

УДК 504.064.3:528.88:(528.855:681.785.58)

Ю. В. Костюченко¹, Д. М. Соловійов², М. В. Ющенко¹, С. С. Дугін¹,
І. М. Копачевський¹, Ю. Г. Білоус¹, І. Г. Артеменко¹

¹ Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі
Інституту геологічних наук Національної академії наук України», Київ

² Морський гідрофізичний інститут Національної академії наук України, Севастополь

ЗАСТОСУВАННЯ ДАНИХ НАЗЕМНИХ ПОЛІГОННИХ СПЕКТРОМЕТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ ДЛЯ КАЛІБРУВАННЯ ДАНИХ ДЗЗ В ЗАДАЧАХ ОЦІНКИ ГІДРОЛОГО-ГІДРОГЕОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

Запропоновано теоретико-методичні засади інтеркалібрування даних супутникових та польових досліджень спектральних властивостей земних покривів у задачах оцінки водного балансу та гідролого-гідрогеологічної безпеки території. На основі аналізу даних вимірювань польового спектродіаметра FieldSpec®3 FR визначено статистичні закономірності просторово-часового розподілу характеристик спектрального відбиття за спектральними індексами, що використовуються для вирішення задачі. Запропоновано форму оптимального алгоритму розрахунку спектральних індексів на основі кореляційного аналізу, а також загальний вигляд калібрувальних закономірностей для подальшої перевірки даних супутникових спостережень.

Спектри відбиття земних утворень, які реєструються за допомогою приладів супутникового базування, формуються шляхом інтеграції енергетичного внеску з великих ділянок поверхні. Дана особливість суттєво відрізняє їх від спектрів, отриманих шляхом наземних вимірювань, і має бути врахована у процесі порівняльного аналізу. На окремих вузьких спектральних смугах ці ефекти можуть бути не помітними. Але 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 вимірювань.

Баланс випромінювання ділянки земної поверхні R_n описується наступним рівнянням [9, 12]:

$$R_n(T_{aero}, \mathbf{P}, \mathbf{W}) = H(T_{aero}, \mathbf{P}, \mathbf{W}) + LH(T_{aero}, \mathbf{P}, \mathbf{W}, \Theta) + G(T_{aero}, \mathbf{P}, \mathbf{W}, \mathbf{T}, \Theta), \quad (1)$$

де T_{aero} — аеродинамічна температура поверхні, LH — прихована теплота (залишок теплової енергії, що надійшла з випромінюванням, після поглинання рослинним покривом та ґрунтом), параметричні описи параметрів ґрунтів та рослинності (\mathbf{P}), кількості опадів та сонячної радіації (\mathbf{W}), поточного теплового (\mathbf{T}) та гідрологічного (Θ) станів поверхні.

Варіації термальних і гідрологічних умов згідно з роботою [3] є функціями кількох змінних:

$$\frac{dT}{dt} = f(T_{aero}, \Theta, \mathbf{T}, \mathbf{P}, \mathbf{W}), \quad (2)$$

$$\frac{d\Theta}{dt} = f(LH, \Theta, \mathbf{T}, \mathbf{P}, \mathbf{W}). \quad (3)$$

З урахуванням вищенаведеного загального опису та процесів випаровування з поверхні і евапотранспірації в роботі [4] було запропоновано таке рівняння для опису енергетичного потоку з ділянки поверхні:

$$g_T = f_v g_v + f_s g_s, \quad (4)$$

де f_v та f_s — частини досліджуваної ділянки, що переважно вкриті рослинністю або переважно

© Ю. В. КОСТЮЧЕНКО, Д. М. СОЛОВІЙОВ, М. В. ЮЩЕНКО,
С. С. ДУГІН, І. М. КОПАЧЕВСЬКИЙ, Ю. Г. БІЛОУС,
І. Г. АРТЕМЕНКО, 2012

представлені оголеними ґрунтами. У найбільш загальному випадку, коли немає жодної наземної інформації про розподіл гідрогеологічних та геоморфологічних характеристик досліджуваної ділянки, згідно з [4] можна вважати, що $f_s = 1 - f_v$. Для більш коректного розрахунку f_v та f_s можна використати дані ДЗЗ [4]:

$$f_v = 1 - \left(\frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right)^p, \quad (5)$$

$$f_s = g \cdot \left(\frac{NDWI - NDWI_{\min}}{NDWI_{\max} - NDWI_{\min}} \right)^q. \quad (6)$$

Тут максимальні та мінімальні значення індексів $NDVI$ та $NDWI$ розраховуються відповідно до стандартного алгоритму [8, 10] у межах визначеного інтервалу спостережень, а g , p та q — емпіричні коефіцієнти.

