НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНА УСТАНОВА «НАУКОВИЙ ЦЕНТР АЕРОКОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗЕМЛІ ІНСТИТУТУ ГЕОЛОГІЧНИХ НАУК НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ»

ТОМЧЕНКО ОЛЬГА ВОЛОДИМИРІВНА

УДК 528.8:504.456:(517:556.56)(477-25)

ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ СТАНУ ВОДНО-БОЛОТНИХ УГІДЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ І НАЗЕМНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ (НА ПРИКЛАДІ ВЕРХІВ'Я КИЇВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА)

05.07.12 – Дистанційні аерокосмічні дослідження

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ-2015

Дисертацією є рукопис.
Робота виконана у Державній установі «Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України»

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор,
член-кореспондент НАН України,
Федоровський Олександр Дмитрович,
ДУ «Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України», завідувач відділу системного аналізу

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Бурачек Всеволод Германович,
Університет новітніх технологій в м. Києві,
проректор з науково-методичної роботи

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Томільцева Аліна Іванівна,
Український науково-дослідний інститут
водогосподарсько-екологічних проблем

Захист дисертації відбудеться 13 жовтня 2015 р. о 11^{00} годині на засіданні Спеціалізованої вченої ради Д 26.162.03 Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України» за адресою: Україна, 01601, м. Київ, вул. Олеся Гончара, 55-Б.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України» (Україна, 01601, м. Київ, вул. Олеся Гончара, 55-Б)

Автореферат розіслано 01 вересня 2015 р.

Секретар спеціалізованої
вченої ради Д 26.162.03
кандидат технічних наук А. О. Козлова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним із найбільших техногенних перетворень природи України у минулому столітті було гідротехнічне будівництво у долині Дніпра, в результаті якого на більш ніж 1000 км відрізку на місці заплавних та річкових ландшафтів виникли величезні акваторії водосховищ, площі яких сягали 100 – 200 тис. га. Зарегулювання Дніпра призвело до знищення цілої низки водно-болотних угідь (ВБУ), і знадобилося багато років, щоб на водосховищах сформувалися нові ландшафтні комплекси, що за структурою подібні природним та на сьогодні відіграють важливу роль у підтриманні біорізноманіття на національному та міжнародному рівнях.

Для оптимізації вирішення актуальних завдань щодо раціонального та екологічно обґрунтованого використання водних ресурсів дніпровського каскаду, підтримання належної якості води, збереження умов існування водної та коловодної біоти і підвищення ефективності екологічного моніторингу необхідним є використання сучасних методів отримання та оброблення інформації. Вирішення цих завдань неможливе без використання матеріалів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Вивчення та оброблення отриманих космічних знімків у поєднанні з окремими контрольними наземними вимірами відображають ретроспективу процесів і дають можливість оцінити динаміку змін, що відбуваються на водоймі, та її сучасний екологічний стан. Тільки на основі систематичної та оперативної інформації можна розробити відповідні рекомендації щодо екологічно обґрунтованого та збалансованого використання як водних, так і природних ресурсів в цілому.

Під час розв’язання задач комплексної оцінки стану водно-болотних угідь на основі інформації ДЗЗ та наземних спостережень актуальним є використання системного підходу, сучасних методів моделювання, оцінки та прогнозу складних систем, можливостей сучасних інформаційних і комп’ютерних технологій.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано згідно з планами наукових досліджень ДУ «Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України» у рамках таких науково-дослідних тем: «Розроблення методів та моделей, що розширюють функціональні можливості космічного геомоніторингу, на основі системних принципів аналізу і моделювання взаємозв’язаних просторових, спектральних та часових інформативних ознак об’єктів» (Державний реєстраційний номер роботи 0113U000096); «Розробка системної методології розвитку та підвищення ефективності космічного геомоніторингу для вирішення задач природокористування при зростанні об’єму виконуваних тематичних задач та удосконаленні космічних систем дистанційного зондування Землі» (Державний реєстраційний номер роботи 0108U000052).

Мета і задачі дослідження.

Метою дослідження є удосконалення методичного забезпечення космічного геомоніторингу стану водно-болотних угідь на основі комплексування даних дистанційного зондування Землі та наземних спостережень шляхом розроблення

відповідних математичних моделей системного аналізу й формування узагальнюючих критеріїв (на прикладі верхів'я Київського водосховища).

Досягнення поставленої мети вимагало розв’язання таких *задач:*

– дешифрування космічних знімків, і на основі отриманої інформації розпізнавання структури ВБУ, визначення її інформативних ознак;

– удосконалення методики багатокритеріальної оптимізації шляхом формування комплексного критерію оцінки якості води для потреб водоспоживання;

– розроблення ієрархічної моделі для експертної оцінки стану ВБУ, моделювання й порівняння трьох напрямків використання ресурсів водосховища (підтримання біотичного різноманіття, господарчого водозабезпечення та виробництва гідроелектроенергії);

– формування математичної моделі адаптивного балансу впливів складових ВБУ на загальне забруднення води;

– апробація та верифікація обґрунтованих методів, моделей і критеріїв.

Об’єкт дослідження – методичне забезпечення космічного геомоніторингу водних об’єктів.

Предмет дослідження – методи та моделі оцінки стану водно-болотних угідь Київського водосховища на основі ГІС/ДЗЗ-технологій із використанням космічної інформації та матеріалів наземних спостережень.

Методи дослідження. Для розв’язання поставлених задач використано геоінформаційні системи та матеріали дистанційного зондування Землі (ГІС/ДЗЗ-технології). Відповідно до сформульованої мети роботи залучалися такі методи дослідження:

– структурно-текстурний аналіз космічних знімків (КЗ) та комп’ютерне моделювання (для виокремлення структурних одиниць ВБУ Київського водосховища – основних типів біотопів та їх класифікація);

– метод багатокритеріальної оптимізації (для оцінки якості води та встановлення її взаємозв’язку зі структурою ВБУ);

– метод аналізу ієрархій (для виокремлення та оцінки екосистемних послуг водосховища);

– метод адаптивного балансу впливів (для прогнозування та моделювання впливу структурних одиниць ВБУ на якість води Київського водосховища).

Вибір методів дослідження забезпечив достовірність отриманих результатів і висновків.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що автором:

Вперше:

– для оцінки стану водно-болотних угідь використано адаптовані методи системного аналізу, а саме: метод багатокритеріальної оптимізації, метод аналізу ієрархій, метод адаптивного балансу впливів;

– розроблено ієрархічну модель структури ВБУ для експертної оцінки водогосподарсько-екологічного значення водосховища: підтримання біотичного різноманіття, господарчого водозабезпечення та виробництва гідроелектроенергії;

Удосконалено:

– методику багатокритеріальної оптимізації шляхом формування комплексного критерію оцінки якості води Київського водосховища на основі даних ДЗЗ;

– модель адаптивного балансу впливів шляхом урахування впливу складових водно-болотних угідь на загальне забруднення води.

Набули подальшого розвитку:

– методичні підходи щодо вивчення закономірностей формування ландшафтних комплексів великих рівнинних водосховищ з використанням даних ДЗЗ.

Практичне значення отриманих результатів. Удосконалено методи та розроблено математичні моделі, що можуть бути використані як інструмент прийняття управлінських рішень в області галузевого використання водних об'єктів штучного походження та в комплексному оцінюванні наслідків антропогенних впливів на довкілля, що забезпечує можливість відповідним службам своєчасно реагувати на ситуативні наслідки.

Аналіз і класифікацію структурних одиниць – типів біотопів – ВБУ Київського водосховища, а також розроблений комплекс методів оцінки екологічного стану водойм було впроваджено в регіональному ландшафтному парку (РЛП) «Міжрічинський» за програмою «Літопис природи РЛП Міжрічинський» у 2012 – 2013 роках для оцінки екологічного стану території парку.

Особистий внесок здобувача. Всі наукові положення, винесені на захист, отримано та обґрунтовано особисто автором. Дисертантом особисто проаналізовано і узагальнено існуючі наукові підходи в галузі оцінювання стану ВБУ методами ДЗЗ. В основу дисертації покладено матеріали власних досліджень – дані тематичного дешифрування 17 космічних знімків за період з 1985 по 2015 рр. (загальною площею 10285 км²) та дані польових досліджень 2012 – 2013 рр. у межах тестових полігонів (виконано 3 маршрути протяжністю 81 км), що були самостійно оброблені та систематизовані. У процесі виконання дисертаційної роботи автором зібрано і проведено аналіз наявних даних наземних спостережень Державної гідрометеорологічної служби (ДГМС) стану Київського водосховища за період з 1989 по 2014 рр. в межах існуючих трьох гідропостів ДГМС, що знаходяться в районі м. Чорнобиль, с. Страхолісся та с. Нові Петрівці.

Представлена дисертаційна робота є самостійним науковим дослідженням, основні результати якого викладено у роботах [1 – 20]. Ієрархічну модель для експертної оцінки стану ВБУ, моделювання і порівняння напрямків використання екосистемних послуг Київського водосховища розроблено автором самостійно й опубліковано у роботах [3, 5, 16]. В опублікованих зі співавторами наукових працях конкретний внесок здобувача полягав у проведенні чисельних розрахунків та інтерпретації результатів – дешифрування космічних знімків [1, 8, 9, 10, 19]. Автором розглянуто особливості дешифрування основних типів біотопів водно-болотних угідь та їх класифікація у працях [7, 12, 13, 14, 18, 20], а також адаптовано використання методу багатокритеріальної оптимізації для оцінки якості води шляхом встановлення взаємозв'язку між показниками, які мають позитивний і негативний вплив на стан водойми [2, 11, 17]. Здійснено апробацію моделі адаптивного балансу

впливів складових ВБУ на якість води, виконано розрахунки моделювання та прогнозу стану ВБУ [4]. Проведено численні розрахунки та інтерпретацію результатів аналізу матеріалів наземних спостережень, знайдено кореляційні зв'язки між гідрохімічними показниками стану водосховища та змінами структури ВБУ, отриманими за матеріалами ДЗЗ [6, 15].

