и наземных определений влажности (W_r и W_g) в интервалах глубин 0—5 и 0—15 см показал высокие значения коэффициента корреляции ($K = 0.9$) при сравнительно небольших значениях средних квадратичных отклонений ($\sigma \leq 3.3$ %), что подтвердило эффективность предложенной методики восстановления W . Аналогичные измерения проводились также непосредственно во время полива песчаной почвы до полного насыщения и ее последующего высыхания. При увлажнении наземные определения влажности в слое 0—5 см выполнялись с возрастающим интервалом от 0.5 до 5 мин и при высыхании с интервалом 10 мин. Процессы увлажнения и высыхания сопровождались измерениями значений R скаттерометром. Важно отметить немотонное изменение сигнала R в течение стадии увлажнения. Значение R возрастало со временем и достигало максимума через 15 мин при $W = 20$ %, затем уменьшалось, достигая локального минимума через 23 мин при $W = 22.6$ %, и далее снова увеличивалось. В соответствии с моделями (i) и (ii) этот результат может быть объяснен явлением интерференции сигнала отраженного от ЗП и сигналов многократно отраженных от нижней границы верхнего увлажняемого слоя (5 см), ниже которого влажность почвы остается минимальной в течение 25 мин. Затем граница размывалась, происходило увлажнение лежащих ниже слоев почвы, и явление интерференции прекращалось. Дальнейшее монотонное возрастание R происходило вследствие увеличения W вплоть до перенасыщения. При высыхании величина R монотонно уменьшалась, явление интерференции не наблюдалось, что свидетельствует об отсутствии четко выраженной границы между верхним сухим слоем и более влажными подстилающими слоями. Расчетные зависимости $W = W(R)$ для моделей (i), (ii) и (iii), а также аналогичные экспериментальные зависимости представлены на рис. 1, б и в для стадий увлажнения и высыхания

соответственно. Как следует из рис. 1, б, модель (i) наилучшим образом соответствует результатам эксперимента, что подтверждает правильность гипотезы о формировании верхнего увлажненного слоя в начальной стадии увлажнения почвы. В тоже время в случае высыхания почвы (рис. 1, в) наилучшее совпадение с результатами эксперимента было получено для модели (iii), что свидетельствует о монотонном характере распределения влаги по глубине. Полученные результаты имеют важное методическое значение, поскольку расширяют возможность использования модели (iii) при определении W во время орошения, за исключением короткого начального периода существования верхнего увлажненного слоя, а также в течение всей последующей стадии высыхания. В тоже время исследования показали необходимость использования модели (i) для оценки W в начальный период орошения, что, как следует из рис. 1, б, позволяет избежать завышенных оценок (более чем на 100 %).

Авиационное картирование W на севере пустыни Негев выполнялось с борта самолета «Сесна-174» с высоты 100 м. По данным съемки были построены карты влажности орошаемых сельскохозяйственных полей хозяйства Ашалим. На фоне однородного поля ($W \approx 6\%$) был обнаружен локальный участок $W \approx 34\%$, обусловленный потерями из водонапорной системы.

Картирование влажности в пределах зоны обязательного отселения и западной части Зоны отчуждения ЧАЭС на площади 800 км² выполнялось в период установившейся сухой погоды с борта самолета АН-2 с высоты 150 м. На борту, помимо скаттерометра, была установлена аппаратура гамма-радиометра для картирования экспозиционной дозы гамма-излучения. Поскольку значительная часть исследуемой территории была покрыта лесом, были получены зависимости $A = A(NDVI)$ для определения R и W (рис. 1, в). По результатам дистанционных исследований были построена карта влажности.

В целом представленные результаты дистанцион-

ных исследований существенно расширяют возможности активного зондирования в Р-диапазоне как в условиях аридного климата в пределах орошаемых территорий непосредственно во время поливов, так и в гумидных условиях, где ЗП может быть скрыта под пологом леса. Это является еще одним аргументом, подтверждающим необходимость создания РСА БО Р-диапазона авиационного и космического базирования.