Варіабельність енергетичного потоку може бути врахована двома шляхами: по-перше, введенням спеціального алгоритму розрахунку спектральних індексів, який враховував би особливості формування енергетичного балансу земної поверхні з огляду на задачу, що вирішується, і, по-друге, застосуванням статистичних процедур для аналізу даних наземних вимірювань з метою регуляризації сітки спостережень відносно супутникових даних. Крім того, важливим є аналіз часової динаміки спостережень у випадках, коли проведення одночасних із супутниковими вимірювань на наземних полігонах не є можливим.

Зазначимо, що задача якісного і кількісного обґрунтування придатного для інтеркалібрування форми виразу розрахунку спектрального індексу в кожному окремому випадку потребує детального аналізу і обробки великої кількості лабораторних, наземних і супутникових даних. При подальшому розгляді обмежимося аналізом лише нормалізованого вегетаційного індексу $NDVI$ (Normalized Difference Vegetation Index) та нормалізованого водного індексу $NDWI$ (Normalized Difference Water Index), як таких, що у найбільшій мірі відповідають характеру задачі про оцінку гідролого-гідрогеологічної безпеки територій.

Класичні вирази для цих індексів, обґрунтовані лабораторними експериментами, запропо-

новано в роботі [10] для $NDVI$ і [8] для $NDWI$ у вигляді

$$NDVI^{lab} = \frac{r_{800} - r_{680}}{r_{800} + r_{680}}, \quad (7)$$

$$NDWI^{lab} = \frac{r_{857} - r_{1241}}{r_{857} + r_{1241}}. \quad (8)$$

Тут r_λ — коефіцієнт відбиття у відповідній смузі спостереження λ (нм).

Враховуючи те, що більшість спектрометричних приладів супутникового базування здійснює зйомку у визначених спектральних смугах, а також зауваження щодо енергетичного балансу територій, які впливають із рівнянь (1)–(4), в роботі [11] було запропоновано рівняння для розрахунку наведених індексів для порівняння з даними конкретних супутникових сенсорів:

$$NDVI^{MSS} = \frac{1}{g} \left(\int_{700}^{800} Id\lambda - \int_{600}^{700} Id\lambda \right) / \left(\int_{700}^{800} Id\lambda + \int_{600}^{700} Id\lambda \right). \quad (9)$$

Для даних, отриманих сенсором MSS супутників серії «Landsat» Геологічної служби США, а також для даних, отриманих сенсорами TM і $ETM+$ супутників «Landsat» запропоновано вирази

$$NDVI^{ETM} = \frac{1}{g} \left(\int_{760}^{900} Id\lambda - \int_{630}^{690} Id\lambda \right) / \left(\int_{760}^{900} Id\lambda + \int_{630}^{690} Id\lambda \right), \quad (10)$$

$$NDWI^{ETM} = \frac{1}{g} \left(\int_{760}^{900} Id\lambda - \int_{1550}^{1750} Id\lambda \right) / \left(\int_{760}^{900} Id\lambda + \int_{1550}^{1750} Id\lambda \right). \quad (11)$$

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 коректніше порівняти результати супутникових і наземних спектрометричних вимірювань.

