

1. *Belkin I. M., Gordon A. L.* Southern Ocean fronts from the Greenwich Meridian to Tasmania // *J. Geophys. Res.* – 1996. – **101**, No C2. – P. 3675–3696.
2. *Скрипалева Е. А.* Изменчивость Перуанского апвеллинга в связи с событиями ENSO по данным спутниковых измерений // *Системы контроля окружающей среды.* – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. – С. 255–257.
3. *Поляков С. Г.* Гидрофизические условия в районе северного Перу // *Фронтальные зоны юго-восточной части Тихого океана (биология, физика, химия)* / Под ред. М. Е. Виноградова, К. Н. Федорова. – Москва: Наука, 1984. – С. 35–51.
4. *Zuta S., Urquizo W.* Temperatura promedio de la superficie del mar frente a la costa Peruana, periodo 1928. – 1969. – // *Bol. Inst. Mar. Peru.* – 1972. – **2**, No 8. – P. 462–519.
5. *Yoshida K.* Circulation in the eastern tropical oceans with special reference to upwelling and undercurrents // *Jap. J. Geophys.* – 1967. – **4**, No 2. – P. 24–37.
6. *Turner J.* Review the El Ni no-southern oscillation and Antarctica // *Int. J. Climatology.* – 2004. – No 24. – P. 1–31.
7. *Pan Y. H., Oort A. H.* Global climate variations connected with sea surface temperature anomalies in the eastern equatorial Pacific Ocean for the 1958. – 1973. – period // *Monthly Weather Rev.* – 1983. – **111**. – P. 1244–1258.

*Морской гидрофизический институт
НАН Украины, Севастополь*

Поступило в редакцию 03.05.2007

УДК 556.131.116:528.8.041.5

© 2007

О. І. Сахацький, С. А. Станкевич

До можливостей оцінювання зволоженості земного покриття за багатоспектральними космічними зображеннями оптичного діапазону на прикладі території України

(Представлено членом-кореспондентом НАН України В. І. Ляльком)

The paper presents a background and an algorithm for the determination of parameters of land cover moisture using multispectral optical satellite images data. The experimental evaluation of land cover moisture within the territory of Ukraine using MODIS data (resolution of 500 m) for dry and wet season periods has been done. The results of evaluations are well correlated (coefficient of determination $r^2 \leq 0.72$) with remote sensing evaluation of soil moisture and the vegetation water content by a satellite microwave radiometer AMSR-E. The proposed approach will be useful for the solution of problems concerning the agricultural and natural resources and the environment protection.

Постановка задачі. Покращення якості розв'язку багатьох тематичних задач за матеріалами дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) вимагає оцінку вологості ґрунту та вмісту вологи в рослинному покриві території дослідження дистанційними методами. Такі дослідження також важливі для визначення параметрів гідрологічних та гідрогеологічних моделей при оцінках водного циклу.

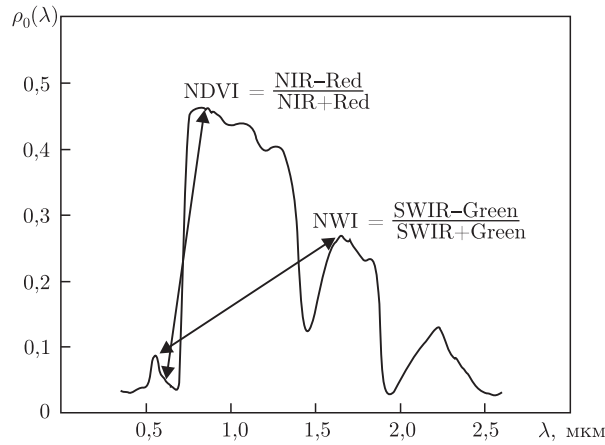


Рис. 1. До визначення нормалізованого водного індексу

Теоретичні основи. Дистанційне оцінювання вологості ґрунту та вмісту води в рослинному покриві зроблено за допомогою пасивного мікрохвильового або активного радіолокаційного аерокосмічного знімання [1]. Для цих методів проведено багато досліджень, побудовано кількісні моделі, їх опрацьовано, завірено та більш-менш успішно впроваджено у практику. Наприклад, космічна система ДЗЗ EOS забезпечує щодобове автоматичне відновлення глобальної карти вологості ґрунту (у верхньому шарі 1 см) та вмісту води в рослинному покриві на основі зображень мікрохвильового радіометра AMSR-E [2]. Але подібні системи мають ряд недоліків. Для вказаного мікрохвильового космічного знімання це — незадовільна просторова розрізненість — десятки кілометрів на місцевості, для радіолокаційного — дуже висока вартість — десятки тисяч доларів за сцену та гірша точність застосованих моделей.

