

УДК 637.67:63:002

## МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА РАДІАЦІЙНИМ БАЛАНСОМ

---

А.М. ШЕВЧЕНКО, О.В. ВЛАСОВА, Р.П. БОЖЕНКО

Інститут водних проблем і меліорації НААН

*Запропоновано методичний підхід до визначення показників екологічного стану водосховищ та великих річок на основі сучасних супутникових технологій.*

**Ключові слова:** сумарна радіація водної товщі, атмосферна корекція, альbedo поверхні, радіація приповерхневих мас, основні компоненти глибини

**Стан проблеми.** Створення та функціонування Дніпровського каскаду водосховищ, крім позитивних наслідків, спричинило низку негативних явищ, які потребують і будуть потребувати значної уваги та заходів щодо мінімізації їхнього прояву. З-поміж них слід відмітити затоплення великої території, підтоплення прилеглих земель, розмив (абразію) берегів, «цвітіння води» тощо.

Крім того, ще з перших років створення Дніпровського каскаду у верхів'ях його водосховищ почалося заростання мілководних (гли-

© А.М. Шевченко, О.В. Власова, Р.П. Боженко, 2013  
Меліорація і водне господарство. 2013. Вип. 100

бина до 2 м) зон і формування дельтоподібних ландшафтів. Трансформація ландшафтів навколо великих штучних водойм є процесом неминучим. Причиною цього є мілководдя і зниження швидкостей течії води до рівнів, за яких відбувається інтенсивне формування мулових відкладів.

Постійні коливання температури та вітрові хвилеутворення впливають на вміст кисню у водоймах. Інтенсифікуються також процеси евтрофікації водойм, що у сукупності погіршує якість води.

Для вирішення такого широкого кола завдань з оцінювання водних об'єктів пропонується безліч розроблених вітчизняних та закордонних моделей, що працюють у найсучасніших програмних комплексах і використовують супутникові та наземні дані. Використання методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) дає змогу оперативно і з достатньою достовірністю отримувати об'єктивну інформацію про екологічний стан об'єкта та здійснювати його моніторинг як для вибору заходів, так і для контролю ефективності їхнього проведення. Нині такий сервіс є доступним за невисокою ціною і розповсюдженістю на відкритих веб-сайтах і тематичних серверах. Але чому ж тоді знову виникає потреба у розгляді питання моделювання гідроекологічної ситуації, і саме на дніпровському каскаді? По-перше, низка водосховищ є стратегічним запасом прісної води для країни. По-друге, немає постійно діючої гідроекологічної моделі для прогнозування негативних екологічних змін і прийняття управлінських рішень щодо поліпшення стану території басейну в цілому. І головне, відсутня методика оцінки самих водних мас каскаду на базі розвинутих світових технологій, визначення випаровування з водних поверхонь за сумарною радіацією.

**Виклад основного матеріалу.** Накопичений досвід показує, що за мультиспектральними супутниковими даними високого просторового розрізнення можна проводити моніторинг гідроморфологічних та гідробіологічних трансформацій водосховищ, сезонної динаміки змін площі водного дзеркала, розраховувати об'єм водосховищ, виявляти зміни контурів берегових ліній, мілководь, ділянок розмиву та акумуляції наносів, а за вузькоканалними супутниковими даними доцільно встановлювати глибини на мілководдях та визначати якість води (вміст неорганічних мінералів, органічного хлорофілу, розчинного органічного матеріалу) [1].

Таким чином, наразі склалися умови для розвитку методики з оцінювання водойм за їхнім радіаційним балансом. Ця методика за-

звичай застосовувалася для оцінювання стану водних мас морських заток, прибережних зон морів і морських вод невеликих глибин. При цьому використовувалися багатозональні супутникові дані невисокого розрізнення. Але з появою супутника Європейської Космічної Агенції ENVISAT (спектрометр MERIS) з'явилася можливість у видимому і температурному інфрачервоному діапазонах проводити розпізнавання розвитку шкідливих водоростей за концентрацією хлорофілу, завислих мінералів та розчинної органічної речовини у замулених водоймах. Алгоритм визначень ґрунтується на сумісному застосуванні нейронної мережі та процедури багатомірної оптимізації, що дає змогу встановлювати параметри якості води з високою точністю, а також вирішувати завдання з виявлення фізичних і хімічних чинників, що впливають на водну біоту, з'ясовувати сезонну та середньорічну динаміку змін процесів на водній поверхні. Перелічене суттєво розширило можливості моделювання гідроекологічних ситуацій, а визначення радіаційного балансу водних мас набуло актуальності при оцінюванні водних ресурсів для їхнього інтегрованого управління.

