

УДК 574.472:528.854.4

С. А. Станкевич, А. О. Козлова

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

# Оцінювання і картографування біорізноманіття Північно-Причорноморського регіону України на основі багатоспектральних космознімків і геоінформаційних технологій

Надійшла до редакції 26.10.06

Пропонується алгоритм оцінювання і картографування біорізноманіття Північно-Причорноморського регіону України на основі багатоспектральних космічних знімків низької просторової розрізненості та геоінформаційних технологій. Наводяться результати оцінювання біорізноманіття півострова Крим за нечітко-логічною моделлю.

## ВСТУП

На сьогоднішній день біорізноманіття розглядається як основний параметр, який характеризує стан надорганізмівих систем. Загроза суттєвого скорочення біорізноманіття в результаті деяких видів людської діяльності змусила визнати його не лише як загальне поняття, а і як глобальний об'єкт охорони. Успішне збереження біорізноманіття неможливе без розробки чіткої наукової концепції біорізноманіття. І в цьому ряду картографування і картографічний метод дослідження мають відігравати одну з провідних ролей. Перспективи вивчення і картографування біорізноманіття тісно пов'язані з використанням матеріалів дистанційного зондування і геоінформаційних технологій.

Незважаючи на те, що більша частина території півдня України знаходиться під постійним господарсько-рекреаційним впливом, в її північному Причорномор'ї спостерігається значний розмах біологічного різноманіття. Більше того, півострів Крим, єдиний в Україні та один з восьми в Європі, включений у перелік регіонів з високим біологічним різноманіттям [1].

З огляду на це актуальною є розробка комплексного підходу до оцінювання і картографування біорізноманіття для інформаційної підтримки та планування природоохоронної діяльності. Основним і найскладнішим завданням під час реалізації цього підходу є визначення показників, які характеризують біорізноманіття і можуть бути ідентифіковані з використанням матеріалів дистанційного зондування та геоінформаційних систем.

Розробка алгоритмів оцінювання і картографування біологічного різноманіття на основі багатоспектральних космознімків і геоінформаційних технологій надасть можливість встановити особливості просторового розподілу біорізноманіття Північно-Причорноморського регіону України.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Біорізноманіття часто асоціюється з кількістю видів як окремого угруповання, так і ландшафту в цілому. Видове різноманіття утворюють два компоненти. Перша складова — видове багатст-

во, тобто загальне число наявних видів. Другий важливий аспект різноманіття — рівномірність розподілу видів, яка базується на визначенні положення виду в структурі домінування на основі мір значущості [5].

У дослідженнях видового різноманіття, зокрема при його оцінці, широко використовується європейський індекс Шеннона  $B$  [6]:

$$B = \sum_{i=1}^N P_i \log_2 P_i, \quad (1)$$

де  $N$  — кількість видів,  $P_i$  — значущість виду  $i$ .

Здатність індексу враховувати не лише багатство видів, а й рівномірність розподілу цих видів за будь-якою своєю ознакою, обумовлює трудомісткість його розрахунку. Залучення даних дистанційного зондування та сучасних цифрових технологій обробки аерокосмічних зображень, на нашу думку, може додати ряд переваг у процес розрахунку індексу видового різноманіття за Шенноном: значно розширити територію дослідження, відобразити реальну інформацію щодо просторового розподілу рослинних угруповань та надавати можливість її постійного оновлення, а представлення даних у цифровому вигляді забезпечує їхню ефективну обробку.

Проте слід зазначити, що переважна більшість існуючих методів оцінювання біорізноманіття на основі використання матеріалів дистанційного зондування Землі окремо досліджують різні компоненти біорізноманіття, зокрема різноманіття ландшафтів, лісових рослинних угруповань, ссавців, асоційованих з агроландшафтами та ін. [<http://europa.eu.int/comm/agriculture/publi/landscape/index.htm>, <http://abmp.arc.ab.ca>, [http://www.ulrnc.org.ua/services/binu/index\\_ua.html](http://www.ulrnc.org.ua/services/binu/index_ua.html)].

З іншого боку, вирішення завдання оцінки, і тим більше картографічної оцінки біорізноманіття на скільки-небудь значній території на детальному рівні через повне врахування всіх біокомпонентів, доки залишається неможливим. З такої точки зору для оцінювання біорізноманіття найбільш адекватним, на нашу думку, є екосистемний підхід, запропонований А. Н. Кисельовим [3].

Головна ідея даного методу полягає в тому, що оцінка біорізноманіття може спиратися на будь-які інтегративні характеристики, які забезпечують «представництво» усіх біокомпонентів.

