

УДК 528.8.04: 551.4

КЛАСИФІКАЦІЯ ЗЕМНОГО ПОКРИВУ КАРПАТ З ВИКОРИСТАННЯМ НАЗЕМНОГО ХЛОРОФІЛЬНОГО ІНДЕКСА ТА ПОЗИЦІЇ ЧЕРВОНОГО КРАЮ ЗА ДАНИМИ ВІДЕОСПЕКТРОМЕТРА MERIS[☆]

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

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

Резюме. Наведено результати попередніх досліджень можливості використання даних відеоспектрометра MERIS для класифікації земного покриву Українських Карпат. При дослідженнях використано дані космознімання супутника ENVISAT MERIS від 16.04.2004 року з грубою просторовою розрізненістю 1 200 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 покриву. 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 в гірських районах з використанням комбінації обох індексів.

Ключові слова: відеоспектрометр MERIS, індекси червоного краю, класифікація земного покриття

© В. І. Лялько, З. М. Шпортюк, О. І. Сахацький, О. М. Сибірцева. 2006

Вступ

Ліси в Українських Карпатах покривають досить великі площі. Поряд із природними лісами значну територію займають ліси, що інтенсивно висаджувалися після 1945 року. 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, в зв'язку з вирубками лісів, в Карпатському регіоні значно загострилися екологічні проблеми. Тому необхідний сталий контроль за станом лісів, який досить ефективно може здійснюватись на основі використання даних сучасних супутникових систем, зокрема, багатозональних і гіперспектральних зйомок. Відеоспектрометр середньої розрізненості MERIS (the Medium Resolution Imaging Spectrometer) встановлений на супутнику ENVISAT 1, запущеному 1 березня 2002 року. Він має 15 каналів шириною від 2.5 до 20 нм в діапазоні 390–1040 нм, та просторову розрізненість 300 м (FR — *full resolution*) і 1200 м (RR — *reduced resolution*). Період спостереження території 3 доби. Це робить MERIS потенційно цінним сенсором для спостереження та моніторингу наземного середовища, зокрема, стану лісів, як на регіональному, так і на глобальному рівні [1, 4]. Наявність 5 каналів шириною до 10 нм в червоній та близькій інфрачервоній зонах електромагнітного спектру дає мож-

ливість отримати інформацію про біофізичні параметри рослинності, яка необхідна для оцінювання стану рослинності та її продуктивності, використовуючи величини таких вегетаційних індексів, як NDVI (the Normalized Difference Vegetation Index), REP (the Red Edge Position) і MTCI (the MERIS Terrestrial Chlorophyll Index) [6].

На основі попіксельного 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-го квітня 2004 р. із просторовою розрізненістю 1 200 м, надане Європейським космічним агенством (ESA) в рамках проекту BEAR, використано при дослідженні покриву Українських Карпат. Специфікації спектральних каналів задані на Web-сторінці (Meris User Guide) [8]. Дані MERIS конвертовано до формату ERDAS Imagine за допомогою програм BEAM та ENVI.

На рис. 1 наведено схематичну карту земного покриву Українських Карпат, на якій прямокутником позначено область досліджень. Вона розташована в Західній Україні у гірському районі Карпат. Досліджувана територія обмежена координатами 23°20'–24°50' с. д. та 48°00'–49°15' пн. ш. Фрагмент зображення ENVISAT MERIS (комбінація каналів 4, 7 та 14) досліджуваної території наведено на рис. 2.

Зображення KA Landsat 7 ETM+ від 5 травня 2000 р. використано для зіставлення з даними MERIS. Інвентаризаційні лісотаксаційні дані, структуровані відпо-

[☆] Класифікація земного покриву Карпат з використанням наземного хлорофільного індексу та позиції червоного краю за даними відеоспектрометра MERIS / В. І. Лялько, З. М. Шпортюк, О. І. Сахацький, О. М. Сибірцева // Космічна наука і технологія. — 2006. Т. 12. № 5/6. С. 10–14.

* e-mail: sakhatsky@casre.kiev.ua

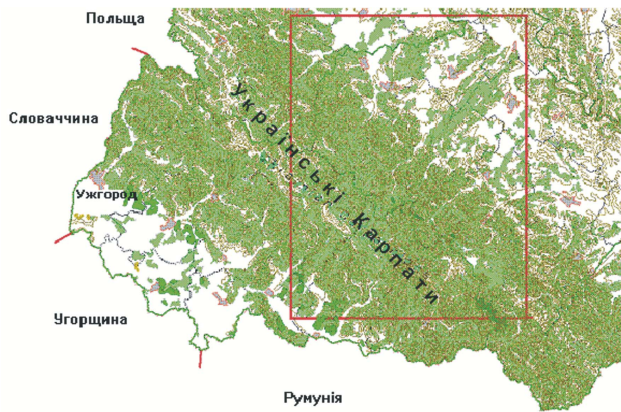


Рис. 1. Схематична карта регіону Українських Карпат. Область досліджень позначено червоним прямокутником.