Регуляризація може бути проведена різними шляхами. В рамках задачі, що вирішується, 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 по аналогії з [7]:

$$f_{x,y} = \sum_{m=1}^n w_{x,y}(\tilde{f}_m) f_m, \quad (12)$$

де $w_{x,y}(\tilde{f}_m)$ — ваговий коефіцієнт, який визначається через пошук мінімуму [5]:

$$\min \left\{ \sum_{m=1}^n \sum_{f_m \in F} w_{x,y}(\tilde{f}_m) \left(1 - \frac{f_m}{\tilde{f}_m} \right)^2 \right\}. \quad (13)$$

Тут 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 — можна провести, використовуючи підхід [1] відповідно до рівняння

$$\bar{R} = \int R(\mathbf{r}) d\mathbf{r}. \quad (14)$$

Тут \mathbf{r} — двовимірний вектор координат ділянки, R — вимірний розподіл спектрального відбиття (\bar{R} — з гіршим просторовим розрізненням).

Таким чином можуть бути коректно зіставлені дані наземних та дистанційних вимірювань.

Для калібрування отриманих спектральних індексів було проведено наземні спектрометричні польові вимірювання. За допомогою польового спектрорадіометра FieldSpec®3 FR [2] на окремих ділянках досліджуваного регіону у періоди, що відповідають періодам супутникових спостережень, зроблено 117 вимірів спектральної відбивної здатності земних покривів у діапазоні 350—2500 нм з інтервалом відліку 1.4 нм у діапазоні довжини хвиль 350—1000 нм та 2.0 нм у діапазоні довжини хвиль 1000—2500 нм при спектральній розрізненості (повній ширині на половині максимуму): 3.0 нм при 700 нм і 10 нм — при 1400 та 2100 нм.

Для проведення проблемно-орієнтованої класифікації та подальшого аналізу спектральних характеристик земних покривів використовувалися матеріали космічних зйомок супутників «Landsat» (Геологічна служба США): «Landsat-2», сенсор MSS (зйомки від 11.06.1975 р., 19.03, 12.05 та 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 та 14.07.2009 р.). У процесі аналізу супутникових даних використовувалися картографічні матеріали актуалізації 1972 та 1986 рр., а також матеріали наземних польових досліджень ЦАКДЗ 2007—2010 рр.

Пряме зіставлення даних вимірювань спектральних характеристик земних покривів і розрахованих на їхній основі спектральних індексів земних утворень не показує сталої статистично достовірної кореляційної залежності між розподілами даних супутникового і наземного походження по всьому інтервалу спостережень.

Розподіли даних, які демонструють на окремих інтервалах сталі кореляції певних параметрів, можна отримати шляхом регуляризації по енергетичному потоку (див. табл. 1).

Як впливає з наведених даних, найкраща кореляція спостерігається між даними супутникових спостережень і наземних вимірювань, обчислених за алгоритмом «ETM» (10), (11), трохи гірша — при використанні алгоритму «MSS» (9). Важливо зазначити задовільні показники кореляцій, що спостерігаються між значеннями, обчисленими за традиційним «lab»-алгоритмом та всіма даними спостережень, що підтверджує коректність запропонованих алгоритмів (9)—(11).

Застосування алгоритмів подальшої просторово-часової регуляризації і корекції дозволяє отримати кращі кореляції через врахування просторових варіацій розподілів вимірюваних характеристик та різниці просторових характеристик супутникових та наземних вимірів (табл. 2).

За цими даними можна розрахувати рівняння лінійної апроксимації, що пов'язують значення спектральних індексів, отриманих за даними супутникових та наземних вимірювань із засто-

Таблиця 1. Коефіцієнти кореляції r між значеннями індексів $NDVI$ за даними супутникових спостережень 2007 і 2009 рр. та польових вимірювань 2010 і 2011 рр., розрахованих за допомогою алгоритмів «lab», «MSS», «ETM» із застосуванням процедур спектральної регуляризації (6)–(10) без просторово-часової регуляризації і взаємної корекції (12)–(14)