Апробація результатів дисертації. Основні теоретичні та методичні положення, висновки й попередні результати дисертаційного дослідження було представлено, обговорено та отримано схвалення на: IV науково-практичній конференції «Моніторинг навколишнього природного середовища: науково-методичне, нормативне, технічне і програмне забезпечення» (АР Крим, м. Коктебель 21 – 25 вересня 2009 р.); V міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми природокористування, сталого розвитку та техногенної безпеки регіонів» (м. Дніпропетровськ, 6 – 9 жовтня 2009 р.); III науково-практичній конференції «Водні ресурси, проблеми раціонального використання, охорони і відтворення» (м. Коктебель, АР Крим, 21 – 25 червня 2010 р.); XII міжнародній конференції «Геоінформатика 2013» – теоретичні і прикладні аспекти (м. Київ, 13 –16 травня 2013 р.); III міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану» (м. Запоріжжя, 13 – 14 травня 2013 р.); II міжнародній науково-практичній конференції «Моніторинг навколишнього середовища» (м. Брест, Республіка Білорусь, 25 – 27 вересня 2013 р.); XI Всеросійській відкритій конференції «Сучасні проблеми дистанційного зондування Землі із космосу» (м. Москва, ІКД РАН, 11 – 15 жовтня 2013 р.); III міжнародному науково-практичному круглому столі «Екологія водно-болотних угідь і торфовищ» (м. Київ, 3 лютого 2014 р.); II міжнародній науково-практичній конференції, присвяченій Всесвітньому дню води «Вода і енергія» (м. Київ, 21 березня 2014 р.); IV міжнародній конференції «Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки GEO-UA 2014», (м. Київ, 26 – 30 травня 2014 р.); XIV українській конференції з космічних досліджень (м. Ужгород, 8 – 12 вересня 2014 р.); науково-практичному семінарі, присвяченому Всесвітньому Дню Водно-болотних угідь «Управління водно-болотними угіддями в умовах природно-заповідних територій» (с. Отрохи, Козелецький р-н., Чернігівська обл., 30 січня – 1 лютого 2015 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 20 робіт, у тому числі у виданнях, внесених до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук – 6 (з яких: 2 – виконано одноосібно, 1 – включена до переліку наукових видань Східноєвропейського центру фундаментальних досліджень EECFR, 3 – виконано у співавторстві); 1 патент; 2 публікації – в інших журналах та виданнях України; 11 – у збірниках матеріалів і тез доповідей вітчизняних та закордонних конференцій та семінарів.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота містить 159 сторінок, із них 126 сторінок основного тексту, 37 рисунків, 16 таблиць, список використаних джерел з 114 найменувань на 13 сторінках та 14 додатків на 20 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність використання системного підходу під час оцінки стану та структури ландшафтних комплексів, зокрема водно-болотних угідь на основі інформації ДЗЗ. Визначено наукову новизну отриманих результатів дисертації, їх практичне значення та подано інформацію про особистий внесок здобувача, апробацію роботи, публікації, зв’язок роботи з науковими програмами.

Перший розділ – *«Основні передумови застосування методів системного аналізу, даних ДЗЗ та наземних спостережень для дослідження стану водно-болотних угідь»* – присвячено теоретико-методичному аналізу наукової літератури, визначено особливості сучасного стану ВБУ, що утворилися у верхів'ї Київського водосховища, та сформульовано задачі дисертаційної роботи.

У підрозділі **1.1** здійснено аналіз становлення та розвитку досліджень водосховищ та обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи. Визначено, що під час оцінки водосховища, як складної екосистеми, та ВБУ, що виникають у разі його будівництва та експлуатації, слід здійснювати комплексну оцінку, що враховуватиме специфіку генетично об'єднаних і взаємозалежних геологічних, геофізичних, біологічних процесів і природних ландшафтів. У підрозділі **1.2** розглянуто загальну характеристику території дослідження – ВБУ, що сформувалися у верхів'ї Київського водосховища як складової Дніпровського екологічного коридору (рис. 1.). Зокрема, виходячи з аналізу наукових джерел, зазначено три стадії формування рослинного покриву (заростання) Київського водосховища за період існування водойми (1966 – 2015 рр.): відмирання лучної рослинності, що зазнала затоплення, в перші роки існування водойми; перерозподіл екологічних ніш та розселення на мілководних ділянках водосховища гелофітної та гідрофітної рослинності, освоєння усіх доступних мілководних біотопів угрупованнями макрофітів; поступове збільшення видового багатства та ценотичного різноманіття водної рослинності. У підрозділі **1.3** розкрито роль аерокосмічних методів та наземних спостережень у дослідженнях структури та екологічного стану ВБУ. Окреслено коло тематичних задач гідроекологічних досліджень для подальшого використання

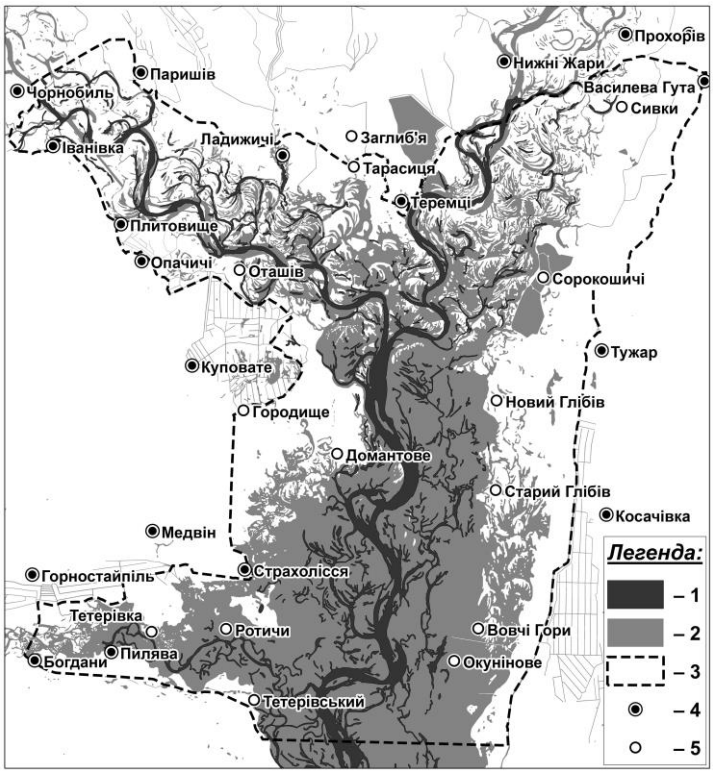

Рис. 1. Територія дослідження – водно-болотні угіддя верхів’я Київського водосховища (1 – р. Дніпро (станом на 1943 рік); 2 – Київське водосховище (станом на 1992 рік); 3 – межі території дослідження; 4 – існуючі населені пункти; 5 – населені пункти, затоплені під час створення водосховища у 1964-1966 роках.)

матеріалів ДЗЗ. Так, дешифрування КЗ водних об'єктів дозволяє за рядом ознак визначити особливості гідрографічної мережі та гідрологічного режиму, тип біотопів, аквальні ландшафти та їх структуру. За супутниковими знімками також можна виділити ділянки заболочування і заростання ВБУ, відстежувати розвиток явищ "цвітіння води".

У другому розділі – *«Методичне забезпечення для аналізу стану водно-болотних угідь»* – розглянуто методичні основи обробки даних ДЗЗ та обґрунтовано вибір методів системного аналізу та системної динаміки для оцінки й прогнозу стану ВБУ на основі дистанційних аерокосмічних досліджень та наземних спостережень. У підрозділі **2.1** сформовано концептуальну модель застосування системного моделювання та космічного моніторингу під час вирішення задач оцінки стану ВБУ, що відображає основні етапи застосування системного моделювання, які детально розглянуто у відповідних розділах цієї роботи (рис. 2).

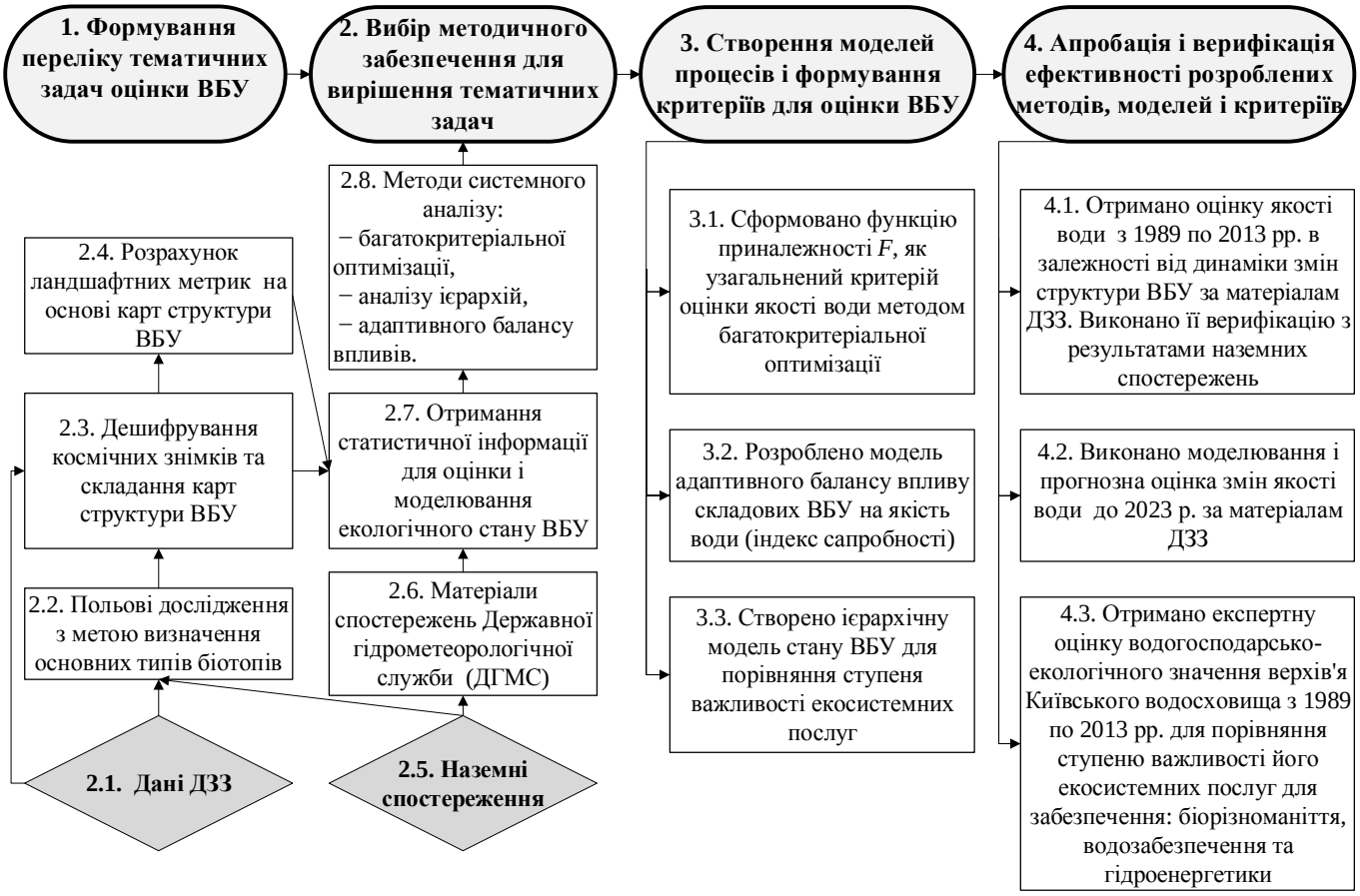

Рис. 2. Концептуальна модель обґрунтування методів системного аналізу оцінки водно-болотних угідь Київського водосховища на основі даних ДЗЗ та наземних спостережень

