

УДК 631.67:528.88 (15)

## УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ПРОСТОРОВОГО ОЦІНЮВАННЯ ВОДНО-ЕКОЛОГІЧНИХ ТА ЕКОЛОГО-МЕЛІОРАТИВНИХ СИТУАЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ

А.М. ШЕВЧЕНКО, канд. с.-г. наук,

О.В. ВЛАСОВА, канд. с.-г. наук

ІНСТИТУТ ВОДНИХ ПРОБЛЕМ І МЕЛІОРАЦІЇ НААН

*Розглянуто напрями удосконалення системи просторового оцінювання водно-екологічних та еколого-меліоративних ситуацій за рахунок запропонованих методів, методик і технологій, що базуються на застосуванні супутникової інформації певної категорії.*

**Ключові слова:** система просторового оцінювання, водно-екологічні та еколого-меліоративні ситуації, радіаційний баланс водних мас, вологозапаси, моніторинг засолення ґрунтів, індекс-показники

**Постановка питання.** Просторове оцінювання водно-екологічних та еколого-меліоративних ситуацій, тобто прояву, насамперед, несприятливих процесів у ході використання вод, або явищ природного характеру, пов'язаних із дією водного чинника, ґрунтується на визначенні інтегральної характеристики стану окремих складових довілля, зокрема стану водних і земельних ресурсів. Складові інтегральних показників можна визначати за даними наземних спостережень, за статистичною і нормативною інформацією та просторово розподіленими супутниковими даними. Використання саме супутникових даних різного просторового розрізнення, як оперативного джерела інформації з одночасним охопленням значних за площею ділянок, у тому числі у важкодоступних місцях, є актуальним на сьогодні і дає змогу удосконалити систему просторового оцінювання водоресурсного потенціалу, ризику або фактичного прояву небезпечних екологічних ситуацій, значно підвищивши інформативність наземних досліджень.

**Метою роботи** є удосконалення системи просторового оцінювання водно-екологічних та еколого-меліоративних ситуацій за рахунок запропонованих методів, методик і технологій, що дають змогу перетворювати супутникові і допоміжні дані з подальшим аналізом стану водних об'єктів і меліорованих земель. Запропоновані методи, методики і технології базуються на застосуванні супутникової інформації певної категорії. При цьому трактуються вони, за визначенням О.А. Войнова [1], так:

– метод – процедура перетворення супутникових і допоміжних даних з метою виконання конкретної операції;

– методика – сукупність взаємопов'язаних методів для отримання з супутникових і допоміжних даних необхідної інформації про характеристики природних та антропогенних об'єктів або процесів;

– технологія (інформаційна) – це методика обробки, що забезпечує отримання інформації про характеристики природних та антропогенних об'єктів і процесів у заданій формі, яка зорієнтована на певні технічні засоби та організаційно і технічно пристосована до оперативної або епізодичної практики використання супутникової інформації.

Необхідна супутникова інформація для удосконалення системи просторового оцінювання складається з таких категорій:

«а» – для системи спостережень за процесами, що досліджуються на великих за розмірами територіях (регіонів, басейнів тощо) – супутникова інформація низької розрізняльної здатності, зокрема NOAA (250-1100 м) з циклом відвідування супутником певної території протягом доби;

«б» – для оцінювання стану водних об'єктів і територій зрошення, затоплення, підтоплення, класифікації земної поверхні, розрахунків вегетаційних індексів, відбивної здатності, температури земної поверхні на невеликих за розміром територіях – мультиспектральні супутникові дані та композити від супутникових систем високої розрізняльної здатності, зокрема Landsat 7 (30 м) з циклом відвідування 16 діб, Сіс-2 (7,8 м);

«в» – для розрізнення невеликих за розміром об'єктів на земній поверхні, визначення фактичних площ зрошення, просторового розподілу вологості верхнього шару ґрунту, площ підтоплення та затоплення – інформація високої розрізняльної здатності, що отримується з панхроматичних знімків, зокрема EarthSat (14,5 м), Landsat 8 (15 м).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Удосконалення системи та методично-технологічного забезпечення базувалось на дослідженнях зарубіжних і вітчизняних науковців з оцінювання стану водних і земельних ресурсів на основі використання дистанційного зондування Землі. Питанню оцінки стану водних об'єктів присвячено роботи R.D. Jackson, 1981; J. Jensen, 2000; О.О. Мазуркевича та В.В. Серенка, 2002; Г.Я. Красовського, 2003 та ін., які дали поштовх до розробки в Інституті водних проблем і меліорації НААН (ІВПіМ) методичного підходу щодо визначення показників екологічного стану водосховищ та великих річок за елементами радіаційного балансу водних об'єктів на основі сучасних супутникових технологій [2]. У подальшому ця робота стала базовою методичною основою оцінки водно-екологічних ситуацій з використанням супутникових даних.

