

Ю. В. Костюченко, Д. М. Соловійов, М. В. Ющенко, С. С. Дугін,
І. М. Копачевський, І. Г. Артеменко

Використання наземних гіперспектрометричних вимірювань для калібрування даних ДЗЗ в задачах оцінки стану навколишнього середовища

(Представлено академіком НАН України В. І. Ляльком)

Запропоновано засади інтеркалібрування даних супутникових та польових досліджень спектральних властивостей земних покривів у задачах оцінки стану навколишнього середовища, зокрема рослинності, ґрунтів і водного балансу територій. На основі аналізу даних вимірювань польового спектрорадіометра FieldSpec[®] з FR визначено статистичні закономірності просторово-часового розподілу характеристик спектрального відбиття за спектральними індексами. Запропоновано форму оптимального алгоритму розрахунку спектральних індексів на основі кореляційного аналізу, а також загальний вигляд калібрувальних закономірностей для подальшої завірки даних супутникових спостережень.

Спектри відбиття земних утворень, які реєструються за допомогою приладів супутникового базування, формуються шляхом інтеграції енергетичного внеску з великих ділянок поверхні. Це значно відрізняє їх від спектрів, отриманих при наземних вимірюваннях [1], та має бути враховано при порівняльному аналізі. При аналізі суперпозицій спектральних смуг (спектральних індексів), особливо у випадку, коли ширина смуг є суттєвою, просторово-часова варіабельність енергетичного потоку з поверхні має бути врахована при зіставленні даних наземних та дистанційних вимірів. Класичні вирази для нормалізованого вегетаційного індексу *NDVI* (Normalized Difference Vegetation Index) та нормалізованого водного індексу *NDWI* (Normalized Difference Water Index), які обґрунтовані за лабораторними експериментами, запропоновано в наукових публікаціях [2, 3] у вигляді:

$$NDVI = \frac{r_{NIR} - r_{RED}}{r_{NIR} + r_{RED}} = \left(\frac{r_{800} - r_{680}}{r_{800} + r_{680}} \right), \quad (1)$$

$$NDWI = \left(\frac{r_{857} - r_{1241}}{r_{857} + r_{1241}} \right), \quad (2)$$

де r_λ — показник відбиття у відповідній смузі спостереження λ , нм; *NIR* — ближній інфрачервоний діапазон; *RED* — червона частина спектра відбиття.

Враховуючи те, що більшість спектрометричних приладів супутникового базування здійснює зйомку в наперед визначених спектральних смугах, було запропоновано рівняння для розрахунку наведених індексів для порівняння з даними конкретних супутникових сенсорів через інтенсивність отриманого сенсором сигналу I [4]:

$$NDVI^{MSS} = \left[\int_{700}^{800} Id\lambda - \int_{600}^{700} Id\lambda \right] / \left[\int_{700}^{800} Id\lambda + \int_{600}^{700} Id\lambda \right] / g. \quad (3)$$

Для даних, отриманих сенсором *MSS* супутників серії Landsat Геологічної служби США, маємо:

$$NDVI^{ETM} = \left[\int_{760}^{900} Id\lambda - \int_{630}^{690} Id\lambda \right] / \left[\int_{760}^{900} Id\lambda + \int_{630}^{690} Id\lambda \right] / g, \quad (4)$$

а для даних, отриманих сенсорами *TM* і *ETM* супутників серії Landsat, —

$$NDWI^{ETM} = \left(\left[\int_{760}^{900} Id\lambda - \int_{1550}^{1750} Id\lambda \right] / \left[\int_{760}^{900} Id\lambda + \int_{1550}^{1750} Id\lambda \right] \right) / g. \quad (5)$$

Застосування редукованих на спектральні інтервали рівнянь дозволяє отримати розподіли спектральних індексів, що відображають як специфіку використаних засобів зйомки, так і просторові варіації енергетичного балансу земної поверхні і, таким чином, провести більш коректне порівняння результатів супутникових і наземних спектрометричних вимірів.

Регуляризацію слід провести різними шляхами. В рамках розв'язувальної задачі можна запропонувати відносно простий шлях, що базується на визначенні розподілів досліджуваних характеристик по всій території $f_{x,y}$ відносно розподілів на вимірних ділянках f_m [5]:

$$f_{x,y} = \sum_{m=1}^n w_{x,y}(\tilde{f}_m) f_m, \quad (6)$$

де $w_{x,y}(\tilde{f}_m)$ — ваговий коефіцієнт, який визначається через пошук мінімуму [9]:

$$\min \left\{ \sum_{m=1}^n \sum_{f_m \in F} w_{x,y}(\tilde{f}_m) \left(1 - \frac{f_m}{\tilde{f}_m} \right)^2 \right\}. \quad (7)$$

У цьому рівнянні m — кількість точок, на яких проводилися вимірювання; n — кількість серій спостережень; f_m — розподіл результатів вимірювань (дані експериментів); F — множина (загальна сукупність) даних вимірювань; \tilde{f}_m — середній розподіл значень вимірюваних характеристик.