Отже, розглянемо рівняння радіаційного балансу водних мас. Згідно з методикою [2] сумарна радіація водної товщі –  $L_t$ , що визначається за багатозональними супутниковими даними, є функцією електромагнітної радіації і має чотири складові:

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

де  $L_p$  – сума сонячної радіації ( $E_{sun}$ ) та атмосферного випромінювання ( $E_{sky}$ ) є **надлишковою радіацією**, що не доходить до водної поверхні;  $L_s$  – радіація, яка доходить до водної поверхні, проникає у надтонкий міліметровий шар і відбивається від поверхні, є **радіацією граничного шару** води. Ця відбита радіація містить спектральну інформацію про приповерхневі характеристики води;  $L_v$  – радіація, що проникає у повітряно-водне середовище, взаємодіє з органічними (або неорганічними) включеннями і забезпечує інформацію про характеристики водної маси водойми, є **радіацією підповерхневих мас**;  $L_b$  – радіація, яка доходить до нижньої водної границі, розповсюджується, відбивається від дна і крізь товщу води виходить на поверхню, є **донною радіацією**, що містить інформацію про глибину та колір води.

Таким чином, необхідно визначити такі складові радіаційного балансу водойм: атмосферну спрямовану радіацію, радіацію підповерхневих мас, відбиття радіації від дна водойми (рис. 1).

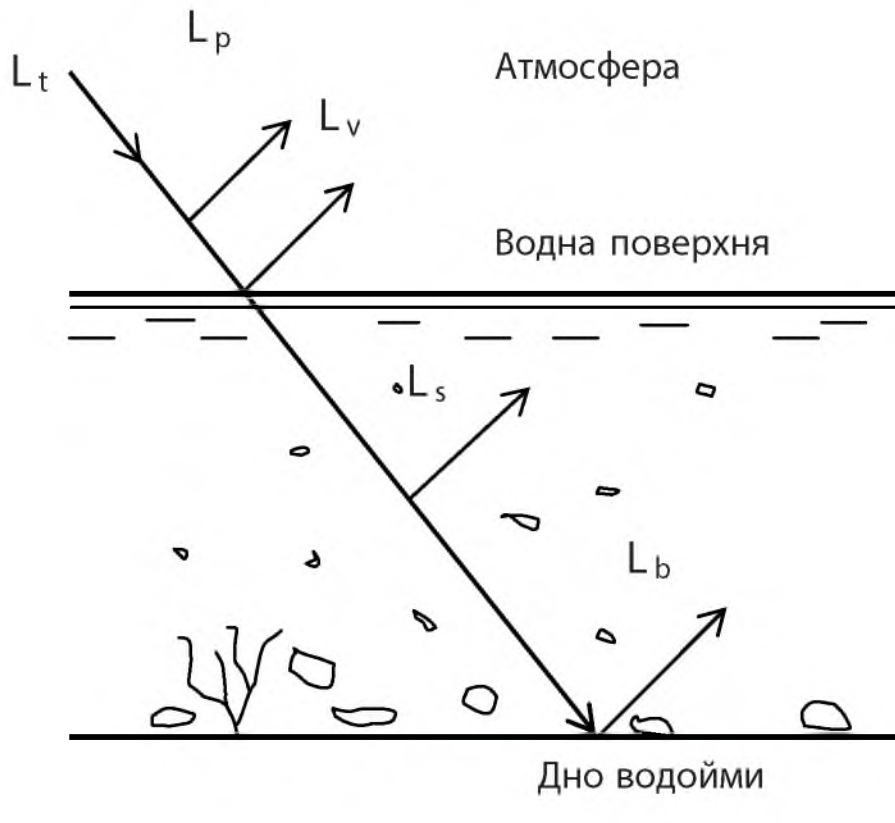


Рис. 1. Складові радіаційного балансу водойми

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

Розрахунок спектральної радіації для конвертації кожного мінімального значення  $DN$  (digital number) у значення супутникової радіації проводиться за формулою [3]:

$$L_{\lambda} = \frac{L_{\max \lambda} - L_{\min \lambda}}{Q_{cal \max} - Q_{cal \min}} \cdot (Q_{cal} - Q_{cal \min}) \cdot L_{\min \lambda}, \quad (2)$$

де значення  $L_{\max}$ ,  $L_{\min}$ ,  $Q_{cal \max}$ ,  $Q_{cal \min}$  беруть у заголовковому файлі супутникового знімка.