Просторове оцінювання еколого-меліоративних ситуацій за супутниковими даними ґрунтується на

встановленні емпіричних (спектральні індекси) і біофізичних показників (свапотранспірація, волога, альbedo тощо) для визначення вологозапасів у межах поля або зрошувальних систем, ідентифікації поливних земель та оцінки якості виконання поливів, виявлення процесів вторинного засолення ґрунтів, їхнього перезволоження тощо. Перші дослідження з цих актуальних питань проводили Jackson та Menenti з колегами [3, 4]. Ними були використані дані з американського супутника Landsat для побудови карт ідентифікованих культур та дефіциту вологи. Їхні роботи продовжили W.G.M. Bastiaanssen і G.J. Roerink [5, 6]. Поєднанню двох різних методів (емпіричного і біофізичного) з використанням мультиспектральних супутникових даних для визначення стану культур безпосередньо перед вегетацією і протягом вегетаційного періоду присвячена робота Al-Khaier [7]. Продовженням цих і багатьох інших робіт стала розробка в ІВПіМ методичного підходу до оцінювання еколого-меліоративних ситуацій за супутниковими даними [8].

Викладені нижче методологічні наробки умовно диференційовані за двома видами просторового оцінювання: водно-екологічних (оцінювання стану водних об'єктів) та еколого-меліоративних ситуацій (оцінювання стану земельних ресурсів, насамперед на меліорованих угіддях), кожний з яких спирається на певні методи, методики, категорії супутникової інформації (рис.1).

**Методики та результати досліджень.** Методика просторового оцінювання водно-екологічних ситуацій ґрунтується на визначенні складових радіаційного балансу водних мас за даними знімків високого

просторового розрізнення супутників Landsat та ASTER. Вона відпрацьована на прикладі Канівського водосховища та Молочного лиману. Оцінювати водні об'єкти нами запропоновано за складовими рівняння радіаційного балансу водних мас. Сумарна радіація водної товщі  $L_t$  є функцією електромагнітної радіації, має чотири складові і визначається за формулою [9]:

$$L_t = L_p + L_s + L_v + L_b, \quad (1)$$

де:  $L_p$  – сума сонячної радіації та атмосферного випромінювання;  $L_s$  – радіація, що доходить до водної поверхні, проникає у надтонкий міліметровий шар і відбивається від поверхні;  $L_v$  – радіація, що проникає у повітряно-водне середовище, взаємодіє з органічними (або неорганічними) включеннями і забезпечує інформацію про характеристики водної маси водойми;  $L_b$  – радіація, що доходить до нижньої водної границі, розповсюджується, відбивається від дна і крізь товщу води виходить на поверхню.

Оскільки першою складовою рівняння (1) є вплив атмосфери, нами запропоновано виконувати атмосферну корекцію супутникового знімка за алгоритмом, що містить такі кроки: отримання даних заголовкового файлу, аналіз даних, побудова моделі, або отримання знімка з мінімальним відсотком хмарності.

За другою складовою у ході апробації методики проведено класифікацію водної поверхні за методом максимальної подібності на прикладі Канівського водосховища. Виявлено місця заростання мілководь і підраховано коливання площі водного дзеркала в літню межінь та осінній період 2011 – 2012 рр.



Рис. 1. Алгоритм удосконалення системи просторового оцінювання водно-екологічних та еколого-меліоративних ситуацій з використанням супутникових даних

Встановлено, що значення показника стану рослинного покриву, які близькі до -0,5, характерні для мілководних ділянок водойм з глибинами 0–1,0 м, значення від 0,5 і вище є ознакою заростання водойм макрофітами (крупними багатоклітинними водоростями). При дослідженні процесу евтрофікації побудовано карту ізоліній переформування берегів станом на 2004 і 2012 рр. За результатами досліджень визначено середньорічну та сезонну динаміку коливання площі водного дзеркала водосховища, а також підтверджено наявність тенденції її зменшення в середньому на 13 км<sup>2</sup> за період з 2004 р. по 2012 р.