Тому спроби оцінити зволоженість земного покриття за матеріалами ДЗЗ оптичного діапазону, щоб уникнути вказаних недоліків, здійснювали неодноразово. Теоретичним підґрунтям цього є специфічний характер спектрального відбиття рослинності у видимому, близькому інфрачервоному (NIR) та середньому інфрачервоному (SWIR) діапазонах (рис. 1), зумовлений саме відсутністю поглинання оптичного випромінювання водною парою на хвилях 0,8–0,9 та 1,6–1,7 мкм. Схожі спектральні характеристики притаманні й відкритим ґрунтам, хоча останні на космічних знімках оптичного діапазону низької просторової розрізненості у чистому вигляді спостерігаються нечасто.

Для оцінювання вологості запроваджувалися різноманітні показники, що базуються на різницях спектрального відбиття поверхонь у видимому та інфрачервоних спектральних діапазонах — Normalized Difference Infrared Index (NDII), Simple Ratio Water Index (SRWI), Leaf Water Content Index (LWCI) та інші [3, 4]. Майже всі вони будуються аналогічно широко відомому вегетаційному індексу Normalized Difference Vegetation Index (NDVI):

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_0(\lambda = 0,6-0,7 \text{ мкм}) - \rho_0(\lambda = 0,8-0,9 \text{ мкм})}{\rho_0(\lambda = 0,6-0,7 \text{ мкм}) + \rho_0(\lambda = 0,8-0,9 \text{ мкм})}, \quad (1)$$

де $\rho_0(\lambda)$ — спектральний коефіцієнт відбиття поверхні на довжині хвилі λ .

За результатами попередніх досліджень встановлено [5], що найбільш висока кореляція із водовміщенням ґрунту спостерігається для нормалізованого водного індексу Normalized

Water Index (NWI):

$$\text{NWI} = \frac{\rho_0(\lambda = 0,5-0,6 \text{ мкм}) - \rho_0(\lambda = 1,6-1,7 \text{ мкм})}{\rho_0(\lambda = 0,5-0,6 \text{ мкм}) + \rho_0(\lambda = 1,6-1,7 \text{ мкм})}. \quad (2)$$

При зіставленні оцінки вологості, за результатами обробки даних оптичного спектро-радіометра MODIS та за вимірюванням радіометра AMSR-E на прерійно-луговій території штату Техас (США), показано, що забезпечується задовільна кореляція ($r^2 = 0,51$) між двома способами оцінки [6]. У роботі [7] заявлено про високу (до $r^2 = 0,9$) кореляцію між водними індексами вигляду (2) спектрорадіометра MODIS та вологістю ґрунту на території сільськогосподарських насаджень штату Новий Південний Уельс (Австралія), за результатами вимірювань авіаційного мікрохвильового радіометра PLMR. У деяких дослідженнях вказується, що, згідно з рівняннями радіаційного переносу, більш адекватним для оцінювання вологості є показники, що враховують радіаційну температуру поверхні T_0 [8, 9], наприклад, Water Supply Vegetation Index (WSVI) — відношення

$$\text{WSVI} = \frac{\text{NDVI}}{T_0}, \quad (3)$$

яке забезпечує коефіцієнт кореляції порядку 0,63 [10].

Алгоритм та результати розрахунків. Для оцінювання зволоженості земного покриття залучалися багатоспектральні космічні зображення спектрорадіометра MODIS видимого, близького інфрачервоного та середнього інфрачервоного спектральних діапазонів. Для цього сенсора співвідношення (2) набуває такого вигляду:

$$\text{NWI} = \frac{\rho_0(\lambda = 0,545-0,565 \text{ мкм}) - \rho_0(\lambda = 1,628-1,652 \text{ мкм})}{\rho_0(\lambda = 0,545-0,565 \text{ мкм}) + \rho_0(\lambda = 1,628-1,652 \text{ мкм})}, \quad (4)$$

де вказані довжини хвиль відповідають четвертому та шостому спектральним каналам MODIS.