Зміст екосистемного підходу зводиться до наступного: елементи живої та неживої природи знаходяться у тісному зв'язку та взаємодіють один з одним, тобто утворюють еко- або геосистеми різних рівнів та різної тривалості існування. Підпорядкування цих елементів один одному за спрощеною схемою виглядає таким чином: умови навколишнього середовища або середовища існування (рельєф, клімат, гідрологічні умови, літологія та ін.) визначають процеси заселення певної території видами рослинності, що в свою чергу формує умови становлення та розвитку тваринного населення. Безперечно, в реальних екосистемах процеси взаємодії значно складніші, тим не менше представлена схема є цілком справедливою.

Ті елементи живої або неживої природи, які визначаються за допомогою даних дистанційного зондування, можна умовно віднести до видимого біорізноманіття, решту — до прихованого.

Основна задача нашої роботи полягає у визначенні за даними дистанційних спостережень і наземних вимірювань видимого біорізноманіття для кожного класу земної поверхні, встановленні регресійних залежностей між видимим і прихованим біорізноманіттям, обчислення повного біорізноманіття для кожної ділянки ландшафту.

#### АНАЛІЗ ФАКТОРІВ

Видове багатство певного угруповання можна пов'язати з цілим рядом факторів, які відносяться до декількох категорій. По-перше, це так звані «географічні» фактори, а саме широта, висота над рівнем моря. Їх часто пов'язували з видовим багатством, але самі по собі вони, скоріше за все, не можуть його визначити. Якщо видове багатство змінюється з широтою, це означає, що має бути ще якийсь фактор, який залежить від неї і безпосередньо впливає на угруповання.

Наступна група факторів якраз має тенденцію корелювати з широтою, однак ця кореляція не абсолютна. До таких факторів відносять продуктивність середовища, та кліматичну мінливість [2].

Механізми впливу наведених факторів на

Таблиця 1. Фактори, що впливають на біорізноманіття

Фактор	Показник	Діапазон значень	Оптимум
Рельєф місцевості	Середньодобове опромінення сонячним випромінюванням	0—300 Вт/м <sup>2</sup>	максимум
Вода	Вологість ґрунту	0—100 %	максимум
Тепло	Середньодобова температура ґрунту	253—323 К	293 К
Опади	Середньорічна кількість осадженої води	0—200 мм	максимум
Рослинний покрив	NDVI або EVI	-1...+1	максимум
Життєва активність	LAI або FPAR	-1...+1	максимум
Життєва ефективність	GPP або NPP	0—600 кг/(м <sup>2</sup> ·рік)	максимум

темпи, форми і спрямованість диференціації біот достатньо широко висвітлені в літературі. Для даної роботи важливішим є встановлення діапазону значень факторів впливу, а також їхнього найсприятливішого значення для біорізноманіття.

Фактори, що впливають на біорізноманіття та можуть бути визначені за матеріалами ДЗЗ наведено у табл. 1.

#### ДЖЕРЕЛА ДАНИХ

Показники, наведені в табл. 1, можна одержати шляхом спеціального оброблення каліброваних багатоспектральних космічних знімків видимого, інфрачервоного та мікрохвильового діапазонів. Розробка алгоритмів визначення кожного з показників за цифровими космічними знімками першого рівня обробки є складною науково-технічною задачею. На практиці її реалізація потребує багаторічної роботи досвідчених наукових колективів [4].

Зараз в світі існує мережа центрів прийому, обробки та розповсюдження матеріалів ДЗЗ, яка постачає не тільки вихідні аерокосмічні знімки, а й інформаційні продукти вищих рівнів обробки — другого, третього та четвертого. Прикладом може послужити міжнародний науковий проект ДЗЗ EOS, в рамках якого одержуються цифрові супутникові зображення сенсорів AMSRE, MODIS, ASTER та інших. Найповніший перелік інформаційних продуктів, потрібних при оцінюванні біорізноманіття, доступний для спектро-радіометра низької просторової розрізненності MODIS, до того ж вони безкоштовні. В табл. 2 наведено стандартні інформаційні продукти EOS, які можуть використовуватися при оцінюванні біорізноманіття [4, 8].

Інформаційні продукти EOS дозволяють кількісно оцінювати орієнтовні показники біорізноманіття з просторовою розрізненністю не краще 1 км в регіональному або глобальному масштабі з періодичністю 1 раз на рік або частіше за умовою наявності теоретичних моделей агрегування інформації, наземних завіркових даних для їх валідації, загального довгострокового кліматичного та екологічного опису регіону спостереження.

