

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ДУБОВИК ДЕНИС ДМИТРОВИЧ



УДК 004.942.519.876.5+574.5

**ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ОЦІНКИ ЗАМУЛЕННЯ ШТУЧНИХ  
ВОДОСХОВИЩ**

Спеціальність: 05.13.06 – «Інформаційні технології»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Черкаси – 2021

Дисертація на правах рукопису.

Роботу виконано у відділі системного аналізу та проблем керування в Інституті технічної механіки (м. Дніпро) Національної академії наук України та Державного космічного агентства України

Науковий керівник: член-кореспондент НАН України  
доктор технічних наук, професор  
**Алпатов Анатолій Петрович**,  
Інститут технічної механіки (м. Дніпро) НАНУ та  
ДКАУ,  
завідувач відділу системного аналізу та проблем  
керування.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Тесля Юрій Миколайович**,  
Черкаський державний технологічний університет  
Міністерства освіти і науки України,  
професор кафедри інформаційних технологій  
проектування.

кандидат технічних наук, доцент  
**Лугай Людмила Миколаївна**,  
Національний аерокосмічний університет ім. М.Є.  
Жуковського «Харківський авіаційний інститут»  
Міністерства освіти і науки України,  
доцент кафедри мехатроніки та електротехніки.

Захист відбудеться « 09 » вересня 2021 р. о 12.00 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 73.052.04 у Черкаському державному технологічному університеті Міністерства освіти і науки України, за адресою: 18000 м. Черкаси, бульвар Шевченка 460.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Черкаського державного технологічного університету Міністерства освіти і науки України, за адресою: 18000 м. Черкаси, бульвар Шевченка 460.

Автореферат розіслано « 07 » серпня 2021 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 73.052.04  
к.т.н., професор



Ю.Ю. Бондаренко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Створення штучних водоймищ є важливим етапом перетворення навколишнього середовища, але це може бути джерелом погіршення екологічного стану відповідних територій, включаючи їх деградацію. Однією з ключових складових процесів деградації водосховищ є їх заболочування внаслідок процесів утворення мулу. Дослідження цього складного процесу потребує великих обсягів інформації та відповідних систем її обробки. Таким чином виникає необхідність розробки і застосування інформаційної технології, які можуть бути покладені в основу створення ІТ- систем діагностування стану водосховища з метою підготовки відповідних управлінських рішень.

Системний аналіз великих обсягів інформації практично неможливий без розробки і використання сучасних інформаційних технологій для екологічного моніторингу штучних водосховищ та, зокрема, р. Дніпро і каскаду його водосховищ. Необхідність створення сучасних інформаційних засобів і технологій, що реалізують методи прогнозних оцінок замулення штучних водосховищ на річках є актуальним завданням.

Найбільш істотних результатів в розробці систем оцінки стану та наукових досліджень в даній області досягли в ІППЕ НАНУ, Інституті гідробіології НАНУ, Інституті гідромеханіки НАНУ, Інституті кібернетики НАНУ. Багатопланові дослідження, пов'язані з екологічним моніторингом узагальнені в роботах В.О.Осадчука, В.І.Осадчого, Л.Н.Горева, С.І.Дорогунцева, В.О.Осадчука, В.І.В.І.Осадчого, М.А.Хвесика, А.Г.Шапара, В.М.Шестопалова, А.В. Яцика, Є.О. Яковлева та інших. Не менш актуальними в даній області є роботи низки зарубіжних вчених, серед яких можна виділити, Yongqiang Zhou, Erik Jeppesen, Jingbao Li, Yunlin Zhang, Xinping Zhang & Xichun Li, Adongo TA, Kyei-Baffour N, Abagale FK, Agyare WA, Meakin P, Sun T., Jossang T., Schwarz K.,Maidment D.,Djokic D.,Rodriguez E Знаменського В.А., Штефана В.Н., Петрова А.Г. та інших. Однак існуючи на цей час інформаційні технології оцінки процесів замулення водосховищ мають недоліки, що призводить до зниження ефективності такої роботи. Серед причин виникнення таких недоліків слід виділити проблему великих об'ємів вихідної інформації та відсутність єдиної комплексної інформаційної технології оцінки замулення, що призводить до недостатньо ефективного аналізу відповідних властивостей водосховищ в цілому та їх окремих частин.

Таким чином розробка інформаційної технології, її змістовного наповнення на базі нових методологічних та інструментальних засобів збору, аналізу і синтезу інформації про процеси замулення штучних водосховищ визначає актуальність теми дисертаційного дослідження.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження даної дисертаційної роботи виконувались відповідно до планів науково-дослідних робіт ІТМ НАНУ і ДКАУ «Розроблення науково-методологічних основ проектування сучасних технічних систем і визначення їхніх основних параметрів» (№ державної реєстрації 0115U002151) а також відповідно до планів науково-дослідних робіт ІППЕ НАНУ «Розробка наукових основ збалансованого функціонування складних

техноекосистем і шляхи його досягнення» (№ державної реєстрації 0113U001134), «Обґрунтування наукових підходів до створення гармонізованих з довкіллям технологій природокористування» (№ державної реєстрації 0118U003272).

**Мета дослідження.** Підвищення швидкості оцінки процесів замулення штучних водосховищ шляхом розробки інформаційної технології моделювання їх замулення з застосуванням методів аналогії.

