

УДК 528.88:(528.837:629.783):556](477)

Ю. В. Костюченко<sup>1</sup>, І. М. Копачевський<sup>1</sup>, Д. М. Соловійов<sup>2</sup>, М. В. Ющенко<sup>1</sup>, П. О. Акименко<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Морський гідрофізичний інститут Національної академії наук України, Севастополь

<sup>3</sup> Аерокосмічне товариство України, Київ

## ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ СУПУТНИКОВИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ДЛЯ ОЦІНКИ РЕГІОНАЛЬНИХ ГІДРОЛОГО-ГІДРОГЕОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ

---

*Розглядається задача побудови методики використання дистанційних методів для оцінки гідролого-гідрогеологічних ризиків. Запропоновано модель поширення небезпечних процесів, на основі якої побудовано методику дешифрування супутникових знімків та аналізу отриманих спектральних індикаторів. Проаналізовано регіональні розподіли кліматичних показників по періоду спостережень, визначено ключові фактори впливу. Визначено зміни спектральних індексів, які можуть бути використані як інформаційна ознака при оцінках ризиків ескалації небезпечних процесів. Для визначення ймовірності прояву стресу за сукупністю спектральних характеристик запропоновано рівняння, визначено параметри ключових змінних. Запропоновано метод оцінки комплексного ризику, пов'язаного із гідролого-гідрогеологічною безпекою.*

---

### ВСТУП

На сьогодні використання засобів супутникового спостереження для вирішення різноманітних прикладних задач (кадастр та управління землекористуванням, побудова та оновлення картографічних матеріалів, контроль стану лісів та оцінка наслідків лісових пожеж, оцінка стану сільськогосподарських культур і прогнозування врожайності, геологічні дослідження та розвідка корисних копалин тощо) набуло значного поширення. З огляду на зростання кількості надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру у світі [9] постає необхідність у прогнозуванні небезпечних процесів та явищ з метою планування превентивних заходів та мінімізації наслідків.

Наша країна не є винятком із світових тенденцій: наявні небезпеки потребують аналізу як на державному, так і на регіональному рівнях. Поширення небезпечних гідролого-гідрогеологічних процесів, таких як підтоплення та за-

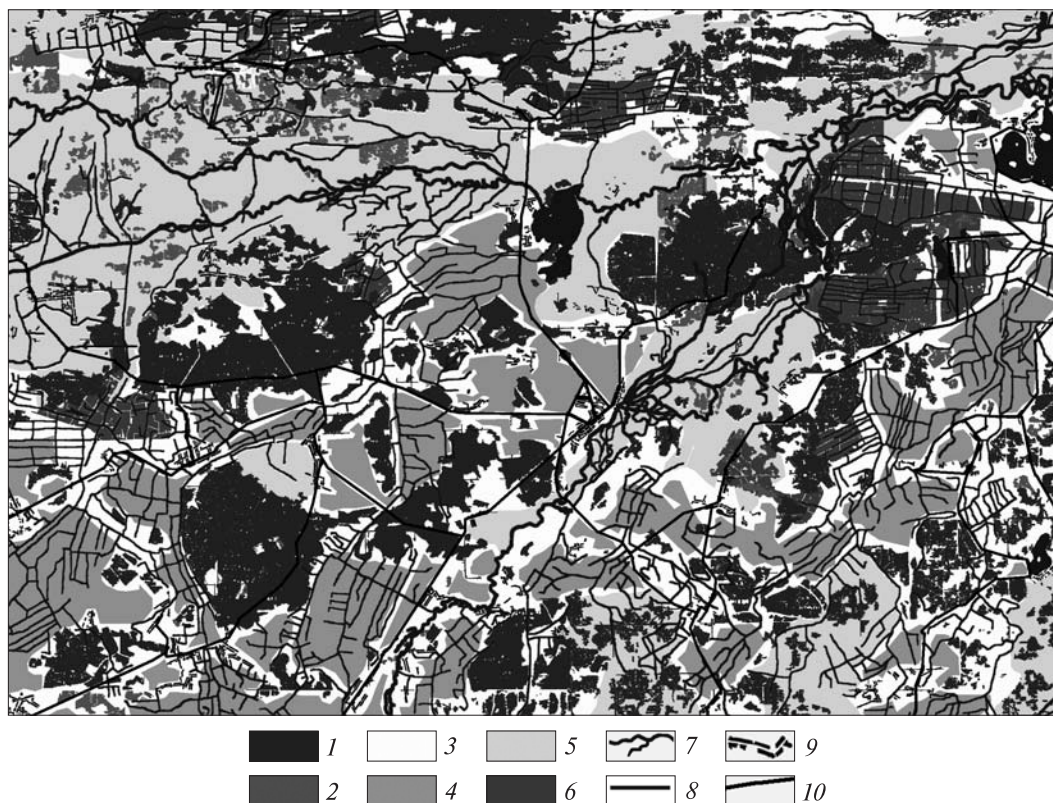
болочування, у межах верхньої частини басейну р. Прип'яті, басейнів рр. Західний Буг, Стир та Стохід є серйозною проблемою для західного регіону. На даній території ескалація небезпечних гідролого-гідрогеологічних процесів загрожує екологічній ситуації, сільськогосподарській, транспортній та промисловій інфраструктурі. Вона загрожує функціонуванню Рівненської атомної електростанції, охоплює значну кількість слабо захищеного населення. Задачею даної роботи є демонстрація можливості побудови конкретної методики використання дистанційних методів для оцінки гідрологічних та гідрогеологічних ризиків та її застосування як на регіональному, так і на локальному рівнях.

### ПОПЕРЕДНІЙ АНАЛІЗ СУПУТНИКОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Динаміка небезпечних гідрологічних та гідрогеологічних процесів була докладно описана системою рівнянь (8) — (16) у нашій роботі [2]. Задача контролю досліджуваних ризиків за допомогою методів ДЗЗ може бути зведеною до аналізу набору індикаторів стану поверхні, що відповіда-

---

© Ю. В. КОСТЮЧЕНКО, І. М. КОПАЧЕВСЬКИЙ,  
Д. М. СОЛОВІЙОВ, М. В. ЮЩЕНКО, П. О. АКІМЕНКО, 2011



**Рис. 1.** Результати проблемно-орієнтованої класифікації земних покривів досліджуваної території. Умовні позначення: 1 — лісова рослинність (середній розподіл у 2003—2009 рр.), 2 — низькоросла рослинність, чагарники (середній розподіл у 2003—2009 рр.), 3 — природні луки, пасовиська (середній розподіл для періоду березень—липень 1999—2009 рр.), 4 — сільськогосподарські угіддя (середній розподіл для періоду травень — липень 2007—2009 рр.), 5 — водно-болотяна рослинність, перезволожені ділянки поверхні (середній розподіл для періоду березень—липень 1999—2009 рр.), 6 — торфoviща (середній розподіл для періоду березень—липень 1999—2009 рр.), 7 — природні водні об'єкти (річкові русла, притоки, стариці тощо) станом на травень 2009 р., 8 — штучні водогосподарські канали станом на травень 2009 р., 9 — забудовані території станом на квітень 2009 р., 10 — дороги, мости (за даними зйомок 2003, 2007 та 2009 рр.)