відно до типів лісової рослинності та адміністративних площ, використано як наземні завірювальні дані для класифікації земного покриву за космоснімками. Інвентаризаційні лісотаксоційні дані включають інформацію про видовий склад дерев, вік, висоту та ін. для відносно однорідних площ (первинні інвентаризаційні одиниці). Ці дані, які зібрані в 1996 р., в GIS-форматі нанесено на територію Карпатського національного природного парку 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. 2f) використано правило максимальної ймовірності, щоб одержати більш точні дані для порівняння. Надійність класифікації зображення високої розрізненності для головних класів покриву зем-

ної поверхні, звичайно, становить 85–95% згідно з нашими дослідженнями. Виконано аналіз спектральних яскравостей для класифікації зображення з метою побудови карти розподілу вегетаційних спільнот. 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 в 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 попіксельно для даних 15 каналів відеоспектрометра MERIS. Синтезоване зображення земної поверхні за цими даними, наведено на рис. 2e. У другому варіанті, за даними попіксельного обчислення вегетаційних індексів NDVI, REP та MTCI побудовано NDVI-зображення (рис. 2a), REP-зображення (рис. 2b), MTCI-зображення (рис. 2c) та синтезоване тришарове (NDVI, REP, MTCI) зображення (рис. 2d), яке використовувалось для класифікації земного покриву за методом MMDM.

Побудова NDVI, REP та MTCI 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 різноманітними вегетаційними індексами використовується і така характеристика, як позиція червоного краю спектрів відбиття (REP). За означенням [7], REP — довжина хвилі із інтервалу 680–760 нм, на якій швидкість зміни спектра відбиття досягає максимуму. Значення REP може бути обчислено різними способами: за методом 4-точкової лінійної інтерполяції

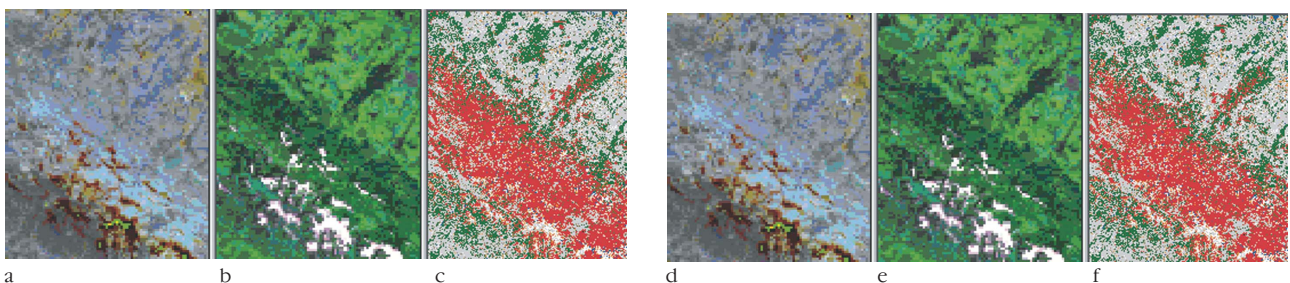


Рис. 2. Зображення основної дослідної ділянки Українських Карпат а) NDVI зображення за даними MERIS; величини NDVI змінюються від -0.4 (темно сірий колір) до +0.6 (світло сірий колір); б) REP зображення за даними MERIS; темно сірий колір відповідає значенням REP із проміжку 700–714 нм, сірий колір — 715 (REP (720 нм), світло сірий колір 720 (REP (730 нм, білий колір позначає REP > 730 нм); в) MTCI зображення; темно сірий колір відповідає значенням з інтервалу [1.0, 1.5], сірий — з інтервалу [1.6, 2], світло сірий [2.0, 2.6]; д) синтезоване зображення, сформоване на основі 3-х зображень: NDVI, REP, MTCI; е) зображення, сформоване за даними MERIS (синтез коефіцієнтів відбиття в 4, 7, 14 каналах); ф) фрагмент класифікованого зображення Landsat 7 ETM+, яке використовується як довідкові дані; червоним кольором позначено хвойні ліси; зеленим — листяні; сірим — пасовища, сільськогосподарські угіддя, вирубки; оранжевим — населені пункти; білим кольором позначено сніг

[3, 6], з використанням методу інтерполяції Лагранжа першої похідної спектра за значеннями його похідних в 3-х точках хвильового відрізка, розташованого в області червоного краю [7], або з використанням похідних спектра, апроксимованого лінійною комбінацією степенів поліномів Чебишова [1, 2, 5].