#### НЕЧІТКО-ЛОГІЧНА МОДЕЛЬ

Коректне кількісне визначення впливу факторів на величини, що характеризують біорізноманіття, потребує встановлення або детермінованих, або статистичних зв'язків між ними. В першому випадку мають будуватися причинно-наслідкові кількісні екосистемні моделі високої просторової розрізненності для кожної ділянки ландшафту та їх взаємодії. Надзвичайна складність та неопрацьованість таких моделей може негативно відбиватися на точності одержуваних результатів, але використання саме дистанційних даних може суттєво покращити якість визначення їхніх параметрів або уточнити вигляд та склад рівнянь. В другому випадку потрібен значний обсяг наземних завіркових даних для побудови регресії, причому бажано для всього різноманіття ландшафтних комплексів різних кліматичних зон регіону. Це призводить до надмірного зростання обсягу польових досліджень. Обидва підходи мають свої слабкі та сильні сторони і можуть бути вдосконалені шляхом використання даних ДЗЗ. Компромісним варіантом між ними може бути нечітко-логічний підхід. Нечіткі моделі дозволяють як описувати класичні детерміновані взаємозв'язки з невизначеними або

Таблиця 2. Інформаційні продукти EOS

Продукт	Сенсор	Просторова розрізненість	Період поновлення	Інформаційні шари
MOD12Q1 — типи покриття ландшафту	MODIS	1 км	96 діб та щорічно	п'ять типів класифікації покриття ландшафту
MOD03A2 — геолокаційні дані	MODIS	1 км	щоденно	широта, довгота, висота місцевості, зенітний та азимутальний кути сенсора, нахильна дальність, зенітний та азимутальний кути Сонця, маска земля-море
MOD05L2 — повний водозбір	MODIS	1 км, 5 км	півдоби — день та ніч	широта, довгота, поточний час, водозбір в ближньому ГЧ-діапазоні, водозбір в дальньому ГЧ-діапазоні, маска хмар
MOD11A1 — температура поверхні	MODIS	1 км	півдоби — день та ніч	зенітний кут, поточний час, температура поверхні, випроміненність в 31 та 32 спектральних діапазонах MODIS
AMSRE_L3 — вологість ґрунту	AMSRE	0.25° за широтою та довготою	щоденно, щотижня та щомісячно	поточний час, вологість ґрунту, водовміст рослинності, температура поверхні
MOD13Q1 — вегетаційні індекси	MODIS	250 та 500 м, 1 км	16 діб та щомісячно	середні зенітний та азимутальний кути Сонця, NDVI та EVI
MOD15A2 — листяне покриття	MODIS	250 та 500 м, 1 км	16 діб, щомісячно та щорічно	FPAR та LAI
MOD17A3 — продуктивність рослинності	MODIS	500 м та 1 км	8 діб та щорічно	GPP та NPP

погано визначеними параметрами і статистичні залежності з невідомими законами розподілу, так й формалізувати експертні уявлення про характер процесів в екосистемах, що досліджуються. Додатковим аргументом на користь вибору нечітко-логічної моделі є достатньо слабка залежність результатів нечітких операцій від вигляду суб'єктивно апроксимованих функцій належності в широкому діапазоні значень нечітких величин. Нечітко-логічні моделі успішно застосовуються в складних системах керування та прийняття рішень, і на наш погляд, цілком придатні для оцінювання біорізноманіття [7].

Нехай відомо кількісні значення  $F_i$ ,  $i = 1, \dots, n$  факторів, що впливають на оцінку біорізноманіття  $B$ , де  $n$  — загальна кількість факторів. Для кожного з  $m$  класів земного покриття ландшафту можна визначити потенційно можливе біорізноманіття  $B_0^{(j)}$ ,  $j = 1, \dots, m$ , яке в разі використання індексу Шеннона (1) цілком визначиться кількістю характерних біологічних

видів даного класу  $N_0^{(j)}$ :

$$B_0^{(j)} = \log_2 N_0^{(j)}. \quad (2)$$

Далі для кожного з  $n$  факторів за відомими екологічними моделями, статистичними залежностями або експертними уявленнями про вплив цього фактора на біорізноманіття визначається вигляд функції належності  $\mu(F_i)$  впливу для всього діапазону можливих значень  $F_i$ . Якщо всі функції належності визначено, стає можливим обчислити спільну функцію належності  $\mu_0$  вектора факторів. Теоретичним обґрунтуванням цього визначення може служити висновок про існування лімітуючого фактора для будь-якого вектора факторів [5].