ють змінним цієї системи рівнянь, і таким чином забезпечують контроль показників реакції локальних екосистем на зміни водного балансу по визначених типах земних покривів, відповідно до попередньо проведеної проблемно-орієнтованої класифікації.

Як видно із рівнянь (15) і (16), наведених у роботі [2], ключовими показниками є площа і щільність рослинного покриву, розподіл гідрографічної мережі, а змінними, що підлягають контролю, є вміст вологи, ефективність фотохімічних процесів і температура. Тоді класифікація має проводитися за двома основними напрямками:

водні об'єкти і рослинний покрив. Рослинний покрив за параметрами, що безпосередньо впливають на баланс вологи, може бути поділений на ліси, чагарники, трав'янисту рослинність (природні луки та сільгоспугіддя), водно-болотяні угіддя, і торф'яні болота із трав'янистою рослинністю. Водні об'єкти поділяються на озера, річкові русла, стариці, річкові притоки (природні), водогосподарські канали (штучні), водосховища (штучні). Крім того, з точки зору оцінки ризиків, тобто оцінки можливих збитків, важливим є визначення елементів інфраструктури, тобто будівель, доріг, мостів, дамб тощо.

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., 19.03.1976 р., 12.05.1976 р., 24.06.1976 р.); «Landsat-5» (сенсор TM, зйомки від 04.05.1986 р., 07.07.1986 р., 22.07.2003 р., 28.04.2007 р., 14.05.2007 р., 15.06.2007 р.); «Landsat-7» (сенсор ETM, зйомки від 19.07.1999 р., 28.02.2000 р., 02.05.2000 р., 24.03.2003 р., 27.05.2003 р., 22.05.2007 р., 09.07.2007 р., 17.07.2007 р., 09.04.2009 р., 25.04.2009 р., 27.05.2009 р., 28.06.2009 р., 14.07.2009 р.) Як додаткові матеріали використовувались дані супутника «EOS Terra» (NOAA, сенсор MODIS, зйомки від 03.06.2000 р., 19.08.2004 р., 04.05.2007 р., 22.05.2007 р., 04.05.2009 р., 22.08.2009 р.), окремі сцени зйомки супутників «Ikonos» (07.10.2006 р.), зйомки «QuickBird» (19.10.2003 р., 24.03.2005 р., 30.03.2007 р., 24.04.2008 р.), супутника «GeoEye1» (01.04.2009 р. та 28.07.2009 р.). При аналізі супутникових даних було використано картографічні матеріали актуалізації 1972 та 1986 рр., а також матеріали наземних польових досліджень ЦАКДЗ 2007—2010 рр. по досліджуваній території.

На рис. 1 приведено результати проблемно-орієнтованої класифікації земних покривів досліджуваної території.

Подальший аналіз даних провадився за окремими спектральними характеристиками визначених типів земних покривів з урахуванням наявних тенденцій змін регіональних (зокрема кліматичних) показників.

#### АНАЛІЗ ДАНИХ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Для оцінки параметрів водного балансу територій за дистанційними індикаторами було проаналізовано регіональні розподіли кліматичних показників по періоду спостережень. Дослідження було спрямоване на побудову статистично достовірних розподілів спостережуваних параметрів за багаторічними даними, отримання статистичних описів побудованих розподілів, визначення основних багаторічних

тенденцій змін досліджуваних показників за період, що відповідає даним супутникових зйомок, отримання висновків щодо найбільш важливих трендів кліматичних змінних у межах визначених періодів. Основною задачею було визначення ключових факторів, що впливають на формування гідролого-гідрогеологічної безпеки, а також впливів на екосистеми (що входять до рівнянь (10)—(13) і (16) з роботи [3]), пов'язаних зі змінами кліматичних показників.

Для аналізу було використано дані метеорологічних спостережень метеостанцій (див. таблицю), розташованих у досліджуваному регіоні [www.ncdc.noaa.gov].

Загалом було проаналізовано 137948 записів метеорологічних спостережень на визначених станціях. З них 75717 відповідають періоду дослідження. До кінцевого аналізу було включено 6448 записів, що відповідають визначеним періодам і мають необхідну якість. Приклади отриманих розподілів наведено на рис. 2, 3.

Як свідчать результати аналізу метеорологічних спостережень (рис. 2, 3), середня температура повітря  $T_m$  липня в регіоні за період 1985—2010 рр. впала на 1.55 °C (з 21.75 до 20.2 °C), а середньорічна температура повітря  $T_m^{an}$  у регіоні зросла на 1.25 °C (з 7.25 до 8.5 °C). Однак мінімальна зареєстрована температура повітря протягом липня  $T_{min}$  зросла на 1.75 °C (з 6.5 до 8.25 °C), а максимальна  $T_{max}$  зросла на 1.42 °C (з 30.78 до 32.2 °C). Такі зміни максимальних і міні-

#### Перелік метеорологічних станцій, використаних для аналізу регіональних розподілів кліматичних показників

Місце розташування	Ідентифікатор станції (USAF)	Координати		
		φ, град	λ, град	H, м
Володимир-Волинський	331770	50.833	24.317	194
Львів	333930	49.817	23.950	323
Рівне	333010	50.583	26.133	231
Сарни	330880	51.283	26.617	156
Седльце (Польща)	123850	52.250	22.250	155
Люблін (Польща)	124950	51.217	22.400	240
Брест (Білорусь)	330080	52.117	23.683	143
Пінськ (Білорусь)	330190	52.117	26.177	142

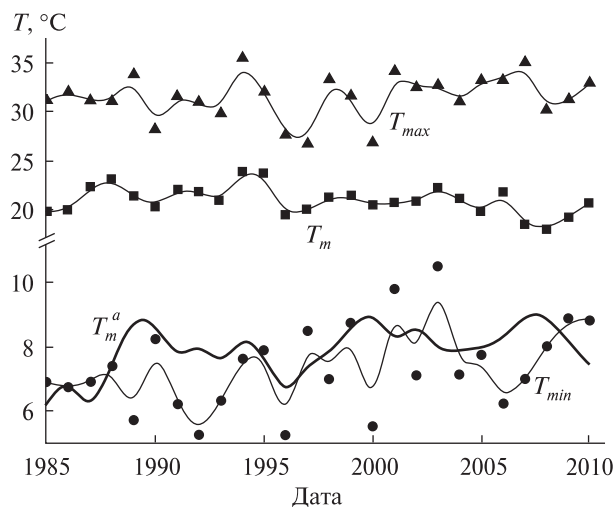


Рис. 2. Середньомісячні (липень)  $T_m$ , середньорічні  $T_m^a$ , максимальні  $T_{max}$  та мінімальні  $T_{min}$  зареєстровані у липні показники температури повітря для регіону досліджень у 1985—2010 рр.