За третьою складовою рівняння (1) на прикладі Молочного лиману визначено відбиття граничного шару води та приповерхневих мас і проведено класифікацію завислих часток неорганічного походження, що акумулюють розчинну сіль з підвищенням температурного режиму. Було встановлено, що із зменшенням площі водного дзеркала лиману спостерігалось збільшення солоності води на 0,05–0,06 г/дм<sup>3</sup>. На об'єкті проведено аналіз рядів динаміки результатів тематично-аналітичної обробки супутникових даних. Часовий порядок  $y = f(t) + \epsilon_t$  складається з систематичної функції часу  $f(t)$ , для якої в ІВПІМ створено базу з 39 супутникових знімків Landsat 5, Landsat 7 за таким сезонним рядом: червень-серпень 2009 р., червень-серпень 2010 р., липень-серпень 2011 р., квітень-серпень 2013 р., квітень-червень 2014 р. На кожну дату отриманого ряду розраховано температуру поверхні та площу водного дзеркала лиману. Аналіз отриманих результатів показав, що за умов невисоких температур поверхні лиману (до 34,5 °С) площа водного дзеркала виокремленого гідроландшафту сягала максимуму 134,3 км<sup>2</sup> у 2010 р., а відповідно і максимальна концентрація солі у воді становила 23,4 г/дм<sup>3</sup>. З підвищенням температури поверхні до 38,8 °С (2014 р.) площа водного дзеркала зменшилася до 108,5 км<sup>2</sup>, а концентрація солі у воді збільшилася до 40–50 г/дм<sup>3</sup>. Проведена на основі супутникової інформації класифікація завислих часток неорганічного походження, що акумулюють розчинну сіль з підвищенням температурного режиму, та визначення концентрації солі у воді по всій акваторії лиману дали змогу перейти від значень показника в окремих пунктах спостережень до його просторового розподілу.

Просторове оцінювання еколого-меліоративних ситуацій має такі складові: методичні підходи з оцінювання наявних вологозапасів та методичні підходи з оцінювання ґрунтово-екологічних ситуацій. Оцінювати зміни вологозапасів  $\Delta V$  [10] запропоновано за методом визначення їх динаміки за формулою:

$$\Delta V = P + I - q - (R_n - G_0 - H) / \Lambda, \quad (2)$$

де  $P$  – опади,  $I$  – водоподача на зрошення,  $q$  – інфільтрація (перетік у ґрунті),  $R_n$  – чиста радіація (миттєва радіація),  $G_0$  – тепловий потік (теплообмін) у ґрунті,  $H$  – видимий тепловий потік,  $\Lambda$  – випаровування з ґрунту.

Метод апробовано для умов зрошення на пілотній території ДП «Дослідне господарство «Асканійське» Каховського району Херсонської області із застосуванням мультиспектральних даних супутників Landsat 5, Landsat 7 (2008, 2011 рр.). Результати отримано шляхом обчислення функції приналежності методу багатокритеріальної оптимізації (системний аналіз) із зведенням розв'язання задачі до субоптимального. На основі площ виділених зволжених ділянок була обчислена функція  $F_{pixel}$ , що характеризує поливну норму. У ході аналізу було встановлено, які саме пікселі чорні (вологі) чи білі (сухі) складають вилиту на поле норму. Карта наявних водних запасів дала відповідь на питання, чи дотримано строки і норми поливу.

Для характеристики еколого-меліоративних ситуацій також запропоновано такі методики:

– оцінювання наявних запасів вологи за спектральними індексами, що ґрунтується на визначенні та застосуванні емпіричних показників, до яких належать спектральні індекси;

– оцінювання ефективності роботи зрошувальної системи у часі за індексом-показником динаміки зрошення  $I_p$ , яке ґрунтується на твердженні, що результат роботи зрошувальної системи є додатковим водним навантаженням на територію ділянок зі зміненими умовами природного зволоження, зокрема фактично политих земель. Запропонована методика передбачає визначення індекса-показника динаміки зрошення  $I_p$ , що дає можливість оцінити ефективність роботи зрошувальної системи у часі. Індекс розраховується як відношення фактично политої площі  $F_A$ , га (визначається за супутниковими даними) до площі зрошуваних земель  $F_{ir}$ , га за запропонованою формулою:

$$I_p = F_A / F_{ir}; \quad (3)$$

– оцінювання ефективності роботи дощувальної техніки за індексом-показником  $F_{NDWI}$ , який передбачає, що фактична площа политих земель на певний момент  $F_{NDWI}$  визначається через карту нормалізованого різницевого індексу зволоженості NDWI. Індекс-показник ефективності роботи дощувальної техніки розраховується за запропонованою формулою:

$$I_{NDWI} = F_{NDWI} / F_{ir}; \quad (4)$$

– оцінювання ефективності захисту земель від підтоплення за індексом-показником  $I_{NDWI}$ , що розраховується як відношення площі просторового розподілу вологості верхнього шару ґрунту  $F_{NDWI}$ , га (результат ефективної роботи дренажної системи) до площі дренажної системи  $F_{dr}$ , га за запропонованою формулою:

$$I_{NDWI} = F_{NDWI} / F_{dr}; \quad (5)$$

Оцінювання еколого-меліоративних ситуацій, зокрема розвитку ґрунтово-екологічних процесів з використанням супутникової інформації, включає проведення моніторингу засолення ґрунтів. У да-

ному контексті нами розроблено методичні підходи до ідентифікації засолених ґрунтів, виявлення закономірностей просторово-часової динаміки їх стану, ступеня засолення, визначення просторової – площинної та вертикальної мінливості наявних солей у профілі ґрунтів та їх картографічного моделювання за супутниковою інформацією [11, 12]. За методикою виявлення змін у засолених ґрунтах, що ґрунтується на порівнянні класифікованих ділянок ґрунту різного ступеня засолення, було визначено, що за двадцять років на землях Каланчацького зрошувального масиву Херсонської області відбулося збільшення площі незасоленних земель і зменшення площі середньо- та сильнозасоленних земель, що підтверджується зйомками засоленних ґрунтів, здійсненими Каховською гідрогеолого-меліоративною експедицією. Для ідентифікації солончаків, соляної кірки та ґрунтів різного ступеня засолення на зрошуваних землях запропоновано використовувати метод спектральних сигнатур, що ґрунтується на визначенні та візуалізації взаємозв'язку між довжиною хвилі електромагнітного випромінювання і відбиттям поверхні.

Для оцінювання стану приповерхневого шару ґрунту на територіях зрошення розроблено методику, яка ґрунтується на використанні спектральних індексів: нормалізованого диференційного вегетаційного індексу (NDVI) та індексу засолення ґрунтів (SSI) і зіставленні їх з наземною інформацією. Визначено, що індекс засолення ґрунтів SSI найбільш точно ідентифікує наявність солей у приповерхневому шарі, що підтверджено співставленням карт засолення ґрунту у різних шарах 0,00-0,25 м, 0,25-0,50 м і 0,0-1,0 м та карти SSI.

Для оброблення великої кількості просторово розподіленої супутникової інформації в ІВПіМ розроблено програмний продукт «Автоматизація процесу оцінювання вегетаційних індексів», в якому виконується регресійний і кореляційний аналіз супутникової інформації. Після організації бази композитних даних було проведено їх кореляційний аналіз при оцінюванні водозабезпеченості територій за трьома показниками: біомаса (NDVI), волога (VCI), температура (TCI) для територій Херсонської і Запорізької областей та територій Каховської, Північно-Рогачицької зрошувальних систем (ЗС) за 2005-2014 рр. За результатами проведеного аналізу композитних даних за їх величиною найбільш тісний кореляційний зв'язок (позитивна кореляція) виявлено між біомасою та температурою, коефіцієнт кореляції яких становить для досліджуваних територій: Запорізька обл. – 0,891, Херсонська обл. – 0,945, Північно-Рогачицька ЗС – 0,908, Каховська ЗС – 0,917. Обернений зв'язок (від'ємна кореляція) виявлено між вологою і температурою: Запорізька обл. – 0,061, Херсонська обл. – 0,553, Північно-Рогачицька ЗС – 0,043 та непряма кореляція – 0,334 – Каховська ЗС.

Для вирішення питання поєднання результатів оцінювання об'єктів за супутниковою та наземною інформацією в ІВПіМ запропоновано індекс багатокритеріальної оцінки  $I_{\text{BO}}$  на основі єдиної

еталонної шкали. Індекс протестовано для території Херсонської області (2005-2013 рр.) за показниками, що визначалися за супутниковими даними: NDVI – коефіцієнт, TCI – температура (°C), VCI – %НВ. Розрахунки підтверджено проведеними аналізами регресії та кореляції за той самий інтервал часу і на тій самій території. Таким чином, замість трьох показників маємо один.

