

В.І. Лялько, Д.М. Мовчан, Ю.В. Костюченко, І.М. Копачевський

**КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРІВ ДИНАМІКИ РЕГІОНАЛЬНОЇ РОСЛИННОСТІ
НА ОСНОВІ ДАНИХ ДЗЗ З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
ДОВГОСТРОКОВОГО УПРАВЛІННЯ
ГІДРОЛОГО-ГІДРОГЕОЛОГІЧНИМИ РИЗИКАМИ**

Розглянуто роль рослинного покриву в гідрологічних і гідрогіологічних процесах земної поверхні. Показано зв'язок динаміки параметрів рослинного покриву території з можливими процесами підтоплення та заболочення. Проведено аналіз та порівняння динаміки продуктивності окремих типів рослинного покриву Волинської обл. за період з 2000 по 2006 р. Зроблено висновки щодо можливості застосування отриманих даних для покращення розрахунків довгострокових гідрологічних і гідрогіологічних ризиків.

Ключові слова: процеси підтоплення, гідролого-гідрогіологічні ризики, рослинний покрив, вегетаційні індекси, дистанційне зондування.

Вступ. Моделі басейнового стоку [1] свідчать, що динаміка процесів підтоплення та заболочування може бути описана змінами вмісту вологи в зоні накопичення s_1 і зоні розвантаження s_2 , відповідно до [2], за допомогою системи рівнянь:

$$ds_1 = A(s_1, s_2)dt + B(s_1, s_2)dW_t, \quad (1)$$

$$ds_2 = C(s_1, s_2)dt + D(s_1, s_2)dW_t. \quad (2)$$

Тут dW_t – інкремент процесу Вінера для опису флуктуацій евапотранспірації і опадів у довгостроковій перспективі, тобто він описує флуктуації параметра:

$$\alpha = LE_p / 2wu, \quad (3)$$

де L – загальний розмір досліджуваної території; E_p – евапотранспірація; w – середній обсяг атмосферної вологи; u – середня швидкість вітру, і має такі статистичні властивості: $\langle dW_t \rangle = 0$, $\langle dW_t dW_t \rangle = 1$, якщо $t = t'$, та $dW_t = 0$ в усіх інших випадках. Параметри $A(s_1)$, $B(s_1)$, $C(s_1)$ і $D(s_1)$ можуть бути задані як функції: кількості атмосферних опадів P_a ; геометричної частки площі території, зайнятої зоною розвантаження f_g ; набору емпіричних параметрів; пористості n ; товщини активного кореневого шару z_r ; потоків підземних вод Q_i (що описуються через проникність за умов повного насичення k_s , час t , набір емпіричних параметрів, середню затримку ґрунтових вод J , дебіт водонасиченої зони S_y , середню проникність зони T та середню відстань між зонами розвантаження води (щільність дренавання) l). [2].

Для розрахунків величини випаровування розглянемо середньодобову евапотранспірацію за допомогою комбінованого рівняння Монтейта у формі [3]:

$$E_p = \left\{ \frac{[f(A)+1][R_n - G]\Delta}{[\sigma f(A)+1]C_p \rho} + [f(A)+1] \frac{\rho_2^* - \rho_2}{r_a} \right\} \times \left\{ \frac{r_a + r_x}{r_a} + \frac{[f(A)+1]L_v \Delta}{[\sigma f(A)+1]C_p \rho} \right\}^{-1}. \quad (4)$$

Тут Δ – похідна тиску пари в умовах повного насичення; C_p – питома теплота повітря за сталого тиску; L_v – “схрита” теплота перетворення води у пару; σ – відношення площі конвекції до площі евапотранспірації; r_a – опір з боку атмосфери руху пари з поверхні рослинного покриву; R_n – кількість сонячного тепла, що потрапляє на поверхню евапотранспірації; G – кількість енергії, що виходить з рослинного покриву в ґрунт за певний час; r_x – опір з боку поверхні евапотранспірації виходу водяної пари; ρ – густина повітря, розрахована за середніх значень тиску і фактичної вологості; ρ_2^* – густина пари в умовах повного насичення за відповідної середньодобової температури; ρ_2 – фактична густина пари в атмосфері над рослинним покривом; $f(A)$ – ефективна площа рослинного покриву (площа, через яку здійснюється евапотранспірація) на одиницю загальної площі досліджуваної ділянки.