**Задачі дослідження:**

1. Розробити систему критеріїв аналогії для порівняння характеристик водоймища-прототипу з водоймищами-аналогами.
2. Розробити інформаційну технологію оцінки замулення водосховищ.
3. Обґрунтувати інформаційну технологію оцінки замулення водосховища - аналога на основі інформації про замулення водосховища-прототипу (еталону), використовуючи критерії аналогії.
4. Провести моделювання процесів замулення штучних водоймищ Дніпровського каскаду з використанням розробленої інформаційної технології. Оцінити інтенсивність замулення водосховищ Дніпровського каскаду.

**Об'єкт дослідження** – процеси замулення штучних водосховищ Дніпровського каскаду.

**Предмет дослідження** – моделі, методи та інформаційна технологія оцінки процесів замулення великих штучних водосховищ.

**Методи досліджень.** Для вирішення поставлених завдань було використано теоретичні й експериментальні дослідження процесів замулення великих штучних водосховищ. Методологічну основу інформаційного і математичного опису процесів утворення мулу в штучних водосховищах складають методи і підходи, розвинуті в теорії інформаційних систем, в обчислювальних технологіях геоінформаційних систем, а також інформаційна складова методів дистанційного зондування Землі. Для опису предметної області, використані методичні підходи, які включають моделювання структури і складу осідаючих часток, умов їх седиментації і перенесення. Для порівняльної оцінки характеристик штучних водосховищ прототипів використовувалися критерії порівняння і методи теорії аналогії.

Для обробки результатів дослідження було використано сучасне програмне забезпечення Інституту технічної механіки НАНУ та ДКАУ, включаючи стандартні обчислювальні технології, що використовуються при аналізі геоінформаційних систем. При підготовці вихідних даних для розрахунків використовувалася інформація, отримана методами дистанційного зондування Землі.

Експериментальні дослідження проведені на сучасному науково-дослідному обладнанні Інституту проблем природокористування та екології НАН України. Для отримання експериментального матеріалу про процеси замулення водосховищ використовувалися методи, засновані на експедиційних та лабораторно-аналітичних роботах. Виконувалися комплексні експедиційні дослідження для вимірювання глибин Самарського водосховища (прототипу) і забору проб води для лабораторного аналізу в період відкритої води для вимірювання концентрації осадового матеріалу.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Основні результати, які визначають наукову новизну дисертаційної роботи:

### 1. Вперше:

– розроблено інформаційну технологію дослідження та розрахунку характеристик замулення штучних водосховищ, яка на відміну від існуючих, відповідно до потреб оцінки екологічного стану водосховищ, описує стан водосховища-прототипу та дозволяє перетворення цієї інформації в інформацію про невідомий стан водосховища-аналогу, що дозволяє автоматизувати перетворення цієї інформації за розробленими алгоритмами відповідно до вимог кінцевих користувачів.

### 2. Удосконалено:

– метод оцінки об'ємів утворення мулу в великих штучних водосховищах, який відрізняється від існуючих запропонованою системою комплексних критеріїв, що поєднують кількісну оцінку близькості штучних водосховищ по характеру процесів мулоутворення та експертну оцінку вагових коефіцієнтів компонентів комплексних критеріїв, що дозволяє комплексно оцінити міру аналогії штучних водосховищ прототипу та аналогу і сформулювати вимоги щодо об'єма та складу первинних даних про невідомий стан водосховища-аналогу, потрібних для перетворення інформації про стан прототипу в інформацію про стан аналогу.

### 3. Отримали подальший розвиток:

– метод аналогії щодо оцінки стану водосховища-аналога з використанням інформації про стан водосховища-прототипу, що дає більш широкі можливості для його застосування.

– моделі та розрахункові алгоритми, засновані на зональному підході переробки інформації про стан водосховищ, що дозволяє відповідно до вимог кінцевих користувачів інформаційної технології вибірково застосовувати інформаційну систему для розрахунків процесів утворення мулу як у вибраних зонах водосховища, так і у водосховищі в цілому.

### **Наукові положення**

1. Система критеріїв аналогії відображає характеристики об'ємних співвідношень водосховищ, їх екологічний стан, зовнішні та внутрішні фактори формування стану водосховищ, дозволяє більш обґрунтовано у кількісній формі визначити близькість водосховищ щодо їх характеристик утворення мулу.

2. Інформаційна технологія, що включає математичні моделі відповідних процесів замулення і алгоритми визначення характеристик та має зональну структуру, відповідає зональній структурі штучних водосховищ, тобто локальних властивостей їх окремих складових акваторій (зон), дозволяє визначати інтенсивність утворення мулів у водосховищі прототипі, та більш оперативно визначити на цій основі характеристики утворення мулу у водосховищі-аналогу.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

1. Отримані автором теоретичні результати доведені до конкретних інженерних методик, алгоритмів і програм, а саме, розроблено методику оперативної оцінки екологічного стану штучних водосховищ Дніпровського каскаду щодо розрахунку темпів їх замулення.

2. Основні положення, одержані в дисертації, спрямовані на подальший розвиток технологій підтримки прийняття рішень корегування екологічного стану водосховищ в умовах невизначеності. Розроблені моделі та методи складають

методологічну базу для оптимізації процесів прийняття відповідних рішень з використанням результатів прогнозу інтенсивності замулення. Матеріали досліджень використані при складанні річних прогнозів замулення Дніпровського водосховища, при річному прогнозі екологічного стану Придніпровського регіону, а також при розробці рекомендацій щодо змін правил експлуатації Дніпродзержинського водосховища.

3. Інформаційна технологія замулення і відповідне програмне забезпечення (екологічний моніторинг штучних водосховищ) впроваджені як розрахунковий модуль в інформаційно-пошукову і експертну систему обробки інформації для прийняття рішень в Дніпропетровськ відділі МНС України.

