

ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ ВОДНИХ ЕКОСИСТЕМ НА ОСНОВІ МЕТОДІВ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ АЕРОКОСМІЧНОЇ Й НАЗЕМНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Федоровський О.Д.¹, Зуб Л.М.², Томченко О.В.¹, Хижняк А.В.¹,
Ходоровський А.Я.¹, Підгородецька Л.В.³

¹ДУ «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі
Інституту геологічних наук Національної академії наук України»
вул. Олеся Гончара, 55-Б, 01601, м. Київ
adfedorovsky@ukr.net
tomch@i.ua
AVSokolovska@i.ua

²Інститут еволюційної екології Національної академії наук України
вул. акад. Лебедева, 37, 03143, м. Київ
lesyazub@yandex.ru

³Інститут космічних досліджень Національної академії наук
та Державного космічного агентства України
просп. Академіка Глушкова, 40, корп. 4/1, 03680, м. Київ
pidgorodetska@ukr.net

У статті розглянуто результати аналізу аерокосмічної та наземної інформації під час вирішення різносторонніх тематичних завдань оцінювання стану водних екосистем за методами системного аналізу. Наведено приклади дослідження трансформації водних екосистем, оцінювання якості води, визначення елементів гідрологічного режиму, моніторингу забруднення води, дослідження літоральної міграції донних відкладів і розподілу радіонуклідів на території Київського водосховища, гирлової зони р. Прип'ять та оз. Світязь. *Ключові слова:* дистанційне зондування Землі (ДЗЗ), природні територіальні комплекси (ПТК), вища водна рослинність (ВВР), якість води, метод багатокритеріальної оптимізації, метод фрактального аналізу, метод аналізу ієрархій, метод адаптивного балансу впливів.

Оценка состояния водных экосистем на основе методов системного анализа аэрокосмической и наземной информации. Федоровский А.Д., Зуб Л.М., Томченко О.В., Хижняк А.В., Ходоровский А.Я., Подгородецкая Л.В. В статье рассмотрены результаты анализа аэрокосмической и наземной информации при решении разносторонних тематических задач оценки состояния водных экосистем на основе методов системного анализа. Приведены примеры исследования трансформации водных экосистем, оценки качества воды, определения элементов гидрологического режима, мониторинга загрязнения воды, исследования литоральной миграции донных отложений и распределения радионуклидов на территории Киевского водохранилища, устьевой зоны р. Припять и оз. Свитязь. *Ключевые слова:* дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), природные территориальные комплексы (ПТК), высшая водная растительность (ВВР), качество воды, метод многокритериальной оптимизации, метод фрактального анализа, метод анализа иерархий, метод адаптивного баланса влияний.

The assessment of conditions of aquatic ecosystems based on the methods of system-oriented analysis of aerospace and land information. Fedorovsky A., Zub L., Tomchenko O., Khyzhnyak A., Pidgorodetska L., Khodorovskiy A. The article deals with the results of analysis of aerospace and land information in solving diverse thematic tasks of assessment of conditions of aquatic ecosystems based on the methods of system-oriented analysis. The examples of research of transformation of aquatic ecosystems, assessment of the quality of water, determination of the elements of hydrological regime, monitoring of water contamination, research of littoral migration of sediments and distribution of radionuclides on the territory of the Kiev reservoir and estuarine zone of the river Pripyat and the lake Svitiaz are given in the article. *Key words:* remote sensing of the Earth (RSZ), natural territorial complexes, higher aquatic vegetation (VVR), water quality, multicriterial optimization method, fractal analysis method, hierarchy analysis method, adaptive balance of influences method.

Постановка проблеми. Оцінювання стану водних екосистем в умовах техногенезу є основною проблемою раціонального використання водних ресурсів, охорони й відновлення їх природного стану. На межі тисячоліть екологічне оздоровлення басейну р. Дніпро стало одним із пріоритетних напрямів природоохоронної діяльності уряду України, адже

його водні ресурси становлять 80% водних ресурсів України та забезпечують водою понад 32 млн. населення і 2/3 господарського потенціалу країни.