Застосування процедури регуляризації дозволяє отримати розподіли вимірюваних характеристик, що з контрольованою точністю відповідають просторово-часовим параметрам супутникової зйомки. Зіставлення двох регулярних мереж спостереження — наземної та супутникової зйомки — може бути проведено, використовуючи підхід, запропонований в статті [6], відповідно до рівняння:

$$\bar{R} = \int R(\vec{r}) d\vec{r}, \quad (8)$$

де \vec{r} — двовимірний вектор координат ділянки; R — вимірний розподіл спектрального відбиття (\bar{R} — з гіршим просторовим розрізненням). Таким чином, можна коректно зіставити дані наземних та дистанційних вимірювань.

Для калібрування отриманих спектральних індексів було проведено наземні спектрометричні польові вимірювання, згідно з методикою [1]. За допомогою польового спектродіаметра FieldSpec[®]3 FR на окремих ділянках середньої частини басейну р. Прип'ять

у періоди, що відповідають періодам супутникових спостережень, було виконано 117 вимірів спектральної відбивної здатності земних покривів в діапазоні від 350 до 2500 нм з інтервалом відліку 1,4 нм у діапазоні довжини хвиль від 350 до 1000 нм і 2,0 нм у діапазоні довжини хвиль від 1000 до 2500 нм при спектральній розрізненості: 3,0 нм при 700 нм; 10 нм при 1400 та 2100 нм [1].

Для проведення проблемно-орієнтованої класифікації та подальшого аналізу спектральних характеристик земних покривів було використано матеріали космічних зйомок супутників Landsat-2 (Геологічна служба США), сенсор *MSS*, зйомки від 11.06.1975 р.; 19.03, 12.05, 24.06.1976 р.; Landsat-5, сенсор *TM*, зйомки від 04.05, 07.07.1986 р.; 22.07.2003 р.; 28.04, 14.05, 15.06.2007 р.; Landsat-7, сенсор *ETM*, зйомки від 19.07.1999 р.; 28.02, 02.05.2000 р.; 24.03, 27.05.2003 р.; 22.05, 09.07, 17.07.2007 р.; 09.04, 25.04, 27.05, 28.06, 14.07.2009 р., а також матеріали наземних польових досліджень ЦАКДЗ 2007–2010 рр. по досліджуваній території.

Пряме зіставлення даних вимірювань спектральних характеристик земних покривів та розрахованих на їх основі спектральних індексів земних утворень не дозволяє отримати сталі статистично достовірні кореляційні залежності між розподілами даних супутникового і наземного походження по всьому інтервалу спостережень.

Регуляризація по енергетичному потоку (спектральна регуляризація) дозволяє отримати розподіли даних, які демонструють на окремих інтервалах сталі кореляції певних параметрів. При цьому найкраща кореляція спостерігається між даними супутникових спостережень і наземних вимірювань, обрахованих за рівняннями (4), (5), трохи гірша — при використанні рівняння (3). Застосовуючи алгоритми подальшої просторово-часової регуляризації і корекції, отримуємо кращі кореляції через врахування просторових варіацій розподілів вимірюваних характеристик та різниці просторових характеристик супутникових і наземних вимірів. Отже, оцінимо рівняння лінійної апроксимації, які пов'язують значення спектральних індексів, отриманих за даними супутникових і наземних вимірювань із застосуванням різних алгоритмів:

рівняння лінійної апроксимації між середнім значенням $NDVI_{sat}$, розрахованим за даними супутникових спостережень, та значенням $NDVI_{ground}^{MSS}$, розрахованим за результатами польових спектрометричних досліджень, можна представити, використовуючи алгоритм (9):

$$NDVI_{sat} = 0,19 + 0,55 \cdot NDVI_{ground}^{MSS}, \quad (9)$$

а з використанням алгоритму (4) отримуємо рівняння

$$NDVI_{sat} = 0,17 + 0,45 \cdot NDVI_{ground}^{ETM}. \quad (10)$$

Ці залежності ілюструють рис. 1 й 2 відповідно.