У підрозділі **2.2** здійснено огляд основних методів дешифрування космічних знімків. Встановлено, що для отримання максимально коректних карт розподілу типів біотопів доречно компонувати різні методи класифікації: для середнього просторового розрізнення (КЗ Landsat) – штучні нейронні мережі, а для високого (КЗ QuickBird) – об’єктно-орієнтований підхід. Підрозділ **2.3** присвячено огляду методів системного аналізу стану ВБУ, основні з яких є: багатокритеріальна оптимізація, аналіз ієрархії та адаптивний баланс впливів.

Під час вирішення задач, для яких потрібно одночасне досягнення найкращих значень для всіх критеріїв, кожний з яких характеризує одну із сторін розглянутої проблеми, використовується *метод багатокритеріальної оптимізації (БКО)*. Для оцінки якості води та встановлення її взаємозв'язку зі структурою ВБУ використовуються алгоритми, що складаються з таких етапів: введення функції близькості порівнюваних величин *a* і *b*, обчислення оцінки для функції близькості – S та функції відповідності – f для об'єкту дослідження за опорної множини класів з урахуванням ступеню важливості μ_j кожного показника. Функція відповідності описує ступінь збігу значень величин, що порівнюються. В нашому випадку задача визначення якості води полягає у наступному: необхідно визначити, до якого з розглянутих років $A=\{a_1,a_2,...,a_j,...,a_m\}$ найбільшою мірою належить рік $B=\{b_1,b_2,...,b_j,...,b_m\}$, який досліджується (*a* і *b* – параметри, що порівнюються: типи біотопів, гідрохімічні показники).

Для оцінки ступеня належності об'єктів процесу *A* до *B* визначається функція приналежності – F, як єдиний узагальнений критерій:

$$F(B,A)=\sum_{j=1}^{n}\mu(b_j,a_j)\cdot f(b_j,a_j), \qquad (1) \qquad\qquad f(b_j,a_j)=\lfloor 1-S_j(b_j,a_j)\rfloor \qquad (2)$$

де: μ_j – міри важливості характеристик класу (вагові коефіцієнти) *j* = 1,...,n.

Визначаємо близькість значення параметру *a* до параметру *b* за допомогою функції близькості для наступних випадків:

$S_j(b_j)=(\bar{a}_j-b_j)/\bar{a}_j$, для параметрів збільшення, значення яких позитивно впливає на якість води;

$S_j(b_j)=(b_j-\bar{a}_j)/b_j$, для параметрів зменшення, значення яких негативно впливає на якість води. (3)

Найбільшого значення функція приналежності досягає у разі збігу значень усіх параметрів, а найменшого значення, рівного нулю, – у разі невідповідності жодного параметру.

У випадку, коли оцінка того чи іншого процесу не піддається вимірам та обчисленням, використовують запропонований Т. Сааті *метод аналізу ієрархій (МАІ)*. Він дає можливість на основі експертних оцінок сформувати необхідну цільову функцію та вибрати із багатьох альтернативних варіантів найкращий, зокрема, в нашому випадку, порівняти ступінь важливості екосистемних послуг водосховища:

$$F=\sum K_l^1\sum K_m^2\sum K_r^3\sum K_p^4\cdot x_p^s; \qquad (4)$$

де верхній індекс критеріального пріоритету K_j позначає рівень ієрархії; x_p^s – коефіцієнт переваги варіанта *s* за показником *p*,

$$K_1=a_1\Big/\sum_i a_i;...;K_n=a_n\Big/\sum_i a_i\ ; \qquad a_1=\left(\prod_{j=1}^{n}a_{1j}\right)^{1/n};...;a_n=\left(\prod_{j=1}^{n}a_{nj}\right)^{1/n} \qquad (5)$$

де $i,j=1,\ldots,n$ число критеріїв, порівнюваних на кожному рівні.

Для цього виконується декомпозиція цільової функції на більш прості показники, що об'єднуються у відповідні рівні ієрархічної схеми. Для формалізації експертної

процедури будується множина матриць попарних порівнянь *a* для кожного рівня та за кожною складовою даного ієрархічного рівня. Здійснюється їх нормалізація та оцінка векторів пріоритетів K_j з точки зору ступеню їх впливу на складові попереднього рівня. Оброблення матриць, наприклад, чотирьох рівнянь дає можливість вираховувати вектори пріоритетів відповідних рівнянь K^1, K^2, K^3, K^4, компоненти яких визначають їхні пріоритети з точки зору експерта. Значення F дозволяють встановити перевагу того чи іншого альтернативного варіанта системи за всією сукупністю проаналізованих факторів.

Для системного моделювання та прогнозування впливу різних типів біотопів на загальне забруднення води Київського водосховища доцільним є використання *методу адаптивного балансу впливів (АВС-метод)*, запропонованого І. Є. Тімченком, як розвиток методу системної динаміки. Цей метод полягає в розробленні концептуальної моделі та формуванні схеми причинно-наслідкових зв'язків між елементами системи, на основі якої створюється системна діаграма моделі. Для формалізації моделі складають математичні рівняння, що описують адаптивний баланс впливів у системі.

У загальному випадку, коли модельована система вміщує n взаємозв'язаних процесів (модулів X_i) та має зовнішні впливи f_i, система динамічних рівнянь АВС-моделі приймає вигляд:

$$\frac{dx_i}{dt} = x_i\left[1 - 2F^{(+)}\left(x_i - \sum_{j=1}^{n-1} a_{ij}x_j - f_j\right)\right],\ (i, j = 1,2,\ldots,n),\ i \neq j \qquad (6)$$

У випадку, коли $F(x)=x$ і $f_j = 0$, вираз приймає вигляд:

$$\frac{dx_i}{dt} = x_i\left[1 - 2\left(x_i - \sum_{j=1}^{n-1} a_{ij}x_j\right)\right] \qquad (7)$$

Більш простим рівняння стає у разі вибору базової функції впливу $F^{(+)}(x_i)$ у формі параболи, тоді рівняння має такий вигляд:

$$\frac{dx_i}{dt} = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \cdots + a_{i,i-1}x_{i-1} + a_{i,i+1}x_{i+1} + \cdots a_{in}x_n - x_i \qquad (8)$$

де a_i – коефіцієнти рівнянь моделі, які враховують вплив складової *s* на складову *i* та зберігають постійне значення у вибраному інтервалі часу; t – часовий або просторовий аргумент процесу.

Надаючи індексу i значення $1,2,\ldots,n$, отримуємо систему рівнянь динамічної АВС-моделі. Коефіцієнти впливу a_{ij} в рівняннях АВС-моделі можуть бути ідентифіковані двома основними шляхами: за оцінками експертів та на основі статистичного оброблення архівних даних. Останній потрібен для прогнозування розвитку процесу з найбільшою вірогідністю.

Послідовне використання обраних методів системного аналізу забезпечить комплексне оцінювання стану антропогенно змінених територій, зокрема ВБУ Київського водосховища.

У третьому розділі – *«Формування інформативних складових оцінки стану ВБУ Київського водосховища для наземного та дистанційного моніторингу»*

розглянуто інформаційні показники структури ВБУ, які отримано на основі матеріалів дистанційного зондування Землі та наземних спостережень для формування інформативних складових оцінки екологічного стану ВБУ для розроблення математичних моделей системного аналізу та формування узагальнюючих критеріїв.

Описано вибір тестових ділянок та результати польових досліджень й аналізу наземних спостережень ДГМС. Обґрунтовано вибір космічних знімків, що мають достатню кількість інформації для здійснення дешифрування структури ВБУ, з метою оцінки та прогнозу змін території. Для дослідження ВБУ Київського водосховища на основі ДЗЗ було використано такі критерії відбору КЗ: період спостережень – 1985–2015 рр.; діапазон дати зйомки – червень–серпень (час максимального розвитку заростей вищих водних рослин (ВВР)); хмарність над областю дослідження не перевищує 5 %. Отже, для ретроспективного аналізу території верхів'я водосховища площею 605 км² було обрано 16 космічних знімків з космічного апарату (КА) Landsat (з просторовим розрізненням 30 м/піксель), а для більш детального вивчення розподілу типів біотопів – КЗ КА QuickBird (з просторовим розрізненням 0,61 м/піксель) за 2011 рік. У результаті дешифрування КЗ КА Landsat 5,7,8 отримано карти розподілу та площі основних типів біотопів ВБУ за період з 1985 по 2015 роки через кожні 2 роки (табл. 1).