Параметр	Індекс	$NDVI_{sat}^{2007}$	$NDVI_{sat}^{2009}$	$NDVI_{gr}^{lab(2010)}$	$NDVI_{gr}^{lab(2011)}$	$NDVI_{gr}^{MSS(2010)}$	$NDVI_{gr}^{MSS(2011)}$	$NDVI_{gr}^{ETM(2010)}$	$NDVI_{gr}^{ETM(2011)}$
r	$NDVI_{sat}^{2007}$	1	0.66396	0.31829	0.55991	0.44642	0.35797	0.48196	0.62964
σ			0.00194	0.2892	0.0466	0.12622	0.22978	0.09535	0.0211
r	$NDVI_{sat}^{2009}$	0.66396	1	0.03692	0.62964	0.40067	0.59742	0.37523	0.65962
σ			0.00194	0.90468	0.0211	0.17486	0.03108	0.20645	0.01417
r	$NDVI_{gr}^{lab(2010)}$	0.31829	0.03692	1	0.72415	0.7366	0.79333	0.71868	0.44383
σ			0.2892	0.90468	0.06573	0.00408	0.03325	0.00564	0.31849
r	$NDVI_{gr}^{lab(2011)}$	0.55991	0.62964	0.72415	1	0.74703	0.86091	0.66985	0.88956
σ			0.0466	0.0211	0.06573	0.05365	0.00016	0.09971	0.00005
r	$NDVI_{gr}^{MSS(2010)}$	0.44642	0.40067	0.7366	0.74703	1	0.75825	0.88444	0.48203
σ			0.12622	0.17486	0.00408	0.05365	0.04821	0.00006	0.27334
r	$NDVI_{gr}^{MSS(2011)}$	0.35797	0.59742	0.79333	0.86091	0.75825	1	0.65699	0.68958
σ			0.22978	0.03108	0.03325	0.00016	0.04821	0.10886	0.00911
r	$NDVI_{gr}^{ETM(2010)}$	0.48196	0.37523	0.71868	0.66985	0.88444	0.10886	1	0.54243
σ			0.09535	0.20645	0.00564	0.09971	0.00006	0.10886	0.2084
r	$NDVI_{gr}^{ETM(2011)}$	0.62964	0.65962	0.44383	0.88956	0.48203	0.68958	0.54243	1
σ			0.0211	0.01417	0.31849	0.00005	0.27334	0.00911	0.2084

Примітка: σ — середнє квадратичне відхилення.

Таблиця 2. Коефіцієнти кореляції між значеннями індексів $NDVI$ за даними супутникових спостережень 2007 і 2009 рр. та польових вимірювань, розрахованих за допомогою різних алгоритмів після застосування процедур спектральної і просторово-часової регуляризації і корекції (7)–(14) (за результатами вимірювань 2009 і 2010 рр.)

Параметр	Індекс	$NDVI_{sat}^{2007}$	$NDVI_{sat}^{2009}$	$NDVI_{sat}^{mean}$	$NDVI_{gr}^{lab}$	$NDVI_{gr}^{MSS}$	$NDVI_{gr}^{ETM}$
r	$NDVI_{sat}^{2007}$	1	0.66396	0.94734	0.7593	0.93672	0.8628
σ			0.66396	7.8308E-10	1.63046E-4	3.59965E-9	1.99942E-6
r	$NDVI_{sat}^{2009}$	0.66396	1	0.86844	0.7236	0.69255	0.7713
σ			0.66396	1.42697E-6	4.621E-4	0.69255	1.10376E-4
r	$NDVI_{sat}^{mean}$	0.94734	0.86844	1	0.8133	0.91766	0.90241
σ			7.8308E-10	1.42697E-6	2.29455E-5	3.15877E-8	1.26972E-7
r	$NDVI_{gr}^{lab}$	0.7593	0.7236	0.8133	1	0.8365	0.86659
σ			1.63046E-4	4.621E-4	2.29455E-5	8.07675E-6	1.59629E-6
r	$NDVI_{gr}^{MSS}$	0.93672	0.69255	0.91766	0.8365	1	0.91913
σ			3.59965E-9	0.69255	3.15877E-8	8.07675E-6	2.72411E-8
r	$NDVI_{gr}^{ETM}$	0.8628	0.7713	0.90241	0.86659	0.91913	1
σ			1.99942E-6	1.10376E-4	1.26972E-7	1.59629E-6	2.72411E-8