Головним завданням міжнародної програми спостереження за кліматом *Global Climate Observing System (GCOS)* є забезпечення її необхідними методами й комп'ютерними програмами для виявлення

ресурсів води високої якості; виявлення змін у гідробиологічному різноманітті; аналіз ступеня загрози водним екосистемам тощо. Отже, комплексне застосування аерокосмічних і наземних досліджень у поєднанні з інтерпретацією результатів на основі методів системного аналізу становить значний інтерес і дає змогу вирішувати численні питання щодо моніторингу водних екосистем [1].

Виклад основного матеріалу. Використання інформації космічного геомоніторингу дає можливість не тільки оперативно отримувати зображення водних об'єктів, що займають великі площі, а й фіксувати зміни їх характеристик у просторі та часі. Так, дешифрування космічних знімків водних об'єктів допомагає за низкою ознак визначити особливості гідрографічної мережі та гідрологічного режиму, типи біотопів, аквальні ландшафти і їх структуру. За супутниковими знімками можна виділити ділянки заболочування і заростання, обчислювати площі, зайняті вищою водною рослинністю (ВВР), і незарослі акваторії, відслідковувати розвиток явищ «цвітіння води» [2; 3; 4].

Мета статті – обґрунтувати оцінку стану водних екосистем на основі методів системного аналізу аерокосмічної та наземної інформації з використанням знань із суміжних наукових дисциплін – екології, гідробіології, гідрології, гідрохімії та геології.

Водні об'єкти являють собою складні системи, аналіз яких відбувається на різних рівнях абстрактного опису з урахуванням ієрархії їх складників: ландшафтні комплекси, гідрологічні, геологічні, гідробіологічні та гідрохімічні характеристики. При цьому оцінювання екологічного стану водних об'єктів здійснюється на основі узагальненого критерію, що фактично інтегрує результати досліджень у різних наукових напрямках [5; 6].

Методи системного аналізу. За допомогою методів системного аналізу обґрунтовуються найбільш раціональні математичні моделі використання космічної інформації під час вирішення різних тематичних завдань, моделюється і прогнозується розвиток процесів, що досліджуються.

Під час вирішення завдань, для яких потрібні одночасні найкращі значення всіх критеріїв, кожний із яких характеризує один із боків розглянутої проблеми, використовується **метод багатокритеріальної оптимізації** (*Multi-objective optimization*) [7]. На основі цього методу здійснюється інтегральне оцінювання стану водних екосистем за всіма їх складниками (біологічні та абіотичні) й оцінюванням змін щодо попередніх років дослідження. У нашому випадку описаний підхід включає обчислення таких функцій [8]:

– близькості S , що характеризує близькість окремих значень характеристик складників водного об'єкта за поточний і попередній періоди;

– відповідності f , яка показує ступінь відповідності значень кожної характеристики всіх складників об'єкта за поточний і попередній періоди;

– належності F , яка показує ступінь належності кожного складника водного об'єкта за поточний і попередній періоди.

Для оцінювання вагових коефіцієнтів складників водних об'єктів $\rho(b_i, a_i)$ використовується метод експертних оцінок – **аналізу ієрархії** (*Analytic Hierarchy Process*), запропонований Т. Сааті на основі лінгвістичного підходу та експертної інформації. Метод дає можливість на основі експертних оцінок сформулювати необхідну цільову функцію і провести рейтинг альтернативних варіантів [9].

