

ІНФОРМАЦІЙНІ РЕСУРСИ ТА СИСТЕМИ

УДК 502.7:55

А.В. КУЗЬМІН, Л.Д. ГРЕКОВ, О.А. ПЕТРОВ, О.М. МЕДВЕДЕНКО

ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ ПРОЦЕДУРИ ТЕМАТИЧНОЇ ОБРОБКИ КОСМІЧНИХ ЗНІМКІВ В ІНТЕРЕСАХ МОНІТОРИНГУ АГРАРНИХ РЕСУРСІВ (частина 1)

***Анотація.** Сформульований перелік основних тематичних задач моніторингу аграрних ресурсів глобального та локального рівня з використанням технології дистанційного зондування. Наведені базові обчислювальні процедури, що використовуються для аналізу стану аграрних ресурсів.*

***Ключові слова:** агроресурси, космічний моніторинг, багатоспектральні космічні знімки, вегетаційні індекси, попередня обробка космічних знімків, математичні процедури.*

Розвиток засобів дистанційного зондування аграрних ресурсів

Інтенсивний розвиток сучасного аграрного виробництва у світі базується на застосуванні найновітніших досягнень науково-технічного прогресу, зокрема використанні нових високопродуктивних сортів рослин, хімічних та біологічних засобів захисту рослин від хвороб і бур'янів, засобів навігації та точного позиціонування, новітніх машин та механізмів для точної обробки ґрунту та посівів. Важливе місце в цьому переліку посідають технології космічного моніторингу аграрних ресурсів із застосуванням супутників спектрального діапазону.

Технології космічного моніторингу агроресурсів (КМА) почали використовуватись ще в середині шістдесятих років, спочатку для отримання розвідданих, з метою оцінки посівних площ та урожайності в різних регіонах світу, але тільки в останні 10–15 років ці технології знайшли широке застосування в практиці агровиробництва. Сьогодні КМА використовують не тільки державні органи, але й великі та середні агропідприємства, а з широким розвитком інтернет-технологій почали застосовувати навіть дрібні фермерські господарства.

Таке широке впровадження в реальну практику сільськогосподарського виробництва технологій КМА пояснюється в першу чергу інтенсивним розвитком самої космічної галузі, зокрема засобів доставки корисного вантажу на навколоремну орбіту, космічних платформ, здатних до довготривалого функціонування на орбіті, високоточних сенсорів, здатних фіксувати відбите сонячне випромінення в різних спектральних діапазонах. Ці досягнення привели до інтенсивного зростання обсягів доступної космічної інформації та її здешевлення.

Сучасний стан розвитку систем дистанційного зондування землі (ДЗЗ) можна охарактеризувати декількома тезами:

- Стрімкий прогрес в області використання супутників ДЗЗ цивільного призначення. Число країн, що беруть участь в реалізації проектів, пов'язаних з супутниками ДЗЗ, перевищило 32; 26 мають власні супутники ДЗЗ.

- За даними аналітичної компанії Euroconsult, до 2020 р. прогнозується стрімке зростання потреби в космічній інформації ДЗЗ в усіх сферах діяльності людини, розширення кола її виробників і користувачів майже у два рази, кількість функціонуючих супутників ДЗЗ (без врахування мікросупутників) має зрости до 260 апаратів.

- Лідерами в галузі розробки космічних засобів ДЗЗ і їх застосування є США, об'єднана Європа, Китай, Росія, Індія, Канада, Японія, Ізраїль.

Для здійснення моніторингу за аграрними ресурсами здебільшого використовуються космічні апарати та їх угруповання з просторовим розрізненням в межах 3–30 метрів на піксель, з наявними спектральними каналами видимого спектру (R,G,B), різних діапазонів ближнього інфрачервоного спектру (NIR), діапазонів середнього інфрачервоного спектру (SWIR) та дальнього (теплого) інфрачервоного діапазону (TIRS). Важливою характеристикою є також час, потрібний для повторного знімання частини земної поверхні.

Характеристики найбільш поширених космічних апаратів, що використовуються для організації моніторингу аграрних ресурсів, представлені в таблиці.