4. На основі розробленої інформаційної технології виконані розрахунки об'ємів замулення штучних водосховищ Дніпровського каскаду (водосховищ-аналогів) на основі інформації про об'єм замулення Самарського водосховища за даними експериментальних вимірювань глибин у 2015, 2016 роках відповідно. На основі статистичного матеріалу щодо вимірювання глибин Самарського водосховища побудовано регресійні моделі зміни глибин, які дозволяють прогнозувати темпи замулювання водосховища.

Про практичне використання одержаних в дисертаційній роботі наукових результатів свідчить відповідний акт про впровадження.

**Особистий внесок автора.** Дисертаційна робота є самостійною науковою працею, заснованою на результатах як особистих аналітичних, польових і лабораторних досліджень, так і опублікованих даних інших авторів. Інформаційна технологія та її складові розроблені особисто автором. Дані для розрахунків отримані як на основі аналізу наукової та статистичної інформації про процеси замулення, так і експериментальним шляхом. Експериментальний матеріал отримано особисто автором або за його безпосередньої участі. У працях, опублікованих у співавторстві, автору належать: [1] – розроблення методичних положень та алгоритм розробки інформаційної моделі замулення водосховищ; розроблення критеріїв для оцінювання міри аналогії водосховищ, що порівнюються; [8] – розроблення математичних моделей перерахунку характеристик замулення водосховищ - прототипів у характеристики водосховищ - аналогів; [5] – модель поверхні дна водосховищ за даними вимірювання глибин; [3] - ідея використання зонального підходу щодо розрахунків параметрів процесу замулення штучних водосховищ.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення, розділи і результати роботи доповідалися: на наукових семінарах ІТМ НАНУ і ДКАУ, 2014 – 2018 рр.; на Вченій раді ІТМ НАНУ і ДКАУ, 14 листопада 2018 р.; на наукових семінарах ІППЕ НАНУ 2014 – 2020 рр.; на наукових конференціях "Інформаційні технології в управлінні складними системами" (Дніпропетровськ 6 грудня 2013 р., Дніпропетровськ 27 листопада 2014 р., Дніпропетровськ 20 листопада 2015 р.); на українській конференції «Міжнародний день Дніпра» (Дніпропетровськ, 11 липня 2015 р., 9 липня 2019); VIII міжнародна науково-практична конференція «Проблеми природокористування, сталого розвитку та техногенної безпеки регіонів», (Дніпропетровськ, 6 жовтня 2015 р.).

**Публікації.** Основний зміст роботи відображено в 16 публікаціях, з яких: 7 статей (4 - без співавторства) у фахових збірниках України, в тому числі 5 статей включені до міжнародних наукометричних баз даних Index Copernicus, 1 стаття в міжнародному виданні; 8 публікацій в матеріалах конференцій і тезах.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається із анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації складає 178 сторінок, з яких анотація на 5 сторінках, зміст на 3 сторінках, перелік умовних позначень на 2 сторінках, основний текст на 158 сторінках, список використаних джерел із 128 найменування на 12 сторінках, додатки на 5 сторінках. Робота містить 20 таблиць і 136 рисунків.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** коротко викладено сучасний стан проблеми, актуальність дослідження, сформульовано мету і задачі, наукову новизну, практичну значущість роботи, власний внесок здобувача, наведено дані щодо апробації роботи, публікації і обсяг дисертації.

**У першому розділі** в результаті проведеного огляду визначено необхідність розробки інформаційної експериментально-аналітичної технології щодо аналізу та оцінок процесів замулення штучних водосховищ, зокрема водосховищ Дніпровського каскаду. Розглянуто причини, процеси і моделі замулення штучних водойм. На основі аналізу наукових публікацій, описані особливості інформаційного простору основних характеристик екологічного стану штучних водосховищ, інформаційних властивостей механізмів і процесів, що відбуваються в ерозійно-руслевих системах територій водозборів, проаналізовані моделі, що описують зв'язок процесів наносів, типів водних наносів з ерозійно-аккумулятивними процесам. Проаналізовано можливості та особливості застосування геоінформаційних технологій (ГІС–технології) дослідження географічних об'єктів, зокрема водосховищ. Проаналізовано програмне забезпечення, що використовується при застосуванні ГІС–технологій. Розглянуто особливості використання даних дистанційного зондування Землі щодо оперативного оновлення даних, необхідних при застосуванні інформаційної технології для оцінки процесів замулення штучних водосховищ. Розглянуто сучасний стан розробки математичних моделей процесів, що є компонентами складного процесу замулення водосховищ. Обрано складові таких моделей, що можуть бути використані при розробці інтегрованих інформаційних технологій замулення. Аналітичний огляд сучасних інформаційних технологій та огляд стану теоретичних засад моделювання і оцінки екологічного стану штучних водосховищ дозволив сформулювати основні напрями досліджень, що в свою чергу, дозволило сформулювати актуальну тему дослідження.

**У другому розділі** розроблено інформаційну модель водосховища та виконується районування території за станом локальних зон водного середовища. Процеси утворення мулів розглядаються з використанням запропонованого, зонального підходу.

Таке структурування інформації про характеристики території, пов'язаної функціонально з водосховищем і безпосередньо самого водосховища є основою для

розробки баз даних, які входять в інформаційну модель, вибору їх структури, ключів, типу БД (бази даних) та ін. Отримано алгоритм розробки інформаційної технології замулення штучних водосховищ. Така технологія використовується для обчислювання кількості мулу, що утворюється у водосховищі.

