

УДК 528.8.04:551.4

В. І. Лялько, З. М. Шпортюк, О. І. Сахацький, О. М. Сибірцева

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

Класифікація земного покриття Карпат з використанням наземного хлорофільного індексу та позиції червоного краю за даними відеоспектрометра MERIS

Надійшла до редакції 05.05.06

Наведено результати попередніх досліджень можливості використання даних відеоспектрометра MERIS для класифікації земного покриття Українських Карпат. При дослідженнях використано дані космознімання супутника ENVISAT MERIS від 16.04.2004 р. з грубою просторовою розрізненістю 1200 м, на основі яких для району досліджень обчислено попіксельно величини індексів REP, MTCI та NDVI. Метод мінімальної відстані до середнього застосовано до множин даних цих індексів для класифікації земного покриття. Результати досліджень показали, що зображення ENVISAT MERIS із грубою просторовою розрізненістю забезпечує середній результат класифікації: добре класифікуються лише хвойні ліси та покриті снігом вершини. Класифікація з використанням множин індексів REP та MTCI дає кращі результати, ніж класифікація на основі значень відбиття. Результати досліджень показали добру кореляцію між REP і MTCI та високий потенціал для моніторингу екосистем у гірських районах з використанням комбінації обох індексів.

ВСТУП

Ліси в Українських Карпатах покривають досить великі площі. Поряд із природними лісами значну територію займають ліси, що інтенсивно висаджувалися після 1945 р. Ліси відіграють важливу роль у збереженні екологічної рівноваги. Зміни, які відбуваються в лісах, впливають на кліматичні процеси як на регіональному, так і на глобальному рівні. За останні роки у зв'язку з вирубками лісів у Карпатському регіоні значно загострилися екологічні проблеми. Тому необхідний сталий контроль за станом лісів.

Наші дослідження спрямовані на моніторинг стану лісів досліджуваного регіону згідно з тематикою глобального моніторингу довкілля за

ініціативою Європейського космічного агентства (ESA) та Європейської комісії — «Forest changes and global carbon monitoring». Дистанційне зондування є відповідним інструментом для моніторингу величезних площ у важкодоступних гірських районах. Воно може досить ефективно здійснюватись на основі використання даних сучасних супутникових систем, зокрема відеоспектрометра середнього розрізнення MERIS (the Medium Resolution Imaging Spectrometer). Відеоспектрометр MERIS встановлено на супутнику ENVISAT 1 (запуск 1 березня 2002 р.). Він має 15 каналів із спектральними смугами шириною $\Delta\lambda$ від 2.5 до 20 нм в діапазоні $\lambda\lambda = 390\text{—}1040$ нм та просторову розрізненість 300 м (висока) і 1200 м (груба). Період спосте-

реження території 3 доби. Це робить MERIS потенціально цінним сенсором для спостереження та моніторингу наземного середовища, зокрема стану лісів на регіональному та глобальному рівнях [1, 4]. Наявність п'яти каналів шириною до 10 нм в червоній та близькій ІЧ-зоні дає можливість отримати значення вегетаційних індексів NDVI (the Normalized Difference Vegetation Index), REP (the Red Edge Position) і MTCI (the MERIS Terrestrial Chlorophyll Index) [6], необхідні для оцінювання стану рослинності та її продуктивності.

На основі попиксельного обчислення вегетаційних індексів за даними MERIS можна формувати нові зображення, для аналізу яких можна використовувати ті ж методи класифікації, що і для зображень, побудованих за даними спектрів відбиття.

ДЖЕРЕЛО ДАНИХ ТА МЕТОДИ

Зображення ENVISAT MERIS від 16 квітня 2004 р. із просторовою розрізненістю 1200 м, надане Європейським космічним агентством (ESA) в рамках проекту BEAR, використано при дослідженні покриву Українських Карпат. Специфікації спектральних каналів задані на вебсторінці [<http://envisat.esa.int/dataproducts/meris/CNTR2.htm//eph.meris.prodalg>]. Дані MERIS конвертовано до формату ERDAS Imagine за допомогою програм BEAM та ENVI.