Використання **фрактального аналізу** (*Fractal analysis*) дає змогу оцінити ступінь упорядкованості і стійкості системи до зовнішнього впливу, що неможливо визначити іншими статистичними методами. Як кількісну міру, яка описує структуру складників об'єкта, прийнято використовувати фрактальну розмірність Рені – D_q , що показує, наскільки щільно й рівномірно елементи цієї множини заповнюють евклідовий простір. Значення D_q – інваріантне до розміру вибірки, площі, масштабу. При цьому необхідне виконання двох умов: по-перше, ступеня залежності зростання компонентів статистичної суми Zq від розміру вибірки N , по-друге, незростаючий вигляд функції спектра узагальнених розмірностей D_q , динаміка змін яких характеризує закономірності росту й еволюції процесу [10].

Для моделювання інтегральних процесів в екосистемі використовується **метод адаптивного балансу впливів** (*method of adaptive balance of causes (ABC)*), який дає можливість моделювати і прогнозувати розвиток складних систем і виконувати обчислювальні функції з урахуванням взаємодії всіх модулів, кожен із яких перебуває в стані динамічної рівноваги. Рівновага підтримується функціями впливу, які пов'язують цей модуль з іншими модулями системи. Режим динамічного балансу впливів усередині системи зберігається під управлінням зовнішнього впливу на систему [11].

Розглянемо кілька прикладів використання методів системного аналізу для проведення інтегрального аналізу стану водних екосистем із поєднанням даних аерокосмічних і наземних спостережень.

Приклад № 1. Під час дослідження трансформації екосистеми озера Світязь за 20-річний період (1988–2009 рр.), з огляду на постулат, що склад і структурні особливості ВВР визначають структуру мілководних ландшафтів водойми й формують певні природні територіальні комплекси (далі – ПТК) у зарослевій зоні озера з шести виокремлених для водойми і проаналізованих ПТК, лише чотири виділені як індикаторні. На основі обраних складників і проведених мультифрактальних досліджень матеріалів дешифрування космічних знімків як критеріїв оцінювання екологічного стану озера Світязь прийнято фрактальну розмірність D_q при $q = -4$, коефіцієнт кореляції якої з експертними оцінками по роках дорівнював $r = 0,78$ [12].

Результати прогнозу ймовірних екологічних наслідків на основі системного моделювання методом АВС підтвердили можливість побудови динамічних моделей природного середовища для прогнозування впливу розвитку рекреаційного навантаження на екологічний стан водойми [13].

Приклад № 2. Для одержання оцінки якості води верхів'я Київського водосховища обраний критерій на основі методу багатокритеріальної оптимізації. Як індикаторні критерії обрані біотопи – основна класифікаційна одиниця, що характеризує місце існування організмів (у нашому випадку – угруповань ВВР). За результатами дешифрування й аналізу космічних знімків Landsat за період з 1989 по 2013 рр. виділено основні типи біотопи водно-болотних угідь (далі – ВБУ) верхніх ділянок водойми та одержані дані щодо динаміки їх площ через кожні 2 роки. На основі площ виділених біотопів обчислена функція належності, що характеризувала якість води [14].

У процесі аналізу встановлено типи біотопів, які позитивно й негативно впливають на якість води. Так, параметри максимізуються, коли збільшення показника впливає на якість води позитивно, і мінімізуються, коли позитивно на якість води впливає зменшення показника. Заключним етапом розрахунків було отримання функції належності як суми функцій відповідності всіх параметрів складників за кожен рік дослідження порівняно з 1989 р., прийнятим за еталон. У таблиці 1 наведені значення функції належності $F_{ДЗЗ}$, отримані за результатами дешифрування космічних знімків, які відображають зміну якості води Київського водосховища в бік незначного погіршення за фізико-хімічними характеристиками [15]. Наступним кроком було визначення ступеня взаємозв'язку між динамікою заростання Київського водосховища ВВР і даними гідрохімічних досліджень. У результаті розрахунків виявлено взаємозв'язок функцій належності $F_{ДЗЗ}$ та $F_{назем}$, що становить 0,7 за коефіцієнтом кореляції Пірсона і є цілком достатнім аргументом для підтвердження доцільності оперативного контролю якості води на основі матеріалів ДЗЗ, на відміну від трудомістких наземних спостережень.