Узагальнюючи, визначимо, що в умовах природного басейну динаміка вологи може бути описана через її накопичення (1) та розвантаження (2) за обчислених значень гідрологічних, гідрогіологічних, геоморфологічних показників та флуктуацій евапотранспірації і опадів (3) з урахуванням параметрів випаровування через рослинний покрив (4). Інакше кажучи, з метою контролю процесів підтоплення можна аналізувати часове поведення рівнянь (1) і (2) з урахуванням (4) у межах довгострокових змін кліматичних та еко-

логічних показників (3). Отже, задача контролю гідрологічних і гідрогеологічних ризиків (зокрема, підтоплення та заболочування) у довгостроковій перспективі за допомогою дистанційних методів моніторингу може бути зведена до визначення методики аналізу набору індикаторів стану поверхні, що відповідають змінним рівням (1)–(4) і, таким чином, забезпечують контроль змін показників реакції локальних екосистем на зміни водного балансу.

Зв'язок динаміки рослинного покриву території з процесами підтоплення. Згідно із сучасними поглядами, кожна систему можна розглядати як акумулятор інформації. Вона здатна зберігати інформацію, записану в її структурі і у властивостях її елементів. Запас інформації тим більший, чим складніша система і чим міцніші зв'язки між її складовими частинами. Систем, які були б повністю ізольовані, в природі не існує, постійно відбувається обмін енергією та речовиною, що певною мірою може порушувати рівновагу, яка сформувалася в конкретній системі. Одним з механізмів реакції на такі зміни є існування зворотних зв'язків.

Найпростішим прикладом подібного регулятора, що діє за принципом зворотного зв'язку, є два елементи системи, які впливають один на один. Така пара отримала назву елементарної комірки саморегуляції системи [4, 5]. За значного спрощення взаємодій як одну з таких комірок на рівні екосистем можна розглядати комплекс рослинний покрив – ґрунт. Ці елементи мають спільний розвиток від зародження елементарної екосистеми до встановлення гомеостатичного стану.

Якщо зовнішні фактори, що виводять систему з гомеостатичного стану, короткострокові, то така система з часом повертається до попереднього стану. Проте якщо навантаження не зникає досить тривалий час, “програма” саморегуляції переводить систему на інший рівень з новим гомеостатичним станом. Відповідь кожної екосистеми на зовнішній вплив залежить від його характеру, передусім від його інтенсивності та швидкості наростання навантаження. Зміни, що відбуваються в екосистемі, і є комбінацією відповідей на суму змінних у часі навантажень. Як результат, загальна картина перетворень в екосистемі може бути досить складною.

Приклад реакції рослинного покриву на процеси підтоплення насамперед засвідчує, що в цілому вона полягає в зміні суходільних і перехідних біогеоценозів низинними. З підняттям рівня ґрунтових вод до 1,5–2 м від поверхні та вище змінюються умови живлення, посилюються ознаки застійних процесів у ґрунтах. Отже, ґрунти отримують додаткове зволоження, що ускладнює їх аерацію. Зміни водно-повітряного режиму ґрунтів зумовлюють зміни у структурі ґрунтового

покриву. В ґрунтах лісової зони уповільнюється швидкість розкладання органічних решток, простежується облугування чи оторфування поверхневого шару ґрунту, розвиваються відновні реакції. Якщо глибина залягання ґрунтових вод у зв'язку з підтопленням сягає 1–1,5 м, на підзолисті процеси накладається також процес облугування, який проявляється у зростанні вмісту гумусу (до 3%), азоту, фосфору, заліза. За глибини залягання рівня ґрунтових вод понад 80–100 см облугування змінюється заболочуванням, оглеєнням і формуванням торф'яно-підзолисто-оглеєних ґрунтів. Якщо ж зазначений рівень не опускається нижче 60 см, утворюються торф'яно-оглеєні ґрунти [4].

Зміни у ґрунтового покриві приводять, відповідно, і до змін у рослинному покриві. Із травостою зникають види, що не витримують перезволоження, домінуючими стають гігрофіти та гігромезофіти, змінюються продуктивність луків і бонітет деревостану, формуються нові фітоценози. В свою чергу, нова рослинність підвищує вміст органічних речовин у ґрунтах, що збільшує їх вологемність, сприяючи накопиченню вологи і, отже, ще більше посилюючи анаеробні процеси.