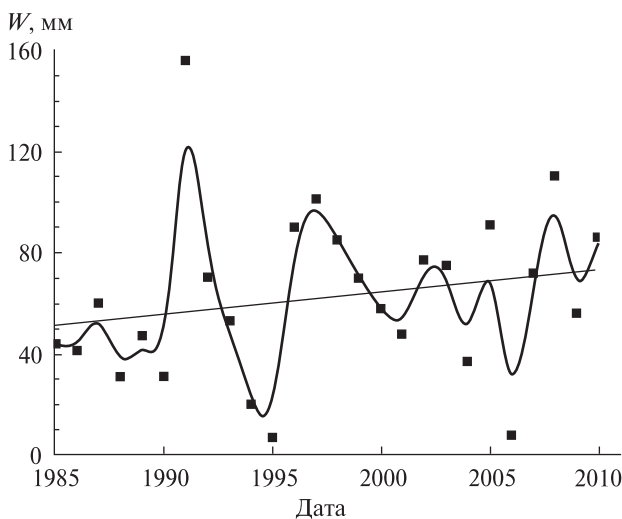


Рис. 3. Середньомісячна (липень) кількість  $W$  опадів по регіону досліджень на період 1985—2010 рр.

мальних показників відносно середніх свідчать, між іншим, про підвищення ризиків виникнення надзвичайних ситуацій природного, в першу чергу гідрологічного походження. Розподіл показників середньомісячних опадів, наведений на рис. 3, підтверджує переважний вплив змін водного режиму. Середня кількість опадів в липні в регіоні за період 1985—2010 рр. зросла на 22 мм

(з 51 до 73 мм), тобто більш як на 25 % від середніх за період показників. Отримані дані дозволяють коректно провести оцінку спектральних характеристик рослинного покриву та визначити зміни, зумовлені стресами, викликаними ескалацією небезпечних гідрологічних і гідрологічних процесів.

### СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗЕМНИХ УТВОРЕНЬ ЯК ІНФОРМАТИВНІ ОЗНАКИ ГІДРОЛОГО-ГІДРОГЕОЛОГІЧНИХ ЯВИЩ

Оцінка ризиків базувалася на визначенні стресів, викликаних впливом на екосистему змін водного і температурного режимів. Аналіз реакції екосистем базувалася на вивченні спектрального відгуку по множині спектральних індексів [4—6, 13, 14].

Для оцінки стресів було розраховано набір спектральних індексів за даними супутників «Landsat» для досліджуваного регіону та додатково для контрольного регіону (верхів'я басейну р. Західний Буг, що характеризуються схожими фізико-географічними умовами, але водний режим відрізняється, тобто природних передумов для виникнення підтоплень немає) області розміром  $20 \times 20$  км з координатами центра:  $49^{\circ}57'15.36''$  пн. ш.,  $24^{\circ}46'05.31''$  сх. д. Порівняння проводилося за весь період наявних спостережень окремо для лісової (крової) та трав'янистої рослинності (природні луки і водно-болотяні угіддя), відповідно до проведеної попередньої класифікації супутникових знімків (див. рис. 1).

Визначені тенденції змін спектральних індексів свідчать про наявність помітного водного і менш виявленого температурного стресів. Аналіз довготривалих водних, температурних і радіаційних стресів на моменти спостережень, що зумовили б помітну реакцію регіональних екосистем, може бути виконаний за допомогою аналізу змін фотосинтетичної активності рослинності, оціненою за індексом  $PRI$  (Photochemical Reflectance Index) для досліджуваного регіону і контрольного регіону (рис. 4).

За період 2003—2009 рр. на досліджуваній території спостерігається зниження показників індексу  $PRI$  для лісових ділянок на 0.015 (з 0.145

до 0.13, тобто приблизно на 10 % відносно середнього) Для ділянок, вкритих трав'янистою рослинністю (природні луки і водно-болотяні угіддя), індекс *PRI* демонструє певне зростання: за період спостережень він підвищився з 0.09 до 0.095 (тобто на 5.4 % відносно середнього). Зважаючи на те, що варіації індексу *PRI* для досліджуваного регіону складають близько 25 % для ділянок, вкритих трав'янистою рослинністю, і близько 14 % для лісових ділянок, можна стверджувати, що обмеженість набору спостережень не дозволяє зробити висновків про статистично достовірні тенденції змін індексу. Для досліджуваної території цей індекс є практично стабільним у межах статистичних варіацій.

Індекс *PRI* розраховувався для сенсора *TM* згідно з правилом [7] у формі [12]:

$$PRI^{TM} = \left\{ \frac{\int_{0.45}^{0.52} Id\lambda - \int_{0.52}^{0.60} Id\lambda}{\int_{0.45}^{0.52} Id\lambda + \int_{0.52}^{0.60} Id\lambda} \right\} / g,$$

а для сенсора *ETM*, згідно із даними [7]:

$$PRI^{ETM} = \left\{ \frac{\int_{0.450}^{0.515} Id\lambda - \int_{0.525}^{0.605} Id\lambda}{\int_{0.450}^{0.515} Id\lambda + \int_{0.525}^{0.605} Id\lambda} \right\} / g.$$

Тут  $\lambda$  — довжина хвилі зондування,  $g$  («gain factor») — напівемпіричний розрахунковий коефіцієнт, що залежить від властивостей сенсора. У випадку, що розглядається,  $g = 600$ .

Наведені на рис. 4 дані свідчать про те, що за період спостережень в регіоні досліджень не було зареєстровано у межах розрізняльної здатності приладів спостереження істотних впливів, які спричинили б помітні зміни видового складу рослинних угруповань або значні зміни циклів вегетаційної активності протягом року.