На рис. I (кольорова вклейка) наведено схематичну карту земного покриву Українських Карпат, на якій прямокутником позначено область досліджень. Досліджувана територія обмежена координатами 23°20'...24°50' с.д. та 48°00'...49°15' північної широти. Фрагмент зображення ENVISAT MERIS (комбінація каналів 4, 7 та 14) досліджуваної території наведено на рис. II (кольорова вклейка).

Зображення високої просторової розрізненості 30 м КА «Landsat 7 ETM⁺» від 5 травня 2000 р. використано для зіставлення з даними MERIS. Інвентаризаційні лісотаксаційні дані, структуровані відповідно до типів лісової рослинності та адміністративних площ, використано як наземні завірювальні дані для класифікації земного покриву за космознімками. Інвентаризаційні лісотаксоційні дані включають

інформацію про видовий склад дерев, вік, висоту та ін. для відносно однорідних площ (первинні інвентаризаційні одиниці). Ці дані зібрано в 1996 р., в GIS-форматі нанесено на територію Карпатського національного природного парку (південний захід Івано-Франківської області) і використано в дослідженнях. Кількість первісних інвентаризаційних одиниць на досліджуваному полігоні перевищує сотню. На досліджуваній території переважають однорідні хвойні ліси з перевагою ялини. Соснові і листяні дерева (здебільшого бук та вільха) на деяких ділянках також покривають значну територію. Класифікація супутникових даних здійснювалась з використанням програмних модулів ERDAS Imagine. Метод мінімальної віддалі до середнього використано для класифікації MERIS-даних, тому що деколи площі інтересу покривали заледве 1-2 піксели зображення.

Для класифікації зображення «Landsat ETM⁺» (рис. II, д) використано правило максимальної ймовірності, щоб одержати точніші дані. Надійність класифікації зображення високої розрізненості для головних класів покриву земної поверхні звичайно становить 85—95 % згідно з нашими дослідженнями. Виконано аналіз спектральних яскравостей для класифікації зображення з метою побудови карти розподілу вегетаційних груп. Це дослідження використовує навчання та класифікацію. Результатом процесу навчання була множина сигнатур для вибраних класів. Спектральні характеристики виділених класів лісової рослинності та різних ландшафтів були встановлені з використанням 4—5 тестових ділянок у межах площ кожного класу.

Класифікація наземного покриву за даними ENVISAT MERIS здійснювалась за двома варіантами даних. В одному варіанті для класифікації використано зображення, побудоване за множиною коефіцієнтів відбиття (TOA reflectance) [4], обчислених по-піксельно для даних 15 каналів відеоспектрометра MERIS. У другому варіанті за даними попиксельного обчислення вегетаційних індексів NDVI, REP та MTCI побудовано NDVI-зображення (рис. II, а), REP-зображення (рис. II, б), MTCI-зображення (рис. II, в) та синтезоване тришарове (NDVI, REP, MTCI) зображення (рис. II, з), яке використовувалось для класифікації земного покриву за методом MMDM.

ПОБУДОВА NDVI-, REP- ТА МТСІ-ЗОБРАЖЕНЬ
ЗА ДАНИМИ ENVISAT MERIS

Обчислення REP. Для оцінки стану рослинного покриву, зокрема для виділення ділянок із здоровою та пригніченою рослинністю за даними дистанційного зондування Землі, разом із значеннями спектральних яскравостей, коефіцієнтів відбиття та вегетаційних індексів використовується і така характеристика, як позиція червоного краю спектрів відбиття (REP). За означенням [7] REP — це довжина хвилі із інтервалу $\lambda\lambda = 680\text{—}760$ нм, на якій швидкість зміни спектру відбиття досягає максимуму. Значення REP може бути обчислено різними способами: за методом 4-точкової лінійної інтерполяції [3, 6], з використанням методу інтерполяції Лагранжа першої похідної спектру за значеннями його похідних у трьох точках хвильового відрізка, розташованого в області червоного краю [7], або з використанням похідних спектру, апроксимованого лінійною комбінацією степенів поліномів Чебишова [1, 2, 5].