А.Г. Ємельянов [5] виділяє три стадії процесу зміни суходільних і перехідних систем у разі підвищення ґрунтових вод. Перша стадія характеризується різким порушенням початкового природного рівноважного стану. В цей період відбуваються “замочування” ґрунтів, підвищення рівня ґрунтових вод і вологості ґрунтів, погіршення умов росту і відмирання деяких видів трав, зміни приросту деревини та ін. Друга стадія відзначається прискореними, односпрямованими змінами природного середовища відразу після підняття рівня ґрунтових вод. Формується новий водно-повітряний режим ґрунтів, уповільнюється розкладання органічних речовин, розвиваються процеси оглеєння, поширюються вологолюбні види рослин, утворюються нові фітоценози. Якщо на цій стадії рівень ґрунтових вод залишається незмінним, то швидкість змін уповільнюється і настає третя стадія – поступово формується нова динамічна рівновага у відповідності до нових умов середовища.

Слід зауважити, що подібні зміни в системі ґрунт–рослинний покрив в першу чергу відображаються на продуктивності рослинного покриву, а рослинний покрив реагує на зміни водного режиму ґрунтів майже відразу після прояву цих змін. Тому відстеження динаміки стану рослинного покриву, якщо виявлені процеси підтоплення територій ґрунтовими водами, може надати додаткову корисну інформацію.

Аналіз динаміки рослинності на основі даних ДЗЗ. За допомогою методів дистанційного зондування в Науковому Центрі аерокосмічних дослі-

джені Землі ІГН НАН України проведена оцінка продуктивності рослинного покриву на території Волинської обл. в різні роки з метою виявлення динаміки стану рослинного покриву. Методика оцінки продуктивності рослинності ґрунтується на застосуванні вегетаційних індексів, зокрема індексу фотохімічного відбивання (PRI) та індексу нормалізованої різниці (NDVI). Детально ця методика викладена в [6]. Під час виконання робіт використовували багатоспектральні супутникові знімки спектрометра MODIS, а також його стандартний інформаційний продукт MOD17 [7].

Для порівняння ефективності поглинання CO_2 рослинним покривом у різні роки і виявлення динаміки продуктивності рослинного покриву Волинської обл. була проведена інтерпретація знімків MODIS у різні роки і в різні періоди вегетаційного сезону (рис. 1–3). Установлено, що на початку вегетаційного сезону ефективність поглинання CO_2 рослинним покривом з атмосфери в 2009 р. рівномірно знизилась на всій території порівняно з 2007 р. (рис. 1). Порівняння знімків 2000 та 2007 рр. показало цікаву динаміку процесів у рослинному покриві. Так, у північній і західній частинах області продуктивність рослинності знизилася, в південно-західній залишилася приблизно на такому самому рівні, а в південній частині незначною мірою зросла (рис. 2). Для оцінки змін наприкінці вегетаційного сезону було проведено інтерпретацію знімків від 19 серпня 2004 р. і 22 серпня 2009 р. (рис. 3). Згідно з отриманими результатами, продуктивність рослинного покриву істотно підвищилася практично на всій території і лише на крайньому заході області значення 2009 р. були нижчими щодо значень 2004 р.

Слід зауважити, що подібні зміни в рослинному покриві здебільшого зумовлені різними погодними умовами в періоди проведення зйомки, хоча частково на них можуть накладатись і зміни, які відбуваються безпосередньо в самому рослинному покриві (зміни видового складу рослинних угруповань та ін.), а також зміни едафічних факторів, які переважно залежать від режиму ґрунтових вод. Тому в наведеному контексті доречнішим є використання інформаційного продукту MOD17, що дає змогу оцінити загальну річну чисту первинну продуктивність (NPP) рослинного покриву над дослідною територією (рис. 4). Застосування цього продукту згладжує коливання, виключаючи можливий вплив короткострокових несприятливих погодних умов на рослинний покрив і дає усереднену величину продуктивності рослинного покриву за весь вегетаційний сезон. При цьому залишається вплив на результат довгострокових погодних факторів (наприклад посух) на рослинність регіону. Викладене, наприклад, стосується 2006, а особливо 2002 рр. (максимальні