Теоретичне значення випромінювання «затіненого об'єкта» (тінь від хмар) знаходять за формулою:

$$L = \frac{0,01 \cdot ESUN \cdot \cos^2 Q}{\pi \cdot d^2}, \quad (3)$$

де  $d$  – відстань від Землі до Сонця в точці отримання знімка на момент зйомки;  $Q$  – зенітна відстань;  $ESUN$  – сонячна ексоатмосферна спектральна іррадіація.

Константу газової корекції для кожного каналу розраховують за формулою [3]:

$$L_{\text{haze}} = L_{\lambda} - L_s, \quad (4)$$

де  $L_{\lambda}$  – значення  $DN$  для кожного каналу, що представлено у вигляді супутникової радіації;  $L$  – теоретичне значення випромінювання для кожного каналу «затіненого об'єкта».

Розрахунок атмосфероскоригованих значень проводять за формулою:

$$V_{\text{value}} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot (DN - L_{\text{haze}})}{ESUN \cdot \cos^2 Q}, \quad (5)$$

де  $DN$  (digital numbers) – значення яскравості кожного пікселя знімка.

Для визначення другої складової у рівнянні (1) –  $L_s$ , необхідно виконати розрахунок атмосферної спрямованої радіації, коефіцієнта спектральної яскравості або розрахувати відбивну здатність від водної поверхні – альbedo. Альbedo – це відношення між відбитою поверхнею радіацією та сонячною радіацією, що надходить до поверхні. Альbedo характеризує частку сонячної енергії, яка поглинається поверхнею і перетворюється в наявне або приховане тепло (рис. 2), визначається у відсотках та становить: у штиль 60%, при хвилях 13%, розсіюванні світлом у верхньому шарі води 1–4%. Якщо відбивна здатність має лінійну залежність, це означає, що на поверхні води присутня замуленість, а наявність хлорофілу свідчить про первинну евтрофікацію води. Наявність хлорофілу визначається у видимому діапазоні 0,453 – 0,510  $\mu\text{m}$ .

Складова альbedo  $L_s$  є також відбиттям від об'єктів забруднення (нафтові плями, мазут та інші наслідки антропогенного впливу) на водній поверхні, що виділяються у інфрачервоному (ІЧ) тепловому діапазоні, і визначається з виразу (6) [4]:

$$r_{\text{surf}} = (r_{\text{toa}} - r_{\text{atm}}) / \tau_{\text{sw}}^2, \quad (6)$$

де  $r_{\text{toa}}$  – планетарне альbedo кожного каналу супутникового знімка;  $r_{\text{atm}}$  – відбивна здатність атмосфери, що визначається відповідно до теоретичних значень типів поверхні, або відповідно до температури;  $\tau_{\text{sw}}^2$  – двобічна атмосферна прозорість,  $\tau = 0,75 + 2 \cdot 10^{-5}$ .

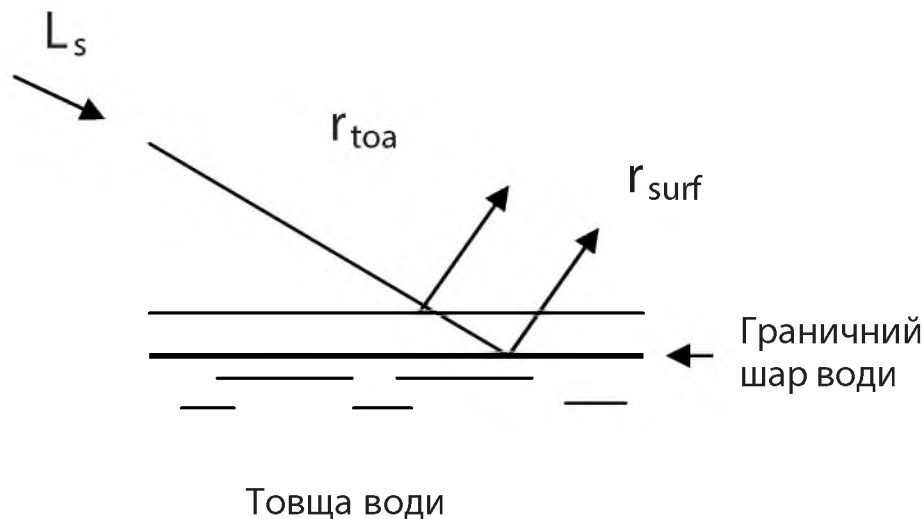


Рис. 2. Складові радіації, що надходить до граничного шару води

Розрахунок планетарного альбедо проводиться за формулою [4]:

$$r_{\text{toa}} = \pi L d^2 / K \downarrow \cos \varphi s, \quad (7)$$

де  $d$  – сонячно-земна відстань відповідно до Юліанського календаря ( $J$ );  $\varphi s$  – кут зеніту сонця;  $K \downarrow = SUN \lambda$  – короткохвильова радіація, що надходить до верхнього шару атмосфери.