Виконані дослідження у випадку як озера Світязь, так і Київського водосховища свідчать про наявність статистичної залежності між наземними, в тому числі експертними, оцінками екологічного стану водних об'єктів та оцінками, здійсненими за космічними знімками з подальшою обробкою отриманих

даних методами фрактального аналізу й багатокритеріальної оптимізації.

Приклад № 3. Функціонування водних екосистем, склад біоти в них і якісні характеристики води насамперед визначаються впливом гідрологічних умов. Зміною внутрішнього й зовнішнього водообмінів, рівня води, швидкості течії можна регулювати самоочисну здатність і біопродуктивність водойм. Для реалізації такої можливості необхідно знайти кількісні залежності показників екологічного стану водойм і якості води від зазначених гідрологічних складників. У цей комплекс входять фізико-географічні характеристики водойм і їх водозборів, хімічні, біохімічні та біологічні аспекти формування якості вод, антропогенний вплив тощо. Отже, регулювання водного режиму для зміни в потрібному напрямі будь-яких характеристик водних екосистем має погоджуватися із загальною концепцією керування станом екосистеми. При цьому необхідно забезпечити наукову обґрунтованість і доцільність запропонованого рішення, технічну й економічну реальність його реалізації, розрахувати ефективність важелів впливу.

У роботі [8] наведено модель, що описує взаємозв'язок гідрологічних показників (площа водного дзеркала, інтенсивність водообміну, тип мілководь, наявність заплавлених водойм тощо) з параметрами, що їх характеризують. Зарахування сукупності гідрологічних параметрів, що характеризують досліджувану ділянку гирла річки, до j -ого типу гідрології виробляється на основі обчислення функції належності F_{zi} згідно з виразом

$$F_{zi} = \exp \left[- \sum_{i=1}^N \left(\frac{\bar{R}_{ij} - R_i}{2 \cdot \Delta R_{ij}} \right)^2 \right],$$

де R_i – нормоване (за умовою $\sum_{i=1}^N R_i = 1$) значення i -ого параметра гідрології на ділянці, наприклад, площа водного дзеркала; \bar{R}_{ij} – середина бального інтервалу i -ого параметра в j -ому типі гідрології; \bar{R}_{ij} – ширина інтервалу i -ого параметра; $i = 1, 2, \dots, N_1$; $j = 1, 2, \dots, M_1$. У тому випадку, коли параметри задаються дискретним рядом, у формулі F_{zi} на заміну \bar{R}_{ij} використовуються вагові коефіцієнти \bar{b}_{ij} , а \bar{R}_{ij} буде відповідати значенням ряду.

На основі цієї моделі визначаються елементи гідрологічного режиму. Зарахування досліджуваної ділянки до конкретного типу гідрологічних параметрів проводиться за максимальним значенням функції належності.

Описана методика й розроблена програма апро-

Таблиця 1

Значення узагальненого критерію оцінювання якості води Київського водосховища за даними ДЗЗ та наземних спостережень Держгідрометслужби

Роки	1989	1991	1993	1995	1997	1999	2001	2003	2005	2007	2009	2011	2013
$F_{ДЗЗ}$	1,00	0,98	0,97	0,94	0,96	0,87	0,84	0,81	0,76	0,83	0,83	0,81	0,73
$F_{назем}$	0,97	0,76	0,61	0,47	0,43	0,41	0,43	0,37	0,35	0,34	0,40	0,45	0,46

бовані на прикладі класифікації ВВР і визначення якості води в гирловій зоні р. Прип'ять [16].

Приклад № 4. Регулярний моніторинг за перерозподілом забруднювачів, насамперед радіонуклідів, має винятково вагоме значення не тільки для контролю функціонування водних екосистем водоймищ, а й для забезпечення належної якості води.

