
doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.08.064>

УДК 528.88

О.В. Томченко, О.Д. Федоровський

ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі

Інституту геологічних наук НАН України”, Київ

E-mail: tomch@i.ua

Оцінка стану водойм на основі інтеграції космічної і наземної інформації (на прикладі верхів'я Київського водосховища)

Представлено членом-кореспондентом НАН України О.Д. Федоровським

Досліджено способи 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).

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

Одним із найбільших техногенних перетворень природи України в минулому столітті було гідротехнічне будівництво в долині Дніпра, в результаті чого на більш ніж 1000 км відрізок на місці заплавлених 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.

Оцінювати динаміку змін, що відбуваються на водоймах, досліджувати ретроспективу процесів та сучасний екологічний стан найефективніше на основі систематичного дистанційного аерокосмічного зондування Землі в поєднанні з наземними вимірами [1].

Метою роботи є дослідження на основі системного підходу сучасного екологічного стану водойм на прикладі ВБУ верхніх ділянок Київського водосховища з позиції раціонального та екологічно обґрунтованого використання водних ресурсів дніпровського каскаду, підтримання належної якості води і стану біорізноманіття.

Відповідно до поставленої мети вирішувалися такі задачі:

- дешифрування космічних знімків (КЗ) і обробка наземних спостережень для розпізнавання структури ВБУ, визначення її інформативних ознак [2];
- оцінка якості води для потреб водоспоживання на основі дистанційних та наземних спостережень з використанням удосконаленої методики багатокритеріальної оптимізації [3];

© О.В. Томченко, О.Д. Федоровський, 2017

- експертна оцінка стану ВБУ, моделювання й порівняння трьох напрямків використання ресурсів водосховища (підтримання біотичного різноманіття, господарчого водозабезпечення та виробництва гідроелектроенергії) на основі розробленої ієрархічної моделі [4];
- оцінка впливу складових ВБУ на загальне забруднення води шляхом моделювання на основі сформованої математичної моделі адаптивного балансу впливу [5, 6].

В основу роботи покладено матеріали тематичного дешифрування 17 КЗ за період з 1985 по 2015 рр. (загальною площею 10285 км²) і дані польових досліджень 2012–2013 рр. у межах тестових полігонів (виконано 3 маршрути протяжністю 81 км), що були самостійно оброблені та систематизовані. А також проаналізовано наявні дані наземних спостережень Українського гідрометеорологічного центру (УкрГМЦ) стану Київського водосховища за період з 1989 по 2014 рр. в межах існуючих трьох гідропостів, що знаходяться в районі м. Чорнобиль, с. Страхолісся та с. Нові Петрівці.

У результаті дешифрування КЗ КА Landsat 5, 7, 8 отримано карти розподілу та площі основних типів біотопів за період з 1985 по 2015 рр. через кожні 2 роки (таблиця).

Встановлено, що для отримання максимально коректних карт розподілу типів біотопів доречно компонувати різні методи класифікації: для середнього просторового розрізнення (КЗ Landsat) — штучні нейронні мережі (рис. 1), а для високого (КЗ QuickBird) — об'єктно-орієнтований підхід.

Для прогнозної оцінки подальшої трансформації ВБУ верхів'я Київського водосховища на основі даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) були розраховані ландшафтні метрики, що описують ландшафтну структуру за допомогою кількісних характеристик різно-

Результати обчислення площ (км²) основних типів біотопів верхів'я Київського водосховища за матеріалами дистанційного зондування Землі