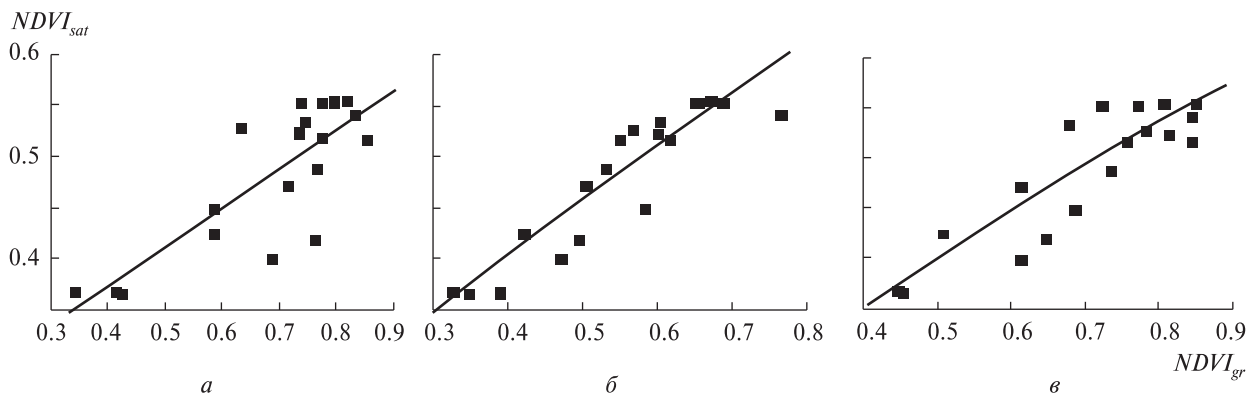


Рис. 1. Корелятивні залежності індексів $NDVI$, отриманих за даними супутникових та наземних вимірювань: a — алгоритм «lab» (7) (коефіцієнт кореляції $r = 0.81$; середнє квадратичне відхилення $\sigma = 0.042$); $б$ — алгоритм «MSS» (9) ($r = 0.91$, $\sigma = 0.029$); $в$ — алгоритм «ETM» (10) ($r = 0.90$, $\sigma = 0.031$)

суванням різних алгоритмів. Ці залежності представлено на рис. 1.

Рівняння лінійної апроксимації між розрахованими за даними супутникових спостережень значеннями $NDVI_{sat}$ і значеннями $NDVI_{gr}^{lab}$, розрахованими за результатами польових спектрометричних досліджень за алгоритмом (7), для випадку, наведеного на рис. 1, a , має вигляд

$$NDVI_{sat} = 0.22 + 0.38 \cdot NDVI_{gr}^{lab} \quad (15)$$

Рівняння (15) може розглядатися як калібрувальна залежність для $NDVI_{gr}^{lab}$.

Відповідні калібрувальні залежності для $NDVI^{MSS}$ і $NDVI^{ETM}$, отримані за допомогою алгоритмів (9) та (10) (див. рис. 1, $б$ і $в$), мають вигляд

$$NDVI_{sat} = 0.19 + 0.55 \cdot NDVI_{gr}^{MSS} \quad (16)$$

$$NDVI_{sat} = 0.17 + 0.45 \cdot NDVI_{gr}^{ETM} \quad (17)$$

Отримані калібрувальні залежності (15)—(17) демонструють достатньо високу кореляцію показників. Загальний порівняльний аналіз показників кореляції дозволяє визначити найбільш

Таблиця 3. Коефіцієнти кореляції між значеннями індексів $NDWI$ за даними супутникових спостережень 1986 і 2003 рр. та польових вимірювань 2010 і 2011 рр., розрахованих за допомогою різних алгоритмів із застосуванням процедур спектральної регуляризації (11) без просторово-часової регуляризації і взаємної корекції (12)—(14)