Для вивчення змін рослинного покриву у зв'язку із стресовими навантаженнями було проаналізовано розподіл нормалізованого вегетаційного індексу *NDVI* (Normalized Difference Vegetation Index) [11], індексу *EVI* (Enhanced Vegetation Index) [10] як контрольного параметра для урахування впливів довгострокових ефектів, пов'язаних із ландшафтними змінами, та «стресового» індексу *SIPI* (Structure Intensive Pigment Index), що використовується для визначення

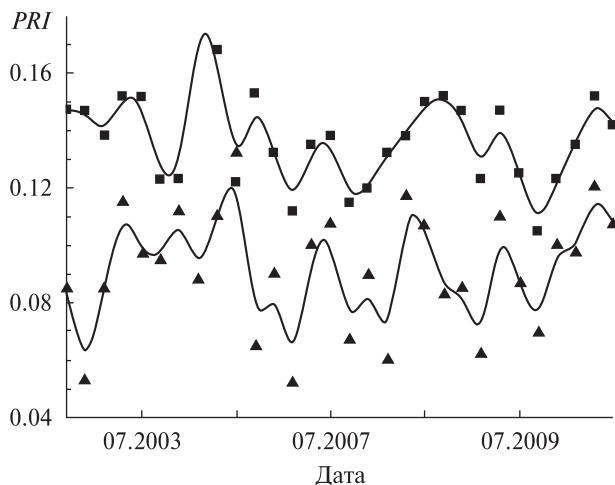


Рис. 4. Варіації значень індексу *PRI* для досліджуваного регіону: квадратики — лісова (коронова) рослинність, трикутники — трав'яниста рослинність (луки і водно-болотяні угіддя)

зон екстремального водного режиму (перезволоження або пересушення) [13]. Для сенсорів *MSS* («Landsat 1–5»), а також сенсорів *TM* і *ETM* («Landsat 4–7») ці індекси можуть бути визначені з виразів [12]:

$$NDVI^{MSS} = \left\{ \frac{\int_{0.70}^{0.80} Id\lambda - \int_{0.60}^{0.70} Id\lambda}{\int_{0.70}^{0.80} Id\lambda + \int_{0.60}^{0.70} Id\lambda} \right\} / g,$$

$$NDVI^{TM/ETM} = \left\{ \frac{\int_{0.76}^{0.90} Id\lambda - \int_{0.63}^{0.69} Id\lambda}{\int_{0.76}^{0.90} Id\lambda + \int_{0.63}^{0.69} Id\lambda} \right\} / g$$

(де  $g = 200$ );

$$EVI^{TM} = 3.2 \left\{ \frac{\int_{0.76}^{0.90} Id\lambda - \int_{0.63}^{0.69} Id\lambda}{\int_{0.76}^{0.90} Id\lambda + 6 \int_{0.63}^{0.69} Id\lambda - 7.5 \int_{0.45}^{0.52} Id\lambda + 1} \right\} / g,$$

$$EVI^{ETM} = 2.5 \left\{ \frac{\int_{0.760}^{0.900} Id\lambda - \int_{0.630}^{0.690} Id\lambda}{\int_{0.760}^{0.900} Id\lambda + 6 \int_{0.630}^{0.690} Id\lambda - 7.5 \int_{0.450}^{0.515} Id\lambda + 1} \right\} / g$$

або із спрощеного виразу

$$EVI^{TM/ETM} = 2.5 \left\{ \left[ \int_{0.76}^{0.90} Id\lambda - \int_{0.63}^{0.69} Id\lambda \right] / \left[ \int_{0.76}^{0.90} Id\lambda + 2.4 \int_{0.63}^{0.69} Id\lambda + 1 \right] \right\} / g$$

(для всіх  $g = 500$ );

$$SIPI^{TM} = \left\{ \left[ \int_{0.76}^{0.90} Id\lambda - \int_{0.45}^{0.52} Id\lambda \right] / \left[ \int_{0.76}^{0.90} Id\lambda - \int_{0.63}^{0.69} Id\lambda \right] \right\} / g - 1,$$

$$SIPI^{ETM} = \left\{ \left[ \int_{0.760}^{0.900} Id\lambda - \int_{0.450}^{0.515} Id\lambda \right] / \left[ \int_{0.760}^{0.900} Id\lambda - \int_{0.630}^{0.690} Id\lambda \right] \right\} / g - 1$$

(де  $g = 50$ ). Якщо при розрахунках отримано  $SIPI < 0$ , то приймається  $SIPI = 0$ .

Водне навантаження оцінювалося за індексом  $NDWI$  (Normalized Difference Water Index) [8] згідно із формулою [12]:

$$NDWI^{TM/ETM} = \left\{ \left[ \int_{0.76}^{0.90} Id\lambda - \int_{1.55}^{1.75} Id\lambda \right] / \left[ \int_{0.76}^{0.90} Id\lambda + \int_{1.55}^{1.75} Id\lambda \right] \right\} / g,$$

де  $g = 100$ . Наведені рівняння запропоновані у формі, яка може використовуватися для аналізу також і наземних калібрувальних спектрометричних вимірювань.

Для калібрування отриманих спектральних індексів було проведено наземні спектрометричні польові вимірювання. За допомогою польового спекторадіометра FieldSpec®3 FR на обраних полігонах у періоди, що відповідають періодам супутникових спостережень, було зроблено 117 вимірювань спектральної відбивної здатності земних покривів з інтервалом відліку 1.4 нм у діапазоні  $\lambda = 350\text{—}1000$  нм і 2.0 нм у діапазоні  $\lambda = 1000\text{—}2500$  нм при спектральній розрізненості (повній ширині на половині максимуму): 3.0 нм при 700 і 10 нм при 1400 і 2100 нм.

На рис. 5, 6 наведено розподіли спектральних індексів, отриманих описаним шляхом.

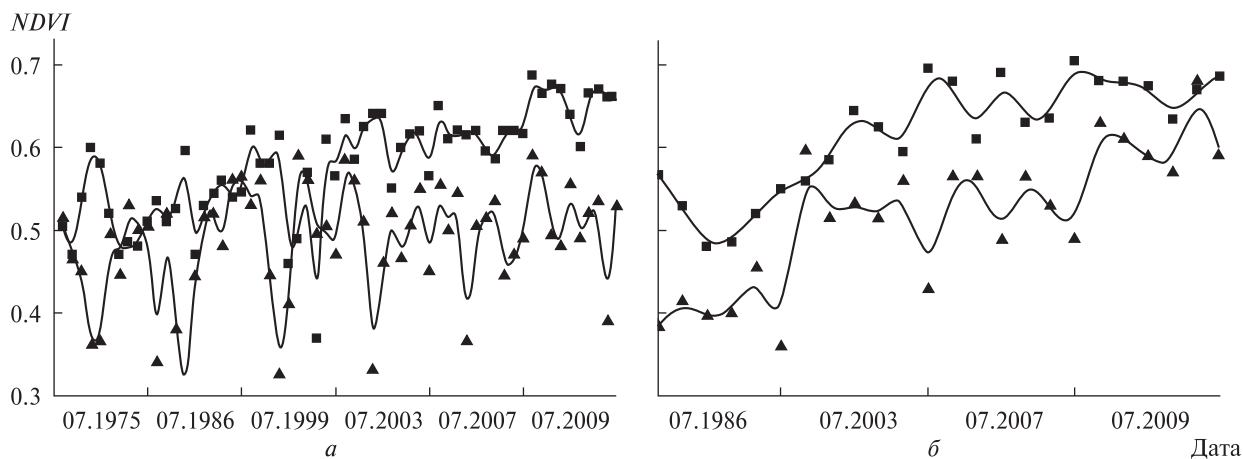
З 1975 по 2009 рр. на досліджуваній території спостерігається підвищення значень індексу  $NDVI$  на 0.07 (з 0.45 до 0.52, тобто на 15 % віднос-