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

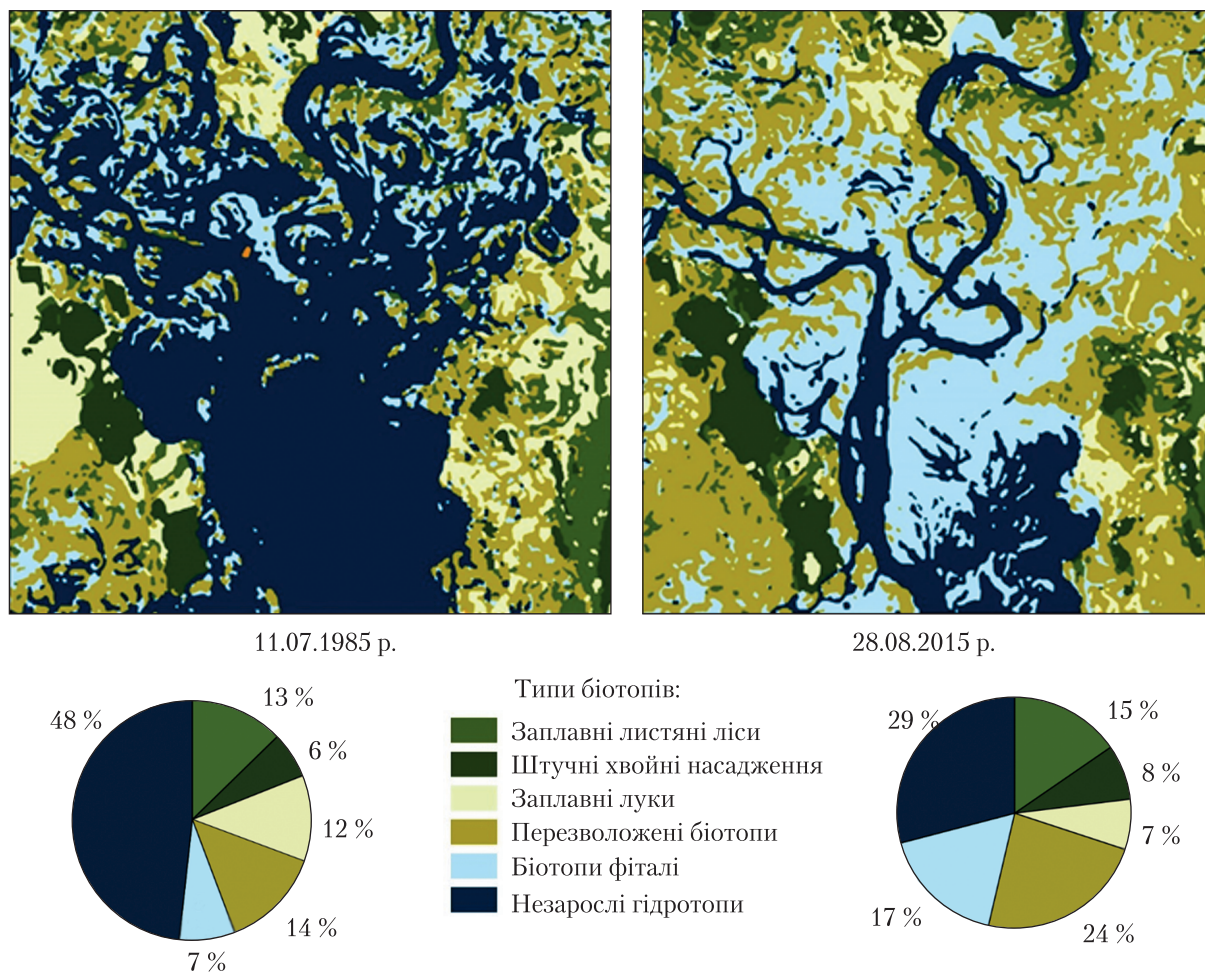


Рис. 1. Графічне зображення результатів піксельно-орієнтованої класифікації КЗ КА Landsat методом штучних нейронних мереж для виділення структурних одиниць (типів біотопів) ВБУ

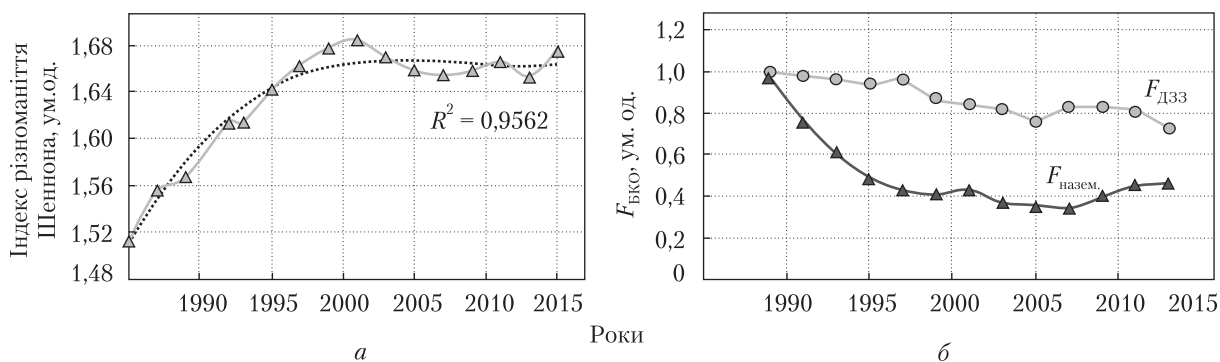


Рис. 2. Результати дослідження стану водно-болотних угідь верхів'я Київського водосховища: а — оцінка ландшафтної структури за індексом ландшафтного різноманіття Шеннона за період 1985–2015 рр.; б — визначення взаємозв'язку між структурою біотопів і станом ВБУ за 1987–2013 рр. на основі даних ДЗЗ ($F_{ДЗЗ}$) і наземних спостережень ($F_{назем}$)