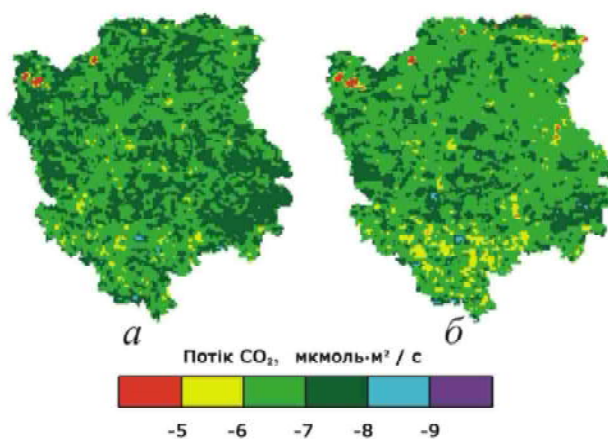


Рис. 1. Розподіл ефективності поглинання CO_2 рослинним покривом Волинської обл. Побудовано на основі інтерпретації знімків MODIS: а – 4 травня 2007 р.; б – 4 травня 2009 р.

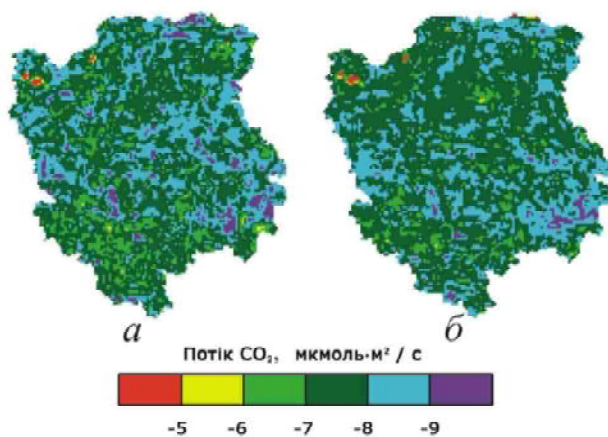


Рис. 2. Розподіл ефективності поглинання CO_2 рослинним покривом Волинської обл. Побудовано на основі інтерпретації знімків MODIS: а – 3 червня 2000 р.; б – 22 червня 2007 р.

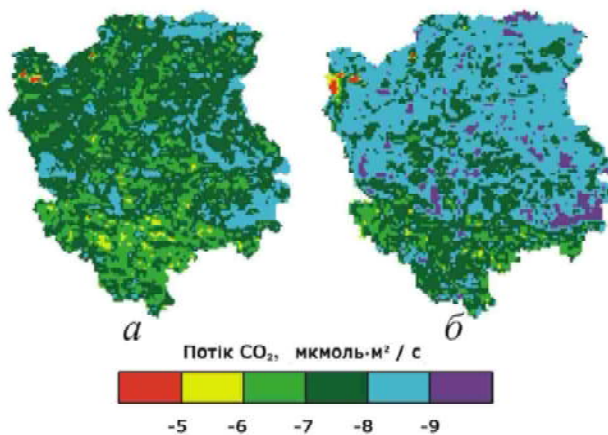


Рис. 3. Розподіл ефективності поглинання CO_2 рослинним покривом Волинської обл. Побудовано на основі інтерпретації знімків MODIS: а – 19 серпня 2004 р.; б – 22 серпня 2009 р.

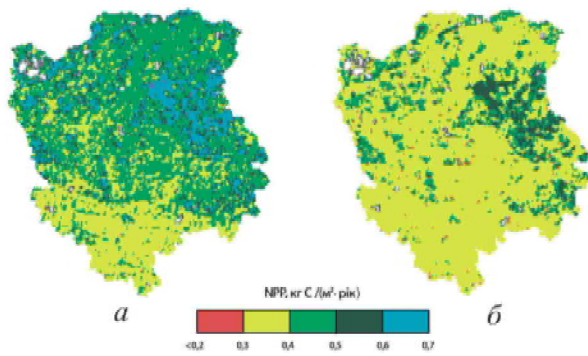


Рис. 4. Розподіл продуктивності рослинного покриву Волинської обл.: а – 2000 р.; б – 2006 р.

температури перевищували 40°C), коли в липні–серпні спостерігалися надзвичайно посушливі умови з незначною кількістю опадів [8], що, в свою чергу, призвело до зниження продуктивності рослинного покриву, який зазнав значного стресу. Порівняння продуктивності рослинного покриву регіону для 2000 та 2006 рр. ілюструє рис. 4.