Інформаційна технологія структурно складається з чотирьох частин: технології оцінки стану водосховища-прототипу, моделі водосховища-аналогу, інформаційної технології аналізу близькості водосховищ-прототипу та аналогу та вихідних даних, потрібних для розрахунків. База даних включає: структуровані дані – статичні незмінні дані про водосховище і його замулення; структуровані динамічні дані – дані, що змінюються, та оновлюються в міру виявлення нової інформації, до таких віднесені дані ДЗЗ (Дистанційне зондування Землі).

Чисельний розрахунок рівняння Стокса дозволяє досліджувати динаміку домішок в річковому потоці з урахуванням морфометричних та гідравлічних характеристик потоку, седиментації і каламутність води. Гідравлічні характеристики потоку визначаються одновимірними рівняннями Сен-Венана.

Верифікація інформаційної моделі проводилася для конкретної ділянки Самарського водосховища. Розглядалася ділянку річки з перемінними вздовж русла глибиною, шириною і швидкістю течії, (рис. 1). Результати визначення каламутності води і гранулометричного складу зважених і донних наносів р. Самара отримані в декількох перетинах відповідно до зональної системи координат. Результати розрахунків було порівняно з результатами експериментальних досліджень (табл. 1).

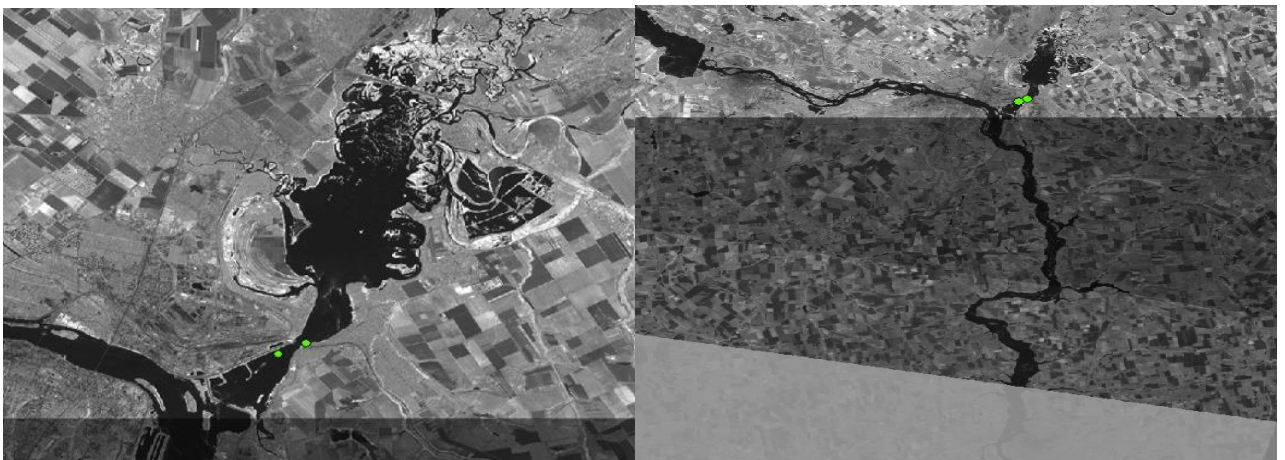


Рисунок 1 – Карта нижньої ділянки р. Самара (Самарський залив) и р. Дніпро (КА Landsat).

Таблиця 1 – Результати розрахунків експериментального дослідження характеристик наносів.

Параметр	Перетин 1		Перетин 2		Перетин 3	
	Експеримент	Розрахунок	Експеримент	Розрахунок	Експеримент	Розрахунок
S - каламутність (концентрація), $мг/дм^3$	0,93	0,99	1,22	1,24	1,13	1,18
d - діаметр частинок $мм$	0,03	0,02	0,07	0,05	0,08	0,05



Інформаційна технологія, що містить загальний підхід, включає п'ять розрахункових моделей, що визначають відповідні процеси створення наносів. Окрім моделі створення донних відкладень, це: морфометрична модель, балансова, модель території водозбору, модель продуктів життєдіяльності (біоти) та модель переносу пилу повітрям.

Морфометричний модуль інформаційної технології включає три функціональні компоненти: розрахункові співвідношення (рівняння, формули, алгоритми). Основу її складають морфометричні характеристики, такі як: характеристики водозбору, площа басейну, довжину вододільної лінії; висоту поверхні водозбору, яка визначається за гіпсографічною кривою або розраховується за формулою:

$$H_{cp} = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^n H_i f_i \quad (1)$$

де:  $H_i$  — середня висота будь-яких висотних інтервалів в межах басейну, що обчислюється як середнє з відміток, що обмежують ці інтервали горизонталей (ізогіпс),  $f_i$  — площа частини басейну між цими горизонталями,  $F$  — повна площа басейну,  $n$  — число висотних інтервалів; середній ухил схилів басейну, розраховується за формулою:

$$i_{cp} = \frac{\Delta H}{F} \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (l_R + l_{R+1})_i \quad (2)$$

де  $l_R$  и  $l_{R+1}$  — довжини суміжних горизонталей,  $\Delta H$  — різниця відміток суміжних горизонталей (перетин рельєфу),  $F$  — повна площа басейну,  $n$  — число висотних інтервалів та інше.

Морфометричні характеристики пов'язані з рівнем води, під яким розуміють висоту поверхні води, відлічувану щодо деякої постійної площині порівняння, за замовчуванням ординара — середнього багаторічного рівня води у водоймі, а також нуль футшок на водомірних постах.