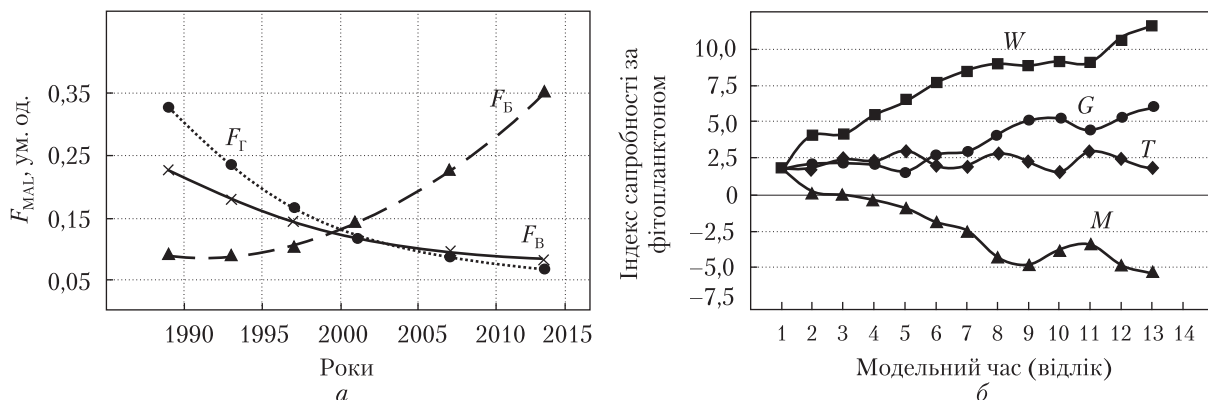


Рис. 3. Результати оцінки і моделювання впливу зміни структури ВБУ Київського водосховища на основі АВС-методу: *a* — оцінка водогосподарсько-екологічного значення екосистеми Київського водосховища за період 1989–2013 рр. ($F_{\text{Б}}$ — біорізноманіття; $F_{\text{В}}$ — водопостачання; $F_{\text{Г}}$ — гідроенергетика); *б* — моделювання впливу різних біотопів на загальне забруднення води (W — незарослі гідротопи; G — заплавні луки; T — ліси; M — мілководдя)

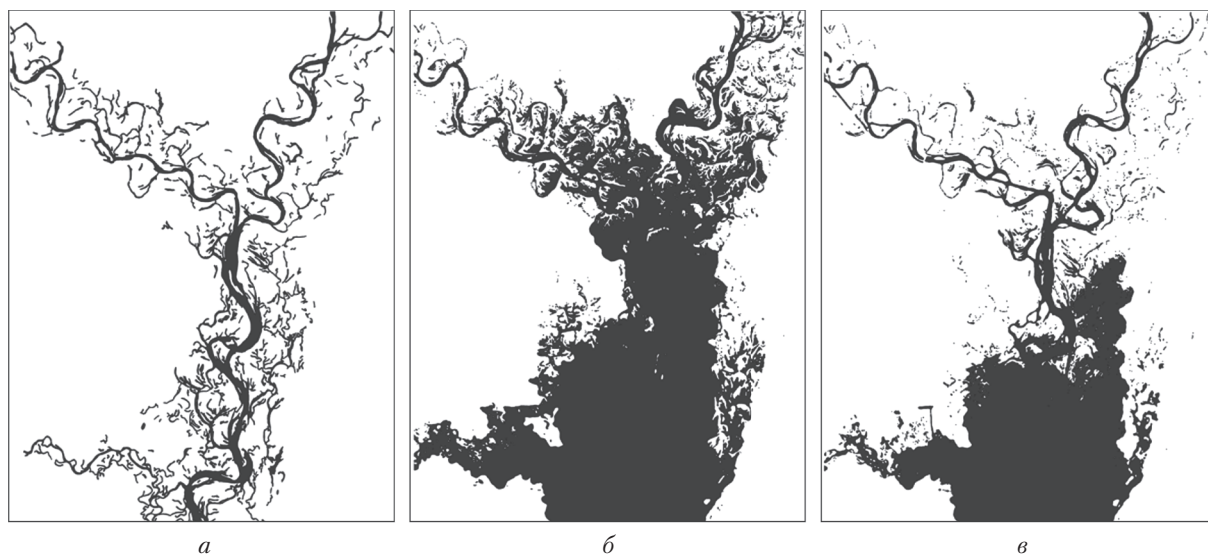


Рис. 4. Відновлення природного стану русла та заплави річок Дніпро і Прип'ять, вигляд за картографічними та дистанційними аерокосмічними матеріалами: *a* — на топографічній карті 1943 р. (до утворення водосховища); *б* — на космічному знімку Landsat 5 (1985 р.); *в* — на космічному знімку Landsat 8 (2015 р.)