В цьому разі природною операцією визначення спільної функції належності буде нечітка кон'юнкція:

$$\mu_0 = \prod_{i=1}^n \mu_i(F_i). \quad (3)$$

Після визначення лімітуючої функції належності (3) та показника потенційного біорізноманіття

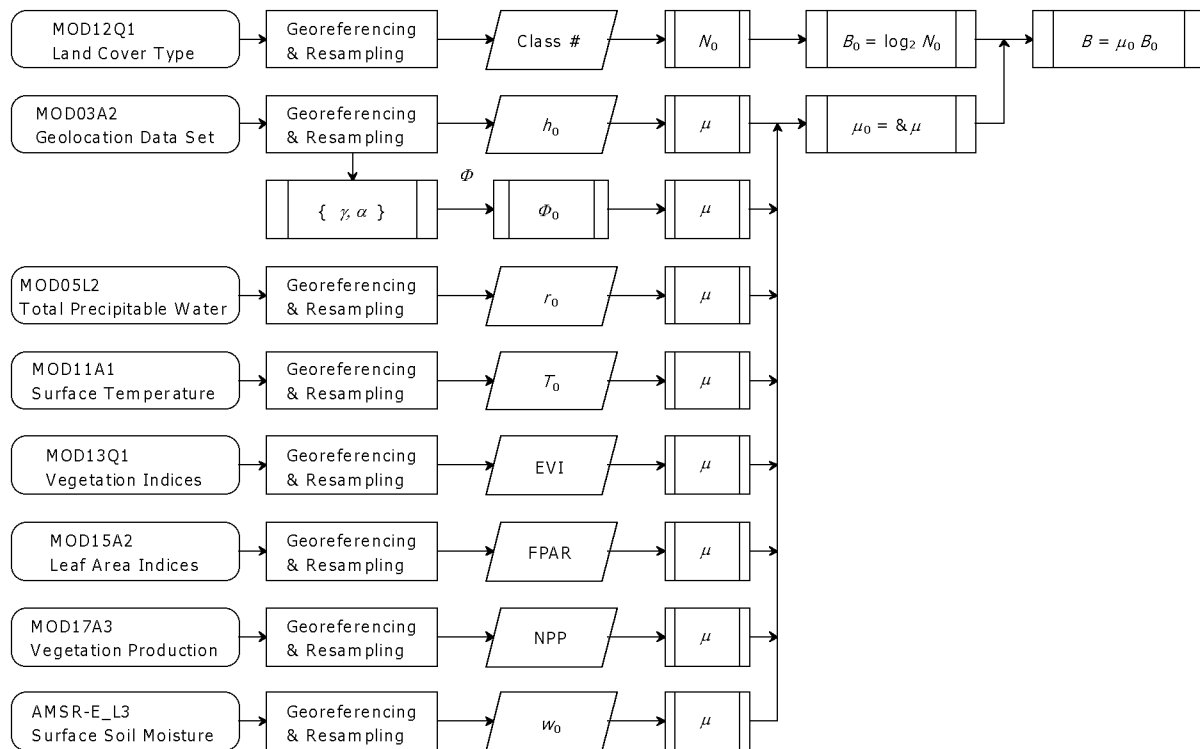


Рис. 1. Порядок оцінювання біорізноманіття за нечітко-логічною моделлю

Рис. 2. Класифікація земного покриття півострова Крим за даними багатоспектрального сенсора MODIS (а) та карта біорізноманіття, створена на основі нечітко-логічної моделі (б)

маніття (2) розраховується поточна оцінка біорізноманіття  $B$ :

$$B = \mu_0 B_0. \quad (4)$$

Операції (2)—(4) здійснюються для всіх елементів розрізнення космічних зображень, що містять значення  $F_i$ . Очевидно, що перед початком визначення біорізноманіття всі задіяні інформаційні шари повинні бути ресемпльовані та попиксельно суміщені між собою.

Порядок оцінювання біорізноманіття в рамках нечітко-логічної моделі з використанням інформаційних продуктів ДЗЗ EOS, перелічених в табл. 2, описується схемою рис. 1.

Схема враховує фактори, пов'язані з типом покриття ландшафту (інформаційний продукт MOD12Q1), рельєфом місцевості (продукт MOD03A2), абіотичні (продукти MOD05L2, MOD11A1, AMSRE\_L3) та біологічні (MOD13Q1, MOD15A2, MOD17A3) фактори. Обчислення над вихідними даними здійснюються за формулами (2)—(4).