Треба зауважити, що для водосховища — аналогу обчислюється лише досить невелика частка характеристик, що потрібні для перерахунку характеристик замуленні від прототипу до аналога.

Важливим показником замулення будь-якого з штучних водосховищ є модель водообміну. Кінцевим співвідношенням моделі зовнішнього і внутрішнього балансу водообміну є узагальнена формула В.Н. Штефана:

$$D = \frac{\sum W_{np} + \sum W_p}{2V} \quad (3)$$

де  $\sum W_{np}$  и  $\sum W_p$  — суми прибуткових і витратних складових водного балансу водойми.

В цілому інтегральна модель водного балансу визначається приходом і витратою води, відповідно.

У третьому розділі розглянуті питання побудови критеріїв щодо порівняння характеристик з мулоутворення водосховищ, які досліджуються.

Для розробки системи первинних критеріїв, необхідних для оцінки міри аналогії водойм обрані комбінації фізичних величин, пов'язаних з досліджуваними характеристиками водоймищ, визначають процеси замулення. Для опису морфометричних характеристик водойм використана система, в якій за основні величини приймаються довжина, маса і час. Безрозмірні комбінації:  $Vt/l$ ,  $at/v$ ,  $\rho l^3/m$ ,  $\rho l^2/p$ ,  $\varphi$  слугують основою для побудови групи первинних критеріїв.

Вибрані первинні критерії  $K_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) мають різну фізичну природу і тому - різну розміреність. Це ускладнює вирішення багатокритеріальних задач. У зв'язку з цим використовується процедура нормування критеріїв. Після нормування простір існування критеріїв метричний, оскільки всі використовувані первинні критерії приведені до безрозмірного вигляду. При виборі нормуючого дільника використаний метод нормування до максимуму. Далі первинні критерії  $K_i$  об'єднуються певним способом як складові комплексних критеріїв  $K_j$  ( $j=1,2,\dots,m$ ).

Різна значимість первинних критеріїв при формуванні комплексного адитивного критерію враховується за допомогою вагових коефіцієнтів, що призначаються експертами:

$$K = \sum_{i=1}^n C_i \left( \frac{K_i}{K_{i0}} \right) \quad \sum_{i=1}^n C_i = 1 \quad (4)$$

Тут  $K_i$  -  $i$ -й первинний критерій;  $K_{i0}$  -  $i$ -й нормуючий дільник;  $C_i$  - ваговий коефіцієнт  $i$ -го критерію;  $n$  - число первинних критеріїв. Для оцінки ступеня узгодженості інформація, отримана від експертів щодо ранжирування первинних критеріїв, використаний коефіцієнт конкордації  $W$ , який змінюється в межах від 0 до 1.

Для спрощення роботи експертів щодо призначення вагових коефіцієнтів використано ранжування за важливістю, тобто за ступенем впливу відповідного фактора на процеси замулення. Комплексні критерії формуються за цими кластерами. Для кластера 1 (один штрих вгорі позначень) комплексні критерії визначаються наступними виразами:

$$\begin{aligned} K_{11} &= C'_{11} K_1 \\ K_{12} &= C'_{21} K'_1 + C'_{22} K'_2 \\ &\dots\dots\dots \\ K_{1l} &= C'_{11} K'_1 + C'_{12} K'_2 \dots + C'_{1l} K'_l \end{aligned} \quad (5)$$

Аналогічно для кластерів 2-5. Номер кластера визначається кількістю верхніх штрихів.

Коефіцієнт  $Q_{kj}$  визначається мірою аналогії (або невідповідності) для  $j$ -го комплексного критерію і кожного  $k$ -го штучного водосховища, (значення  $k = 0$  відповідає водосховищу-прототипу).

$$Q_{ij}^0 = \frac{|K_{0j} - K_{kj}|}{K_{0j} + K_{kj}}, \quad (6)$$

де:  $K_{0j}$  –  $j$ -й комплексний критерій для штучного водосховища-прототипу;  
 $K_{kj}$  –  $j$ -й комплексний критерій для кожного  $k$ -го штучного водосховища.

Для аналізу системи критеріїв аналогії використовується запропонований в роботі підхід, заснований на розбитті водоймища - моделі (найбільш вивченого водоймища) на два ідентичних віртуальних водосховища шляхом його дискретизації. Для цього водоймища в площині дзеркала при нормальному підпірному рівню розбивається поперечними перетинами на  $N$  ділянок. Кожній ділянці присвоюються відповідний порядковий номер (вниз за течією від верхнього б'єфа). Далі множина дискретних елементів штучного водосховища ділиться на два віртуальних водоймища. Одне віртуальне штучне водосховище містить суму непарних елементів (це водоймище умовно віднесемо до водоймища-прототипу). Друге віртуальне штучне водосховище утворюється сумою парних елементів. Таким чином, отримані два практично ідентичних водосховища. Теоретично ці частини штучного водосховища ідентичні при  $N \rightarrow \infty$ . Змінюючи співвідношення кількості дискретних елементів ВВ можна кількісно оцінити співвідношення критеріїв міри аналогії.

Інший метод, запропонований в даній роботі, полягає в експертному підході до оцінки міри аналогії з подальшим її коригуванням при накопиченні статистичних даних про процеси замулення.

В роботі також запропонована концепція послідовного аналізу і прогнозу стану штучного водосховища на основі перетворення водосховища-аналога в водосховище-прототип, який далі служить для прогнозу стану інших водоймищ, близьких йому за критерієм аналогії.