Наведемо формули обчислення REP з умови максимуму першої похідної спектру відбиття, апроксимованого сумою п'яти членів ряду, розвиненого за поліномами Чебишова, і за методом 4-точкової лінійної інтерполяції, модифікованим для даних сенсора MERIS [6]. Апроксимація спектру поліномами Чебишова має вигляд

$$R(\lambda) = C_0 + C_1 T_1(\lambda) + C_2 T_2(\lambda) + C_3 T_3(\lambda) + C_4 T_4(\lambda),$$

де $T_m(t) = \cos[m(\arccos t)]$ — поліноми Чебишева першого роду m -го степеня ($|t| \leq 1$; $m \geq 2$; $T_1(t) = t$), $R(\lambda)$ — значення коефіцієнта відбиття на довжині хвилі λ . Коефіцієнти C_i ($i = 0, 1, 2, 3, 4$) визначаються за методом найменших квадратів. Тоді REP визначається з умови $R'(REP) = \max R'(\lambda)$, $670 \leq \lambda \leq 780$ нм, де $R'(\lambda)$ — перша похідна апроксимованого спектру.

Згідно з методом 4-точкової лінійної інтерполяції REP для даних сенсора MERIS, визначається за формулами [7]

$$\begin{aligned} \text{REP} &= 708.75 + 45 \frac{\bar{R} - R_9}{R_{10} - R_9} = \\ &= 708.75 + 45 \frac{\bar{R} - R_{708.75}}{R_{753.75} - R_{708.75}}, \quad (1) \\ \bar{R} &= \frac{R_7 + R_{12}}{2}. \end{aligned}$$

Тут R_i — значення коефіцієнта відбиття в i -му каналі, $i = 7, 9, 10, 12$. Зауважимо, що обчислені різними способами значення REP можуть не збігатися. Тут ми використовуємо значення REP, обчислені методом (1), який є оптимальним щодо часу обчислень [2, 7].

Обчислення МТСІ. Одним із нових вегетаційних індексів, які використовують значення коефіцієнтів відбиття на довжинах хвиль із області червоного краю, є запропонований в роботі [6] наземний хлорофільний індекс МТСІ. Згідно з означенням МТСІ — це відношення різниці коефіцієнтів відбиття R в 10-му і 9-му каналах до різниці коефіцієнтів відбиття в 9-му і 8-му каналах MERIS

$$\text{МТСІ} = \frac{R_{10} - R_9}{R_9 - R_8}, \quad (2)$$

Показано [6], що у випадку високих значень вмісту хлорофілу в рослинах МТСІ чутливіший до його зміни, ніж REP.

Обчислення NDVI. Розпізнавання стану рослинного покриву можна здійснювати за допомогою нормалізованого різницевого вегетаційного індексу NDVI, який визначається за формулою

$$\text{NDVI} = \frac{R_{\text{NIR}} - R_r}{R_r + R_{\text{NIR}}},$$

де R_r , R_{NIR} — коефіцієнти відбиття в червоному та близькому інфрачервоному каналах сенсора відповідно.

Для даних ENVISAT MERIS еквівалентом індексу NDVI є індекс BOAVI, який обчислюється за формулою

$$\text{BOAVI} = \frac{R_{14} - R_8}{R_{14} + R_8}. \quad (3)$$

Обчислюючи попіксельно значення BOAVI за даними зображення MERIS можна сформулювати нове зображення, яке є аналогом NDVI-зображення для цих даних (рис. II, а, кольорова вклейка). Одержані NDVI-, REP- та МТСІ-зображення дозволяють сформулювати синтезоване зображення, яке використовувалося для класифікації наземного покриву (рис. II, з).