Назва	Країна	Розрізнення (R,G,B,IR) каналів (м)	Розрізнення SWIR каналів (м)	Розрізнення TIRS каналів (м)	Повторюваність (днів)
Landsat 8	США	30	30	100	16
Sentinel 2, 3	Євросоюз	10	20	60	2–3
RapidEye (1–5)	США	5	відсутні	відсутні	за замовленням
Planet (угруповання)	США	3–5	відсутні	відсутні	1
Deimos 1	Іспанія	22	відсутні	відсутні	2–4
Modis	США	250	500	1000	0.5

Важливо також, що знімки з космічних апаратів Landsat 8, Sentinel 2,3 та Modis знаходяться у вільному доступі і можуть бути отримані через мережу Internet-порталів.

Тематичні задачі моніторингу аграрних ресурсів

Зауважимо, що земельні ресурси в законодавстві переважної більшості країн визначені як головне національне багатство, найважливіший засіб виробництва. У зв'язку з цим задачі КМА можна розділити на два класи [4, 5]:

1. Глобальний або регіональний моніторинг агроресурсів в інтересах всієї держави або окремих великих територій з метою раціонального використання земельних ресурсів та ефективного виробництва сільськогосподарської продукції:

- a) Аналіз землекористування на предмет виявлення сільськогосподарських земель, що не обробляються;
- b) Оцінка ступеня парцеляції та консолідації земельних масивів, технологічності обробки;
- c) Оцінка посівних площ основних сільськогосподарських культур;
- d) Оцінка ризиків втрати врожаю в результаті погодних аномалій, інших природних явищ;
- e) Прогнозування і оцінка врожайності і валових зборів окремих сільськогосподарських культур на великих сільськогосподарських територіях.

2. Моніторинг аграрних ресурсів в інтересах великих, середніх та дрібних товаровиробників з метою покращення агротехнологічних прийомів вирощування продукції:

- a) Формування контурів аграрних полів;
- b) Аналіз розвитку посівів на різних етапах процесу вегетації;
- c) Оцінка ступеня неоднорідності посівів на окремому агрономічному полі або групі полів однієї культури, знаходження характерних зон для проведення польових досліджень;
- d) Пошук зон особливого або аномального розвитку посівів на великих площах;
- e) Аналіз однорідності агрономічного поля на предмет наявності посівів декількох різних культур;
- f) Класифікація культур в межах великої множини агрономічних полів;
- g) Створення регіональних моделей оцінки та прогнозування врожайності основних культур.

Практично всі перелічені задачі вимагають застосування ефективних обчислювальних процедур обробки багатовимірних масивів цифрової інформації і реалізації їх у вигляді програмних модулів.

Дані космічних знімків та їх попередня обробка

Сенсори космічного апарату формують зображення земної поверхні в результаті реєстрації відбитого сонячного випромінення в різних спектральних діапазонах. Вони інтегрують енергію, що потрапляє на поверхню датчиків, і визначають таким чином спектральну щільність енергетичної освітленості елемента земної поверхні. Площадку земної поверхні, з якої здійснюється реєстрація відбитого сонячного випромінення, називають пікселем, геометричний розмір якого визначається просторовим розрізненням сенсора.

Зареєстровані сенсором інтегральні значення відбитого сонячного випромінювання перетворюються в електричний сигнал, який кодується за допомогою Q двійкових розрядів (радіометричне розрізнення сенсора), таким чином, кожному пікселю космічного знімку для кожного із наявних спектральних діапазонів $\lambda_k, k = \overline{1, K}$ відповідає цілочисельне значення $0 \leq DN(x, y, \lambda_k) \leq 2^Q - 1$.

Саме такі цілочисельні значення і використовуються для формування зображень на космічному знімку у вигляді відтінків сірого кольору.

В той же час ця числова інформація несе лише відносну характеристику земної поверхні, оскільки на неї впливають різноманітні фактори, зокрема: кут знімання земної поверхні сенсорами, кут опромінення земної поверхні сонячними променями, коефіцієнт пропускання атмосфери, відстань від Землі до Сонця, чутливість сенсора в заданому спектральному діапазоні. Для отримання інваріантної характеристики земної поверхні, яка практично не залежить від вказаних величин, використовується спектральна відбивальна здатність земної поверхні, яка розраховується як відношення щільності потоку, що падає на поверхню, до щільності потоку, що відбивається поверхнею $0 \leq \rho(x, y, \lambda_k) \leq 1$. Обчислення величини $\rho(x, y, \lambda_k)$ здійснюється для більшості сучасних космічних апаратів за допомогою коефіцієнтів перерахунку, що надаються в спеціальних файлах орбітальних даних, які супроводжують космічні знімки [2].