1. Engman E. T. Applications of microwave remote sensing of soil moisture for water resources and agriculture // *Remote Sensing of Environment*.—1991.—35.—P. 213—226.
2. Jiankang Ji., Henning S., Preben G. «Estimation of soil moisture from the Maestro-1 sar data of Flevoland», *Sensors and environmental applications of remote sensing*. — Balkema, Rotterdam, 1995.—P. 103—109.
3. Lyalko V. I. et al. Soil Moisture (Water-Content) Assessment by an Airborne Scatterometer: The Chernobyl Disaster Area and the Negev Desert // *Remote Sensing Environ*, Elsevier Science Inc.—2000.—71.—P. 309—319.
4. Pereira J. M. C., Oliveira T. M., Paul J. C. P. Satellite-based estimation of mediterranean shrubland structural parameters // *Adv. remote sensing*.—1995.—4, N 3.—P. 14—20.
5. Shutko A. M. *Microwave radiometry of water terrain surfaces*. — Moscow: Nauka, 1986.—174 p.

SUBSURFACE REMOTE SENSING IN THE P-BAND FOR THE DETERMINATION OF SOIL WATER CONTENT IN DIFFERENT LANDSCAPE AND CLIMATIC CONDITIONS

*V. I. Lyalko, L. D. Wulfson, A. L. Kotlar,
A. D. Ryabokonenko, V. D. Freilicher*

We report the use of the microwave remote sensing as a technique with great potential for the mapping of subsurface soil water content. Remote sensing experiments were conducted in different landscape and climatic conditions of the partially forest-covered Chernobyl nuclear disaster area and the Negev desert. The remote sensor used was a continuous wave frequency modulated P-band scatterometer along with the collection ground truth data such as surface roughness and volumetric soil moisture. The results of the microwave experiments are in good agreement with the developed theoretical models that take into account the effects of the plant cover, surface roughness and interference at the beginning of soil irrigation.

УДК (504.4.062:556.535:528.8.04) [477-25]

О. М. Терemenко, А. Г. Мичак,
О. І. Кудряшов, Я. Л. Кудряшова

Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України

Використання космічної інформації для вирішення водоохоронних завдань міських територій (на прикладі м. Києва)

Представлено 25.06.07

Запропоновано використання космічної інформації для вирішення водоохоронних завдань міських територій. Приводяться основні водоохоронні задачі. Розглянуті техногенні фактори дії на гідромережу м. Києва. Приведені приклади екологічних досліджень гідромережі з використанням дистанційних методів.

Використання матеріалів багатозональної космічної зйомки є ефективним засобом вирішення гідроекологічних завдань міських територій, основними серед яких є:

— отримання інформації щодо змін гідрографічної мережі, передусім на заплавах територіях, реєстрацію зміни прируслових ландшафтів, розвитку ерозії та абразії, визначення геоecологічного стану прибережних захисних смуг;

— визначення ареалів підтоплення та затоплення на забудованих територіях з метою прогнозу розвитку несприятливих природних та техногенних процесів [1, 2].

Запропоновано концепцію використання космічної інформації для оцінки та моніторингу геоecологічного стану гідромережі, яка пропонується для екологічного моніторингу урбанізованих територій.

При гідроекологічних дослідженнях широке використання мають космічні знімки супутників Landsat, IRS, Terra, Ресурс, Океан О та ін., оснащені мультиспектральною апаратурою типу МСУ, MSS, TM, HRV, ASTER, LISS тощо. Сканери мають до чотирнадцяти каналів від оптичного (0.4—0.75 мкм), інфрачервоного (0.7—14.0 мкм) до теплового діапазону. Роздільна здатність на місцевості коливається у залежності від виду та типу зйомки в широких межах — від 5 до 300 м. Нові апарати Ikonos, Quick Bird дають знімки з просторовою розрізненістю до 60 см.

Об'єктом вивчення в даному випадку є гідромережа м. Києва. Дніпро — домінуючий водний

об'єкт цієї мережі. У межах міста ріка приймає невеликі притоки — Либідь, Віту, Сирець, а Нивка впадає вище столиці у праву притоку Дніпра — р. Ірпінь. Сучасна територія міста дрeнується численними постійними та тимчасовими водотоками, нараховується понад 400 водойм. Найбільші серед них — озера Алмазне, Вирлиця, Тягле [3].