но середнього значення 0.47) для ділянок, вкритих трав'янистою рослинністю, а для лісових ділянок індекс  $NDVI$  підвищився на 0.15 (з 0.5 до 0.651, тобто на 27 % відносно середнього 0.552). Варіації індексу для трав'янистих ділянок складають 12 %, а лісових — 9 %. Для контрольної території з 1986 по 2009 рр. індекс  $NDVI$  збільшився на 0.21 для ділянок, вкритих трав'янистою рослинністю (від 0.42 до 0.63, тобто на 41 % відносно середнього 0.51 при варіації індексу 8 %). Для лісових ділянок на цій території зростання  $NDVI$  склало 0.2 (з 0.525 до 0.725, тобто на 33 % відносно середнього значення в 0.61 при варіації в 6 %).

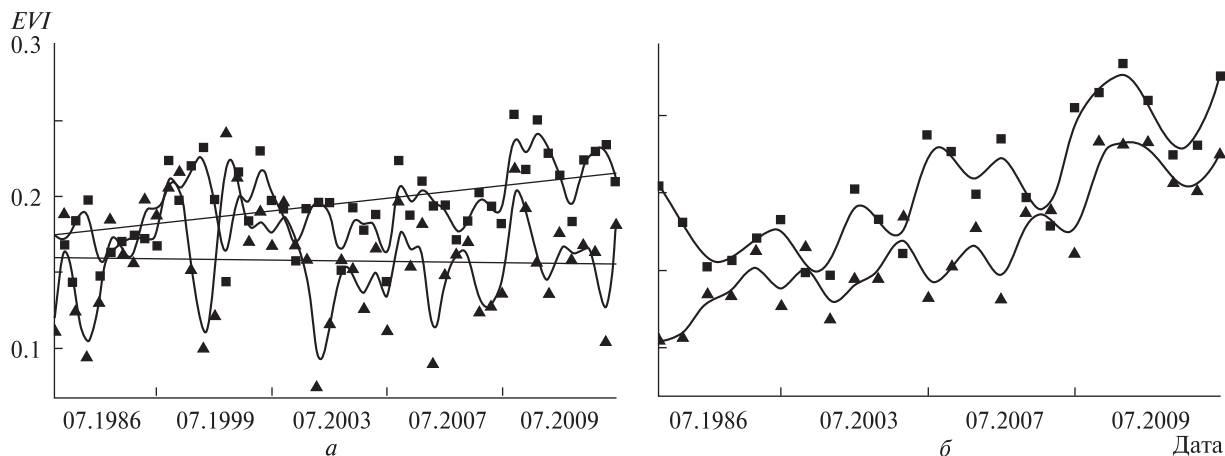
З 1986 по 2009 рр. на досліджуваній території спостерігається підвищення значень індексу  $EVI$  для лісових ділянок на 0.043 (з 0.175 до 0.218, тобто на 21.8 % відносно середнього значення 0.043), а для ділянок, вкритих трав'янистою рослинністю, індекс знизився на 0.005 (з 0.16 до 0.155, тобто на 3.2 % відносно середнього 0.155). Варіації індексу для трав'янистих ділянок складають 3 %, а лісових 3 %. Тобто можна вважати, що  $EVI$  для лісових ділянок зріс, а для трав'янистих залишився практично незмінним. Для контрольної території з 1986 по 2009 рр. індекс  $EVI$  зріс від 0.1 до 0.23 для ділянок, вкритих трав'янистою рослинністю (на 84 % відносно середнього 0.155 при варіації індексу 32 %). Для лісових ділянок на цій території зростання  $EVI$  склало 0.12 (з 0.145 до 0.265, тобто на 60 % відносно середнього 0.2 при варіації 11 %).

Важливим є вивчення спектральних індексів, пов'язаних з прямим впливом стресових факторів, зокрема індексу  $SIPI$  (рис. 7).

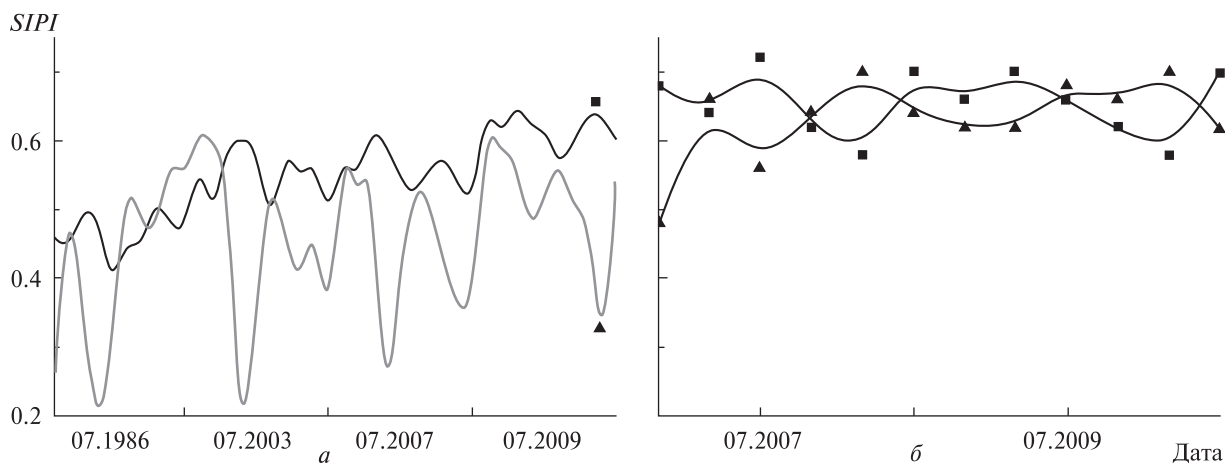
З 1986 по 2009 рр. на досліджуваній території спостерігається підвищення значень індексу  $SIPI$  на 0.08 (з 0.42 до 0.5, тобто на 19 % відносно середнього 0.43) для ділянок, вкритих трав'янистою рослинністю, а для лісових ділянок індекс підвищився на 0.17 (з 0.46 до 0.63, тобто на 30 % відносно середнього 0.56). Значимо, що варіації  $SIPI$  для досліджуваної території складають близько 20 % для водно-болотних угідь (в залежності від місця розташування точки вимірювання відносно геоморфологічних і гідрогеологічних особливостей місцевості) і 10 %