Саме спектральна відбивальна здатність земної поверхні у різних спектральних діапазонах є унікальною характеристикою різних типів поверхні, яка не залежить від умов знімання і використовується для проведення ДЗЗ.

Обчислення відбивальної здатності земної поверхні здійснюється за формулою:

$$\rho(\lambda_k) = (RSF_k \cdot DN(\lambda_k) + RAF_k) \frac{\pi \cdot SunDist^2}{EAI(\lambda_k) * \sin\left(\frac{\pi \cdot \varphi}{180}\right)}, k = \overline{1..K}, (1)$$

де:

- RSF_k, RAF_k – коефіцієнти лінійного перетворення цілочисельних (первинних) значень у спектральну яскравість для спектрального діапазону λ_k , надаються разом з космічними знімками у вигляді XML файлів.
- $SunDist$ – площа сонячного диску в астрономічних одиницях, яка залежить від поточного дня року day і може бути обчислена за наближеною формулою

$$SunDist = 1 + 0.0167 \cdot \sin\left(\pi \frac{day - 93.5}{365}\right). (2)$$

- $EAI(\lambda_k)$ – спектральна щільність енергетичної освітленості, яка обчислюється за формулою Планка.

• φ – кут в градусах між площиною земної поверхні і вектором, направленим на Сонце.

Таким чином, кожний піксель з координатами x, y в момент часу t багатоспектрального космічного знімку характеризується вектором значень

$$\mathbf{Z}(x, y, t) = \rho(x, y, t, \lambda_1), \rho(x, y, t, \lambda_2), \dots, \rho(x, y, t, \lambda_K),$$

де $1 \leq x \leq N_x, 1 \leq y \leq N_y$.

Хоча вектор спектральної відбивальної здатності земної поверхні $\mathbf{Z}(x, y, t)$ містить первинну інформацію про стан різних видів земної поверхні, для аналізу рослинності використовуються спеціальні комбінації окремих спектральних діапазонів, які є найбільш чутливими до зміни показників рослинності, таких як вміст хлорофілу, вміст вологи та інших. Такі комбінації різних спектральних діапазонів прийнято називати вегетаційними індексами. Хоча визначення вегетаційний можна в повній мірі віднести лише до одного з найбільш поширених індексів, а саме до індексу NDVI – нормалізований диференціальний вегетаційний індекс, який є чутливим до вмісту хлорофілу в зеленій біомасі, змінюється в межах від -1 до 1 і обчислюється за формулою

$$NDVI(x, y) = \frac{\rho(x, y, 850) - \rho(x, y, 650)}{\rho(x, y, 850) + \rho(x, y, 650)}. \quad (3)$$

Також широке застосування мають індекси для аналізу стану вологовмісту в рослинності NDWI (нормалізований диференціальний індекс вологості) та аналізу вкритості поверхні шаром снігу NDSI (нормалізований диференціальний індекс снігу), які обчислюються за формулами:

$$NDWI(x, y) = \frac{\rho(x, y, 850) - \rho(x, y, 1650)}{\rho(x, y, 850) + \rho(x, y, 1650)}, \quad (4)$$

$$NDSI(x, y) = \frac{\rho(x, y, 480) - \rho(x, y, 850)}{\rho(x, y, 480) + \rho(x, y, 850)}, \quad (5)$$

де 480, 650, 850, 1650 – довжини хвиль в нанометрах блакитного (B), червоного (R), ближнього інфрачервоного (NIR) та середнього інфрачервоного (SWIR1) діапазонів. Індекс NDVI має доволі велику кількість різних модифікацій, із застосуванням інших додаткових спектральних діапазонів, які в певній мірі розширюють його можливості, зокрема, у випадках розрідженої та густої рослинності, коли для NDVI порушується лінійна залежність рівня біомаси від значення індексу.

Загалом на сьогоднішній день відомі більше 100 різних індексів, які є чутливими до різних типів земної поверхні, зокрема наявності різних типів мінералів в ґрунтах, однаке більшість з них потребують для свого обчислення значення відбивальної здатності у вузьких спектральних діапазонах (так звані гіперспектральні сенсори) і для аналізу стану рослинності, як правило, не використовуються.