**У четвертому розділі** розроблена інформаційна технологія оцінки характеристик замулення штучного водосховища з застосуванням метода аналогії. Головною є ідея, яка заснована на ствердженні, що штучні водосховища можуть бути близькими за інформацією щодо тих характеристик, які є головними щодо формування процесів їх замулення. На цій основі, інформація про характеристики замулення водоймища-прототипу, трансформується у інформацію про відповідні характеристики водосховища-аналога. Це має практичне значення для штучних водосховищ, які потребують великий обсяг вихідних даних для аналізу їх екологічного стану, включаючи процеси замулення та потребують значний час для їх отримання.

Для штучних водосховищ є характерним мати великий набір територіальних зон, що мають значні розбіжності щодо інформації про їх локальні екологічні характеристики. Тому в дослідженні запропонований підхід до оцінки інформації про процеси утворення мулу, заснований на зональному підході при надходженні первинної інформації та її перетворенні. Таким чином, головною структурною частиною при розрахунках об'ємів утворення мулу є зональний елемент.

До інформаційної технології включено також методика експрес-оцінки процесу замулення водосховищ. Позначено:  $\bar{x}$  – кількість осаду, що осідає на інтервалі часу



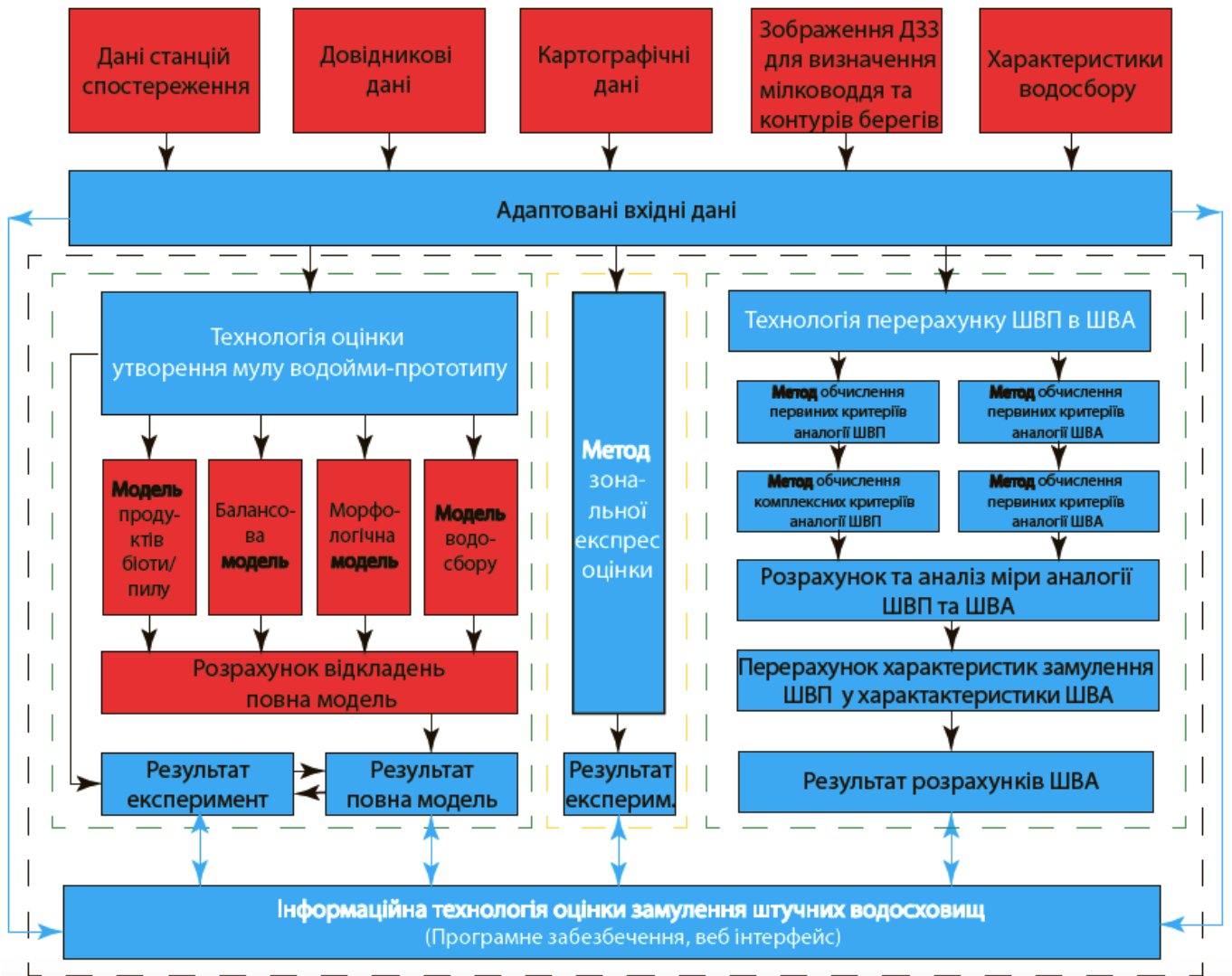


Рисунок 2 – Інформаційна технологія оцінки замулення штучних водосховищ (рожевим означена запозичена інформація)

У п'ятому розділі виконано оцінку інтенсивності замулення водосховищ Дніпровського каскаду на основі розробленої інформаційної моделі, в яку включені відповідні критерії аналогії. Згідно розробленої експериментально-аналітичної технології була розроблена інформаційна модель. Для перевірки адекватності розроблена інформаційна модель Самарського водосховища, яке використовується як водосховище-прототип. Далі виконано оцифрування картографічних даних Самарського водосховища-прототипу і Дніпровського водосховища-аналога.