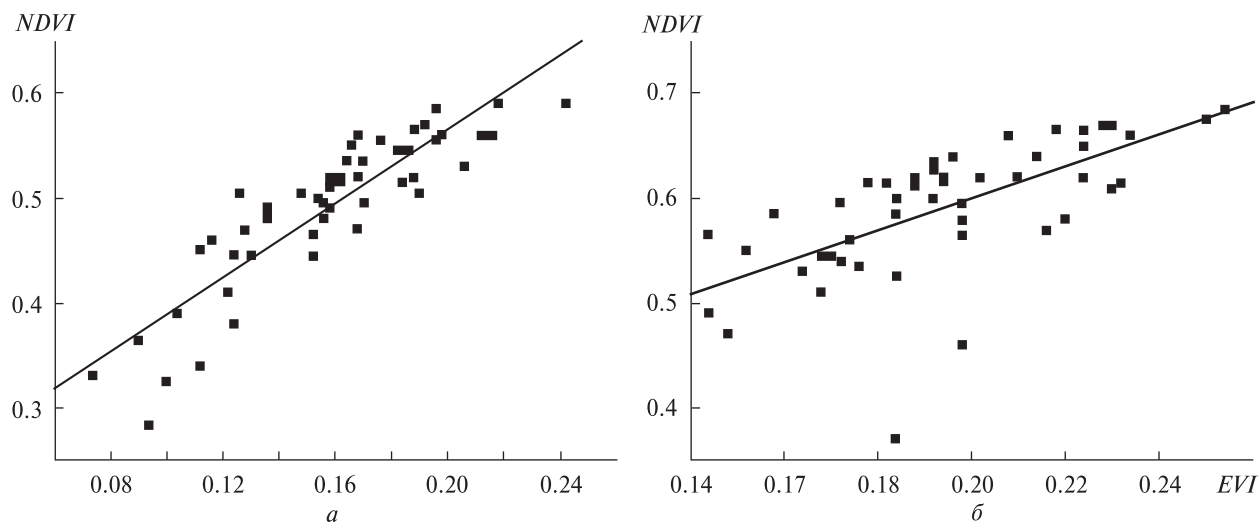
**Рис. 5.** Варіації значень індексу *NDVI*: *a* — для досліджуваного регіону, *б* — для контрольної території. Квадратики — лісова (коронова) рослинність, трикутники — трав'яниста рослинність (луки і водно-болотні угіддя)



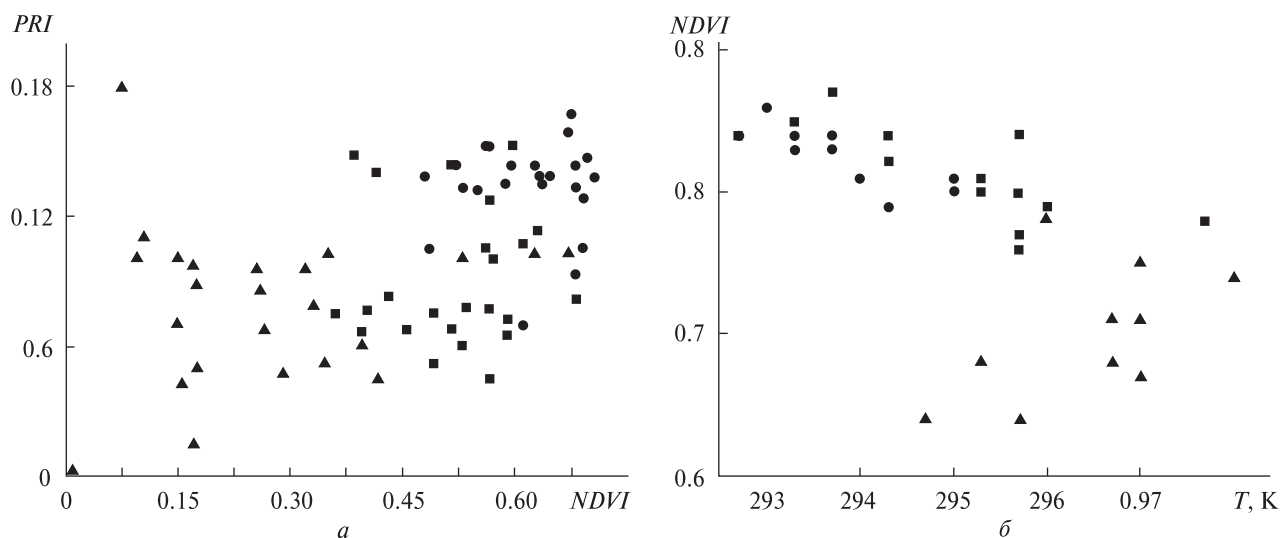
**Рис. 6.** Те ж для індексу *EVI*



**Рис. 7.** Те ж для індексу *SIPI*



**Рис. 8.** Корелятивна залежність індексу *NDVI* від індексу *EVI* у межах досліджуваного регіону: *a* — для ділянок, вкритих трав'янистою рослинністю (лінія — апроксимація  $NDVI = 0.21354 + 1.75622EVI$ ;  $R = 0.88$ ), *б* — для ділянок, вкритих лісовою рослинністю (лінія — апроксимація  $NDVI = 0.295 + 1.52741EVI$ ;  $R = 0.65$ )



**Рис. 9.** Корелятивні залежності: *a* — індексу *PRI* від індексу *NDVI* для досліджуваної території, *б* — водного індексу *NDWVI* від температури поверхні *T*, зареєстрованої супутниковими спостереженнями. Квадратики — трав'яниста рослинність (луки і водно-болотяні угіддя), кружки — лісова (коронова) рослинність, трикутники — сільськогосподарські угіддя

для лісових ділянок. Для контрольної території за наявними даними можна було розрахувати індекс *SIFI* лише для періоду 2007—2009 рр. На цей період для лісових ділянок спостерігалось зниження індексу *SIFI* на 0.02 (з 0.665 до 0.645, тобто на 3.1 % відносно середнього 0.655), а для ділянок, вкритих трав'янистою рослинністю,