Отримані калібрувальні залежності демонструють достатньо високу кореляцію показників. Отже, виходячи з наведених даних, оптимальним алгоритмом для розрахунку індексу $NDVI$ за даними польових спектрометричних вимірювань за допомогою приладу FieldSpec[®]3 FR слід використовувати рівняння (5).

Аналогічним чином можна провести аналіз розподілів спектральних індексів $NDWI$. Як і у випадку з вегетаційними індексами, регуляризація по енергетичному потоку (спектральна регуляризація) дає змогу отримати розподіли даних, які на окремих інтервалах зумовлюють сталі кореляції певних параметрів. Слід зазначити, що водні індекси $NDWI$ демонструють кращі кореляції, ніж вегетаційні індекси, але просторовий розподіл вимірювань їх значно

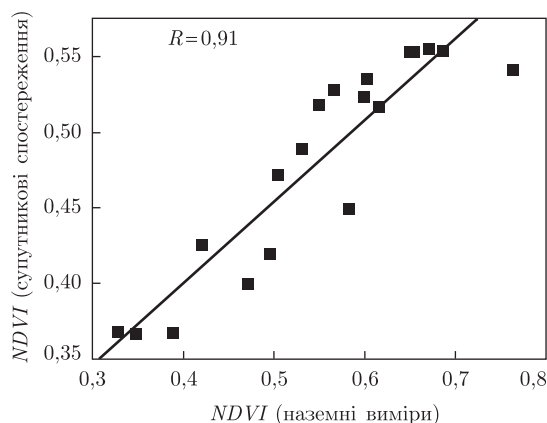


Рис. 1. Зіставлення розподілів індексу $NDVI$, отриманого за даними супутникових і наземних вимірювань, який обчислено за алгоритмом (9) (коефіцієнт кореляції 0,91; середньоквадратичне відхилення 0,029)

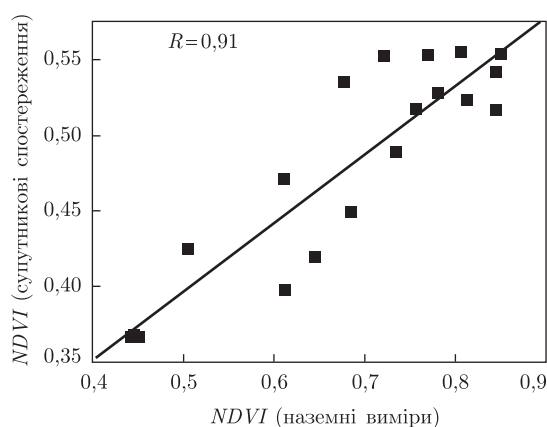


Рис. 2. Зіставлення розподілів індексу $NDVI$, отриманого за даними супутникових і наземних вимірювань, який обчислено за рівнянням (10) (коефіцієнт кореляції 0,90; середньоквадратичне відхилення 0,031)

гірший, що пов'язане з недоопрацьованістю методики наземних вимірювань. Ці дані показують добрі кореляції, завдяки ним можна розрахувати рівняння лінійної апроксимації, які пов'язують значення спектральних індексів, отриманих за результатами супутникових та наземних вимірювань із застосуванням різних алгоритмів. Отриману залежність ілюструє рис. 3.

Рівняння лінійної апроксимації між середнім значенням $NDWI_{sat}$, розрахованим за даними супутникових спостережень, та значенням $NDWI_{ground}^{ETM}$, розрахованим за результатами польових спектрометричних досліджень (для випадку, наведеного на рис. 3), можна представити як

$$NDWI_{sat} = 0,58 + 0,61 \cdot NDWI_{ground}^{ETM}. \quad (11)$$

Враховуючи те, що дані супутника було відкалібровано з коефіцієнтом +0,5 відносно початкового розподілу (з метою більш детального вивчення ділянок з малим значенням індексу $NDWI$), формулу (11) наведемо як

$$NDWI_{sat} = 0,29 + 0,61 \cdot NDWI_{ground}^{ETM}. \quad (12)$$

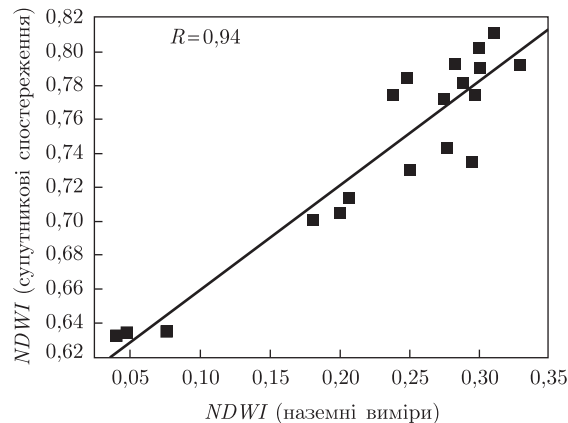


Рис. 3. Зіставлення розподілів індексу $NDWI$, отриманого за даними супутникових і наземних вимірювань, який оброблено за рівнянням (5) (коефіцієнт кореляції 0,94; середньоквадратичне відхилення 0,021)