Розподіл радіоактивного забруднення донних відкладень у заростях вищих водних рослин відбувається нерівномірно. Центральна частина прибережних фітоценозів, яка розташована в глибині заростей на відстані до 20 м від його нижньої границі, є зоною підвищеного вмісту радіонуклідів. Так, для Київського водосховища на цих ділянках уміст Sr^{90} у 4–40 разів, а $Cs^{134} + Sr^{90}$ у 2–26 разів перевищував рівень радіоактивного забруднення донних відкладень порівняно з іншими ділянками заростей, а також із такими, де відсутні зарості рослин. У заростях занурених рослин (рдести) радіоактивне забруднення донних відкладень вище, ніж на чистій воді, у 3,5 рази для Sr^{90} і в 2,5 рази – для $Cs^{134} + Cs^{137}$.

У процесі росту вищі водні рослини, крім радіонуклідів, поглинають із ґрунту й води біогенні елементи (азот, фосфор, калій тощо), також мікроелементи, у тому числі й ті, що належать до важких металів. Цим поглинанням виконується важлива функція консервації і трансформації забруднювачів та очищення й кондиціонування води. Проте сезонне відмирання рослин чи падіння рівня води водойм, що зумовлює осушення літоралі й одночасне відмирання рослинності, спричиняють залпове повернення у воду (при повторному затопленні) пов'язаних біомасою біогенних елементів.

Найбільш тривалий період пов'язують біогенні елементи повітряно-водних рослин. По-перше, вони розвивають могутню кореневу систему, яка становить 30–60%, а іноді 70–80% загальної біомаси, що не відмирає до кінця вегетації. Тому, незважаючи на активний весняний відтік із кореневої системи біогенних елементів для формування надземних пагінців, значна кількість цих речовин залишається в біомасі кореневища й разом із придатковими коренями й старими кореневищами йде в більш глибокі шари донних відкладень, тобто хорониться. Саме ця група рослин найбільш чітко контролюється дистанційними методами під час зйомок у період вегетації.

Для інтегрального оцінювання забруднення води обраний критерій на основі методу багатокритеріальної оптимізації – $F_{назем}$. При цьому кореляція сумарного показника хімічного забруднення води (ПХЗ-10), отриманого значення функції належності $F_{назем}$ та обчислених за період з 1989 р. по 2013 р. становить 0,94. Це доводить, що отриманий так узагальнений критерій оцінки хімічного забруднення води може бути використаний на рівні з показниками інтегральних індексів, розрахованими загальноприйнятими методами [17].

Приклад № 5. Відомо, що важливу роль у накопиченні донних відкладів водоймищ відіграє рельєф дна, який визначається переважно сучасними вертикальними рухами по розломах. Особливості геологічної будови дна водосховища і його виразність у рельєфі необхідно враховувати під час створення мережі контрольних станцій для проведення моніторингу якості води не тільки поверхневих, а й підземних вод, а також рівня забруднень донних відкладень. Крім того, по зонах розломів відбувається інтенсивна фільтрація води з розчинними в неї компонентами на глибину. Ці явища мають особливе значення для Київського водоймища, у якому накопичено багато радіонуклідів, пов'язаних з аварією на Чорнобильській АЕС.

З метою дослідження літоральної міграції донних відкладів і розподілу радіонуклідів [18] використані матеріали структурного дешифрування різночасових космічних знімків різної просторової розрізності («Океан-О», «SPOT» і «Landsat»). Виділені на берегах структури екстрапольовані в межі дна водоймища, виконано аналіз морфології рельєфу за топографічними картами різних років, ураховано матеріали наземних геофізичних досліджень навколишньої суші, а також дані гідробіологічних, гідроекологічних, радіоекологічних досліджень Київського водоймища й ріки Прип'яті.

У результаті проведених досліджень складена структурна схема району, на якій показані розломи, блоки, кільцеві структури та вузли перетинання розломів, тобто всі структури, що впливають на латеральне переміщення відкладів і вертикальну проникність гірських порід і фільтрацію підземних вод [19].