Таким чином, при аналізі стану рослинності, окрім вектора $\mathbf{Z}(x, y, t)$, формують додаткові ознаки земної поверхні у вигляді набору індексів $\mathbf{I}(x, y, t)$.

Веgetуюча рослинність має чітко виражену сезонну мінливість, тому для аналізу її стану використовують послідовність доступних космічних знімків на поточну дату, які характеризують процес вегетації та дозволяють сформувати вихідний двовимірний масив даних, в якому кожний стовпець відповідає окремому спектральному каналу або індексу на деякий момент часу.

$$\Omega = \{Z(x, y, t_1), I(x, y, t_1), \dots, Z(x, y, t_N), I(x, y, t_N), x = 1..N_1, y = 1..N_2\}.$$

Розмірність відповідного масиву може сягати декількох мільйонів рядків та декількох десятків стовпчиків, кожний рядок масиву будемо розглядати як реалізацію деякого багатовимірного випадкового вектора.

Кореляційний аналіз масиву демонструє високий рівень кореляції між окремими компонентами випадкового вектора, зокрема, значення попарних коефіцієнтів кореляції між спектральними відбивальними здатностями різних спектральних діапазонів для одного знімку сягає величини 0.8–0.9, для знімків за різні дати цей коефіцієнт знаходиться в межах 0.5–0.7 в залежності від віддаленості дат знімків. Тобто масив Ω , як правило, містить надмірну кількість компонентів випадкового вектора.

Зниження розмірності простору ознак Ω та усунення кореляції між окремими компонентами, як відомо [1], можна досягнути використанням факторного аналізу, наприклад, методом головних компонентів (*principal component analysis, PCA*). *PCA* аналізує власні числа та власні вектори вибіркової коваріаційної матриці $\mathbf{C}(N, N)$, де N – розмірність векторного простору. Як відомо, матриця $\mathbf{C}(N, N)$ невід’ємно визначена, має додатні власні числа $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N > 0$ та ортонормований набір власних векторів $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_N$, впорядкованих за зменшенням власних чисел. Перетворення вихідного простору ознак до головних компонентів здійснюється за допомогою ортогональної матриці $\mathbf{A} = \{\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_N\}^T$. Кількість головних компонентів $1 \leq K \leq N$ визначається величиною доли поясненої дисперсії, яка обчислюється через власні числа $D_K = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_K}{\text{tr}\mathbf{C}}$, залишкова дисперсія при цьому дорівнює $1 - D_K$. За

правилом Кайзера значущими є ті компоненти, для яких $\lambda_i > \frac{\text{tr}\mathbf{C}}{N}$.

Обчислювальні процедури тематичної обробки

Аналіз ступеня однорідності агрономічного поля. Агрономічне поле – це базовий об’єкт космічного моніторингу, який можна визначити як частину сільськогосподарських угідь, обмежених стійкими природними границями,

який засіяний однією культурою і обробляється як цілісний об'єкт за допомогою єдиних технологічних методів обробітку ґрунту, захисту і підживлення рослин. Якість окремого агрономічного поля характеризується мірою однорідності показника продуктивності, наприклад відмінностями об'єму біомаси в різних точках поля. Вважається, що чим вища однорідність поля, тим вищий рівень культури агровиробництва і кращий рівень продуктивності поля. Для аграріїв важливо надати оцінку міри однорідності поля, її зміни з року в рік та виділити зони максимального та мінімального відхилення від середнього значення показника продуктивності. В якості показника продуктивності поля здебільшого використовують розподіл по площі поля вегетаційного індексу $NDVI$ або його численних модифікацій, які корелюють з кількістю зеленої біомаси. В якості міри неоднорідності поля використовується варіація значення $NDVI$, тобто $VAR = \frac{\sqrt{D(NDVI)}}{M(NDVI)}$. Для

оцінки розподілу міри неоднорідності по площі поля використовується фокальна статистика. В цьому випадку вся площа поля розбивається на скінченну кількість регулярних частин, що не перетинаються: $S = \bigcup S_i$, варіація обчислюється для кожного елемента S_i . Розподіл показника варіації відображається на картографічній основі в кольоровій шкалі з позначенням точок максимальної варіації на полі.