Для оцінки та порівняння динаміки різних типів рослинного покриву на основі карти рослинного покриву Волинської обл. [9] були виділені окремі ділянки з характерним переважанням певного виду рослинності: евтрофного болота, заболочених луків, соснових і вільхових лісів (рис. 5), для яких проведено оцінку та порівняння продуктивності в період з 2000 по 2006 рр.

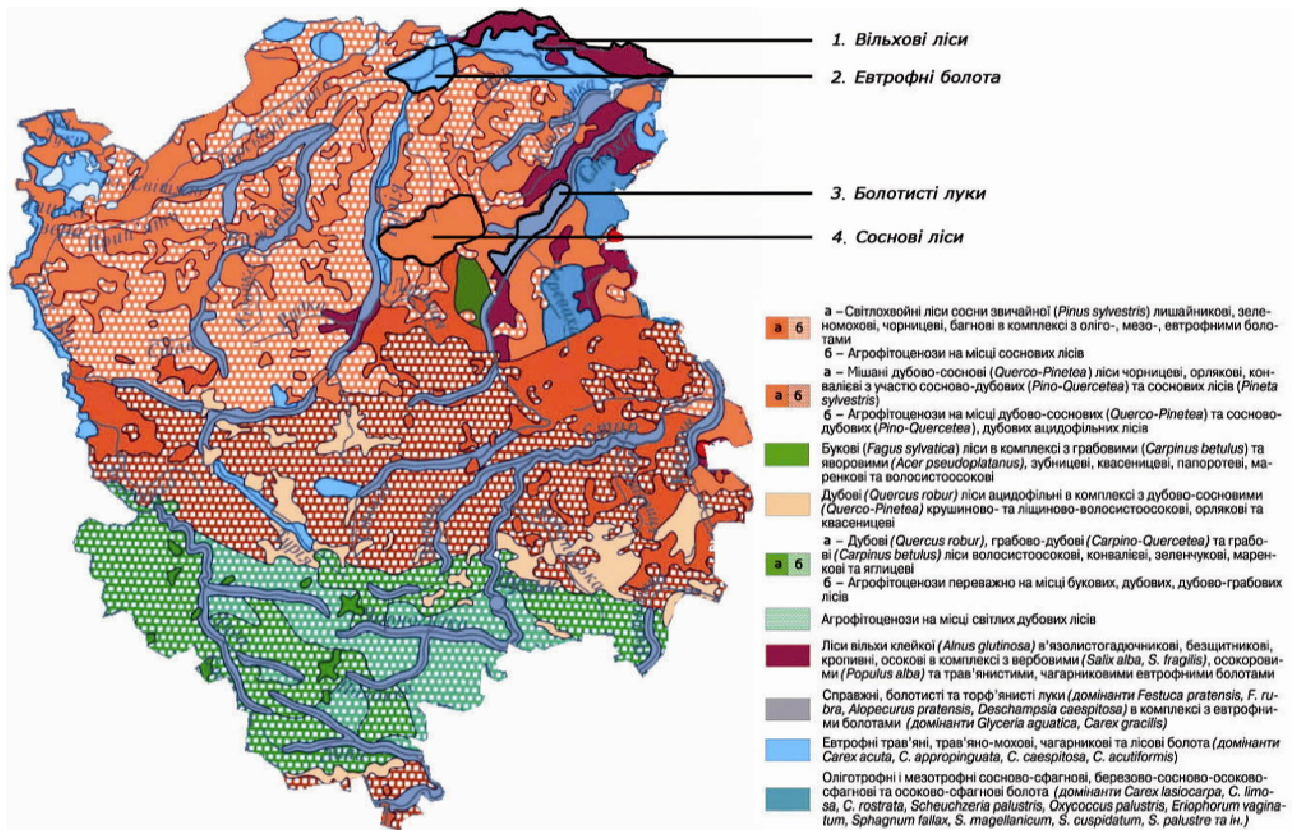


Рис. 5. Рослинний покрив Волинської обл.