Виходячи з проведених досліджень, найбільш небезпечною структурою з погляду забруднення підземних вод радіонуклідами є північна частина водоймища, де сходяться Прип'ятський і Дніпровський відроги. У цьому районі розташована кільцева структура, що активна на сучасному етапі розвитку.

Три вузли перетинання Одесько-Тальнівської зони розломів з більш дрібними структурами встановлені в межах Тетерівського, Толокунського та Лютізького плес. Крім того, ще один вузол розломів розташований у районі Чорнобильської АЕС. Найбільш небезпечним із погляду забруднення підземних вод варто вважати вузол у районі Тетерівської затоки. Високий уміст радіонуклідів і важких металів у поверхневих відкладеннях на цій території та підвищена проникність гірських порід роблять цей район особливо небезпечним із погляду забруднення підземних вод.

Використання методу синтезу й екстраполяції результатів дешифрування космічних знімків та аналіз наявних матеріалів з розподілу радіонуклідів у воді, суспензіях і донному геологічному відкладі водоймища дали змогу виокремити в ложі водосховища ділянки з більшим умістом радіонуклідів (правобережна частині водоймища, дно якої відрізняється більш піднесеним і розчленованим рельєфом)

і припустити, що нерівності дна виявилися «пастками» на шляхах переміщення осадових, що містять радіонукліди.

Головні висновки. Результати комплексного оцінювання стану водних екосистем на основі дистанційних і наземних досліджень наочно показали ефективність використання системного аналізу.

Розроблення й апробація алгоритму оцінювання стану водних екосистем на основі методу багатокритеріальної оптимізації та аналізу ієрархій дали можливість сформулювати узагальнений критерій – функцію належності – й ієрархічну модель, які поповнили методичну базу дистанційних аерокосмічних досліджень у природокористуванні.

Вивчення загальної картини заростання крупних водних об'єктів із комплексним використанням космічної й наземної інформації дає змогу відстежити зміни площ основних типів рослинних угруповань і, відповідно, біотопів і природно-територіальних комплексів за тривалий період і прогнозувати їх подальший розвиток під дією того чи іншого чинника.

Дослідження взаємозв'язку гідрохімічних параметрів і розвитку угруповань вищих водних рослин у великому рівнинному водосховищі показали наявність залежності між зміною площ зарослих акваторій і вмістом розчиненого у воді діоксиду вуглецю, хлору та показниками біхроматної окислюваності, кольоровості води, вмістом іонів міді й завислих речовин.

За космічними знімками виділені тектонічні блоки, що проявилися в сучасному рельєфі та вплинули на розподіл і перерозподіл радіонуклідів у донних відкладах Київського водосховища. Вивчення розломно-блокових структур, які впливають на перерозподіл придонних водних потоків і седиментів, дало змогу точніше прогнозувати виникнення екстремальних ситуацій.

Перспективи використання результатів дослідження. Набутий у ході досліджень Київського водосховища, понизових ділянок Дніпра та озера Світязь досвід комплексного використання різнодисциплінарних матеріалів може бути використаний як методична основа для оцінювання інших водойм України.