Точки максимальної варіації використовуються для проведення польових агрономічних досліджень з метою встановлення причин неоднорідності посівів та прийняття оперативних або перспективних засобів реагування.

Ранжування групи полів. Сучасні великі агрофірми, що обробляють десятки і навіть сотні тисяч гектарів, здебільшого спеціалізуються на вирощуванні 2–3 культур; фактично на компактній території можуть бути розташовані декілька десятків, іноді і сотні агрономічних полів, на яких вирощується одна культура та використовуються однотипні аграрні технології. В цьому випадку виникає потреба проведення ранжування полів відповідної групи для оптимізації агротехнологічних прийомів та зменшення впливу на ефективність виробництва порушень технологічної дисципліни, людського фактору.

Будемо припускати, що кожне поле з номером $j = 1..M$ характеризується набором числових характеристик $P_i^j, i = 1..N$. Лінійним перетворенням нормалізуємо так, щоб кожний нормалізований показник Z_i^j для множини полів належав діапазону $[0,1]$ та кращим значенням показника відповідали менші значення нормалізованого індексу. Таке перетворення можна записати у вигляді $Z_i^j = \frac{P_i^j - A_i}{B_i - A_i}$, де $A_i = \min_{j=1..M}(P_i^j)$, $B_i = \max_{j=1..M}(P_i^j)$ для показників, де меншим значенням вихідного показника $P_i^j, i = 1..N$ відповідає краща якість поля, та у вигляді $Z_i^j = \frac{P_i^j - B_i}{A_i - B_i}$ для показників з протилежним напрямом якості.

Прикладом показників першого типу є варіація розподілу *NDVI* по полю (поля з меншою варіацією вважаються кращими, ніж поля з більшою). Показником другого типу є, наприклад, середнє значення величини *NDVI* по полю (поля з більшим значенням середнього значення *NDVI* вважаються кращими).

Згортка нормалізованого векторного показника Z_i^j в скалярній формі для кожного поля j обчислюється за формулою $D_j = \left(\sum_{i=1}^N \mu_i (Z_i^j)^2 \right)^{0.5}$, $j=1..M$, де $0 \leq \mu_i \leq 1$, $i=1..N$, $\sum_{i=1}^N \mu_i = 1$, вагові множники, що враховують важливість скалярних показників, визначаються експертним методом.

Скалярний показник D визначає ранжування полів за якістю для обраної множини полів. Рівномірне розбиття діапазону зміни D на K інтервалів дозволяє об'єднати поля з близькими показниками в окремі класи.

Заключення

У першій частині роботи були сформульовані основні задачі космічного моніторингу аграрних ресурсів, описана загальна модель даних дистанційного моніторингу та розглянуті допоміжні математичні процедури обробки космічних знімків. Друга частина роботи буде присвячена процедурам тематичної обробки космічних знімків аналізу аграрних ресурсів. Зокрема, будуть описані технології кластеризації та класифікації для аналізу структури посівних площ, аналізу ступеня однорідності агрономічного поля, виявлення земель, що не обробляються, аналізу ризиків втрати врожаю в результаті природних явищ. Будуть розглянуті підходи побудови регіональних та локальних моделей оцінки врожайності з використанням технології нейронних мереж та інші важливі обчислювальні процедури.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Шовенгердт Р.А. – М: Техносфера, 2010. – 568 с.
2. Chavez P.S., Jr., Image-Based Atmospheric Correction – Revisited and Improved Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 62, No 9, September 1996, pp. 1025–1036.
3. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Гонсалес Р., Вудс Р. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 р.
4. Grekov L., Kuzmin A., Medvedenko E. and other, Applied geoinformation system of space monitoring of agricultural resources. 14th GeoConference on informatics, geoinformatics and remote sensing. Conference Proceedings. Volume III, 17–26, June, 2014, Albena, Bulgaria, pp. 461–468.
5. Региональная геоинформационная система мониторинга аграрных ресурсов с применением методов дистанционного зондирования Земли / Греков Л.Д., Кузьмин А.В., Верюжский Г.Ю., Петров А.А., Скавронский В.П. // Екологічна безпека та природокористування. – 2015. – № 1(17). – С. 88–97.

Стаття надійшла до редакції 09.03.2016