Отримані результати (рис. 6) свідчать про коливання продуктивності рослинного покриву в різні роки, як і передбачалося, внаслідок впливу різних погодних факторів. Особливо низькою була продуктивність, зокрема лісових територій, у доволі сухі та жаркі літні періоди 2002 та 2006 рр. Найбільше реагували на несприятливі умови території соснових лісів, тоді як болота та заболочені луки були менш чутливими. Взагалі продуктивність лісових території дуже коливається з року в рік, що унеможливує виявлення певної чіткої тенденції. Однак болота і заболочені луки, у яких міжрічні коливання незначні, мають чітку тенденцію до незначного зниження продуктивності протягом періоду спостереження. Ця тенденція уже може вказувати на постійний вплив певного негативного фактора на згаданий тип рослинного покриву.

Розподіл температурних показників у регіоні досліджень (рис. 7) дає змогу дійти висновку щодо мінімального впливу температурних стресів за період спостережень і, таким чином, сконцентруватися на впливах, викликаних змінами водного режиму (рис. 8). Звичайно, вплив варіацій температури на екосистеми за весь період вегетації ні в якому разі виключати не можна, як і довгочасові тренди зміни температури. Проте вплив короткочасових змін температури в межах поставленої задачі можна не враховувати, зважаючи на наведені дані та короткий період зйомки. Розподіл показників середньомісячних опадів

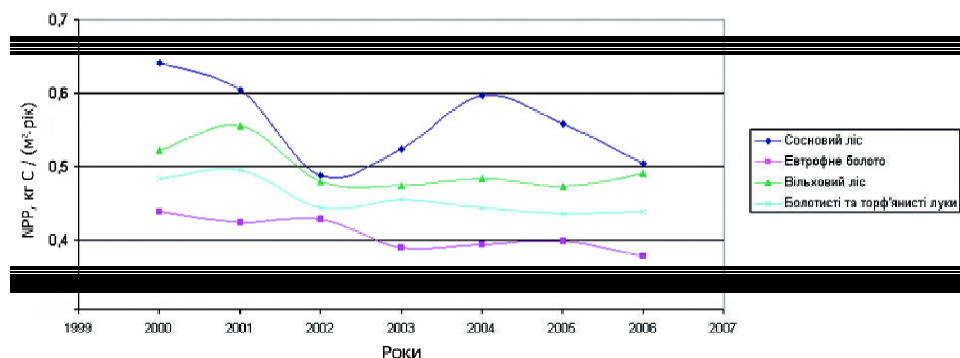


Рис. 6. Зміна продуктивності різних типів рослинного покриття Волинської обл. з 2000 по 2006 р.

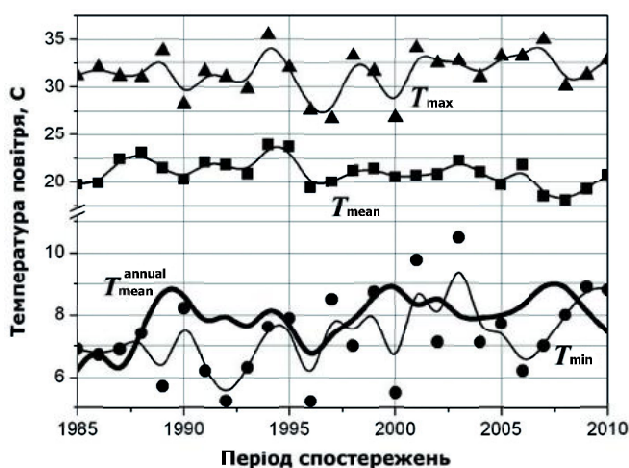


Рис. 7. T_{mean} – середньомісячні (липень); $T_{\text{mean}}^{\text{annual}}$ – середньорічні; T_{max} – максимальні; T_{min} – мінімальні. Показники температури повітря в регіоні досліджень на період 1985–2010 рр., зареєстровані у липні

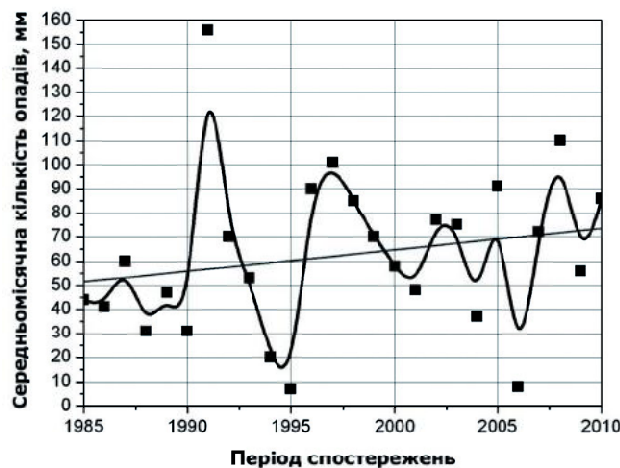


Рис. 8. Середньомісячна (липень) кількість опадів у регіоні досліджень на період 1985–2010 рр.