Гідромережа у межах міської агломерації зазнає постійного та значного впливу антропогенних чинників. Так, до кінця XVIII ст. правий рукав Дніпра, тепер судноплавний, був мілководним, а лівий — Чорторій — був глибшим і повноводнішим. Зливалися вони у районі Печерської Лаври, утворюючи заплашний Труханів острів. Після тривалих інженерних робіт (1788—1910 рр.) повноводний Чорторій було перекрито, його потік спрямовано до мілководного правого рукава, де зараз судноплавний хід. В подальшому значних змін Дніпро у межах Києва зазнав після створення Київського та Канівського водосховищ. Внаслідок підпору Канівського водосховища відбулося підняття рівня води, зменшилась швидкість потоку, що спричинило затоплення та підтоплення заплашних територій та долин малих рік [4].

Нинішній екологічний стан Дніпра та малих річок і водойм Києва спричинений докорінною зміною поверхні басейнів і умов формування стоку в результаті ущільнення міської забудови, спорудження шляхів, створення підземної інфраструктури та густої дренажно-водопровідної і каналізаційної мереж. Ландшафтні зміни супроводжувалися перебудовою структури і скороченням гідрографічної

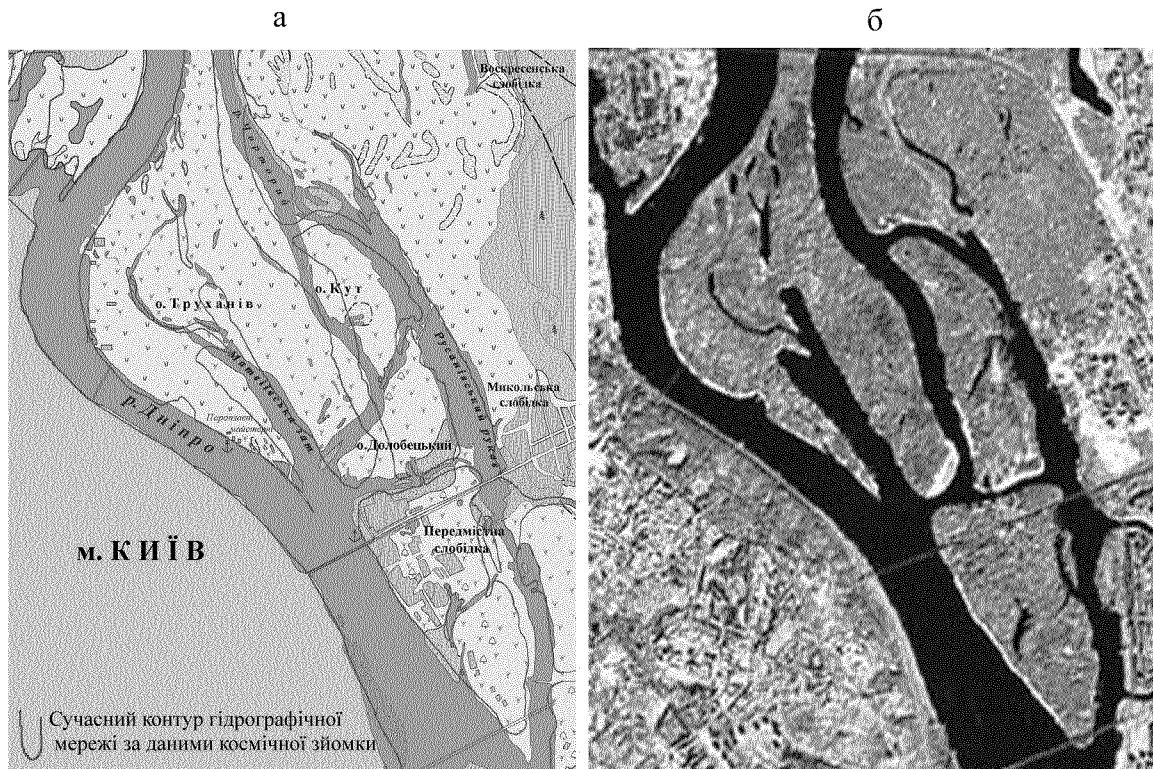


Рис. 1. Визначення змін ландшафтів і контурів островів у русловій зоні Дніпра: *а* — стан ландшафтів на 1897 р., *б* — сучасний стан ландшафтів за КЗ Landsat 7ETM+ 2002 р.