Вологість ґрунту w_0 або вміст води в рослинному покриві мена визначати як функцію від NWI, і в першому наближенні пошук цієї залежності, як показують експериментальні дослідження в межах локальних ділянок, можна проводити, припускаючи її лінійний характер вигляду:

$$w_0(\text{NWI}) = A \cdot \text{NWI} + B. \quad (5)$$

Крім того, як показано в [11], вологість ґрунту w_0 (як функція від NWI та температури поверхні T_0) може описуватись також простим логарифмічним виразом:

$$w_0(\text{NWI}, T) = A \ln\left(\frac{\text{NWI} + 1}{T_0} + 1\right) + B, \quad (6)$$

де A та B — константи, які з фізичних міркувань обмежені відношенням

$$A = \frac{1 - B}{\ln\left(\frac{2}{T_{0\min}} + 1\right)}, \quad (7)$$

де $T_{0\min}$ — мінімально можлива радіаційна температура ділянки території спостереження.

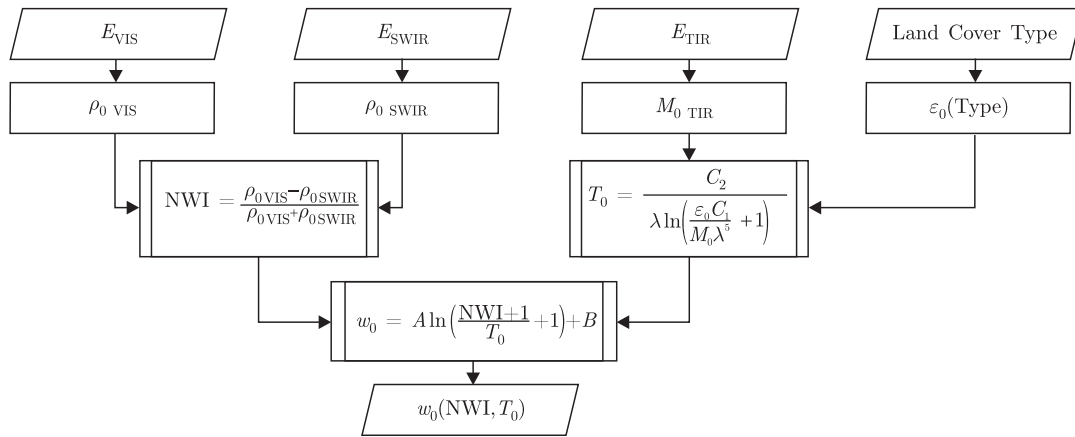


Рис. 2. Схема алгоритму визначення зволоженості земного покриття за багатоспектральними космічними зображеннями оптичного діапазону

Радіаційна температура поверхні є стандартним інформаційним продуктом EOS MOD11L2 другого рівня обробки, який створюється перерахуванням за стандартизованими алгоритмами величин енергетичної освітленості земної поверхні $M_0(\lambda)$ у спектральних каналах MODIS дальнього інфрачервоного діапазону 31 ($\lambda = 10,78\text{--}11,28$ мкм) і 32 ($\lambda = 11,77\text{--}12,27$ мкм) із залученням додаткових даних щодо стану атмосфери, типів покриттів ландшафту, розподілу снігу і хмар тощо [12]. Повний алгоритм розрахунку описується схемою рис. 2.

Для демонстрації можливостей дистанційного оцінювання зволоженості земного покриття за оптичними зображеннями залучалися багатоспектральні космічні знімки низької просторової розрізненості спектрорадіометра MODIS. Територією дослідження обрано частину України, для якої характерні переважно степові та степово-чагарникові ландшафти. Аналізувалися знімки MODIS за 06.10.2005 р., 29.10.2005 р. та за 18.08.2006 р., а також інформаційні продукти на їх основі, зокрема радіаційна температура поверхні.

Вибір знімків за вказаний час обумовлений можливістю зіставити дані супутникової зйомки MODIS та AMSR-E, отримані за різні періоди стану зволоженості земного покриття. Зокрема, зйомка за 06.10.2005 р. характеризує посушливий період, коли на значній частині території України, за даними гідрометеорологічних спостережень, протягом трьох тижнів до цієї дати з 18 вересня 2005 р. опади були відсутні. Цей посушливий період восени 2005 р. тоді викликав досить напружену ситуацію в агропромисловому секторі нашої країни і значне занепокоєння станом посівів озимих культур з боку сільгоспвиробників та відповідальних керівників державних органів. У подальшому агрометеорологічна ситуація суттєво поліпшилась. Значна кількість опадів у період з 7 по 28 жовтня 2005 р. привела до підвищення зволоженості земного покриття. Тому цікаво було побачити, як супутникові дані за 29 жовтня 2005 р. MODIS та AMSR-E відображають цю зміну. Крім того, для демонстрації можливостей дистанційного оцінювання вологості ґрунту за оптичними зображеннями з урахування радіаційної температури поверхні залучався знімок MODIS та відповідні дані AMSR-E за 18 серпня 2006 р.