Таблиця 1. **Результати обчислення площ основних типів біотопів верхів'я Київського водосховища за матеріалами ДЗЗ та їх вагових коефіцієнтів μ_j**

Роки	Листяні ліси та чагарники, км^2	Хвойні насадження, км^2	Заплавні луки, км^2	Прибережні перезволожені біотопи, км^2	Біотопи фіталі, км^2	Піщані масиви, км^2	Незарослі гідротопи, км^2
1985	76,7	38,0	70,5	82,1	45,2	0,9	291,4
1987	80,3	41,4	63,5	82,5	52,3	3,2	281,4
1989	79,2	39,9	71,5	85,4	55,9	1,9	270,9
1991	81,5	40,4	70,3	88,2	74,9	1,3	248,1
1993	73,0	42,4	71,2	90,1	76,7	1,3	250,2
1995	75,0	44,5	73,0	94,9	78,5	1,4	237,5
1997	70,3	42,5	79,4	89,6	62,2	2,0	258,6
1999	79,9	46,3	67,8	103,5	89,9	1,6	215,7
2001	81,0	46,0	65,0	113,7	88,1	1,9	209,0
2003	71,7	46,1	54,7	126,4	98,3	1,5	206,0
2005	77,6	45,7	42,3	134,3	95,4	2,0	207,5
2007	87,5	45,9	42,1	132,2	87,6	1,4	207,9
2009	73,7	45,6	52,8	128,6	90,1	1,4	212,5
2011	82,2	45,3	44,0	137,2	98,7	1,3	196,1
2013	90,2	45,8	37,1	140,1	103,5	1,2	187,2
2015	92,5	46,6	42,6	142,0	104,3	0,8	175,8
N*	(max)	(max)	(max)	(min)	(min)	(min)	(max)
μ_j	0,10	0,10	0,10	0,20	0,20	0,10	0,20

* – напрямок оптимізації параметру, використаний в методі БКО.

Виділено такі основні класи (типи) біотопів як: заплавні листяні ліси та чагарники; штучні хвойні насадження; заплавні луки; прибережні перезволожені біотопи (угруповань гелофітів); біотопи фіталі (угруповань вищих гідрофітів (макрофітів)); прибережні незарослі або слабозарослі піщані біотопи; незарослі гідротопи водосховища (відкрита водна поверхня), динаміку яких наведено на рис. 3.

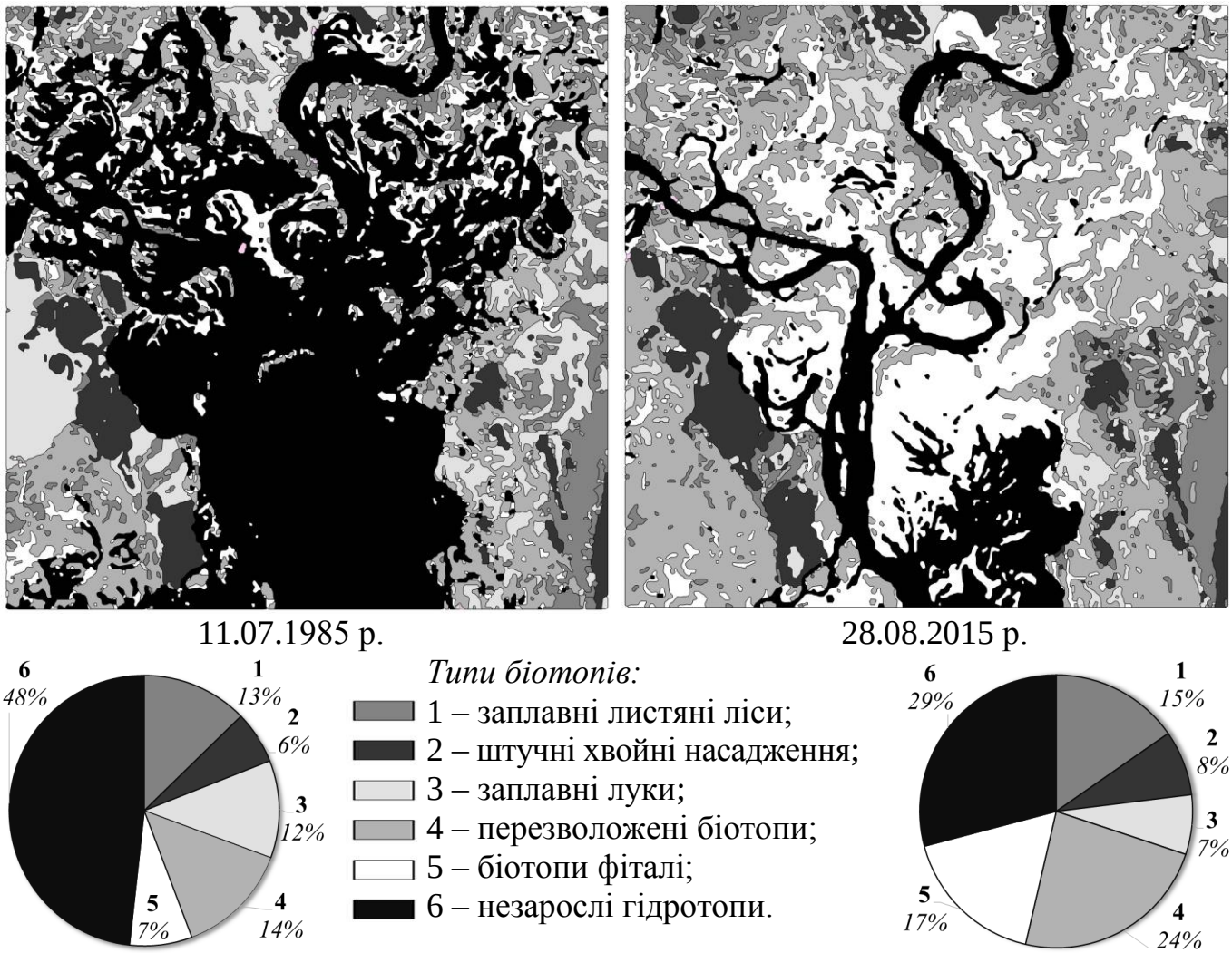

Рис. 3. Графічне представлення результатів піксельно-орієнтованої класифікації КЗ КА Landsat методом штучних нейронних мереж для виділення структурних одиниць (типів біотопів) ВБУ

Четвертий розділ – «*Розроблення узагальненого критерію багатокритеріальної оптимізації, ієрархічної моделі і моделі адаптивного балансу впливу складових та здійснення аналізу стану водно-болотних угідь»* – розроблено системні моделі, здійснено регіональну адаптацію та апробацію удосконалених системних методів для дослідження стану ВБУ Київського водосховища на основі даних ДЗЗ.

У підрозділі **4.1.** для оцінки якості води Київського водосховища, враховуючи зміни площ основних типів біотопів, ми звернулися до методології, що застосовується у задачах класифікації дискретних об’єктів, ***методу багатокритеріальної оптимізації***, описаного у підрозділі 2.3.1.

Позначивши еталонний рік – 1989 (початок періоду дослідження) за *A*, стан його якості води можна описати як $A=\{a_1,a_2,\ldots,a_j,\ldots a_n\}$, де, a_1,a_2 – наскрізна нумерація параметрів, що досліджуються (типів біотопів) від 1 до *n*; *n* – кількість біотопів, що порівнюються; a_j – *j*–й біотоп. Для обчислення функції приналежності F відповідно до рівняння (2) необхідне врахування значень вагових коефіцієнтів μ_j для кожного біотопу водосховища (табл.1.).

У нашому випадку міра важливості μ_j кожного біотопу визначалася від 0 до 100 %, так вплив вищої водної рослинності та відкритої водної поверхні на якість води має найбільше значення й отримує 20 %, а всі інші складові по 10 %. При розрахунку функції близькості враховувався напрямок оптимізації кожного параметру (позитивний та негативний вплив на якість води), наведений в табл.1. Далі, функція приналежності як узагальнений критерій оцінки якості води за матеріалами ДЗЗ відповідно до рівняння (1), наприклад у 2013 році, розраховувалася таким чином:

$$F_{ДЗЗ(2013)}=\left(\mu_1\cdot f\left(a_1,b_1\right)\right)+\left(\mu_2\cdot f\left(a_2,b_2\right)\right)+\left(\mu_3\cdot f\left(a_3,b_3\right)\right)+$$
$$+\left(\mu_4\cdot f\left(b_4,a_4\right)\right)+\left(\mu_5\cdot f\left(b_5,a_5\right)\right)+\left(\mu_6\cdot f\left(b_6,a_6\right)\right)+\left(\mu_7\cdot f\left(a_7,b_7\right)\right)$$

де: a − площі біотопів у 1989 році; b− площі біотопів у 2013 році; 1,2…7 – типи біотопів; μ_j − міра важливості кожного біотопу.

На наступному етапі проведено оцінку кореляції між значеннями функції приналежності, отриманої за матеріалами ДЗЗ *($F_{ДЗЗ}$)*, та узагальненим критерієм $F_{назем.}$, отриманим на основі наземних спостережень ДГМС. Результати обчислень показали, що обидві функції приналежності F, які характеризують стан якості води Київського водосховища, корелюють з імовірністю $R=0{,}7$, що обґрунтовує можливість використання методів системного аналізу саме на основі даних ДЗЗ для оцінки якості води. На рис. 4 наведено графік функцій приналежності $F_{БКО}$ за роками. З графіку видно, що функції приналежності F відображають зміну стану Київського водосховища в бік незначного погіршення якості води для потреб водоспоживання. До цього у 2005 році відбулася стабілізація процесів зміни біотопів і вирівнювання показників якості води, а саме наземних гідрохімічних показників, таких як: CO_2, O_2, NO_2^-, NO_3^-, NH_4^+, $P_{(заг)}$, хімічного споживання кисню, кольоровості, завислих речовин.