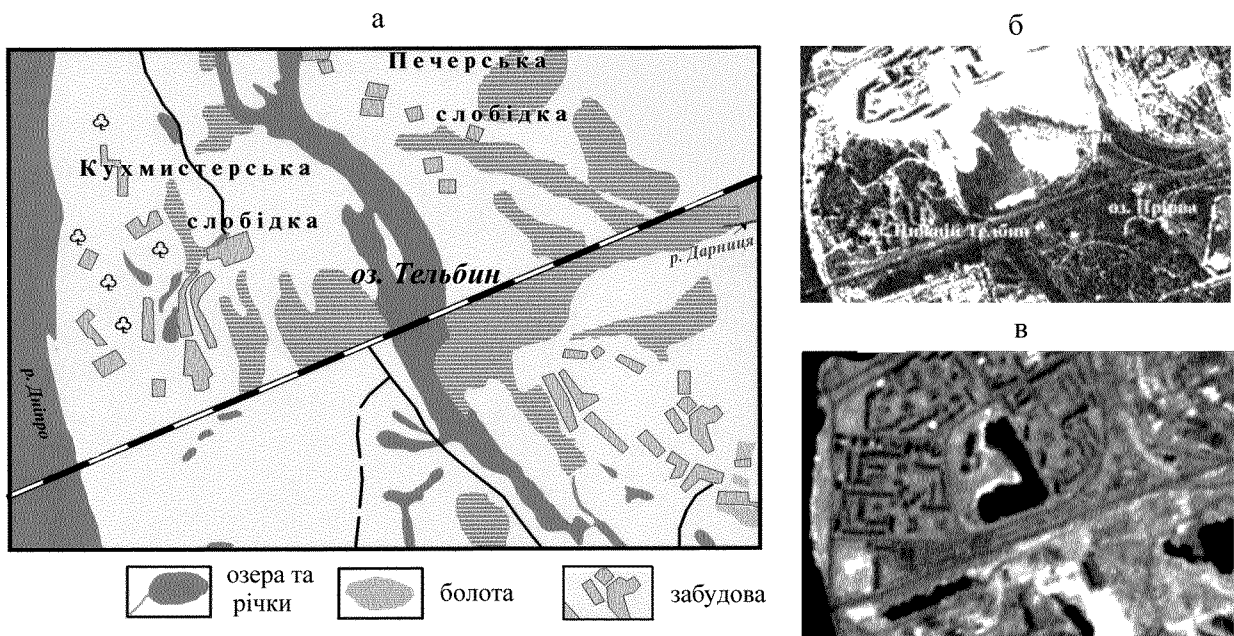


Рис. 2. Визначення змін ландшафтів та гідромережі в заплаві Дніпра (район оз. Тельбін): *а* — станом на 1897 р. за картографічними даними; *б* — на 1969 р. за КЗ CORONA; *в* — на 2003 р. за КЗ Landsat 7ETM+

сітки, порушенням гідравлічного зв'язку поверхневих і підземних вод, втратою регуляторної функції заплав водотоків. Якісний стан води в річках та водоймах формується під впливом забруднених стічних вод з забудованої території, які характеризуються високим вмістом завислих часток, нафтопродуктів, важких металів, органічних речовин. Збільшення обсягу та інтенсивності поверхневого стоку, особливо паводкового, призводить до посилення процесів ерозії, змиву ґрунту, який може досягати понад 200 т з 1 км², що в 10—15 разів перевищує такий показник для сільських територій [5].

Виходячи із зазначеного, відсутність необхідних оперативних даних і належного моніторингу гідрографічної мережі та гідроморфних ландшафтів викликає певні труднощі в упорядкуванні цих територій і в оцінці гідроекологічного стану. У вирішенні таких завдань значну допомогу може надати застосування космічних методів ДЗЗ.

Дніпровські острови в межах Києва мають велике рекреаційне значення в системі Київської міської агломерації. Морфометрія островів, ландшафти в цілому зазнали корінних змін внаслідок причин, про які йшлося вище.