Наведемо формули обчислення REP з умови максимуму першої похідної спектра відбиття, апроксимованого з використанням методу найменших квадратів сумою 5-и членів ряду, розвиненого за поліномами Чебишова, і за методом 4-точкової лінійної інтерполяції, модифікованим для даних сенсора MERIS [6]. Апроксимація спектра поліномами Чебишова має вигляд:

$$R(\lambda) = C_0 + C_1 T_1(\lambda) + C_2 T_2(\lambda) + C_3 T_3(\lambda) + C_4 T_4(\lambda), \quad (1)$$

де $T_m(t)$ — поліноми Чебишева першого роду m -го степеня, $T_m(t) = \cos[m(\arccos t)]$, $|t| \leq 1$; $m \geq 2$; $T_1(t) = t$; $R(\lambda)$ — 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 $R'(REP) = \max R'(\lambda)$, $\lambda \in [670, 780]$ нм, де $R'(\lambda)$ — перша похідна апроксимованого спектра.

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

$$\bar{R} = \frac{R_7 + R_{12}}{2}, \quad (2)$$

$$REP = 70875 + 45 \frac{(\bar{R} - R_9)}{(R_{10} - R_9)} = 70875 + 45 \frac{(\bar{R} - R_{70875})}{(R_{5375} - R_{70875})}.$$

Тут R_i — значення коефіцієнта відбиття в i -тому каналі, $i \in [7, 9, 10, 12]$. Зауважимо, що обчислені різними способами значення REP можуть не співпадати. В роботі наведено результати обчислень REP лише методом (1), який є оптимальним щодо часу в порівнянні з іншими методами [2, 7].

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

$$MTCI = \frac{R_{10} - R_9}{R_9 - R_8}, \quad (3)$$

де R_i ($i = 8, 9, 10$) — коефіцієнт відбиття в i -тому каналі стандартного набору каналів сенсора MERIS.

В праці англійських дослідників [6] показано, що у випадку високих значень вмісту хлорофілу в рослинах, МТСІ більш чутливий до його зміни, ніж REP, тобто при високих значеннях вмісту хлорофілу малим змінам значень REP відповідають значні зміни значень МТСІ.

Обчислення NDVI. Розпізнавання стану рослинного покриву можна здійснювати за допомогою нормалізованого різницевого вегетаційного індексу NDVI (the Normalized Difference Vegetation Index), який визначається за формулою:

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_r}{R_r + R_{NIR}}, \quad (4)$$

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

Для даних ENVISAT MERIS еквівалентом індекса NDVI є індекс BOAVI [8], який обчислюється за формулою

$$BOAVI = \frac{R_{14} - R_8}{R_{14} + R_8}. \quad (5)$$

Обчислюючи попіксельно значення BOAVI за даними зображення MERIS можна сформувати нове зображення, яке є аналогом NDVI-зображення для цих даних (рис. 2а). Одержані NDVI, REP та МТСІ-зображення дозволяють сформувати синтезоване зображення, яке використовувалося для класифікації наземного покриву (рис. 2д).

Результати класифікації земного покриву

Класифікація двох типів зображень, побудованих за даними відеоспектрометра MERIS з просторовою розрізненістю 1 200 м (див. попередній розділ) здійснювалась з допомогою методу MMDM. Для порівняння використано результати класифікації космознімка тієї ж території, одержаного з КА Landsat-7 з просторовою розрізненістю 30 м. Класифікація земного покриву за даними Landsat-7 здійснювалась методом масимальної вірогідності із навчанням. Об'єкти для навчання включали ті відібрані класи вегетаційного покриву, які були вибрані на основі інвентаризаційного опису лісів на досліджуваній території. Крім цього, об'єктами для навчання були такі елементи ландшафту, як водна поверхня, населені пункти, пасовища та оброблювані землі, сніговий покрив.

В табл. 1 наведено діапазони змін вегетаційних індексів, обчислених за формулами (1)–(3) для виділених класів земного покриву, які одержано при проведенні класифікації методом MMDM. Слід відзначити, що для водної поверхні та снігу величини REP та МТСІ мають аномальні значення (як низькі, так і високі), які знаходяться за межами діапазону значень для всіх решти класів зеленого покриву.