Для погоджування із даними мікрохвильового зондування вхідні багатоспектральні зображення MODIS з розрізненістю 500 м попередньо осереднювалися по сітці 5×5 пікселів. Далі зображення MODIS перетворювалося на NWI.

На рис. 3 показано зіставлення даних AMSR-E та MODIS за 06.10.2005 р. та 29.10.2005 р. Чітко видно зміни у параметрах зволоженості земного покриття, зокрема, вмісту вологи у рослинному покриві, за даними AMSR-E, і значеннях NWI, за даними MODIS, які відповідають двом різним періодам стану зволоження земного покриття.

Зіставлення вимірів, за даними MODIS та AMSR-E, у межах тестових ділянок дозволило побудувати кореляційні залежності між значеннями NWI, за даними MODIS, та параметрами вологості ґрунту і рослинного покриву, за даними AMSR-E. Як приклад, наведено кореляційні залежності (рис. 3, в) для тестового полігону прямокутної форми, який знаходиться в межах Дніпропетровської та Миколаївської областей і має такі діапазони географічних координат: $31^{\circ}31'48.28''$ – $32^{\circ}04'18.14''$ сх. д. та $47^{\circ}33'20.57''$ – $48^{\circ}48'44.24''$ пн. ш. (рис. 3, б).

Отримані залежності свідчать про досить впевнену кореляцію між NWI, за даними MODIS, та оцінками зволоженості земного покриття, за даними AMSR-E. Особливо це стосується оцінки вмісту вологи в рослинному покриві, де кореляція на рівні $r^2 = 0,725$ (рис. 3, в1).

Деяко менша кореляція між параметрами оцінки вологості ґрунтів AMSR-E та значеннями NWI, за даними MODIS (рис. 3, в2). На нашу думку, це пов'язано з тим, що відкритий ґрунт складає меншу частину проективного покриття в межах тестового полігону в порівнянні з рослинним покривом, вплив якого на інтегральне значення NWI виявився більшим.

Крім того, для демонстрації можливостей дистанційного оцінювання вологості ґрунту, за знімками MODIS з залученням радіаційної температури поверхні, проведено дослідження з використанням знімка MODIS за 18 серпня 2006 р. та його інформаційних продуктів і відповідних даних AMSR-E (рис. 4). Територією дослідження обрано південну частину України сумісно з півостровом Крим, для якої характерні переважно степові та степово-чагарникові ландшафти.

Параметр, що відображає вологість ґрунту (див. рис. 4, з) за даними MODIS (18.08.06), отримано, згідно з викладеним алгоритмом з використанням радіаційної температури (див. рис. 4, в).

Перевірку коректності одержаних оцінок вологості ґрунту за багатоспектральними космічними зображеннями оптичного діапазону здійснювалося шляхом порівняння з результатами одночасних прямих вимірювань вологості ґрунту тієї ж території за допомогою мікрохвильового радіометра AMSR-E. Геореференційований розподіл вологості ґрунту, за даними AMSR-E, показано на рис. 4, д.

Нами досліджено статистичну залежність між NWI (див. рис. 4, б), за даними AMSR-E (рис. 4, д), і статистичну залежність між параметрами оцінки вологості ґрунту, за знімками MODIS (рис. 4, з), а також за даними AMSR-E (рис. 4, д). У першому випадку спостерігалося кореляція з коефіцієнтом $r^2 \leq 0,49$ (для окремих територій з великою часткою оголених ґрунтів $r^2 \leq 0,69$), у другому — кореляція з коефіцієнтом $r^2 \leq 0,75$ (для окремих територій — $r^2 \leq 0,89$) при деяко більшій дисперсії.