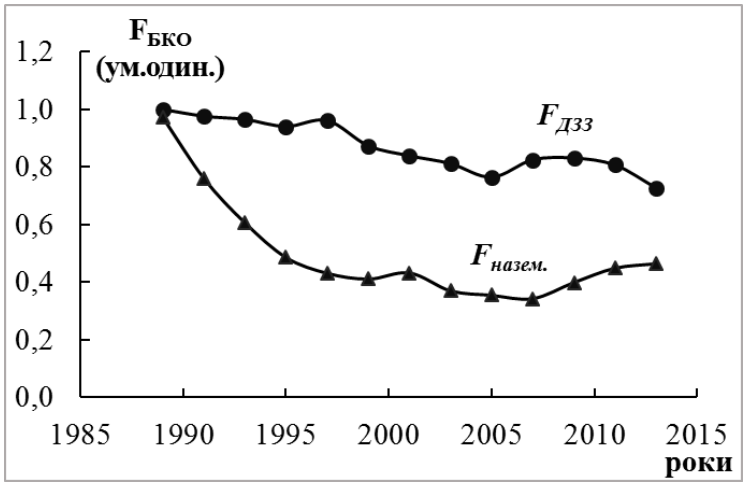

Рис. 4. Результати обчислення функції приналежності $F_{БКО}$, отримані за даними ДЗЗ та наземних спостережень ДГМС в умовних одиницях

У підрозділі **4.2** розроблено ***ієрархічну модель*** та виконано обчислення оцінки водогосподарсько-екологічного значення Київського водосховища з 1989 по

2013 рр. Для порівняння ступеню важливості екосистемних послуг верхів'я водосховища як цінного водно-болотного угіддя та значення Київського водосховища як техногенного комплексу для водопостачання та потреб гідроелектростанції (ГЕС), розроблено інтегральну ієрархічну модель стану водойми (рис. 5). Для розв'язання поставленої задачі було вивчено широкий набір наземних гідрофізичних, гідрохімічних, гідробіологічних показників спостережень Державної гідрометеорологічної служби, які відображають особливості абіотичних і біотичних компонентів водної екосистеми. Цей набір включає значення вмісту біогенних і органічних речовин, компонентів сольового та газового складу, прозорості, специфічних речовин токсичної та радіоактивної дії, індекс Шеннона та сапробності і інших показників, а також температури води і загального водообміну.

Попарні порівняння проводилися в термінах домінування одних елементів над іншими. Якщо порівнювалися якісні фактори, то порівняння проводилося експертно з використанням шкали «відносної важливості» (шкали переваг Т. Сааті), вираженої в балах від 1 до 10, де 1 бал − однакова важливість, рівна пріоритетність, 10 балів − абсолютна перевага одного над іншим.

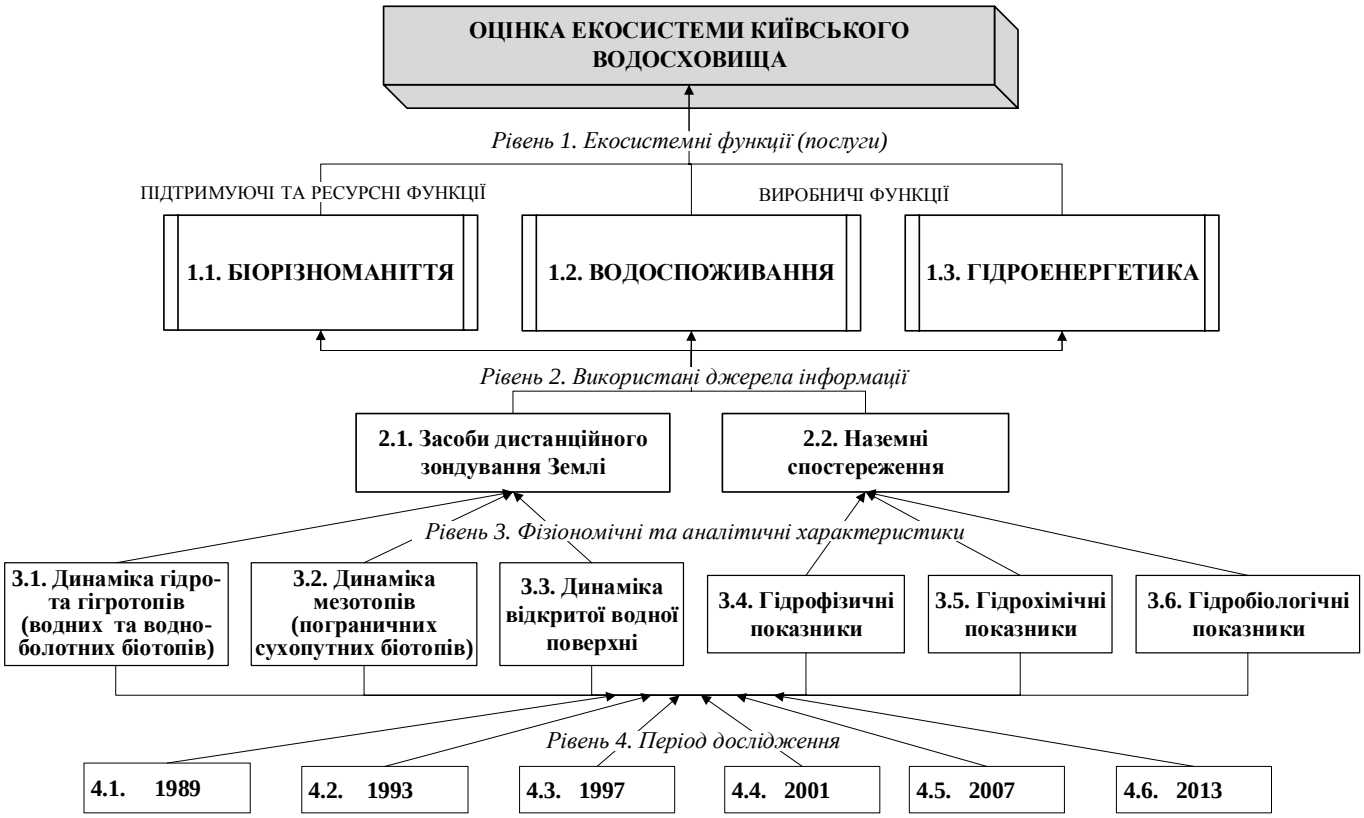

Рис. 5. Ієрархічна модель оцінки екосистеми Київського водосховища за 1989–2013 рр.

Далі для кожного елементу на всіх рівнях ієрархії будувалися матриці переваг та згідно шкали переваг фаховими експертами у відповідних галузях знань здійснено попарні порівняння елементів нижчого рівня. На наступному етапі для кожної з матриць попарних порівнянь розраховано компоненти власного вектора матриці та здійснено їх нормування до одиниці. У результаті визначено вектор локальних пріоритетів критеріальних складових кожного рівня ієрархії.

Після цього у відповідності зі значеннями векторів локальних пріоритетів (вагами) K^1, K^2, K^3, K^4 визначено значення згортки узагальненого критерію F згідно (4) для визначеного періоду дослідження, що дозволило оцінити екологічне благополуччя водойми за всією сукупністю складових, що визначають ієрархію.

Наводимо системи рівнянь для оцінки трьох рівнів ієрархії екосистемних послуг Київського водосховища:

оцінки 3-го рівня ієрархії

$$F^3_{1(1-6)} = \left(K^4_{1(1-6)}\ K^4_{2(1-6)}\ K^4_{3(1-6)}\right)\cdot\left(x^3_{1(1-3)}\right)$$

$$F^3_{2(1-6)} = \left(K^4_{1(1-6)}\ K^4_{2(1-6)}\ K^4_{3(1-6)}\right)\cdot\left(x^3_{2(1-3)}\right)$$

$$F^3_{3(1-6)} = \left(K^4_{1(1-6)}\ K^4_{2(1-6)}\ K^4_{3(1-6)}\right)\cdot\left(x^3_{3(1-3)}\right)$$

$$F^3_{4(1-6)} = \left(K^4_{4(1-6)}\ K^4_{5(1-6)}\ K^4_{6(1-6)}\right)\cdot\left(x^3_{4(4-6)}\right)$$

$$F^3_{5(1-6)} = \left(K^4_{4(1-6)}\ K^4_{5(1-6)}\ K^4_{6(1-6)}\right)\cdot\left(x^3_{5(4-6)}\right)$$

$$F^3_{6(1-6)} = \left(K^4_{4(1-6)}\ K^4_{5(1-6)}\ K^4_{6(1-6)}\right)\cdot\left(x^3_{6(4-6)}\right)$$

оцінки 2-го рівня ієрархії

$$F^2_{1(1-6)} = \left(F^3_{1(1-6)}\ F^3_{2(1-6)}\ F^3_{3(1-6)}\right)\cdot\left(x^2_{1(1,2,3)}\right)$$

$$F^2_{2(1-6)} = \left(F^3_{4(1-6)}\ F^3_{5(1-6)}\ F^3_{6(1-6)}\right)\cdot\left(x^2_{2(4,5,6)}\right)$$

остаточні оцінки для трьох напрямків використання водосховища

$$F^1_{В(1-6)} = \left(F^2_{1(1-6)}\ F^2_{2(1-6)}\right)\cdot\left(x^1_{1(1-2)}\right)$$

$$F^1_{Г(1-6)} = \left(F^2_{1(1-6)}\ F^2_{2(1-6)}\right)\cdot\left(x^1_{2(1-2)}\right)$$

$$F^1_{Б(1-6)} = \left(F^2_{1(1-6)}\ F^2_{2(1-6)}\right)\cdot\left(x^1_{3(1-2)}\right)$$

Останнім етапом виконання процедури МАІ є контроль правильності процедури розв’язання задачі. Достовірність отриманих розрахункових даних суттєво залежить від виконання умов узгодженості у матрицях порівнянь. Оцінку ступеню узгодженості вихідних даних здійснено шляхом розрахунку індексу узгодженості (ІУ) і обчислення відношення узгодженості (ВУ) для кожної матриці. Результати обчислень за кожною з матриць попарних порівнянь згідно умови ВУ < 0,2. До цього узгодженість всієї ієрархії становить 0,044, тобто ≈4,4 %, що менше припустимих за теорією МАІ 10 %.

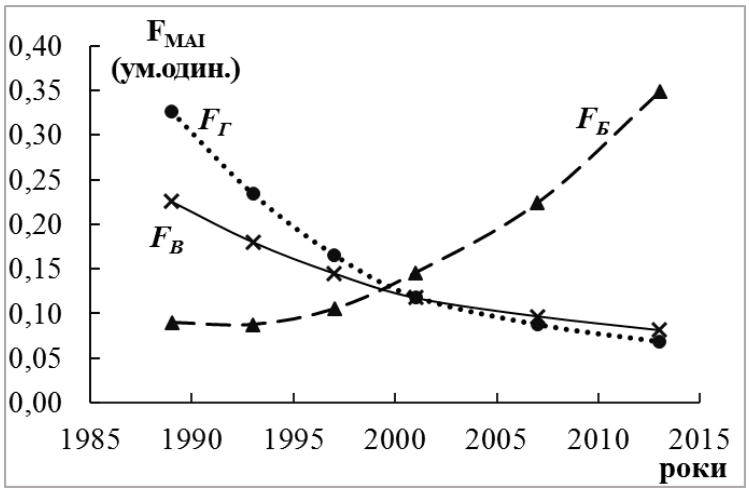

Рис. 6. Оцінка водогосподарсько-екологічного значення екосистеми Київського водосховища за період 1989−2013 рр. ($F_Б$ – біорізноманіття; $F_В$ – водопостачання; $F_Г$ – гідроенергетика.)