**Висновки.** Ефективним засобом підвищення рівня інформативності наземних досліджень щодо просторового оцінювання водно-екологічних та еколого-меліоративних ситуацій є застосування супутникової інформації. Оцінювання водних об'єктів за супутниковими даними доцільно здійснювати за їх радіаційним балансом, а складові сумарної радіації водної товщі слід визначати за мультиспектральними супутниковими даними. Визначені складові можуть використовуватись як окремі показники екологічного стану поверхневих вод (евтрофікація; накопичення осадів; забруднення вод; зони різної концентрації суспензій, що сприяють переносу солей; ділянки мілководь за глибиною, їх заростання; твердий стік) при розробці системи заходів з його поліпшення. Оцінювання водоресурсних та еколого-меліоративних ситуацій (наявність вологозапасів у межах поля, ідентифікація политих земель та оцінка якості виконання поливів, виявлення процесів перезволоження та вторинного засолення ґрунтів) за супутниковими даними доцільно здійснювати за емпіричними (спектральні індекси) і біофізичними показниками (евапотранспірація, волога, альbedo тощо).

**Бібліографія**

1. Войнов О.А. Мониторинг состояния агроценозов аэрокосмическими методами / О.А. Войнов. – К.: [Ін-т телекомунікацій і глоб. інформ. пространства]. – 2005. – 392 с.: ил. – Библиогр.: с. 369–390.
2. Шевченко А.М. Методичні засади оцінювання стану водних об'єктів за радіаційним балансом / А.М. Шевченко, О.В. Власова, Р.П. Боженко // Меліорація і водне господарство. – 2013. – Вип. 100. – С. 143–151.
3. Jackson R.D. Canopy temperature as a crop water stress indicator, *Water Resources Research* / R.D. Jackson, S.B. Idso, R.J. Reginato, P.J. Pinter. – 1981. – 17: – P. 1133–1138.
4. Menenti M. Appraisal of irrigation performance with satellite data and georeferenced information / M. Menenti, T.N. Visser, J.A. Morabito, A. Drovandi // *Irrigation theory and practice, Proc. Of the Int. Conf., Institute of irrigation studies, Southampton, 12–15 September*; – 1989. – P. 785–801. Pentech Press, London.
5. Bastiaanssen W.G.M. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates / Ph.D. Thesis, Landbouw Universiteit, Wageningen, The Netherlands. – 1995.
6. Roerink G.J. S-SEBI: A Simple Remote Sensing Algorithm to Estimate the Surface Energy Balance / G.J. Roerink, Su Z. et al. // *Phys. Chem. Earth (B)*, – 2000, Vol. 25, No 2, – P. 147–157.
7. Al-Khaier. Soil salinity detection using satellite remote sensing / Thesis. International institute for geo-information science and earth observation Enschede, The Netherlands. – 2003. 70 p.
8. Власова О.В. Інформаційне забезпечення планування зрошення за просторово розподіленими даними / О.В. Власова // *Таврійський науковий вісник: Збірник наукових праць*. – 2007. – Вип. 51. – Херсон: Айлант. – С. 40–46.
9. Jensen J. *Remote Sensing of Water*. Geography University of South Carolina Columbia / J. Jensen. – 2000. – № 11. – P. 1–34.
10. Мультидисциплінарний аналіз аерокосмічної і наземної інформації при оцінці стану водних екосистем на основі методів системного аналізу / О.Д. Федоровський, А.М. Шевченко, О.В. Власова [та ін.] // *Український журнал дистанційного зондування Землі*. – 7 (2015). – С. 27–42.
11. Шевченко А.М. Розвиток методичних засад оцінювання стану засоленних земель у межах зрошувальних систем за супутниковими даними / А.М. Шевченко, О.В. Власова, М.П. Рябцев // *Меліорація і водне господарство*. – 2015. – Вип. 102. – С. 59–62.
12. Власова О.В. Методика виявлення змін у засоленних ґрунтах за супутниковими даними / О.В. Власова, А.М. Шевченко // *Збірник наукових праць ННЦ «Інститут землеробства НААН»*. – Вип. 2, – 2015. – С. 42–46.

**А.Н. Шевченко, Е.В. Власова****Усовершенствование системы пространственной оценки водно-экологических и эколого-мелиоративных ситуаций с использованием спутниковых данных**

Рассмотрено пути усовершенствования системы пространственной оценки водно-экологических и эколого-мелиоративных ситуаций за счет предложенных методов, методик и технологий, в основу которых положено использование спутниковых данных определенных категорий.

**A.M. Shevchenko, O.V. Vlasova****The system of spatial estimation water-ecological and ecological-land reclamation situation by remote sensing are advanced**

It has been studied an advanced system of spatial estimation water-ecological and ecological-land reclamation situations using the proposed methods, techniques and technologies, which are based on the use of satellite data of certain categories.