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

Класифікація зображення, побудованого на основі синтезу REP, МТСІ та NDVI зображень, показала високу чутливість до рослинних об'єктів, які містять хлорофіл. Хвойні ліси в межах високогір'я, де чергу-

Таблиця 1

Значення вегетаційних індексів для різних класів земного покриву за даними ENVISAT MERIS

| Клас земного покриву | NDVI (BOAVI) | | REP (f i) | | MTCI | |
|----------------------|--------------|--------|-----------|-------|--------|--------|
| | min | max | min | max | min | max |
| 1 | 0.496 | 0.657 | 721.4 | 724.6 | 1.74 | 2.37 |
| 2 | 0.446 | 0.524 | 717.6 | 722.9 | 1.37 | 1.87 |
| 3 | 0.408 | 0.535 | 718.9 | 721.7 | 1.39 | 1.89 |
| 4 | 0.466 | 0.623 | 721.1 | 724.9 | 1.79 | 2.57 |
| 5 | 0.148 | 0.361 | 712.1 | 717.0 | 1.13 | 1.14 |
| 6 | -0.163 | 0.034 | <700 | >730 | -2.57 | 0.49 |
| 7 | -0.087 | -0.057 | <700 | >730 | -20.87 | -0.052 |

ються покриті та не покриті лісом ділянки, виділяються точніше за комбінованим зображенням, ніж за зображенням, побудованим з використанням величин відбиття у 15-ти каналах відеоспектрометра MERIS. В той же час не зовсім точно класифікуються сільськогосподарські угіддя. Враховуючи час знімання (16 квітня), можна допустити, що в межах сільськогосподарських полів зображення, сформоване на основі вегетаційних індексів, вказує на стан посівів озимих культур та ступінь їх відновлення у весняний період.

На рис. 3 і в табл. 2 наведено результати класифікації 2-х типів зображень за даними MERIS (район г. Говерла). Ця ділянка знаходиться в правому нижньому куті території досліджень, зображеної на рис. 2.

Як свідчать зіставлення результатів класифікації для тест-ділянки площею 2 105 км² з використанням різних типів зображень, наведених в таблиці 2, класифікація за даними 3-х вегетаційних індексів (NDVI, REP, MTCI) дає більш точні результати при визначенні хвойних лісів (рис. 3b) в порівнянні із класифікацією з використанням відбиття в 15-ти каналах MERIS (рис. 3a). Середня відносна похибка класифікації менша на 5%.

Потенціал використання REP- та MTCI-зображень не вичерпується лише можливістю більш точної класифікації наземного покриву гірських районів, через незалежність від топографічних ефектів. Оскільки ці індекси чутливі до вмісту хлорофілу в листі та

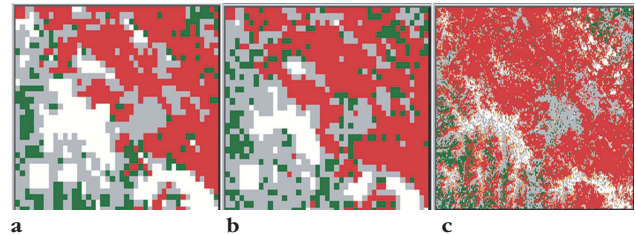


Рис 3. Фрагменти класифікованих знімків:

а) класифікація з використанням відбиття у 15-ти каналах відеоспектрометра MERIS; б) класифікація зображення, сформованого із NDVI, REP та MTCI-зображень за даними MERIS; в) фрагмент класифікованого знімка Landsat-7, який використовується як довідкові дані: (червоний колір — хвойні ліси; зелений — листяні ліси; сірий — нелісові землі, пасовища, сільгоспугіддя, вирубки; білий — сніг, хмари).

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-, MTCI- та NDVI-зображень за даними ENVISAT MERIS дає кращі результати, ніж з використанням радіації чи відбиття в 15-ти 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 MTCI і високий потенціал для моніторингу екосистем в гірських районах з використанням комбінації обох індексів.

Автори висловлюють подяку проф. доктору Барбарі Кох та доктору Клаусу-Петеру Гроссу з Фрайбургського університету за підтримку проекту досліджень. Автори вдячні ESA за надання знімка КА ENVISAT MERIS.