Наочно динаміку екосистемних послуг водосховища за період 1989–2013 рр. наведено на рис. 6.

Отримані результати свідчать про те, що збільшення площ зарослих мілководь трансформує гідрофізичні та гідрохімічні показники у бік послаблення значення екосистеми водосховища в соціально-економічному напрямку з точки зору забезпечення водними ресурсами. З іншого боку, посилення заростання акваторій водосховища та зміна біотопічної структури мілководь сприяють підтриманню екологічної рівноваги усієї водойми, забезпеченню її біоресурсного потенціалу,

самоочисних функцій, а також збереженню та відтворенню природного біорізноманіття водної та коловодної флори і фауни.

Підрозділ **4.3** присвячено формуванню ***моделі адаптивного балансу впливів***, системного моделювання та прогнозу стану ВБУ Київського водосховища до 2023 р. Для досягнення поставлених цілей робота виконувалася на основі рівнянь (7). Спочатку була сформована концептуальна модель оцінки загального забруднення води (рис. 7).

Основними модулями моделі виступали складові ВБУ (площі класифікованих типів біотопів), отримані на основі дешифрування та аналізу КЗ КА Landsat за період 1989–2013 рр., а саме: площа заплавних листяних лісів (*T*), площа заплавних луків (*G*), площа зарослих водними рослинами мілководь (прибережні перезволожені біотопи та біотопи фіталі) (*M*), незарослих гідротопів (*W*), значення яких наведено у табл. 1. Також, як основний модуль, у роботі використано дані числової оцінки екологічного стану водойми, отримані за матеріалами наземних статистичних спостережень ДГМС, а саме індекси біологічної індикації властивостей води за системою сапробності (*S*) по фіто- ($S_{фітопланк.}$) та зоопланктону ($S_{зоопланк.}$).

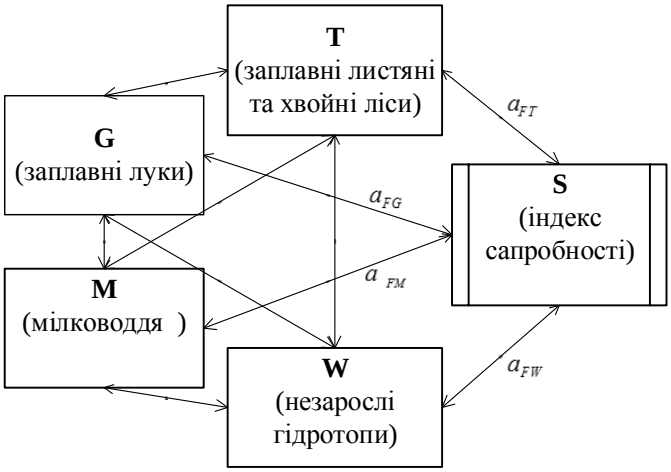

Рис. 7. Концептуальна модель оцінки загального забруднення води

Математична модель взаємозв'язку біотопів

$$\begin{aligned}
\frac{dS}{dt} &= a_{ST}T + a_{SG}G + a_{SM}M + a_{SW}W - S,\\
\frac{dT}{dt} &= a_{TG}G + a_{TM}M + a_{TW}W + a_{TS}S - T,\\
\frac{dG}{dt} &= a_{GM}M + a_{GW}W + a_{GS}S + a_{GT}T - G,\\
\frac{dM}{dt} &= a_{MW}W + a_{MS}S + a_{MT}T + a_{MG}G - M,\\
\frac{dW}{dt} &= a_{WS}S + a_{WT}T + a_{WG}G + a_{WM}M - W.
\end{aligned} \tag{9}$$

Основними завданнями дослідження є встановлення наявності взаємозв’язку між усіма модулями моделі та отримання їх вагових коефіцієнтів впливу, що відображають характер функціонування екосистеми. Надалі на їх основі здійснено моделювання та прогнозування екологічного стану водойми. Якщо прийняти, що кожна зі складових може бути виражена лінійною комбінацією решти складових, то можна сформувати математичну модель взаємозв’язку складових ВБУ (9).

Дані результатів моделювання (рис. 8) приводять до висновку, що сформована модель адекватно реагує на зміни площ основних типів біотопів ВБУ Київського водосховища. Моделювання впливу зміни біотопічної структури ВБУ на екосистему водосховища дозволило визначити, що перерозподіл площ біотопів, який відбувається, та збільшення обсягу заростання мілководь призведе до загального покращення екологічного стану водойми.

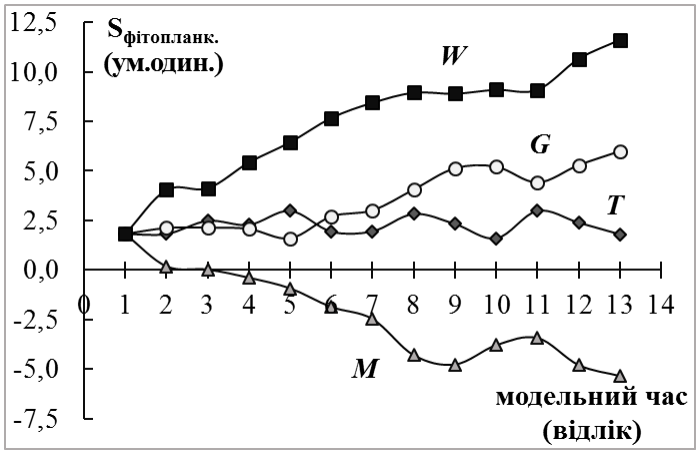

Рис. 8. Результати моделювання впливу різних біотопів на загальне забруднення води Київського водосховища на основі АВС-методу (*W* – незарослі гідротопи; *G* – заплавні луки; *T* – ліси; *M* – мілководдя.)

Результати моделювання доводять, що якщо відбудеться повторне заповнення водосховища водою, це призведе до погіршення стану водойми з позиції забруднення, викликаного розкладанням органічної маси рослинного походження. Відомо, що чим менше значення індексу сапробності, тим менше ступінь забруднення води органічними речовинами.

З графіку на рис. 9 видно, що в наступні 10 років процеси перерозподілу площ між основними типами біотопів триватимуть внаслідок заростання новостворених мілководь та заболочення існуючих. Результати прогнозування (рис. 10) показують подальше поліпшення якості води за гідробіологічними показниками (індексами сапробності за фіто- та зоопланктоном) на наступні десять років у разі стабільного протікання процесів заростання водосховища без втручання людини.

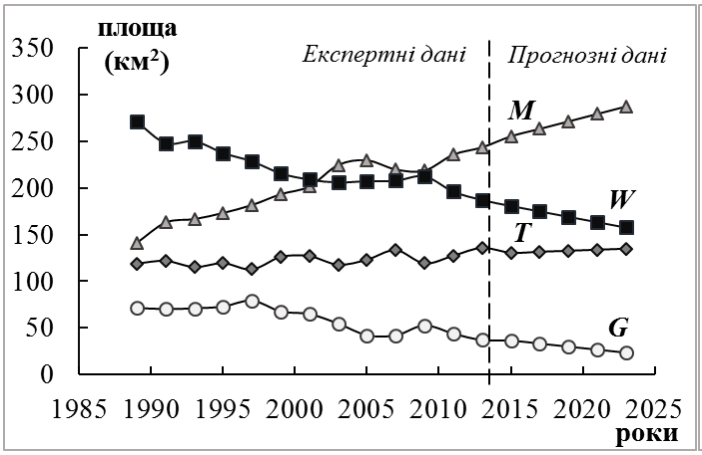

Рис. 9. Прогнозування тенденції змін площ біотопів верхів'я Київського водосховища до 2023 р., отримане за даними ДЗЗ

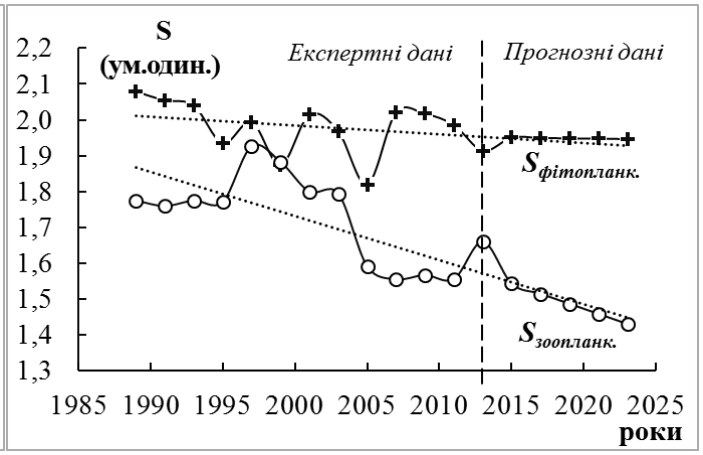

Рис. 10. Прогнозування змін ступеня загального забруднення води за даними спостережень ДГМС в залежності від змін біотопів

Прогнозуючи подальший хід процесів ландшафтоперетворень у верхів'ях Київського водосховища (рис. 11), слід зазначити, що на період 2065 р. (менше ніж через 50 років) у разі збереження сучасних тенденцій трансформації основних типів біотопів відбудеться суттєве зменшення площ глибоководних акваторій водосховища і відновлення руслових ділянок та пограничних заплавних комплексів річок Дніпра та Прип'яті у верхів'ї Київського водосховища.