Параметр	Індекс	$NDWI_{sat}^{1986}$	$NDWI_{sat}^{2003}$	$NDWI_{gr}^{lab(2010)}$	$NDWI_{gr}^{lab(2011)}$	$NDWI_{gr}^{ETM(2010)}$	$NDWI_{gr}^{ETM(2011)}$
r	$NDWI_{sat}^{1986}$	1	0.63986	0.66195	0.41385	0.6239	0.78275
σ	$NDWI_{sat}^{1986}$		0.00317	0.01371	0.15979	0.02268	0.00156
r	$NDWI_{sat}^{2003}$	0.63986	1	0.48938	0.68942	0.71075	0.90453
σ	$NDWI_{sat}^{2003}$			0.08964	0.00913	0.00647	0.000022
r	$NDWI_{gr}^{lab(2010)}$	0.66195	0.48938	1	0.85971	0.92433	0.61967
σ	$NDWI_{gr}^{lab(2010)}$				0.08292	0.000006	0.13775
r	$NDWI_{gr}^{lab(2011)}$	0.41385	0.68942	0.85971	1	0.42932	0.69317
σ	$NDWI_{gr}^{lab(2011)}$					0.33643	0.00861
r	$NDWI_{gr}^{ETM(2010)}$	0.6239	0.71075	0.92433	0.42932	1	0.81637
σ	$NDWI_{gr}^{ETM(2010)}$						0.02507
r	$NDWI_{gr}^{ETM(2011)}$	0.78275	0.90453	0.61967	0.69317	0.81637	1
σ	$NDWI_{gr}^{ETM(2011)}$						

статистично коректні процедури калібрування даних (див. табл. 2).

Таким чином, оптимальним алгоритмом для розрахунку індексу $NDVI$ за даними польових спектрометричних вимірювань за допомогою приладу FieldSpec®3 FR слід визнати рівняння (10), а для верифікації даних супутникових зйомок при цьому можна запропонувати калібрувальну залежність (17).

Аналогічним чином можна проаналізувати розподіли спектральних індексів $NDWI$.

Як і у випадку із вегетаційними індексами, регуляризація за енергетичним потоком (спектральна регуляризація) дозволяє отримати розподіли даних, які демонструють на окремих інтервалах сталі кореляції певних параметрів (див. табл. 3).

Слід зазначити, що «водні» індекси $NDWI$ демонструють кращі кореляції, ніж вегетаційні індекси, але просторовий розподіл їхніх вимірювань значно гірший, що пов'язано з недосконалістю методики наземних вимірювань. Застосування алгоритмів подальшої просторово-часової регуляризації і корекції дозволяє отримати ще кращі кореляції через врахування просторових варіацій розподілів вимірюваних характеристик та різниці просторових характеристик супутникових та наземних вимірів.

Отримані дані демонструють добрі кореляції (див. табл. 4), і за ними можна розрахувати рівняння лінійної апроксимації, що пов'язують

Таблиця 4. Коефіцієнти кореляції між розподілами індексів $NDWI$ за даними супутникових спостережень 2003 р. та польових вимірювань, розрахованих за допомогою різних алгоритмів після застосування процедур спектральної та просторово-часової регуляризації і корекції (11)–(14) (за результатами вимірювань 2009 і 2010 рр.)

Параметр	Індекс	$NDWI_{sat}^{2003}$	$NDWI_{gr}^{lab(mean)}$	$NDWI_{gr}^{ETM(mean)}$
r	$NDWI_{sat}^{2003}$	1	0.70408	0.9377
σ			0.00076	0.000000003
r	$NDWI_{gr}^{lab(mean)}$	0.70408	1	0.78745
σ		0.00076		0.000063
r	$NDWI_{gr}^{ETM(mean)}$	0.9377	0.78745	1
σ		0.000000003	0.000063	

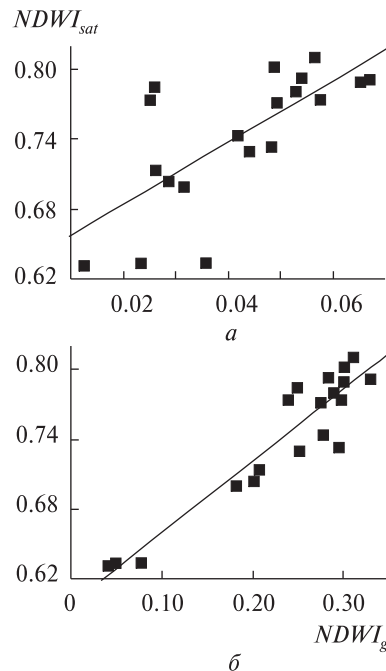


Рис. 2. Корелятивні залежності індексів $NDWI$, отриманих за даними супутникових та наземних вимірювань: a — алгоритм «lab» (8) ($r = 0.70$, $\sigma = 0.043$), b — алгоритм «ETM» (11) ($r = 0.94$, $\sigma = 0.021$)

значення спектральних індексів, отриманих за даними супутникових та наземних вимірювань із застосуванням різних алгоритмів.