Література

1. Лялько В. І., Шпортюк З. М., Сахацький О. І. та ін. Дослідження стану лісів з використанням позиції червоного краю

Таблиця 2

Зіставлення результатів класифікації з використанням різних типів зображень за даними MERIS та Landsat 7 для площі 2 105 км².

| Земний покрив | Розподіл площ (%) класифікації за зображеннями | | | Відносна похибка класифікації для (1) % | Відносна похибка класифікації для (2) % |
|----------------|--|-----------------------------|---------------|---|---|
| | (1) MERIS відбиття 15 канал | (2) MERIS (NDVI, REP, MTCI) | (3) Landsat-7 | | |
| 1 | 36.3 | 40.4 | 55.8 | 34.9 | 27.5 |
| 2 | 13.1 | 15.3 | 8.8 | 32.8 | 42.5 |
| 3 | 32.1 | 34.4 | 28.6 | 10.9 | 16.7 |
| 4 | 18.5 | 9.9 | 6.2 | 66.5 | 37.4 |
| 5 | — | — | 0.6 | — | — |
| Загальна площа | 100 | 100 | 100 | Середнє: 36.3 | Середнє: 31.0 |

1 — хвойні ліси; 2 — листяні ліси; 3 — пасовища та нелісовий покрив; 4 — сніг; 5 — хмари

- за даними відеоспектрометра MERIS//Тез. докл. 5-ой Украинской конф. по космическим исследованиям. (НЦУИКС, Евпатория, 4–11 сент. 2005 г.) — Киев: Изд-во Ин-та космич. исследований 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, №2.-P.133-142.
 4. Clevers, I.G.P.W., Bartholomeus H.M., Mucher C.A. et al. Land covers classification with the Medium Resolution Imaging (MERIS). In: New Strategies for European Remote Sens.-Rotterdam: Oluic (ed.) 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, №4.-P.737-749.
 6. Dash J., Curran P.J. The MERIS terrestrial chlorophyll index// Intern. Journ. Remote Sens.-2004.-25.-P.5403-5413.
 7. Dawson J., Curran P.J. A new Technique for Interpolating the Reflectance Red Edge Position// Intern. Journ. Remote Sens.-1998.-19.-P.2133-2139.
 8. MERIS USER GUIDE. <http://envisat.esa.int/dataproducts/meris/CNTR2.htm//eph.meris.prodalg>.

КЛАССИФИКАЦИЯ ЗЕМНОГО ПОКРОВА КАРПАТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАЗЕМНОГО ХЛОРОФИЛЬНОГО ИНДЕКСА И ПОЗИЦИИ КРАСНОГО КРАЯ ПО ДАННЫМ ВИДЕОСПЕКТРОМЕТРА MERIS

В. И. Лялько, З. М. Шпортюк, А. И. Сахацкий, О. М. Сибирцева

Резюме. Приведены результаты предварительных исследований возможности использования данных видеоспектрометра MERIS для классификации земного покрова Украинских Карпат. При исследованиях использованы данные космической съемки спутника ENVISAT MERIS от 16.04.2004 года с грубым пространственным разрешением 1200 м, на основе которых для района исследований вычислено попиксельно величины индексов REP, MTCI и NDVI. Метод минимального расстояния от среднего применен к множеству данных этих индексов для классификации земного покрова. Результаты исследований показали, что изображение ENVISAT MERIS с грубой пространственным разрешением обеспечивает средний результат классификации: хорошо выделяются хвойные леса и покрытые снегом вершины. Классификация с использованием множеств индексов REP и MTCI дает лучшие результаты, чем классификация на основе значений отражения. Результаты исследований показали хорошую корреляцию между REP и MTCI и высокий потенциал для мониторинга экосистем в горных районах с использованием комбинации обоих индексов.

Ключевые слова: видеоспектрометр MERIS, индексы красного края, классификация земного покрытия

LAND COVER CLASSIFICATION OF CARPATHIANS USING TERRESTRIAL CHLOROPHYLL INDEX AND RED EDGE POSITION FROM SPECTROMETER MERIS DATA

V. I. Lyalko, Z. M. Shportjuk, O. I. Sakhatsky, O. M. Sibirtseva

Abstract. The results of preliminary study of the use of the spectrometer MERIS for land cover classification of the Ukrainian Carpathians are given. In the study the data from ENVISAT MERIS (16.04.2004) with coarse spatial resolution (1200 m) have been used, on the basis of the satellite data the pixel values of indices REP, MTCI and NDVI have been calculated for the study area. Minimum distance method has been applied for land cover classification using created data set on the base of these indices. The results showed that the ENVISAT MERIS image with coarse spatial resolution provides an average classification result: coniferous forests and snow-capped peaks have been well allocated. Land cover classification using index sets REP and MTCI gives better results than the classification based on the values of reflection. The results showed a good correlation between REP and MTCI and a high potential for ecosystem monitoring in mountainous areas using a combination of both indices.

Keywords: spectrometer MERIS, red edge indices, land cover classification