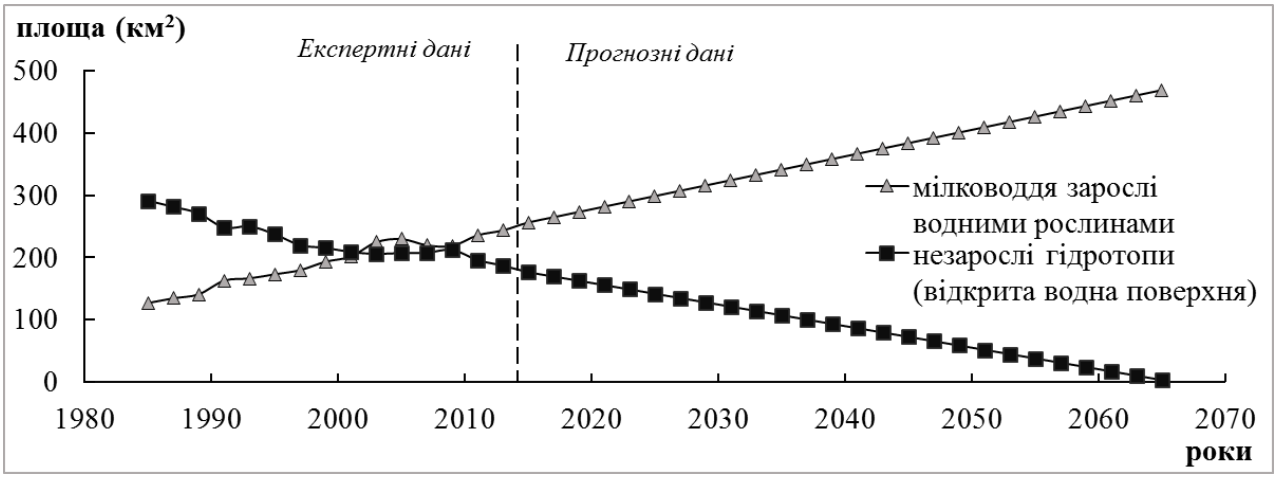

Рис. 11. Результати довгострокової прогнозної оцінки стану заростання верхніх ділянок Київського водосховища до 2065 р.

ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення та запропоновано нове вирішення наукової задачі, що полягає в обґрунтуванні та удосконаленні методичного забезпечення космічного геомоніторингу водно-болотних угідь на основі комплексування даних дистанційного зондування Землі та наземних спостережень шляхом розроблення відповідних математичних моделей системного аналізу й формування узагальнюючих критеріїв (на прикладі верхів'я Київського водосховища). Основні результати дисертації такі:

1. Визначено низку інформативних ознак структурних одиниць ВБУ – типів біотопів, що надійно дешифруються на космічних знімках та є індикаторними ознаками стану територій, які досліджуються. Отримано класифікаційну схему індикаторних типів біотопів (за КЗ КА Landsat), що включає 7 основних класів, які у подальшій роботі є ключовими елементами комплексного системного аналізу.

2. Розроблено математичні моделі системного аналізу та сформовано узагальнюючі критерії, що суттєво удосконалили методичне забезпечення космічного геомоніторингу водно-болотних угідь на основі комплексування даних дистанційного зондування Землі й наземних спостережень.

3. Створення комплексного критерію для оцінки якості води на основі даних ДЗЗ сприяло суттєвому удосконаленню методики багатокритеріальної оптимізації. Аналіз ефективності використання даного методу з урахуванням показників, які мають позитивний і негативний вплив, встановив зміну стану Київського водосховища в бік незначного погіршення якості води для потреб водоспоживання.

4. Розроблена ієрархічна модель експертної оцінки екологічних функцій водно-болотних угідь Київського водосховища довела, що аналіз екосистемного значення водойми має базуватися на оцінці спроможності функціонування двох основних її складових: підтримуючої і виробничої, а також реалізації трьох напрямків призначення водойми: підтримання біотичного різноманіття, водозабезпечення та виробництва електроенергії. Отримані результати відображають, на думку

здобувача, перевагу на сьогодні біоресурсного екосистемного значення розвитку водойми над господарськими функціями.

5. Між динамікою змін структури ВБУ і станом водосховища виявлено яскраво виражений взаємозв'язок, що є пріоритетним для оперативного контролю екосистеми водойми на основі космічного геомоніторингу.

6. Розроблена модель адаптивного балансу впливів складових структури ВБУ на гідрохімічні показники водойми підтвердила пряму залежність якості води від ступеню розвитку біотопів зарослих мілководь.

7. Прогнозна оцінка стану ВБУ верхів'я Київського водосховища до 2023 р., виконана з урахуванням різних факторів, показала чіткі тенденції щодо подальшої трансформації основних типів біотопів в бік зростання площ зарослих мілководь і заболочених територій, що сприятиме подальшому покращенню якості води та посиленню біоресурсного потенціалу водойми.

Отримані моделі можуть бути використані як наукова основа під час обґрунтування та формування методик для комплексного оцінювання стану ВБУ та екологічного моніторингу з використанням космічної інформації ДЗЗ.

Отже, на основі проведених досліджень обґрунтовано застосування методів системного аналізу стану водно-болотних угідь з використанням даних дистанційного зондування Землі і наземних спостережень на прикладі верхів'я Київського водосховища з метою розв'язання актуальних задач щодо комплексного, збалансованого природокористування та охорони довкілля.

Виходячи із досвіду проведених робіт, убачаємо перспективи подальших розвідок у дослідженнях процесів, що відбуваються у водосховищах всього каскаду Дніпра з різним рівнем зарегулювання та відмінними стадіями формування водно-болотних комплексів − угідь, цінних для збереження природного різноманіття.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. **Томченко О. В.** Використання методу багатокритеріальної оптимізації матеріалів ДЗЗ та наземних даних для оцінки екологічного стану Київського водосховища / О. В. Томченко // Екологічна безпека та природокористування: зб. наук. праць / М-во освіти і науки України, Нац. ун-т буд-ва і архіт., НАН України, Ін-т телекомунікацій і глобал. інформ. простору; [редкол.: О. С. Волошкіна, О. М. Трофимчук (голов.ред.) та ін.]. – Київ, 2014. – Вип. 15. – С. 31–39.

2. **Томченко О. В.** Використання космічної інформації ДЗЗ та наземних спостережень для комплексної оцінки екосистемних послуг Київського водосховища на основі методу аналізу ієрархій / О. В. Томченко // Космічна наука і технологія. – 2014. – Т. 20. № 5(90).– С. 41–49.

3. **Томченко О. В.** Моделювання екологічного стану антропогенних ландшафтів на основі космічного геомоніторингу / О. В. Томченко, А. В. Соколовська, О. Д. Федоровський // Геоінформатика. – Київ: Карбон ЛТД, 2015. – № 1(53). – С. 77–84.

4. Sokolovska A. Sustainable development and safety for territories using systems analysis methods and remote sensing materials/ Anna Sokolovska, **Olga Tomchenko** //

Modern Science – Moderni veda. – Praha. – Czech Republic: Nemoros, 2014. – № 4. – P. 148–155

5. Зуб Л. М. Формування рослинного покриву та деякі особливості гідрохімічного режиму Київського водосховища / Л. М. Зуб, **О. В. Томченко** // Екологічні науки: науково-практичний журнал; голов. ред. О. І. Бондар. – Київ: ДЕА, 2015. – № 8. – С. 27–39.

6. Спосіб дешифрування оптичних аномалій на аерокосмічних знімках [Текст] : ПАТЕНТ України №104662 / Федоровський О. Д., Якимчук В. Г., Соколовська А. В., **Томченко О. В.**; власник патенту ДУ "Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України". – № а 2012 09156; заявл. 25.07.2012; опубл. 25.02.14, Бюл. № 16–1 с.

7. Стародубцев В. М. Формування дельтових ландшафтів у верхніх водосховищах Дніпровського каскаду [Електронний ресурс] / В. М. Стародубцев, В. А. Богданець, С. В. Яценко, **О. В. Томченко**, Н. В. Скіміра, Б. В. Урбан // Електронний журнал «Наукові доповіді НУБіП України». – 2010-5(21). 13 с. – Режим доступу до журн.: http://www.nbuv.gov.ua/e-journals/Nd/2010_5/10svmdrc.pdf

Опубліковані праці апробаційного характеру:

8. Стародубцев В. М. Утворення нових ландшафтів у вершині Кременчуцького водосховища / В. М. Стародубцев, В. А. Богданець, **О. В. Томченко**, С. В. Яценко // Проблеми природокористування, сталого розвитку та техногенної безпеки регіонів: матеріали п’ятої міжнародної науково-практичної конференції (м. Дніпропетровськ, Україна, 06-09 жовтня 2009). – Дніпропетровськ, 2009. – Ч. ІІ. – С. 21–23.

9. Стародубцев В. М. Земельні ресурси у нових дельтах Дніпра / В. М. Стародубцев, **О. В. Томченко**, С. В. Яценко // Моніторинг навколишнього природного середовища: науково-методичне, нормативне, технічне і програмне забезпечення: матеріали 4-ої науково-практичної конференції (м. Коктебель, АР Крим, 21-25 вересня 2009). – Київ: НПЦ Екологія наука техніка, 2009. – С. 49–51.

10. Стародубцев В. М. Формування нових дельт у Дніпровських водосховищах / В. М. Стародубцев, В. А. Богданець, **О. В. Томченко**, С. В. Яценко, Н. В. Скіміна // Водні ресурси, проблеми раціонального використання, охорони і відтворення: матеріали 3-ї науково-практичної конференції (м. Коктебель, АР Крим, 21-25 червня 2010). – Київ: НПЦ Екологія наука техніка, 2010. – С. 39–41.

11. Соколовська А. В. Використання системних методів аналізу космічної інформації ДЗЗ для визначення екологічного стану антропогенно змінених ландшафтів / А. В. Соколовська, **О. В. Томченко** // Геоінформатика – теоретичні і прикладні аспекти: матеріали 13-ї Міжнародної конференції (м. Київ, Україна, 13–16 травня 2013). – Київ: Наукова думка, 2013. – С. 1–6.

12. **Томченко О. В.** Дослідження змін та особливості дешифрування мілководдя Київського водосховища на основі матеріалів ДЗЗ / О. В. Томченко, О. Д. Федоровський // Проблемы, методы и средства исследований Мирового океана: сб. докладов третьей международной научно-практической конференции (г. Запорожье, Украина, 14–15 мая 2013). – Запорожье: НАН Украины, Научно-технический центр панорамных акустических систем, 2013. – С. 289–299.