Отримані залежності представлено на рис. 2.

Рівняння лінійної апроксимації між розрахованими за даними супутникових спостережень значеннями індексу $NDWI$ і значеннями, розрахованими за результатами польових спектрометричних досліджень за алгоритмом (8), для наведеного на рис. 2, a випадку може бути представлено як:

$$NDWI_{sat} = 0.65 + 2.75 \cdot NDWI_{gr}^{lab} \quad (18)$$

Рівняння лінійної апроксимації між розрахованими за даними супутникових спостережень значеннями індексу $NDWI$ і значеннями, розрахованими за результатами польових спектрометричних досліджень за алгоритмом (11), для наведеного на рис. 2, b випадку має вигляд

$$NDWI_{sat} = 0.58 + 0.61 \cdot NDWI_{gr}^{ETM} \quad (19)$$

Враховуючи те, що дані супутника було відкалібровано з коефіцієнтом +0.5 відносно початкового розподілу (з метою детальнішого вивчення ділянок з малим значенням $NDWI$), формулу (19) можна представити у вигляді

$$NDWI_{sat} = 0.29 + 0.61 \cdot NDWI_{gr}^{ETM}. \quad (20)$$

Загальний порівняльний аналіз показників кореляції індексів $NDWI$ дозволяє визначити найбільш статистично коректні процедури калібрування даних (див. табл. 4).

Таким чином, оптимальним алгоритмом для розрахунку індексу $NDWI$ за даними польових спектрометричних вимірювань за допомогою приладу FieldSpec®3 FR слід визнати рівняння (11), а як калібрувальну залежність для верифікації даних супутникових зйомок при цьому можна запропонувати рівняння (20).

Підсумовуючи, можна сказати, що в рамках проведеної роботи наведено теоретичні засади інтеркалібрування даних супутникових та польових досліджень спектральних властивостей земних покривів, показано можливість використання даних польового спекторадіометра FieldSpec®3 FR для завірки даних супутникових спостережень в задачах оцінки водного балансу та гідролого-гідрогеологічної безпеки, наведено рівняння розрахунку спектральних індексів за даними польових вимірів для проведення калібрування супутникових спостережень. Таким чином, за окремими спектральними індексами було завірено дані $NDVI$ та відкалібровано дані $NDWI$.

Слід зауважити, що під час проведення спектрометричних вимірювань за лімбічною схемою (під певним кутом до об'єкта) деякі ділянки області огляду спектрометра виявляються екранованими рослинністю. Якщо ділянка, на якій проводяться вимірювання, не є ізотропною, загальний спектральний відгук від ділянки може відрізнятися від відгуку від тієї ж ділянки, отриманого за «надірною» схемою (яка використовується при супутниковому спостереженні). Для врахування цього ефекту потрібно знати значення кутів зйомки і, крім того, мати загальний вигляд функції розподілу кутів огляду спектрометра за всіма ділянками, на яких проводилися вимірювання.

Враховуючи загальну неоднорідність умов досліджуваного району у межах розмірів ділянок зйомок, можна передбачити, що врахування ефекту впливу схеми спостереження дасть змогу зменшити невизначеність оцінювання спектральних індексів у середньому на 12–15 %. Таким чином, під час наступних робіт доцільно визначати в явному вигляді розподіл кутів польової спектрометричної зйомки $p_m(\theta_i)$, де θ — кут огляду спектрометра, m — ділянки, на яких проводяться вимірювання, а i — точки вимірювань, у вигляді функції $p_m(\theta_i) \rightarrow F(\alpha(t), x_i, y_i, z_i, z_i^*)$, де α — кут Сонця, t — час вимірювання, x, y — горизонтальні координати точки вимірювання, z — рельєф місцевості, z^* — «ефективна висота рослинності» (положення спектрометра на місцевості відносно поверхні рослинного покриву). Це допоможе коректно визначити і врахувати похибки калібрувальних коефіцієнтів, пов'язані із різницею експозицій надірних і лімбічних зйомок.