Запропонований алгоритм дистанційного оцінювання зволоження земного покриття (вологості ґрунту та вмісту вологи в рослинному покриві) за багатоспектральними космічними зображеннями оптичного діапазону надає задовільні результати, що добре корелюються з прямими вимірюваннями іншої фізичної природи. При цьому забезпечується суттєво краща просторова розрізненість на місцевості, що дуже важливо при вирішенні багатьох тематичних задач ДЗЗ. Вказаний алгоритм може бути попередньо рекомендовано як допоміжний для дистанційного оцінювання зволоженості земного покриття.

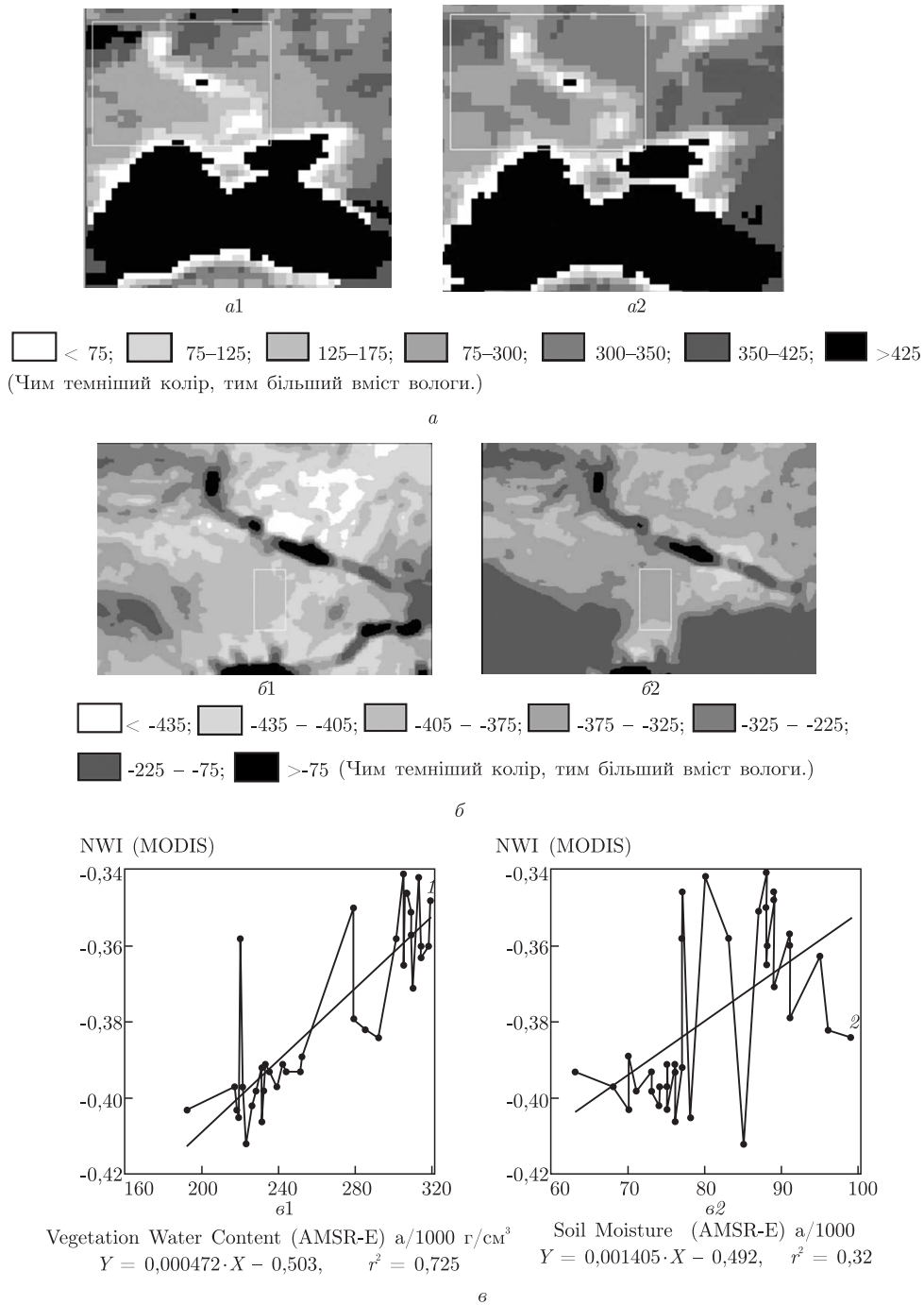


Рис. 3. Розподіл параметрів, які відображують вміст вологості у рослинному покриві для території України, за матеріалами космічної зйомки: *а*: дані мікрохвильового знімання супутниковим радіометром AMSR-E, просторова розрізненість 26 км: *а1* — 6 жовт. 2005 р., *а2* — 29 жовт. 2005 р.; *б*: розподіл значень NWI, за даними MODIS: *б1* — 6 жовт. 2005 р., *б2* — 29 жовт. 2005 р. (Білий прямокутник на *б1* і *б2* вказує на межі тестового полігону, для якого побудовано кореляційні залежності між даними AMSR-E та