При формуванні множини точок використана інтерполяція за методом обернено-зважених відстаней, яка дозволяє визначити значення осередків з використанням лінійно зваженої комбінації значень з набору опорних точок.

Робота з моделювання рельєфу дна ділянки р. Самара Україна (водойми-прототипу) виконана на ГІС-платформі. Для визначення середніх потужностей донних відкладень на різних ділянках побудовані і визначені профілі дна Самарського водосховища на глибинах 2015 року та глибинах 2016 року. Для розрахунку використаний ГІС-модуль GRASS.

Для перевірки даних, отриманих на основі цифрової обробки існуючих картографічних даних і результатів моделювання процесів створення мулу проведені прямі виміри глибин в 2015 і 2016 роках (інтервал 1 рік).

В ході експедиційних досліджень профілів поперечних перетинів водосховища-прототипу експериментальна інформація отримана у формі прямих вимірювань глибин в створах зазначених перетинів. Досліджувана частина акваторії задається верхнім створом (міст на Ігрені) і нижнім створом (міст на Придніпровськ). Число поперечних перетинів за течією розподілені нерівномірно. З урахуванням даних оцифрування враховувалися особливості форми профілю дна в конкретному перетині. Робота з моделювання рельєфу дна ділянки р. Самара (водойми-прототипу) виконана на ГІС-платформі. Для визначення середніх потужностей донних відкладень на різних ділянках побудовані і визначені профілі дна Самарського водосховища на глибинах вимірюваних з інтервалом в один рік. Для розрахунку профілів дна використаний ГІС-модуль GRASS.

На підставі статистичної різниці глибин з інтервалом в один рік визначено об'єм замулу, що утворився протягом одного року. Цей об'єм склав 40011 м<sup>3</sup>. Для розрахунку об'єму замулу за методикою наближеної оцінки використовуються експериментальні дані про розподіл мутності води і швидкості осадження зважених речовин. За наближеною методикою виконані оцінки кількості замулу, що випав протягом року в заданих зонах водосховища-прототипу. Кількість мулу склала 42046 м<sup>3</sup>. Використовувався показник щільності річкового мулу  $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$ . Швидкість осадження мулу по всьому об'єму зони склала 109,59 тон/добу, або 4,57 тон/рік. Таким чином, в експерименті об'єм замулу склав 40 011 м<sup>3</sup>, а за результатами наближеної методики – 42046 м<sup>3</sup>. Такий збіг результатів дає підставу вважати методику наближеної оцінки валідною.

Розраховані первинні критерії аналогії для усіх водосховищ Дніпровського каскаду. На цій основі обчислені комплексні критерії аналогії і виконано порівняння за цими критеріями водосховища-прототипу і водосховищ Дніпровського каскаду. Значення міри відмінності, визначені критеріями аналогії, що наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Міра відмінності критеріїв аналогії ШВ прототипу і аналогів

П	A5	A3	A2	A6	A4	A1
0	0,144	0,275	0,337	0,389	0,707	1,000

Де: П - ділянка Самарського водосховища (прототип), А1 - Київське водосховище (аналог), А2 - Канівське водосховище (аналог), А3 - Кременчуцьке водосховище (аналог), А4 Дніпродзержинське / Кам'янське водосховище (аналог), А5 - Дніпровське водосховище (аналог), А6 - Каховське водосховище (аналог).

З таблиці 2 видно, що найбільш близькими за критерієм аналогії 0,144 є водосховища Самарське (прототип) і Дніпровське (аналог).

Розрахунки об'єму мулу, утвореного в водосховищі-прототипі (Самарське) проведені за трьома методиками. Перша методика заснована на використанні традиційної інформаційної моделі водосховища, доповненої зональним підходом. Друга методика заснована на використанні експрес-оцінки об'єму замулення з використанням експериментальних даних про каламутність води у водосховищі-

прототипі (вересень 2015 - вересень 2016 рр.) а також лабораторного визначення швидкості осадження зважених речовин у воді водосховища. Третя методика заснована на прямих вимірах об'єму намулу, що осів на дно Самарського водосховища. Результати розрахунків за трьома методиками представлені нижче. Об'єм  $W_H$  і маса  $M_H$  мулу, утвореного в 2015-2016 рр. в Самарському водосховищі при показнику щільності річкового мулу  $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$  склав:

Методика 1  $W_H = 2,05 \cdot 10^5 \text{ м}^3$ ,  $M_H = 3,28 \cdot 10^5 \text{ т}$ ,  $h=4,11 \text{ см}$

Методика 2  $W_H = 2,8 \cdot 10^5 \text{ м}^3$ ,  $M_H = 4,48 \cdot 10^5 \text{ т}$ ,  $h=4,57 \text{ см}$

Методика 3  $W_H = 2,4 \cdot 10^5 \text{ м}^3$ ,  $M_H = 3,84 \cdot 10^5 \text{ т}$ ,  $h=4,26 \text{ см}$

Перерахунок даних оцінки замулення водосховища-прототипу в дані оцінки замулення водосховища-аналога здійснювався згідно інформаційної технології, розробленої з урахуванням співвідношення об'ємів води і характеристик каламутності води.

Для апробації інформаційної технології перетворення інформації про характеристики замулення водосховища прототипу в інформацію про замулювання Самарського водосховища, дані, отримані експериментальним шляхом ( $h=4,26 \text{ см}$ ) перераховані в дані про замулювання Дніпровського водосховища за запропонованою методикою перерахунку ( $h=3,01 \text{ см}$ ). За результатами розрахунків осадження мулу в Дніпровському водосховищі, виконаних вченими ІППЕ НАН України (Шапар А.Г.), отримано значення товщини шару осаду в рік ( $h=2,7 \text{ см}$ ). Порівняння цих результатів ( $h=2,7 \text{ см}$  і  $h=3,01 \text{ см}$ ) підтверджує валідність розробленої методики перерахунку даних про замулювання водосховища-прототипу в дані замулення водосховища-аналога.