РЕЗУЛЬТАТИ КЛАСИФІКАЦІЇ ЗЕМНОГО ПОКРИВУ

Класифікація двох типів зображень, побудованих за даними відеоспектрометра MERIS з просторовою розрізненістю 1200 м здійснювалась за допомогою методу MMDM. Для порівняння ви-

Таблиця 1. Значення вегетаційних індексів для різних класів земного покриття за даними ENVISAT MERIS

Земний покрив	NDVI (BOAVI)		REP (нм)		MTCI	
	min	max	min	max	min	max
Хвойні ліси	0.496	0.657	721.4	724.6	1.74	2.37
Листяні ліси	0.446	0.524	717.6	722.9	1.37	1.87
Пасовища та нелісовий покрив	0.408	0.535	718.9	721.7	1.39	1.89
Озима пшениця	0.466	0.623	721.1	724.9	1.79	2.57
Оголений ґрунт	0.148	0.361	712.1	717.0	1.13	1.14
Водна поверхня	-0.163	0.034	< 700	> 730	-2.57	0.49
Сніг	-0.087	-0.057	< 700	> 730	-20.87	-0.052

Таблиця 2. Зіставлення результатів класифікації з використанням різних типів зображень за даними MERIS та «Landsat 7» для площі 2105 км²

Земний покрив	Доля площі, %			Відносна похибка класифікації ε , %	
	відбиття 15 каналів (MERIS)	NDVI, REP, MTCI (MERIS)	«Landsat 7»	15 каналів	NDVI, REP, MTCI
Хвойні ліси	36.3	40.4	55.8	34.9	27.5
Листяні ліси	13.1	15.3	8.8	32.8	42.5
Пасовища та нелісовий покрив	32.1	34.4	28.6	10.9	16.7
Сніг	18.5	9.9	6.2	66.5	37.4
Хмари	—	—	0.6	—	—
Загальна площа	100	100	100	Середнє 36.3	Середнє 31.0

користано результати класифікації космознімка тієї ж території, одержаного з КА «Landsat 7» з просторовою розрізненістю 30 м. Класифікація земного покриття за даними «Landsat 7» здійснювалася методом масимальної вірогідності із навчанням. Об'єкти для навчання включали ті відібрані класи вегетаційного покриття, які були вибрані на основі інвентаризаційного опису лісів на досліджуваній території. Крім цього, об'єктами для навчання були водна поверхня, населені пункти, пасовища, оброблювані землі та сніговий покрив.

У табл. 1 наведено діапазони змін вегетаційних індексів, обчислених за формулами (1)–(3) для виділених семи класів земного покриття. Слід відзначити, що для водної поверхні та снігу значення REP та MTCI виходять за межі діапазону значень для всіх решти класів зеленого покриття.

Результати класифікації свідчать, що у деяких випадках спостерігаються суттєві розбіжності між результатами, одержаними при обробці двох типів зображень, утворених за даними ENVISAT MERIS.

Класифікація зображення, побудованого на основі синтезу REP, MTCI та NDVI-зображень,

показала високу чутливість до рослинних об'єктів, які містять хлорофіл. Хвойні ліси у межах високогір'я, де чергуються покриті та не покриті лісом ділянки, виділяються точніше за комбінованим зображенням, ніж за зображенням, побудованим з використанням коефіцієнтів відбиття у 15 каналах відеоспектрометра MERIS. В той же час не зовсім точно класифікуються сільськогосподарські угіддя. Враховуючи час знімання (16 квітня), можна допустити, що у межах сільськогосподарських полів зображення, сформоване на основі вегетаційних індексів, вказує на стан посівів озимих культур та ступінь їхнього відновлення у весняний період.

На рис. III (кольорова вклейка) і в табл. 2 наведено результати класифікації двох типів зображень за даними MERIS (район г. Говерла). Ця ділянка знаходиться у правому нижньому куті території досліджень.

Як свідчать зіставлення результатів класифікації для тест-ділянки площею 2105 км² з даними табл. 2, класифікація за даними вегетаційних індексів NDVI, REP, MTCI дає точніші результати при визначенні хвойних лісів (рис. III, б), ніж класифікація з використанням відбиття в 15 каналах MERIS (рис. III, а).

Середня відносна похибка класифікації менша на 5 %.