манітності (площі, форми, лінії кордонів виділених типів біотопів). Як основний аналітичний інструмент використано ПО Fragstats 4.2.

Розрахунки індексу Шеннона (рис. 2, *a*) показали, що процеси ландшафтоперетворень у верхів'ї Київського водосховища йшли шляхом досягнення найбільшого різноманіття, фрагментації доступних для трансформації акваторій та оптимального розподілу площ між різними типами біотопів [7].

Як критерій оцінки якості води водосховища використовувалася зведена функція належності $F_{\text{БКО}}$, отримана методом багатокритеріальної оптимізації. При цьому $F_{\text{назем}}$ роз-

раховували на основі середньорічної концентрації гідрохімічних показників, а $F_{ДЗЗ}$ — на основі тематичного дешифрування біотопів ВБУ на космознімках. Взаємозв'язок функції належності $F_{ДЗЗ}$ з $F_{назем}$ має кореляцію з імовірністю $R = 0,7$, чого достатньо для оперативного контролю якості води на основі матеріалів ДЗЗ. Функції належності $F_{БКО}$ (див. рис. 2, б), отримані за даними ДЗЗ та наземних спостережень УкрГМЦ, відображають зміну стану Київського водосховища в бік незначного погіршення якості води для потреб водоспоживання. До цього у 2005 р. 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^+ , $\text{P}_{\text{заг}}$, хімічного споживання кисню, кольоровості, завислих речовин.

Для порівняння ступеня важливості екосистемних функцій верхів'я водосховища як цінного водно-болотного угіддя та значення Київського водосховища як техногенного комплексу для водопостачання і потреб гідроелектростанції розроблено інтегральну ієрархічну модель стану водойми на основі методу аналізу ієрархій.

Для розв'язання поставленої задачі було вивчено широкий набір наземних гідрофізичних, гідрохімічних, гідробіологічних показників спостережень УкрГМЦ, які відображають особливості абіотичних і біотичних компонентів водної екосистеми.

Результати оцінки і моделювання (рис. 3) впливу зміни біотопічної структури ВБУ на екосистему водосховища показали, що перерозподіл площ біотопів і заростання мілководдя сприяє загальному поліпшенню екологічного стану водойми.

Прогнозуючи подальший хід процесів ландшафтоперетворень у верхів'ї Київського водосховища, слід зазначити, що менше ніж через 50 років, у разі збереження сучасних тенденцій трансформації основних типів біотопів, відбудеться істотне зменшення площ глибоководних акваторій водосховища і відновлення руслових ділянок та пограничних заплавлених комплексів річок Дніпро та Прип'ять. Цей процес відображено на рис. 4.

Таким чином, визначено низку інформативних ознак структурних одиниць водойм (водно-болотних угідь) — основних класів/типів біотопів, що надійно дешифруються на космічних знімках і є індикаторними ознаками стану досліджуваних територій. Удосконалено методику багатокритеріальної оптимізації шляхом формування комплексного критерію оцінки якості води Київського водосховища на основі даних ДЗЗ. Апробовано сформовану ієрархічну модель експертної оцінки трьох типів екосистемних послуг: підтримання біотичного різноманіття, господарчого водозабезпечення і виробництва гідроелектроенергії. Розроблено модель адаптивного балансу впливів для прогнозування і моделювання взаємозв'язків структурних змін водно-болотних угідь та якості води. Визначено перспективи подальших досліджень на основі комплексування даних ДЗЗ і наземних спостережень для актуальних задач збалансованого природокористування та охорони довкілля.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Лялько В.И., Федоровский А.Д., Попов М.А., Воробьев А.И., Кичка А.А., Кононов В.И., Костюченко Ю.В., Лищенко Л.П., Мычак А.Г., Сахацкий А.И., Станкевич С.А., Ходоровский А.Я. Использование данных спутниковой съемки для изучения природоресурсных проблем. *Косм. дослідження в Україні*. 2002—2004. С. 7—14.
2. Спосіб дешифрування оптичних аномалій на аерокосмічних знімках: пат. 104662 Україна. МПК G01V 9/00, G01S 17/00, G06K 9/00; заявл. 25.07.2012. Опубл. 25.02.2014.