індекс зріс на 0.12 (з 0.56 до 0.68, тобто на 19 % відносно середнього 0.63). Зазначимо, що для поточного дослідження важливим є стабільність наведених розподілів, але високе середнє значення індексу для цієї території потребує окремого пояснення у подальших дослідженнях. Для контрольної території варіації індексу складають



близько 15 % і, таким чином, можна вважати, що під час спостережень індекс *SPI* залишався практично стабільним. Порівняння розподілів індексу *SPI* дозволяє припустити наявність чіткого водного стресу на досліджуваній території, який в абсолютних показниках (30 % збільшення величини *SPI* для лісових ділянок, що не піддавалися штучному дренажу) відповідає збільшенню кількості опадів за той же період на досліджуваній території. Різниця показників для ділянок, вкритих трав'янистою рослинністю, які включають природні луки і водно-болотні угіддя, пояснюється штучним дренажем і змінами рослинного покриву, що відображені в розподілах індексів *NDVI* та *EVI*.

Для аналізу показників водного балансу може бути важливою також оцінка розподілу біомаси по території досліджень, яку можна отримати із співвідношення спектральних індексів (рис. 8).

Ділянки, вкриті трав'янистою рослинністю, у межах досліджуваного регіону демонструють практично однорідне зростання значень індексів *EVI* і *NDVI*. Це означає, що розвиток біомаси обмежений за визначених природних умов видовим різноманіттям і розміром території. Крім того, велика варіабельність значень вегетаційних індексів для таких ділянок свідчить про нестабільність стану рослинного покриву. Це робить лугові екосистеми менш здатними до ефективного поглинання надлишкової вологи, тобто вразливими щодо варіацій поверхневого стоку. Для лісових ділянок характерне швидше зростання значень індексу *EVI* ніж *NDVI*, що може свідчити про більш активний розвиток біомаси у вертикальній площині, тобто розвиток нижніх ярусів лісової рослинності, підліску і чагарників у межах лісових ландшафтів. Це підвищує здатність екосистем до поглинання вологи, позитивно впливає на розподіл поверхневого стоку і збереження ґрунтового шару. Таким чином, наявність лісових масивів знижує гідролого-гідрогеологічні ризики (повеней, підтоплення і заболочувань).

Відмітимо також, що різні типи рослинних угруповань чітко розрізняються за спектральними характеристиками, зокрема за співвідношенням спектральних індексів *PRI* і *NDVI*, а також

водного індексу *NDWI* і температури поверхні *T* (див. рис. 9).

Таким чином, співвідношення спектральних індексів можуть бути використані як додаткові інформативні параметри при проведенні класифікації супутникових знімків, а також при оцінках ризиків за даними ДЗЗ.

Визначені зміни спектральних індексів можуть бути використані як інформаційна ознака при оцінках ризиків ескалації небезпечних процесів.

### ОЦІНКА РИЗИКІВ ЗА ДАНИМИ СУПУТНИКОВИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

На основі підходу, запропонованого у роботі [2], та на базі даних аналізу супутникових спостережень було проведено оцінювання ризиків, пов'язаних з ескалацією гідролого-гідрогеологічних процесів в досліджуваному регіоні. Результати представлено на рис. 10, 11.

Отримані результати в загальному вигляді збігаються з подібними результатами, наведеними в роботах інших дослідників, наприклад в роботі [3], що підтверджує коректність розробленого

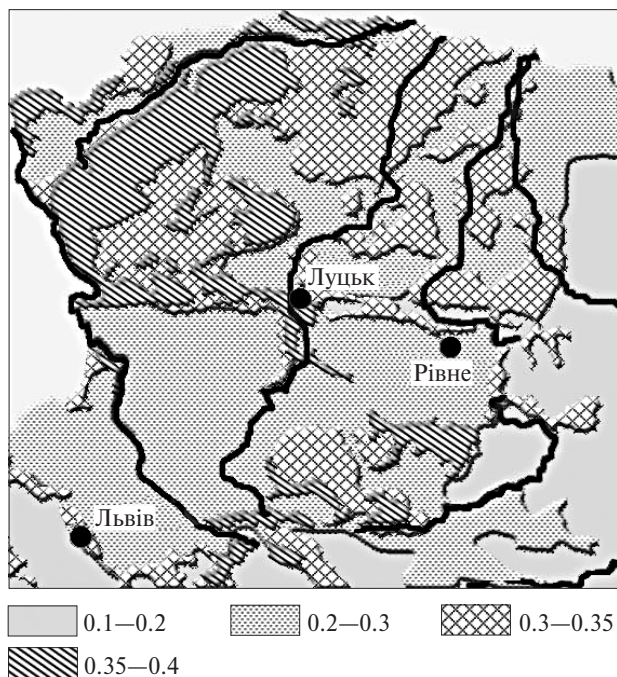
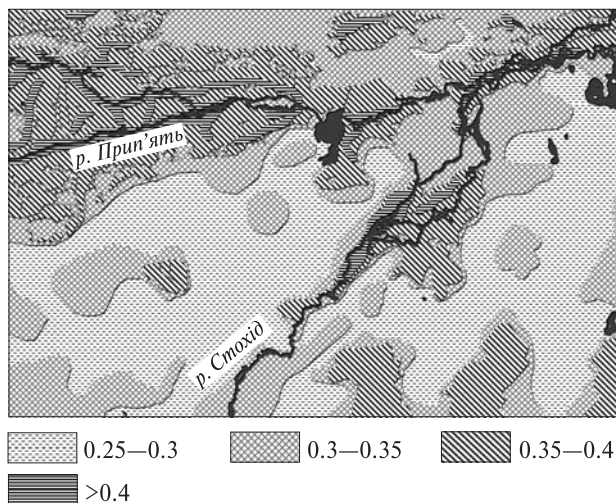


Рис. 10. Розрахункові ризики підтоплення для регіону, що включає територію досліджень і контрольні ділянки



**Рис. 11.** Розрахункові ризики підтоплень для досліджуваної території

підходу. Слід зазначити, що таким чином можна оцінити поточний стан безпеки та поточні значення ризиків, принаймні на певний період часу. Але аналіз тривалої поведінки досліджуваних величин в часі потребує вивчення ширшого набору параметрів, як кліматичних, так і екологічних, зокрема ширшого набору прогнозних моделей.

## ВИСНОВКИ

Представлені результати дають підстави вважати, що дані супутникових спостережень є адекватною основою для оцінки гідролого-гідрологічних ризиків як на регіональному, так і на локальному рівнях. Виходячи із моделі поширення небезпечних процесів, можна побудувати методику дешифрування супутникових знімків та аналізу отриманих спектральних індикаторів.