Таким чином, оптимальним алгоритмом для розрахунку індексу $NDWI$ за даними польових спектрометричних вимірювань за допомогою приладу FieldSpec[®]3 FR слід використовувати рівняння (5), а як калібрувальну залежність для верифікації даних супутникових зйомок при цьому можна запропонувати формулу (12).

Слід відзначити, що під час проведення польових спектрометричних вимірів за лімбічною схемою (тобто під певним кутом) деякі ділянки області огляду спектрометра виявляються екранованими рослинністю. Враховуючи загальну неоднорідність умов досліджуваного району в межах розмірів ділянок зйомок, можна передбачити, що ефект впливу схеми спостереження дасть змогу зменшити невизначеність оцінювання спектральних індексів у середньому на 12–15%. Аналіз отриманих розподілів показує, що визначені лінійні калібрувальні залежності для вегетаційного індексу $NDVI$ слід вважати достатньо коректними лише в інтервалі значень індексу від 0,4 до 0,55. При $NDVI > 0,55$ калібрувальна залежність не буде лінійною, як це демонструють представлені дані. Визначення точного вигляду калібрувальних залежностей для всього інтервалу можливих значень індексів є предметом подальших досліджень.

1. ASD FieldSpec[®]3 FR User Manual. – Boulder: ASD Document, 2007. – 96 p.
2. Jackson R. D., Slater P. N., Pinter P. J. Discrimination of Growth and Water Stress in Wheat by Various Vegetation Indices Through Clear and Turbid Atmospheres // Remote Sensing of the Environment. – 1983. – 15. – P. 187–208.
3. Gao B. C. Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space // Proceedings of SPIE. – 1995. – 2480. – P. 225–236.
4. Kostyuchenko Y. V., Kopachevskiy I., Solovyov D. et al. Coupling of satellite observation to increase reliability of analysis of socio-ecological consequences of technological disasters // Reliability and Safety. – 2012. – 6. – P. 225–241.
5. Fowler H. J., Kilsby C. G., O'Connell P. E. Modeling the impacts of climatic change and variability on the reliability, resilience and vulnerability of a water resource system // Water Resour Res. – 2003. – 39. – P. 12–22.
6. Acarreta J. R., Stammes P. Calibration comparison between SCIAMACHY and MERIS onboard ENVISAT // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2005. – 1. – P. 31–35.

ДУ “Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі
 Інституту геологічних наук НАН України”, Київ
 Морський гідрофізичний інститут
 НАН України, Севастополь

Надійшло до редакції 02.04.2012

Ю. В. Костюченко, Д. М. Соловьёв, М. В. Ющенко, С. С. Дугин,
И. М. Копачевский, И. Г. Артеменко

**Использование наземных гиперспектральных измерений
для калибровки данных ДЗЗ в задачах оценки состояния
окружающей среды**

Предложены основы интеркалибровки данных спутниковых и полевых исследований спектральных свойств земных покровов в задачах оценки состояния окружающей среды, в частности растительности, грунтов и водного баланса территорий. На основе анализа данных измерений полевого спектрорадиометра FieldSpec® 3 FR определены статистические закономерности пространственно-временного распределения характеристик спектрального отражения по спектральным индексам. Предложена форма оптимального алгоритма расчета спектральных индексов на основе корреляционного анализа, а также общий вид калибровочных закономерностей для дальнейшей проверки данных спутниковых наблюдений.

Yu. V. Kostyuchenko, D. M. Solovyov, M. V. Yuschenko, S. S. Dugin,
I. M. Kopachevskyi, I. G. Artemenko

**Utilization of in-field hyperspectral measurements for the calibration of
satellite observation data for the environmental condition analysis**

A basic approach for the intercalibration of satellite observational data and in-field hyperspectre measurements of land covers is proposed. It can be applied to the tasks of environmental analysis, in particular, to the assessment of a condition of vegetation, soil, and water balance of territories. Using the in-field measurement data of a spectroradiometer FieldSpec® 3 FR, the statistical trends of the spatial-temporal distribution of spectral reflectance indices are determined. The optimal form of an algorithm for the calculation of spectral indices has been proposed basing on correlation analysis, and the calibration equations for satellite data verification are obtained.