3. Томченко О.В. Використання методу багатокритеріальної оптимізації для оцінки екологічного стану Київського водосховища на основі матеріалів космічної зйомки та наземних спостережень. *Екол. безпека та природокористування*. 2014. Вип. 15. С. 31–39.
4. Томченко О.В. Використання космічної інформації ДЗЗ та наземних спостережень для комплексної оцінки екосистемних послуг Київського водосховища на основі методу аналізу ієрархій. *Космічна наука і технологія*. 2014. **20**, № 5. С. 41–49.
5. Томченко О.В., Соколовская А.В., Федоровский А.Д. Моделирование экологического состояния антропогенных ландшафтов на основе космического геомониторинга. *Геоинформатика*. 2015. № 1. С. 77–84.
6. Sokolovska A., Tomchenko O. Sustainable development and safety for territories using systems analysis methods and remote sensing materials. *Modern Science – Moderni veda*. 2014. **1**, № 4. P. 148–155.
7. Зуб Л.Н., Томченко О.В. Использование космической информации ДЗЗ для изучения зарастания крупного равнинного водохранилища. *Гидробиотика 2015: Материалы VIII Всерос. конф. с междунар. участием по водным макрофитам* (Борок, 16–20 окт. 2015). Ярославль: Филигрань, 2015. С. 120–123.

Надійшло до редакції 31.01.2017

REFERENCES

1. Lyalko, V. I., Fedorovskiy, A. D., Popov, M. A., Vorobev, A. I., Kichka, A. A., Kononov, V. I., Kostyuchenko, Yu. V., Lischenko, L. P., Myichak, A. G., Sahatskiy, A. I., Stankevich, S. A. & Hodorovskiy, A. Ya. (2004). Usage of satellite data to study natural resource issues. Space research in Ukraine 2002–2004, pp. 7-14 (in Ukrainian).
2. Pat. 104662 UA, IPC G01V 9/00, G01S 17/00, G06K 9/00, Decryption method of optical anomalies in the aerospace images, Fedorovsky, A. D., Yakymchuk, V. H., Sokolovska, A. V. & Tomchenko, O. V., Kiev, Publ. 25.02.2014 (in Ukrainian).
3. Tomchenko, O. V. (2014). Usage of multiobjective optimization of remotely sensed data and in-situ measurements for assessing the ecological condition of Kiev reservoir. *Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannya*, Iss. 15, pp. 31-39 (in Ukrainian).
4. Tomchenko, O. V. (2014). Using remote sensing imagery and ground-based observations for integrated assessment of the Kyiv reservoir's ecosystem services on the basis of analytic hierarchy process. *Space Science and Technology*, 20, Iss. 5, pp. 41-49 (in Ukrainian).
5. Tomchenko, O. V., Sokolovska, A. V. & Fedorovsky, A. D. (2015). Modeling the ecological state of anthropogenic landscapes based on space geomonitoring. *Geoinformatika*, No. 1, pp. 77-84 (in Russian).
6. Sokolovska, A. & Tomchenko, O. (2014). Sustainable development and safety for territories using systems analysis methods and remote sensing materials. *Modern Science – Moderni veda*, No. 4, pp. 148-155.
7. Zub, L. N. & Tomchenko, O. V. (2015, October). Using Remote sensing space information for study of overgrowing in a big plain reservoir. In *Hydrobotany 2015: Proceedings of 8th All-Russian Conference with International Participation on aquatic macrophytes*, Borok (pp. 120-123), Yaroslavl: Filigran (in Russian).

Received 31.01.2017

О.В. Томченко, А.Д. Федоровский

ГУ “Научный центр аэрокосмических исследований Земли
Института геологических наук НАН Украины”, Киев
E-mail: tomch@i.ua

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ВОДОЕМОВ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ И НАЗЕМНОЙ ИНФОРМАЦИИ (НА ПРИМЕРЕ ВЕРХОВЬЯ КИЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА)

Исследованы способы 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).

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

O.V. Tomchenko, A.D. Fedorovsky

Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth
of Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, Kiev
E-mail: tomch@i.ua

ASSESSMENT OF THE STATUS OF WETLANDS BASED
ON THE INTEGRATION OF SPACE AND TERRESTRIAL INFORMATION
(BY THE EXAMPLE OF THE UPPER KIEV RESERVOIR)

The ways of improving the methodological provision of a space geominotoring of the state of wetlands based on the integration of remote sensing data and ground observations by developing the proper mathematical models of system analysis and the formation of generalizing criteria (the evidence from the upper Kyiv reservoir) are studied.

Keywords: remote sensing, wetlands, system analysis, analysis of hierarchies, multiobjective optimization, adaptive balance of causes.