Також слід зазначити, що визначені лінійні калібрувальні залежності для вегетаційного індексу $NDVI$ (15)–(17) слід вважати достатньо коректними лише в інтервалі значень індексу 0.4–0.55. При $NDVI > 0.55$ калібрувальна залежність не буде лінійною, як це демонструють дані рис. 1. Визначення точного виду калібрувальних залежностей для всього інтервалу можливих значень індексів є предметом подальших досліджень.

Таким чином, ми отримуємо інструмент для кількісного калібрування не тільки розподілів даних супутникового спостереження, але і спектральних індексів, що використовуються для аналізу параметрів гідролого-гідрогеологічної безпеки.

1. *Acarreta J. R., Stammes P.* Calibration comparison between SCIAMACHY and MERIS onboard ENVISAT // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. — 2005. — 2. — P. 31–35.
2. ASD FieldSpec®3 FR User Manual – Boulder: ASD Document, 2007. — 96 p.
3. *Castelli F., Entekhabi D., Caporali E.* Estimation of surface heat flux and an index of soil moisture using adjointstate surface energy balance // Water Resour. Res. — 1999. — 35. — P. 3115–3125.
4. *Choudhury B. J., Ahmed N. U., Idso S. B., et al.* Relations between evaporation coefficients and vegetation indices

- studied by model simulations // *Remote Sens. Environ.* — 1994. — **50**. — P. 1—17.
5. *Cowpertwait P. S. P.* A generalized spatial-temporal model of rainfall based on a clustered point process // *Proc. Roy. Soc. London A.* — 1995. — 450. — P. 163—175.
 6. *Cox D. R., Hinkley D. V.* *Theoretical Statistics.* — NY: Chapman & Hall, 1974. — 285 p.
 7. *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. 1222; doi: 1029-2002WR001778.
 8. *Gao B. C.* Normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // *Proc. SPIE.* — 1995. — **2480**. — P. 225—236.
 9. *Gupta H. V., Bastidas L. A., Sorooshian S., et al.* Parameter estimation of a land surface scheme using multicriteria methods // *J. Geophys. Res.* — 1999. — **104**. — P. 19,491—19,503.
 10. *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 Sens. Environ.* — 1983. — **15**. — P. 187—208.
 11. *Kostyuchenko Yu. V., Kopachevsky I. M., Solovyov D. M., et al.* Way to reduce the uncertainties on ecological consequences assessment of technological disasters using satellite observations // *Proc. of the 4th International Workshop on Reliable Engineering Computing «Robust Design – Coping with Hazards, Risk and Uncertainty»*, March 3—5, 2010, Singapore. — Singapore: National University of Singapore, 2010. — P. 765—776.
 12. *Peters-Lidard C. D., Zion M. S., Wood E. F.* A soil — vegetation — atmosphere transfer scheme for modeling spatially variable water and energy balance processes // *J. Geophys. Res.* — 1997. — **102**. — P. 4303—4324.

Надійшла до редакції 09.10.12

Yu. V. Kostyuchenko, D. M. Solovyov, M. V. Yushchenko, S. S. Dugin, I. M. Kopachevsky, Yu. H. Bilous, I. G. Artemenko

THE USE OF RESULTS OF GROUND-BASED TEST SITE SPECTROMETRIC MEASUREMENTS FOR THE CALIBRATION OF SATELLITE OBSERVATIONS TO ESTIMATE HYDROLOGICAL AND HYDROGEOLOGICAL SECURITY

We propose some theoretical and methodological principles for intercalibration of satellite data and in-field spectrometric measurements in the framework of water balance and hydrological and hydro-geological security assessment. On the basis of the analysis of ground test sites spectrometric data of Field-Spec ® 3 FR, the statistical regularities of spatial-temporal distribution of spectral reflectance characteristics are determined for the spectral indices used in this study. An algorithm is proposed to calculate spectral indices using the correlation analysis. The general form of calibration patterns for further verification of satellite observations is given.