(рис. 8) підтверджує переважний вплив змін водного режиму. Середня кількість опадів у липні в регіоні за період 1985–2010 рр. зросла на 22 мм (тобто понад 25 % від середніх за період показників), з 51 до 73 мм.

Розрахунок довгострокових ризиків. Урахування даних змін кліматичних та екологічних факторів є важливим елементом у розрахунку довгострокових ризиків. У загальному випадку задача контролю гідрологічних і гідрогеологічних ризиків (зокрема, підтоплення та заболочування) у довгостроковій перспективі за допомогою дистанційних методів моніторингу може бути зведеною до визначення методики аналізу набору індикаторів стану земної поверхні. А для оцінки довгострокового ризику можна використати формулу, яка враховує розподіли важливих факторів впливу [10] та в цілому відповідає загальному підходу для оцінки соціоекологічних ризиків [11]:

$$R^L(t) = \sum_{n \in N} \sum_{j \in \mathfrak{Z}} P_n(t, Q_n) P(Q_n / Q_j) F(Q_j). \quad (5)$$

Тут Q_j – відомі (розраховані, відповідно до прогнозних моделей [12]) фактори впливу з множини $j \in \mathfrak{Z}$, що пов'язані з довгостроковими кліма-

тичними та екологічними змінами; $F(Q_j)$ – прогнозований (розрахований за відповідними сценарними моделями або за рівняннями (3), (4)) розподіл частоти та інтенсивності довгострокових впливів.

Рівняння (5) описує ризик настання наслідків, які можна інтерпретувати як негативні (наприклад, зниження біологічної продуктивності екосистем, зміну площ та видів рослинного покриття тощо) за відомих розподілів довгострокових екологічних і кліматичних змін [13]. Це рівняння дає змогу оцінити вплив довгострокової компоненти гідрологічних і гідрогеологічних ризиків, які генеруються впливом кліматичних змін, та пов'язаних з ними змін екосистем.

Крім того, важливим результатом є можливість використання отриманих даних для верифікації та уточнення на регіональному масштабі глобальних кліматичних моделей та сценаріїв кліматичних змін [12, 14, 15].

Висновки. У статті показано, що для контролю гідрологічних і гідрогеологічних ризиків (зокрема, підтоплення та заболочування) у довгостроковій перспективі за допомогою дистанційних методів моніторингу досить важливим може бути

моніторинг індикаторів стану земної поверхні. Результати досліджень продуктивності рослинного покриву території Волинської області на основі даних ДЗЗ та відстеження міжрічної динаміки показали значну залежність стану рослинного покриву від погодних умов. Характер розподілу продуктивності рослинності узгоджується з розподілом типів рослинного покриву на території дослідження. Продуктивність лісів значною мірою залежить від погодних умов, і для них важко виділити чітку динаміку внаслідок досить короткого періоду спостереження. Разом з тим болота і заболочені території мають чітку динаміку поступового незначного зниження продуктивності, що може бути результатом процесів підтоплення. Це також підтверджується даними зростання кількості опадів у регіоні дослідження протягом періоду спостережень. Врахування зазначеного фактора може певною мірою покращити розрахунок довгострокових гідрологічних і гідрогеологічних ризиків.

1. Костюченко Ю.В., Ющенко М.В., Білоус Ю.Г. Модування базових тенденцій формування та розвитку надзвичайних ситуацій гідрологічного характеру // Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування / За ред. В.І. Лялько, М.І. Попова. — К.: Наук думка, 2006. — С. 120–143.
2. Rodriguez-Iturbe I., Entekhabi D., Bras R.L. Nonlinear dynamics of soil moisture at climate scales: 1. Stochastic analysis // Water Resources Res. — 1991. — № 27(8). — P. 1899–1906.
3. Vudiko M.I. Climate and Life. — New York: Elsevier, 1974. — 508 p.
4. Экосистемы в критических состояниях / Под ред. Ю.Г. Пузаченко. — М.: Наука, 1989. — 155 с.
5. Емельянов А.Г. Подтопление как физико-географический процесс // Влияние Иваньковского водохрани-

лища на природу прилегающих территорий. — Калинин, 1975. — С. 5–16.