Для визначення третьої складової у рівнянні (1)  $L_v$  – радіації приповерхневих мас – слід розглянути спектральне відбиття водного середовища як функцію органічних і неорганічних включень, що у сумі становить:

$$L_v = f[w_c, SM, Chl, DOM], \quad (8)$$

де  $w$  – концентрація чистої води;  $SM$  – вміст неорганічних мінералів;  $Chl$  – вміст органічного хлорофілу;  $DOM$  – розчинний органічний матеріал.

У діапазонах  $L_v$  – радіації розрізняють  $SM$ : кремній, алюміній, оксиди заліза, частки сумішей глини діаметром 3–4 мк, невеликі фракції піску 41–130 мк, грубий зернистий пісок 131–1250 мк, осад від сільськогосподарської діяльності, берегової ерозії, а також  $DOM$  (фітопланктон), який виробляє вуглекислий газ, неорганічний азот, сірку, фосфор. Молекулярне водне поглинання домінує в ультрафіолетовому та у жовтому діапазонах ( $< 0,40 \mu\text{m}$ ), а також в інфрачервоній смузі спектра ( $> 0,58 \mu\text{m}$ ). У ближньому і середньому інфрачервоних діапазонах ( $0,74\text{--}2,50 \mu\text{m}$ ) воно є несуттєвим. Розсіювання у товщі води відбувається у фіолетовому та синьому діапазонах ( $0,40\text{--}0,50 \mu\text{m}$ ).

Для визначення четвертої складової у рівнянні (1) –  $L_b$ , що відбивається від об'єктів на глибині та дає змогу встановлювати їхні форми і розміри, необхідні ближній інфрачервоний (БІ) і середній інфрачервоний (СІ) діапазони та відповідні їм канали на знімках. Розпізнавання земної поверхні крізь товщу води відбувається у діапазоні 0,74–2,50  $\mu\text{m}$ . У БІ- та СІ-діапазонах водні об'єкти виглядають темними, навіть чорними, оскільки вони поглинають найбільшу кількість радіації, особливо коли вода глибока і чиста та містить невеликий осад або органічний матеріал. Тут пропонується використовувати метод *виділення основних компонентів глибини*, що ґрунтується на виділенні експоненціального впливу глибини води у кожному пікселі з використанням математичних обмежень. Висока розподільна здатність знімків дає змогу визначити відносний коефіцієнт відбиття дна водойми та отримати карту відбиття дна у відповідних каналах.

Основною проблемою при картографуванні мілководь є присутність у воді різних завислих часток органічного та неорганічного походження, що заважають проникненню світла до дна водойми і реєстрації його відбиття. Для визначення ефекту відбиття дна водойми необхідним інтервалом спектра електромагнітного випромінювання є 0,30–0,70  $\mu\text{m}$ , що відповідає каналам видимого діапазону – 1 (відбиття матеріалів дна), 2 (ефект глибини), 3 (властивості поглинання та розсіювання молекулами води розчинних твердих речовин і завислих часток) – і розраховується за формулою [5]:

$$L_b = (e^{-2kz})L_{bm} + (1 - e^{-2kz})L_w, \quad (9)$$

де  $Z$  – глибина води;  $L_b$  – відбита від дна радіація;  $L_{bm}$  – радіація від вологого матеріалу при  $z = 0$  (мілина) дна;  $k$  – коефіцієнт затухання розповсюдження радіації у водній товщі;  $L_w$  – радіація товщі води.

Усі зазначені складові, окрім глибини, можуть змінюватися залежно від довжин хвиль випромінювання. Зі збільшенням глибини величина радіації зменшується. Коефіцієнт затухання  $k$  та радіація  $L_w$  перебувають під впливом поглинання і розсіювання товщі води. Коефіцієнт відбиття матеріалу дна є вимірюваною величиною і не залежить від умов освітлення.