На рис. 1 представлено зміну у просторово-часовому вимірі ландшафтів групи дніпровських островів (Труханів, Долобецький, Передмісна Слобідка) за останнє сторіччя. В результаті досліджень та обробки картографічних матеріалів кінця ХІХст. укладено картосхему основних ландшафтів руслової частини та заплав Дніпра станом на 1897 р., коли техногенне навантаження на довкілля було відносно незначним. На картосхему винесено сучасний контур гідрографічної мережі за даними космічної зйомки. Виконано синтез КЗ Landsat 7ETM+ з каналів 0.52—0.90 мкм, 0.45—0.52 мкм, 0.76—0.90 мкм з метою дослідження сучасного стану ландшафтів, в першу чергу їхньої гідроморфної складової.

Аналіз космічної інформації свідчить, що морфологічні та морфометричні характеристики берегової лінії найчіткіше відображені на космічних знімках у спектральній зоні 0.7—1.1 мкм. До них належать форма і конфігурація островів, значних акумулятивних форм: мілин, кіс тощо.

В результаті обробки та порівняльного аналізу блоку КЗ починаючи з 1970-х рр. визначені зміни гідроморфних ландшафтів, виконані морфометричні дослідження островів та ареалів відкритих (пляжних) пісків. Порівняння результатів дистанційних вимірів з традиційними наземними підтвердило високу об'єктивність та оперативність космічної інформації.

Важливого значення надається вивченню змін ландшафтів та гідромережі в заплаві Дніпра. За-

плавні території міста з будівництвом житлових масивів на наливних пісках: Оболонь на правобережжі; Русанівка, Березняки, Троєщина, Осокорки та ін. на лівобережжі, зазнали значного техногенного навантаження. Це привело до корінних змін та порушення природних гідроморфних ландшафтів. Гідрогеологічний стан таких ділянок викликає занепокоєння у зв'язку з поширенням загрозливих природно-техногенних процесів підтоплення, затоплення, просідання ґрунтів. В районі житлового масиву Березняки відбувається перебудова ландшафтно-системи з природної у природно-техногенну і техногенну внаслідок наміву пісків та інтенсивної забудови (рис. 2).

На заплавах територіях за даними космічних знімків було визначено площі прибережних захисних смуг ряду водойм та типи ландшафтів в їхніх межах. Виконано класифікацію ландшафтів за мультиспектральними КЗ. Для покращення дешифрувальних ознак космознімків проведено операцію злиття багатозональних та панхроматичних зображень. Усі процедури обробки та дешифрування дистанційних даних проводились на основі програмного продукту ERDAS Imagine [6].

Розглянуті методичні прийоми та результати використання космічної інформації для вирішення геоecологічних завдань на території Києва засвідчили їхню ефективність.

1. Довгий С. О., Лялько В. І., Трофимчук О. М. та ін. Інформація аерокосмічного землезнавства. — Київ: Наук. думка, 2001.—606 с.
2. Екологічний атлас Києва. — Київ: Інтермедіа, 2003.—60 с.
3. Кондратьев К. Я., Поздняков Д. В. Новое в дистанционном зондировании окружающей среды // Исслед. Земли из космоса.—1996.—1.—С. 107—121.
4. Паламарчук М. М., Загорчевна Н. Б. Водний фонд Києва // Екологія і ресурси.—2002.—4.—С. 115—126.
5. Теременко О. М., Лялько В. І., Федоровський О. Д., Рябоконеко О. Д. Екологічна інтерпретація космічних зйомок міських агломерацій // Нові методи в аерокосмічному землезнавстві. — Київ: ЦАКДЗ ІГН НАН України, 1999.—С. 143—148.
6. Хільчевський В., Курило С. Гідролого-гідрохімічна характеристика малих водотоків території м. Києва // Водне господарство України.—1999.—№ 3-4.

THE USE OF SPACE INFORMATION FOR THE DECISION OF WATER-PROTECTION PROBLEMS OF CITY TERRITORIES

O. M. Teremenko, A. G. Mychak, O. I. Kudriashov, Ya. L. Kudriashova

The use of space information is offered for the decision of water-protection problems of city territories. The basic water-protection problems are listed. Some man-activity factors affecting the gidro-system of Kyiv are considered. Some examples of ecological researches of gidro-system through remote methods are given.