Література

1. Використання космічної інформації у вирішенні водогосподарських і водоохоронних завдань / В.І. Лялько, О.Д. Федоровський, Л.Я. Сіренко та ін. Космічна наука і технологія. 1997. № 3/4. С. 40–49.
2. Пат. 104662 Україна, Спосіб дешифрування оптичних аномалій на аерокосмічних знімках / О.Д. Федоровський, В.Г. Якимчук, А.В. Соколовська, О.В. Томченко; 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.
3. Макрофиты – индикаторы изменений природной среды / С. Гейны, Д.В. Дубына, К.М. Сытник и др. Киев: Наукова думка, 1993. 433 с.
4. Fedorovsky A.D., Dychenko T.N., Sirenko L. A. Use of the remote control for revealing sites of danube with various speed of water stream on the basis of phytoindication. 32. Konferenz der IAD. Wien/Osterreich. 1997. С. 211–215.
5. Оценка экологического состояния водоемов с использованием космической информации / А.Д. Федоровский, Л.А. Сиренко, Э.Л. Звенигородский, И.Ю. Иванова, К.Ю. Суханов, В.Г. Якимчук. Космічна наука і технологія. 1996. № 5–6. С. 103–106.
6. Соколовська А.В., Томченко О.В. Використання системних методів аналізу космічної інформації ДЗЗ для визначення екологічного стану антропогенно змінених ландшафтів. Геоінформатика – теоретичні і прикладні аспекти: матеріали 13-ї Міжнародної конф. (Київ, Україна, 13–16 травня 2013). Київ: Наукова думка, 2013. С. 1–6.
7. Многокритериальная оптимизация: Математические аспекты / Б.А. Березовский, Ю.М. Барышников и др. Москва: Наука, 1989. 128 с.
8. К вопросу оценки экологического состояния аквально-наземных ландшафтных комплексов на основе системного подхода / А.Д. Федоровский, Л.Ф. Даргейко, Т.Н. Дьяченко, В.Г. Якимчук. Доповіді Національної академії наук. 2000. № 5. С. 129–131.
9. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. Москва: Радио и связь, 1993. 186 с.
10. Артюшенко М.В., Подгородецкая Л.В., Федоровский А.Д. Фрактальный анализ спектрограм растительного покрова в задачах природопользования. Доповіді Національної академії наук. 2010. № 8. С. 113–119.
11. Тимченко И.Е., Игумнова Е.М. Системный менеджмент и АВС-технологии устойчивого развития. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2000. 225 с.
12. Мультифрактальный анализ биоразнообразия и ценотической структуры сообщества растений по данным дистанционного зондирования / М.В. Артюшенко, Л.Н. Зуб, Л.В. Подгородецкая, А.Д. Федоровский. Доповіді Національної академії наук. 2011. № 9. С. 132–141.
13. Підгородецька Л.В., Зуб Л.М., Федоровський О.Д. Використання інформації космічного геомоніторингу для оцінки екологічного стану водойм на прикладі озера Світязь. Космічна наука і технологія. 2010. Т. 16. № 4. С. 51–56.
14. Томченко О.В. Використання методу багатокритеріальної оптимізації матеріалів ДЗЗ та наземних даних для оцінки екологічного стану Київського водосховища. Екологічна безпека та природокористування: зб. наук. праць / М-во освіти і науки України, Київ. 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.
15. Томченко О.В., Зуб Л.М., Сагайдак А.В. Оцінка екологічного стану акваторій водно-болотних угідь верхніх ділянок Київського водосховища. Екологія водно-болотних угідь і торфовищ: зб. наук. ст. / головний редактор В.В. Конішук. Київ: ТОВ НВП «Інтерсервіс», 2014. С. 246–251.
16. Романенко В.Д., Сиренко Л.А., Федоровський А.Д. Экологические проблемы Днепра в ретроспективе и на современном этапе. Гидробиол. журнал. 1998. Том 34. № 5. С. 3–10.

17. Гідрохімічний довідник: Поверхневі води України. Гідрохімічні розрахунки. Методи аналізу / В.І. Осадчий, Б.Й. Набиванець, Н.М. Осадча, Ю.Б. Набиванець. Київ: Ніка-Центр, 2008. 656 с.
18. Использование космической информации для контроля состояния водных объектов чернобыльской зоны / А.Д. Федоровский, Л.А. Сиренко, А.Я. Ходоровский, А.Д. Рябоконеко. Гидробиологический журнал. 1999. Т. 35. № 4. С. 3–11.
19. О влиянии разломных структур на распределение радионуклидов в донных отложениях Киевского водохранилища / В.М. Шестопалов, В.И. Лялько, А.Д. Федоровский, Л.А. Сиренко, А.Я. Ходоровский. Доповіди Національної академії наук України. 2000. № 8. С. 131–134.