Потенціал використання REP- та МТСІ-зображень, що не залежать від топографічних ефектів, не вичерпується лише можливістю точнішої класифікації наземного покриву гірських районів. Оскільки ці індекси чутливі до вмісту хлорофілу в листі та голках рослинності, це дозволяє оцінювати стан окремих видів лісової рослинності та виявити ділянки із несприятливими умовами зростання.

ВИСНОВКИ

Класифікація наземного покриву гірських районів Карпат методом мінімальної відстані до середнього з використанням REP, МТСІ та NDVI зображень за даними ENVISAT MERIS дає кращі результати, ніж з використанням радіації чи відбиття в 15 каналах. Застосування вегетаційних індексів не вимагає проведення топографічної корекції і тому перспективне при дослідженні стану рослинного покриву гірських районів.

Результати проведених досліджень показують добру кореляцію між REP та МТСІ і високий потенціал для моніторингу екосистем в гірських районах з використанням комбінації обох індексів.

Автори вдячні професору Барбарі Кох та доктору Клаусу-Петеру Гроссу з Фрайбургського університету за підтримку проекту досліджень, а також Європейському космічному агентству за надання знімка КА ENVISAT MERIS.

1. Лялько В. І., Шпортюк З. М., Сахацький О. І. та ін. Дослідження стану лісів з використанням позиції червоного краю за даними відеоспектрометра MERIS // Тез. докл. 5-й Української конф. по космічним дослідженням (НЦУІКС, Євпаторія, 4—11 сент. 2005 г.). — Київ: Ін-т космич. дослідвань НАНУ-НКАУ, 2005.—С. 137.

2. Шпортюк З. М., Лялько В. І., П'янило Я. Д. та ін. Спектральні методи обробки та аналізу інформації в дистанційному зондуванні рослинності. — Львів, 1993.—54 с.—(Препр. / АН України. Науково-учбовий центр математичного моделювання ІППММ ім Я. С. Підстригача, № 4-93).
3. Baret F., Jacquemoud S., Guyot G., et al. Modeled analysis of the biophysical nature of spectral shift and comparison with information content of broad bands // *Remote Sens. Environ.*—1992.—**41**, N 2.—P. 133—142.
4. Clevers I. G. P. W., Bartholomeus H. M., Múcher C. A., et al. Land covers classification with the Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) // *New Strategies for European Remote Sens / Ed. Oluic.* — Rotterdam: Millpress, 2005.—P. 687—694.
5. Collins W., Chang S. H., Raines G., et al. Airborne Biogeophysical Mapping of Hidden Mineral Deposits // *Economic. Geol.*—1983.—**78**, N 4.—P. 737—749.
6. Dash J., Curran P. J. The MERIS terrestrial chlorophyll index // *Int. J. Remote Sens.*—2004.—**25**—P. 5403—5413.
7. Dawson J., Curran P. J. A new technique for interpolating the reflectance red edge position // *Int. J. Remote Sens.*—1998.—**19**—P. 2133—2139.

LAND COVER CLASSIFICATION IN UKRAINIAN CARPATHIANS USING THE MERIS TERRESTRIAL CHLOROPHYLL INDEX AND RED EDGE POSITION FROM ENVISAT MERIS DATA

V. I. Lyalko, Z. M. Shportyuk, O. L. Sakhatskyi, O. M. Sybirtseva

We present some results of a preliminary study of the possibility to use MERIS data for land cover classification in the Ukrainian Carpathians. The ENVISAT MERIS data (16 April 2004) with a rough space resolution of 1200 m are used to calculate the red edge indices: the Red Edge Position (REP), MERIS Terrestrial Chlorophyll Index (MTCI) and NDVI. The classification using REP and MTCI images gives better results that with reflectance by the method of minimum distance to means (MMDM). The calculation results showed that the MERIS image with a rough space resolution provided moderate classification results: only coniferous forests and snow are well classified. MTCI is sensitive to a broad range of the chlorophyll contents and much less sensitive to topographical effect in mountain region. The investigation results show a good correlation between REP and MTCI and a high potential for monitoring for the ecosystems in mountain regions using a combination of both indices.