6. Мовчан Д.М. Возможности использования данных спутниковых зйомок MODIS для оцінки продуктивності різних видів рослинності та оцінки потоків CO₂ в системі рослинність — атмосфера (на прикладі території України) // Доп. НАН України. — 2008. — № 8. — С. 108 — 112.
7. User's Guide GPP and NPP (MOD17A2/A3) Products. Version 2.0 — MODIS Land Team, 2003. — 57 p.
8. Гідрометеорологічний інформаційний сервер [Електрон. ресурс]. — Режим доступу: <http://www.weatheronline.co.uk> — Weather Online UK.
9. Національний атлас України / Гол. ред. Л. Г. Руденко. — К: ДНВП “Картографія”, 2008. — 440 с.
10. Ermoliev Y. Stochastic quasigradient methods: Applications // Encyclopedia of Optimization / Eds C. Floudas, P. Pardalos. — New York: Springer Verlag, 2009. — P. 3801–3807.
11. Елохин А.Н., Бодриков О.В., Ульянов С.В. Методология комплексной оценки природных и техногенных рисков для населения регионов России // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. — 1996. — № 3. — С. 3–10.
12. Climate Change. The Scientific Basis. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. — UNEP, WMO, 2001.
13. Kostyuchenko Y.V., Bilous Y. Long-Term Forecasting of Natural Disasters Under Projected Climate Changes in Ukraine // Regional Aspects of Climate-Terrestrial-Hydrologic Interactions in Non-boreal Eastern Europe / Eds P. Ya. Groisman, S.V. Ivanov. — Dordrecht, The Netherlands: Springer, NATO Publ. Diplomacy Division, 2009. — P. 95–102.
14. Jones R.G., Murphy J.M., Noguer M. Simulation of climate change over Europe using nested regional climate model. I: Assessment of control climate, including sensitivity to location of lateral boundaries // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. — 1996. — 77. — P. 1413–1449.
15. Anthes R.A., Hsieh E.Y., Kuo Y.H. Description of the Penn State/NCAR Mesoscale Model Version4(MM4) // NCAR Techn. Note, NCAR/TN–282+STR, Natl Cent. for Atmos. Res. — Boulder, Colo., 1987. — 70 p.

Державна установа “Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України”, Київ, Україна

Надійшла до редакції 06.10.2011 р.

В.І. Лялько, Д.М. Мовчан, Ю.В. Костюченко, І.М. Копачевський

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИКИ РЕГИОНАЛЬНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ОСНОВАНИИ ДАННЫХ ДЗЗ С ЦЕЛЬЮ УЛУЧШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОЛГОСРОЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОЛОГО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИМИ РИСКАМИ

Рассмотрена роль растительного покрова в гидрологических и гидрогеологических процессах земной поверхности. Показана связь динамики параметров растительного покрова территории с возможными процессами подтопления и заболачивания. Произведены анализ и сравнение динамики продуктивности отдельных типов растительного покрова Волынской области за период с 2000 по 2006 г. Сделан вывод о возможности применения полученных данных для улучшения расчетов долгосрочных гидрологических и гидрогеологических рисков.

Ключевые слова: процессы подтопления, гидролого-гидрогеологические риски, растительный покров, вегетационные индексы, дистанционное зондирование.

V.I. Lyalko, D.M. Movchan, Yu.V. Kostyuchenko, I.M. Kopachevsky

**PARAMETERS CONTROL OF REGIONAL VEGETATION DYNAMICS BY REMOTE SENSING
TO IMPROVE LONG-TERM MANAGEMENT EFFECTIVENESS
OF HYDROLOGICAL AND HYDROGEOLOGICAL RISKS**

Considered in the paper is a role of vegetative cover in hydrological and hydrogeological processes of the Earth surface. Shown in the article is a relationship between vegetation parameters dynamics and possible flooding and waterlogging processes. We carried out an analyses and comparison of defined vegetation types dynamic in Volynsk region from 2000 to 2006, and concluded that the received data can be applied for improvement of long-term hydrological and hydrogeological risks assessment.

Keywords: flooding processes, hydrological and hydrogeological risks, vegetation, vegetation indexes, remote sensing.