значеннями NWI, за даними MODIS (див. рис. 3, *б*, білий прямокутник показує межі знімків MODIS). На знімку *б2* темні ділянки у правому і лівому нижніх кутах відповідають хмарам); *в*: залежність між зволоженням земного покриття, за даними AMSR-E (*в1* — вмістом вологи у рослинному покриві, *в2* — вологістю ґрунту), і значеннями NWI, за даними MODIS від 06.10.2007 та 29.10.2007, у межах тестового полігону (див. рис. 3, *б*)

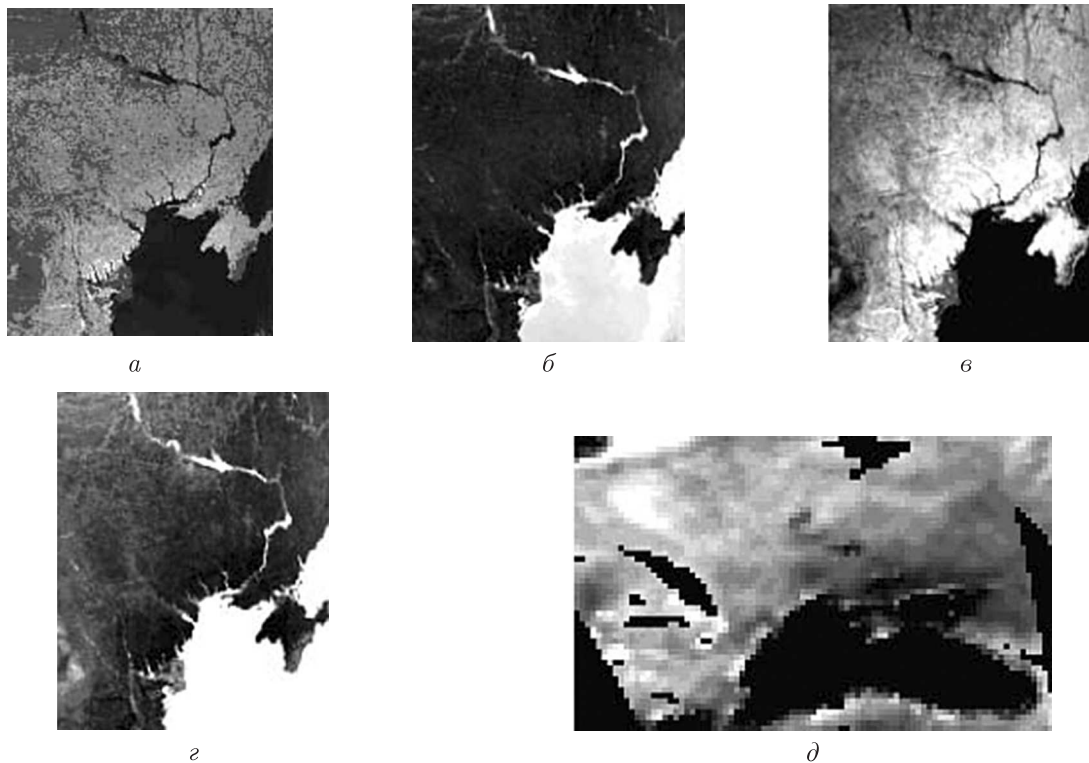


Рис. 4. Космічні знімки спектрорадіометра MODIS та радіометра AMSR-E території України від 18.08.2006 р.:

a — синтезоване зображення, за даними MODIS (синтез спектральних каналів: 4 (0,545–0,565 мкм), 7 (2,105–2,155 мкм) та 6 (1,628–1,652), просторова розрізненість 500 м) та інформаційні шари, за даними MODIS; *б* — нормалізований водний індекс NWI; *в* — радіаційна температура поверхні ($^{\circ}\text{C}$); *г* — розподіл параметра, що відображає вологість ґрунту ($\text{г}/\text{см}^3$); *д* — розподіл вологості ґрунту ($\text{г}/\text{см}^3$), за матеріалами мікрохвильового знімання супутниковим радіометром AMSR-E (просторова розрізненість 26 км)