Крім вище наведених, для забезпечення оцінювання водних мас водосховищ на базі розвинутих світових технологій може бути використана більш детальна супутникова інформація, зокрема гіпер-

спектральні знімки, повітряне лазерне сканування, інноваційні лідарні системи, сучасні системи-навігатори для ведення наземних спостережень, які нині дорого коштують, проте є ефективними та надійними.

**Результати та їхнє обговорення.** За даними дослідницького моніторингу 1992–2012 рр., який проведено за складовими сумарної радіації водної товщі Канівського водосховища, виявлено переформування гідроморфних ландшафтів під впливом акумуляції твердого стоку р. Дніпра.

Також встановлено, що багаторічні зміни площ заростання мілководь річкової ділянки водосховища пов'язані з фазами розвитку повітряно-водної та водної рослинності, з режимом наповнення і спрацювання водойми, потрапляння великої кількості біогенних елементів з водою Бортницької станції аерації та надходження біогенних речовин із Київського водосховища. За супутниковими даними простежено динаміку збільшення площ мілководь, що заростають та земельних ресурсів островів і намитих земель дачних масивів за 17 років, що становить понад 66 га щороку.

За розрахунком ухилів і побудовою ізоліній на супутникових знімках виявлено трансформацію берегової лінії – руйнування берегових схилів, утворення зсувів правобережжя водосховища, інтеграцію природного та антропогенного евтрофування в районі сс. Великий Букрин, Ходорів та ін. Протяжність ділянок інтегрованого природного і антропогенного евтрофування сягає понад 150 м. Розмив та акумуляція наносів в озероподібній ділянці водосховища призвели до зменшення площі водного дзеркала (без урахування площ водної поверхні заток) у середньому на 13 км<sup>2</sup> (за останні 10 років). Озероподібна ділянка водосховища відрізняється від пригребельної утворенням тимчасових придонних потоків і активнішим заростанням рослинністю. Питання встановлення сумарного випаровування з водної поверхні потребує окремого розгляду і проведення в цьому напрямі підсупутникових досліджень, що має значно розвинути пропоновану методику, яка ґрунтується на визначенні радіаційного балансу водних мас.

**Висновки.** Оцінювання водних об'єктів доцільно здійснювати за їхнім радіаційним балансом, а складові сумарної радіації слід визначати за вузькоканалними супутниковими даними. Визначені складові можуть використовуватися як окремі показники екологічного



стану поверхневих вод, що робить запропоновану методику гнучкою, актуальною та незамінною при розробці системи заходів з поліпшення екологічного стану водосховищ і великих річок.

Розроблена методика дає змогу вивчати і визначати вплив процесів транспортування твердого стоку та накопичення осадів на режим роботи водосховищ; визначати вид і склад промислового забруднення вод; виділяти ділянки «світлої» води і водні тіла, зони різної концентрації суспензій, ділянки мілководь за глибиною і властивостями дна; виділяти гелі – розчинені у воді органічні сполуки, що поглинають ультрафіолетові та блакитні діапазони спектра; виділяти твердий стік – тверді частки, що містяться у воді і сприяють розсіюванню світла в ній (глину, пісок, уламки кварцу та інших мінералів, кістяки планктону й інших організмів); виділяти хлорофіл, домішки неорганічних часток і суспензії, за якими визначається фітопланктон.

1. *Власова О.В.* Інформаційні технології відновлення водних ресурсів / О.В. Власова, С.Г. Бойко, Г.С. Фінін //Таврійський наук. вісн.: зб. наук. праць. – 2012. – Вип. 57.–Херсон: Айлант. – С. 72–78.

2. *Jensen J.* Remote Sensing of Water. Geography University of South Carolina Columbia / Jensen J. – 2000. – № 11. – P. 1–34.

3. *Liang S.* «Atmospheric Correction of Landsat ETM+ Land Surface Imagery: I. Methods», IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing / S. Liang, H. Fang, M. Chen. – Vol. 39. – P. 2490–2498, 2001.

4. *Roerink G.J.* 2000. S-SEBI: a simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. Phys. Chem. Earth (B) / G.J. Roerink, Z. Su, M. Menenti. – Vol. 25. – No.2: 147–157.

5. *Van Hengel W.* (1991). Multi-temporal water depth mapping by means of Landsat TM. International Journal of Remote Sensing / Van Hengel W., Spitzer D. – №12 (4). – P. 703–712.

*Изложен методический подход к определению показателей экологического состояния водохранилищ и больших рек на основе современных спутниковых технологий.*

*Methodical campaign to identify indicators of ecological status of reservoirs and large rivers using modern satellite technology are expounded.*