Розраховані ризики було оцінено в термінах ймовірності виникнення негативних наслідків події в разі реалізації сукупності умов, що сприятимуть виникненню події. Ця ймовірність розрахована на період в 1 рік. Виходячи з умов, заданих модельними рівняннями, можна сказати, що значення ризику 0.5 технічно означає, що за умов достовірного перевищення середнього рівня сезонних варіацій опадів (інтегральне перевищення місячної норми більш як на 50 %, тобто на 95—100 мм), або відповідно стоку (на

0.2 м<sup>3</sup>с<sup>-1</sup>км<sup>-2</sup> території водозбору, що відобразиться на перевищенні рівня води в річках від 1 до 1.8 м) у відповідному місці буде зафіксовано випадок підтоплення (підвищення рівня води на 0.3—0.8 м) протягом року. Тобто, ризик 0.5 за наявних кліматичних тенденцій практично означає щорічне підтоплення будь-якого рівня з вірогідністю 0.86.

Визначені ризики підтоплень на досліджуваній території є природно високими і дещо вищими, ніж середні по регіону. Це пояснюється особливостями локального водного балансу. Наявні тенденції збільшення середніх річних температур мають зменшувати загальний ризик виникнення підтоплень через вплив рослинного покриву, але при цьому сезонні варіації (зниження середніх сезонних температур) істотно впливають в сторону збільшення сезонних показників відповідних ризиків. Зареєстроване збільшення кількості опадів в регіоні також збільшує ризики, пов'язані з ескалацією небезпечних гідрологічних і гідрологічних процесів. Таким чином, можна прогнозувати подальше підвищення відповідних ризиків у досліджуваному регіоні.

Окремої уваги потребують явища заболочування. Водно-болотяні угіддя представлені в регіоні досить широко. Пов'язані з ними процеси, в тому числі такі, що можуть негативно вплинути на господарство, досить успішно контролюються за рахунок створеної протягом останнього століття водогосподарської мережі. Суттєвої зміни площі боліт, яка б виходила за межі сезонних коливань, протягом періоду спостережень виявлено не було. Але зміни площі кронної рослинності (зокрема зареєстроване зменшення площі лісів [1]) та неоптимальне ведення сільського господарства може негативно вплинути на водний баланс територій і збільшити ризики заболочувань. Отже, за результатами проведеного аналізу ризик поширення процесів природного заболочування загалом можна оцінити як не досить високий. При цьому слід зазначити, що з огляду на наявні кліматичні зміни слід враховувати при подальших дослідженнях можливий вплив на явища, що розглядаються, інших явищ, пов'язаних із змінами довкілля, наприклад поширення інтрузивних видів рослинності, які і-

тотним чином можуть вплинути на рівень гідрологічної безпеки в регіоні. Загалом, враховуючи високу екологічну чутливість досліджуваного регіону, довгострокові тенденції екологічних змін на регіональному рівні мають бути оцінені більш детально.

1. *Изменения земных систем в Восточной Европе / Отв. ред В. И. Лялько.* — Киев, 2010. — 582 с.
2. *Костюченко Ю. В., Копачевський І. М., Ющенко М. В.* Теоретико-методичні засади оцінки гідролого-гідрогеологічних ризиків за даними ДЗЗ // *Космічна наука і технологія.* — 2011. — **17**, № 6. — С. 10—18.
3. *Лисиченко Г. В., Забулонов Ю. Л., Хміль Г. А.* Природний, техногенний та екологічний ризики: аналіз, оцінка, управління. — Київ: Наук. думка, 2008. — 542 с.
4. *Blackburn G. A.* Spectral indices for estimation photosynthetic pigment concentrations: a test using senescent tree leaves // *Int. J. Remote Sens.* — 1998. — **4**. — P. 657—675.
5. *Choudhury B. J.* Estimating gross photosynthesis using satellite and ancillary data: approach and preliminary results // *Remote Sens. Environ.* — 2001. — **75**. — P. 1—21.
6. *Dobrowski S. Z., Pushnic J. C., Zarco-Tejada P. J., Ustin S. L.* Simple reflectance indices track heat and water stress-induced changes in steady-state chlorophyll fluorescence at the canopy scale // *Remote Sens. Environ.* — 2005. — **97**. — P. 403—414, doi:10.1016/j.rse.2005.05.006.
7. *Gamon J. A., Serrano L., Surfus J. S.* The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types and nutrient levels // *Oecologia.* — 1997. — **112**. — P. 492—501.
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. *Guha-Sapir D., Vos F., Below R., Ponserre S.* Annual disaster statistical review 2010: the numbers and trends. — Brussels: Université catholique de Louvain — Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2011. — 50 p.
10. *Huete A. R., Liu H., Batchily K., van Leeuwen W.* A comparison of vegetation indices over a global set of TM Images for EOS-MODIS // *Remote Sens. Environ.* — 1997. — **59**. — P. 440—451.
11. *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.
12. *Kostyuchenko Y. V., Kopachevsky I., Solovyov D., et al.* Way to reduce the uncertainties on ecological consequences assessment of technological disasters using satellite observations // *Proc. of the 4<sup>th</sup> International Workshop on Reliable Engineering Computing “Robust Design — Coping with Hazards, Risk and Uncertainty”, March 3—5, 2010.* — Singapore: National University of Singapore, 2010. — P. 765—776.
13. *Penuelas J., Baret F., Filella I.* Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reactance // *Photosynthetica.* — 1995. — **31**. — P. 221—230.
14. *Verma S. B., Sellers P. J., Walthall C. L., et al.* Photosynthesis and stomatal conductance related to reflectance on the canopy scale // *Remote Sens. Environ.* — 1993. — **44**. — P. 103—116.

Надійшла до редакції 06.09.11

*Yu.V. Kostyuchenko, I. M. Kopachevskyi, D.M. Solovyov, M.V. Yushchenko, P. O. Akymenko*

#### APPLICATION OF SATELLITE OBSERVATIONS FOR ASSESSMENT OF REGIONAL HYDROLOGICAL AND HYDROGEOLOGICAL RISKS

We discuss a procedure for the calculation of the hydrological and hydrogeological risk assessment with the use of remote sensing methods. A model for the propagation of dangerous processes is proposed and a procedure for satellite image decoding as well as for analyzing spectral indicators is developed on the basis of the model. Regional distributions of climatic parameters for the observational period are analyzed and key factors of impact are identified. The changes in values of the spectral indices are determined which can be used as information indicators of dangerous processes. We propose an equation to determine the stress probability from a set of spectral characteristics. A method for the assessment of the integrated risk associated with hydrological and hydrogeological hazards is developed.