#### МОДЕЛЮВАННЯ

Проведено демонстраційне оцінювання біорізноманіття Кримського півострова з використанням інформаційних продуктів EOS — сенсори MODIS та AMSRE, одержаних в червні—липні 2006 р. (класифікація покриття ландшафту — за 2005 р.). Для всіх космічних знімків проведено геореференціювання, а всі інформаційні шари ресемпльовано до просторової розрізненності 1 км. Оскільки інформаційні продукти EOS не містять середньодобову сонячну опроміненість, її обчислювалося за кутами та азимутами схилу відповідних ділянок місцевості з урахуванням сезону, географічної широти та середньої хмарності. Кути та азимуту схилу визначалося за геолокаційними даними продукту MOD03A2. Результати оцінювання біорізноманіття на прикладі півострова Крим ілюструються тематичними картами рис. 2.

При порівнянні карти біорізноманіття, створеної на основі розробленої моделі, з літературними та іншими картографічними даними щодо розповсюдження біорізноманіття Кримського півострова добре видно, що одержані результати відповідають дійсності. Деякі незначні неточності можна пояснити недостатньою якістю

оцінки вхідних параметрів, зокрема вологості ґрунту, а також значним узагальненням класів земного покриття, обумовленим низькою просторовою розрізненністю космічних знімків. Це дає підстави стверджувати, що розроблений алгоритм оцінювання біорізноманіття нечітко-логічною моделлю є цілком адекватним, хоча і потребує певних уточнень.

#### ВИСНОВКИ

Таким чином, дистанційні дані навіть низької просторової розрізненності є досить зручним та ефективним інструментом уточнення параметрів екосистемних моделей та картографування біорізноманіття великих регіонів. Спільне використання стандартних інформаційних продуктів ДЗЗ та наземних завіркових даних може стати основою інформаційного сервісу не тільки оцінювання біорізноманіття, а й його моніторингу з періодом спостереження в роки та навіть сезони.

Поряд з тим запропонована нечітко-логічна модель є дуже примітивною, не враховує ряд сучасних досягнень в моделюванні гео- та екосистем і потребує суттєвих уточнень. Але, як свідчить досвід оброблення та інтерпретування даних ДЗЗ, дуже часто недосконалість застосованих моделей компенсується значним обсягом та якістю вихідних даних, зокрема точним знанням їхнього просторового розподілу. Особливо це стосується таких надскладних та малопродатних до моделювання систем, як екологічні. Тому запропонований підхід до оцінювання біорізноманіття з використанням дистанційних даних є актуальним і має широкі перспективи теоретичного розвитку та практичного застосування.

1. Боков В. А. Биологическое и ландшафтное разнообразие в Крыму: Итоги исследований за 1997—2000 годы // Записки общества геоэкологов.—2000.—Вып. 3.—[http://www.ccssu.crimea.ua/tnu/magazine/geoecology/index\\_3.html](http://www.ccssu.crimea.ua/tnu/magazine/geoecology/index_3.html)
2. География и мониторинг биоразнообразия. — М.: Изд-во науч. и учебно-метод. центра, 2002.—432 с.
3. Киселев А. Н. Оценка и картографирование биологического разнообразия (на примере Приморья) // Геоботаническое картографирование. — СПб, 2000.—Т. 3.—С. 3—15.
4. Кравцова В. И., Уваров И. А. Гиперспектральная система MODIS для глобального мониторинга Земли // Информ. бюл. ГИС-Ассоциации.—2001.—№ 2(29)—3(30).—С. 39—41.

5. Одум Ю. Экология: Пер. с англ. — М.: Мир, 1986.— Т. 2.—376 с.
6. Протасов А. А. Биоразнообразие и его оценка: Концептуальная диверсиколия. — К.: Ин-т гидробиологии, 2002.—107 с.
7. EOS Data Products Handbook / Eds C. L. Parkinson, R. Greenstone. — Greenbelt: NASA Goddard Space Flight Center, 2004.—518 p.
8. Takeuchi W., Yasuoka Y. Development of MODIS compositing algorithms for MODIS data // J. Japanese Society of Photogrammetry and Remote Sensing.—2004.—P. 35—54.

**BIODIVERSITY ESTIMATION AND MAPPING OF THE NORTHERN PRE-BLACK SEA REGION OF UKRAINE USING HYPERSPECTRAL SATELLITE IMAGERY AND GEOINFORMATIONAL TECHNOLOGIES**

S. A. Stankevich, A. A. Kozlova

An algorithm for biodiversity estimation and mapping of the Northern Pre-Black sea region of Ukraine is proposed. It is based on hyperspectral satellite imagery of low spatial resolution. Some results of biodiversity estimation of the Crimean peninsula by fuzzy-logic model are presented.