Разом з тим застосований показник у формулах (6) і (7) потребує подальших досліджень своєї адекватності та явно може бути покращений. Основними напрямками вдосконалення можуть стати:

більш точне визначення констант A і B у (6), (7), наприклад за результатами незалежних вимірювань вологості ґрунту. Дуже перспективним здається адаптивне комплексування оптичних та мікрохвильових космічних зображень [13];

зміна математичного або навіть фізичного вигляду базового показника вологості ґрунту. В деяких дослідженнях стверджується про можливість застосування для цього похідної $\partial T_0 / \partial \text{NDVI}$, яка забезпечує кореляцію $r^2 = 0,77$ на території Китаю [14];

застосування досконалих територіальнозалежних локальних моделей енергомасопереносу в геосистемах для врахування непрямих (прихованих) факторів впливу на вологість ґрунту та компенсації негативних ефектів осереднення мікрохвильового знімання, викликаних його наднизькою просторовою розрізненістю [15].

Роботу виконано за підтримки проекту INTAS TLCC.

1. Du Y., Ulaby F. T., Dobson M. C. Sensitivity to soil moisture by active and passive microwave sensors // IEEE Trans. on Geosci. and Rem. Sensing. – 2000. – 38. – P. 105–114.

2. *Njoku E. G., Jackson T. J., Lakshmi V. et al.* Soil moisture retrieval from AMSR-E // *Ibid.* – 2003. – **41**. – P. 215–229.
3. *Gao B. C.* NDWI – a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // *Rem. Sen. Environment.* – 1996. – **58**. – P. 257–266.
4. *Zarco-Tejada P. L. J., Rueda C. A., Ustin S. L.* Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods // *Rem. Sen. Environment.* – 2003. – **85**. – P. 109–124.
5. *Сахацький О. І.* Застосування супутникових даних для розв'язання задач водообміну у геосистемах // *Доп. НАН України.* – 2006. – № 4. – С. 118–126.
6. *Dasgupta S., Qu J. J.* Combining MODIS and AMSR-E based vegetation moisture retrievals for improved fire risk monitoring // *Proc. SPIE.* – 2006. – 6298. – P. 275–286.
7. *Maggioni V., Panciera R., Walker J. P. et al.* A Multi-sensor approach for high resolution airborne soil moisture mapping // *Proc. the 30th Hydrology and Water Resources Symp.* – Launceston: TAS, 2006. – P. 11–18.
8. *Theory and application of optical remote sensing* / Ed. by G. Asrar. – N. Y.: John Wiley, 1989. – 734 p.
9. *Nemani R. R., Pierce L. L., Running S. W.* Developing satellite-derived estimates of surface moisture status // *J. Appl. Meteorology.* – 1993. – **32**. – P. 548–557.
10. *Liu L., Zhang B., Xu G. et al.* Vegetation classification and soil moisture calculation using land surface temperature (LST) and vegetation index (VI) // *Proc. SPIE.* – 2002. – 4730. – P. 319–323.
11. *Xin J., Tian G., Liu Q., Chen L.* Combining vegetation index and remotely sensed temperature for estimation of soil moisture in China // *Inter. J. Rem. Sensing.* – 2006. – **27**, No 9. – P. 2071. – 2076.
12. *EOS Data Products Handbook* / Ed. by C. L. Parkinson and R. Greenstone. – Greenbelt: NASA Goddard Space Flight Center, 2004. – 518 p.
13. *Chauhan N. S., Miller S., Ardanuy P.* Spaceborne soil moisture estimation at high resolution: a microwave – optical infrared synergistic approach // *Inter. J. Rem. Sensing.* – 2003. – **24**, No 22. – P. 4599–4622.
14. *Jingfeng X., Guoliang T., Qinhuo L., Liangfu C.* Combining vegetation index and remotely sensed temperature for estimation of soil moisture in China / *Ibid.* – 2006. – **27**, No 10. – P. 2071. – 2075.
15. *Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування* / За ред. В. І. Лялько та М. О. Попова. – Київ: Наук. думка, 2006. – 360 с.

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

Надійшло до редакції 27.04.2007