13. **Томченко О. В.** Исследование динамики зарастания Киевского водохранилища с использованием ГИС/ДЗЗ-технологий / О. В. Томченко, П. В Луценко // Мониторинг окружающей среды: сборник материалов II Международной научно-практическая конференция (г. Брест, Республика Беларусь, 25–27 сентября 2013). – Брест: Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина, 2013. – Ч. 1. – С. 146–148.

14. **Томченко О. В.** Анализ временных изменений зарастания макрофитами Киевского водохранилища по данным дистанционного зондирования Земли / О. В. Томченко // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: сборник материалов Одиннадцатой Всероссийской открытой конференции (ИКИ, г. Москва, РФ, 11–15 ноября 2013). – Москва: ИКИ, 2013. – С. 438.

15. **Томченко О. В.** Оцінка екологічного стану акваторій водно-болотних угідь верхніх ділянок Київського водосховища / О. В. Томченко, Л. М. Зуб, А. В. Сагайдак // Екологія водно-болотних угідь і торфовищ: зб. наук. статей. Голов. ред. В. В. Коніщук. – Київ: ТОВ НВП «Інтерсервіс», 2014. – С. 246–251.

16. **Томченко О. В.** Тенденції зміни стану Київського водосховища для соціально-економічного та природоохоронного використання / О.В. Томченко // II Міжнародна науково-практична конференція, присвячена Всесвітньому дню води (Вода і енергія): матеріали наук.-практ. конф. Ред. кол.: В. А. Сташук [та ін.] (м. Київ, Україна, 21 березня 2014). – Київ: Державний інститут управління та економіки водних ресурсів, 2014. – С. 12–14.

17. Sokolovska A. The methods and models of using of satellite images to assess the condition of natural and anthropogenic landscapes / A. Sokolovska, **O. Tomchenko**, A. Fedorovsky // Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки: матеріали доповідей четвертої міжнародної конференція (Київ, Україна, 26–30 травня 2014). – Київ: Наукова думка, 2014. – С. 86–88.

18. **Томченко О. В.** Ретроспективний аналіз стану Київського водосховища з використанням матеріалів космічних знімань/ О. В. Томченко // 14-та Українська конференція з космічних досліджень: тези доповідей (м. Ужгород, Україна, 8–12 вересня 2014). – Київ, 2014. – С. 156.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

19. **Томченко О. В.** Комплексна оцінка екологічного стану водойм на основі космічної інформації дистанційного зондування Землі (на прикладі оз. Світязь та верхів’я Київського водосховища) / О. В. Томченко, Л. В. Підгородецька, О. Д. Федоровський // Гідроакустичний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану): Зб. наук. пр. – Запоріжжя: НТЦ ПАС НАН України, 2013. – № 10. – С. 111–117.

20. **Томченко О. В.** Використання космічної інформації дистанційного зондування Землі для моніторингу стану крупного рівнинного водосховища / О. В. Томченко // Гідроакустичний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану): Зб. наук. пр. – Запоріжжя: НТЦ ПАС НАН України, 2014. – № 11. – С. 135–143.

АНОТАЦІЯ

Томченко О. В. Обґрунтування методів системного аналізу стану водно-болотних угідь з використанням даних дистанційного зондування Землі і наземних спостережень (на прикладі верхів'я Київського водосховища). – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.07.12 – дистанційні аерокосмічні дослідження. – Державна установа «Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України», Київ, 2015.

Дисертаційну роботу присвячено дослідженню способів удосконалення методичного забезпечення космічного геомоніторингу стану водно-болотних угідь на основі комплексування даних дистанційного зондування Землі й наземних спостережень шляхом розроблення відповідних математичних моделей системного аналізу та формування узагальнюючих критеріїв (на прикладі верхів'я Київського водосховища).

Визначено низку інформативних ознак структурних одиниць водно-болотних угідь – основних класів/типів біотопів, що надійно дешифруються на космічних знімках та є індикаторними ознаками стану територій, що досліджуються. Удосконалено методику багатокритеріальної оптимізації шляхом формування комплексного критерію оцінки якості води Київського водосховища на основі даних дистанційного зондування Землі та апробовано ієрархічну модель експертної оцінки екологічних функцій водно-болотних угідь на основі методу аналізу ієрархій з позиції забезпечення трьох типів екосистемних послуг: підтримання біотичного різноманіття, господарчого водозабезпечення та виробництва гідроелектроенергії. Розроблено модель адаптивного балансу впливів для прогнозування та моделювання взаємозв'язків структурних змін водно-болотних угідь та якості води. Вперше на основі космічної інформації дистанційного зондування Землі отримано прогнозну оцінку стану Київського водосховища до 2023 р. та зазначено перспективи подальших досліджень на основі комплексування даних дистанційного зондування Землі та наземних спостережень у системі геомоніторингу з метою розв’язання актуальних задач щодо комплексного, збалансованого природокористування та охорони довкілля.

Ключові слова: дистанційне зондування Землі, водно-болотні угіддя, системний аналіз, аналіз ієрархій, багатокритеріальна оптимізація, адаптивний баланс впливів.

АННОТАЦИЯ

Томченко О. В. Обоснование методов системного анализа состояния водно-болотных угодий с использованием данных дистанционного зондирования Земли и наземных наблюдений (на примере верховья Киевского водохранилища). – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.12 – дистанционные аэрокосмические исследования. – Государственное учреждение «Научный Центр аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины», Киев, 2015.

Диссертационная работа посвящена исследованию способов совершенствования методического обеспечения космического геомониторинга состояния водно-болотных угодий на основе комплексирования данных дистанционного зондирования Земли и наземных наблюдений путём разработки соответствующих математических моделей системного анализа и формирования обобщающих критериев (на примере верховья Киевского водохранилища).

Определён ряд информативных признаков структурных единиц водно-болотных угодий – основных классов/типов биотопов, которые надёжно дешифрируются по космическим снимкам и являются индикаторными признаками состояния исследуемой территории. Усовершенствована методика многокритериальной оптимизации, путём формирования комплексного критерия оценки качества воды Киевского водохранилища на основе данных дистанционного зондирования Земли и апробирована иерархическая модель экспертной оценки экологических функций водно-болотных угодий Киевского водохранилища на основе метода анализа иерархий с позиции обеспечения трёх типов экосистемных услуг: поддержания биотического разнообразия, хозяйственного водоснабжения и производства гидроэлектроэнергии. Разработана модель адаптивного баланса влияний для прогнозирования и моделирования взаимосвязей структурных изменений водно-болотных угодий и качества воды. Впервые на основе космической информации дистанционного зондирования Земли получена прогнозная оценка состояния Киевского водохранилища до 2023 г. и раскрыты перспективы дальнейших исследований на основе комплексирования данных дистанционного зондирования Земли и наземных наблюдений в системе геомониторинга с целью решения актуальных задач комплексного, сбалансированного природопользования и охраны окружающей среды.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, водно-болотные угодья, системный анализ, анализ иерархий, многокритериальная оптимизация, адаптивный баланс влияний.

ANNOTATION

Tomchenko O. V. Substantiation of wetland system analysis methods using remote sensing data and ground observations (in the upper Kyiv reservoir case study) – Manuscript.

On obtain the Candidate of Sciences Degree Thesis, specialty 05.07.12 – remote aerospace researches. – State institution "Scientific center for aerospace researches of the Earth of IGS NAS of Ukraine", Kyiv, 2015.

The thesis is devoted to investigation the ways of improving the methodological provision of space geominotoring of wetlands based on integration of remote sensing data and ground observations by developing proper mathematical models of system analysis and formation of generalizing criteria (the evidence from Kyiv reservoir).

A number of informative features of operational unit of wetlands – main types of habitats were identified, which are reliably interpreted on satellite images, and which are indicators of the state of the territory. The classification scheme of indicator habitat types (on Landsat images) was received, including 7 basic types: broadleaved swamp woodland

and riverine scrub; native conifer plantations; wet grasslands; coastal wetlands habitat; macrophytes habitat; sandy coast; smooth-flowing watercourses, which, in further, served as key elements of systemic analysis of wetland water bodies.

The technique of multi-objective optimization was improved, by forming a complex evaluation criteria for water quality of Kyiv reservoir headwater, based on remote sensing data. Efficiency analysis of proposed method taking into account the indicators, which have positive and negative effects on the ecological state of water bodies showed the change of Kiev reservoir conditions towards a slight deterioration the quality of water consumption.

A hierarchical model of expert assessment of wetlands ecological functions, based on the analytic hierarchy process was developed. The model was tested for the assessment of the Kyiv reservoir ecosystem during the period 1988 – 2013 on purpose of tree types of ecosystem service satisfaction: to protect biotic diversity, municipal water supply and hydropower production. It was established that the processes occurring in the reservoir has multidirectional value for production and supporting biodiversity ecosystem functions.

A distinct relationship is determined that exists between the dynamics of changes in habitat structure and condition of the reservoir, based on information obtained from RS and ground observations.

The model of adaptive balance effects for different habitat types' prediction and modeling in general water pollution was developed. Testing the adaptive balance of causes model of wetlands components the Kyiv reservoir, which were confirmed by direct dependence of water quality on the degree of habitat fitali.

Modelling was conducted and for the first time ever space-based remote sensing information the prognosis data till 2023 were obtained, which showed a clear tendency to further increase in the area of higher thickets of aquatic plants (fitali habitat), reduction of vegatation-free waters and as a result, self-cleaning function of Kyiv reservoir, water quality and potential of bio-resources improving.

Predicting further progress processes of the landscape transformation in the upper Kiev reservoir should be noted that during 2060, in case of modern trends of transforming the main habitat types keep going the same, we will see a significant decrease in deep waters of the reservoir areas and restore stream area and flood plain complexes rivers Dnieper and Pripyat in the upper Kyiv reservoir.

The results give reason to recommend the use of the techniques of comprehensive evaluation of the wetland state and ecomonitoring carrying out using mathematical models of systems analysis based on the integration of remote sensing data and ground observation on purpose to solve urgent problems of comprehensive, balanced environmental management and nature conservation.

Based on the experience of the work were done the are high prospects for implementation of developed system analysis methodology for investigation of the processes occurring in the all Dnieper cascade reservoirs with different levels of regulation of formation and different stages of wetland complexes – lands, valuable for preserving natural diversity of water biota.

Keywords: remote sensing, wetlands, systems analysis, analytic hierarchy process, multi-objective optimization, adaptive balance of causes.