Результати перерахунку показників замулення Самарського водосховища-прототипу в дані про замулюванні водосховищ Дніпровського каскаду (аналогів) наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Маса створеного мулу в водосховищах Дніпровського каскаду

Водосховище	Об'єм намулу * $10^5$ , м <sup>3</sup>	Маса намулу * $10^5$ , т
Ділянка р. Самара	2,4	3,84
Київське	55,95	89,52
Канівське	47,67	76,27
Кременчуцьке	211,50	338,40
Дніпродзержинське	55,53	88,85
Дніпровське	63,80	102,08
Каховське	299,51	479,22

## ВИСНОВКИ

У дисертації, що є завершеною науковою роботою, на основі проведених досліджень, розроблена інформаційна технологія моделювання замулення штучних водосховищ, що дало можливість підвищити ефективність оцінки процесів замулення.

Основні результати дослідження:

1. Розроблено інформаційну технологію, що включає математичні моделі відповідних процесів замулення та характеристики штучних водосховищ, які

визначають інтенсивність утворення мулу. Вперше встановлено систему критеріїв для порівняння характеристик штучних водосховищ-прототипів і аналогів. Розрахункові алгоритми засновані на використанні оригінальної зональної структури великих водосховищ, які дозволяють враховувати локальні властивості їх окремих складових акваторій та водосховища в цілому. Зональна структура штучних водосховищ прив'язана до змінного контуру штучних водосховищ та поперечних перетинів і не змінюється при сезонних і вікових змінах рівня води у водосховищі. Запропонований метод, заснований на введенні нового поняття «віртуальне водосховище», який використовується для аналізу залежності міри близькості або відмінності характеристик водосховищ (ступеню їх аналогії або невідповідності). Як віртуальні водосховища використовуються сегменти одного і того ж водосховища, вибрані таким чином, щоб мінімізувати різницю їх інформаційних моделей на початку аналізу.

2. Розроблено систему критеріїв, що включає п'ять кластерів первинних критеріїв і відповідні їм комплексні критерії аналогії. Ґрунтуючись на розроблених критеріях виконані кількісні оцінки міри аналогії водоймища-прототипу і водоймища-аналогу.

3. На основі розробленої інформаційної технології виконані розрахунки об'ємів замулення штучних водосховищ Дніпровського каскаду (водосховищ-аналогів) на основі інформації про об'єм замулення Самарського водосховища (прототипу), отриманої розрахунковим і експериментальним шляхом.

Запропоновано використання трансферної методики формування пар порівняння водосховищ аналогів і прототипів, засновану на виборі пар водойм «прототип-аналог» з максимально близькими інформаційними моделями процесу замулення, з подальшим трансфером властивостей прототипу до аналогу. У такий спосіб водосховище-аналог виступає як водосховище-прототип в обраній парі штучних водосховищ.

4. За допомогою інформаційної технології аналізу геоінформаційних систем (ГІС-технологій) були побудовані моделі рельєфу дна Самарського водосховища (моделювання) за даними експериментальних вимірювань глибин у 2015, 2016 роках відповідно. На основі статистичного матеріалу щодо вимірювання глибин Самарського водосховища побудовано регресійні моделі зміни глибин, які дозволяють прогнозувати темпи замулювання водосховища.

Результати дисертаційної роботи мають самостійне науково-технічне значення, їх доцільно застосовувати як проблемно-орієнтований інструментарій для інформаційного забезпечення оцінки замулення штучних водосховищ.

Створено інформаційну технологію оцінки замулення штучних водосховищ, яка реалізує на практиці розроблені алгоритми, моделі та методи, було використано при складанні річних прогнозів замулення Дніпровського водосховища, при річному прогнозі екологічного стану Придніпровського регіону, а також при розробці рекомендацій щодо змін правил експлуатації Дніпродзержинського водосховища. Інформаційна експериментально-аналітична технологія замулення і відповідне програмне забезпечення впроваджені як розрахунковий модуль в інформаційно-пошуковій і експертну систему обробки інформації для прийняття рішень в



Дніпропетровському відділі МНС України. Розроблена інформаційна технологія визначення замулювання великих водосховищ використано у процесі підготовки технічного завдання на розроблення, побудову та впровадження автоматизованої системи технічного діагностування стану безпеки територій, що входять в коло відповідальності Дніпровського відділу МНС України.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. A. Shapar, O. Skrypnyk, O. Taranenko, D. Dubovik. «Determination of bottom sediments intensity accumulation in samara gulf of dnieper reservoirs using geographic information systems (GIS)» / Екологічна безпека № 1/2015 (19), Кременчуг, 2015. – С. 33-36.

2. Дубовик Д.Д. Алгоритм разработки информационной модели экологического состояния искусственных водоемов // Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Механико-технологические системы и комплексы. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2015. – No 36 (1145). – С. 111-115. (Index copernicus).

3. Дубовик, Д.Д. Розробка алгоритму зональних характеристик штучних водоймищ / Д. Д. Дубовик, Т. М. Дубовик // Вісник НПУ «ХПИ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2016. – No12 (1184). – С. 112-118. – doi:10.20998/2413-4295.2016.12.16. (Index copernicus).

4. Дубовик Д.Д. Приближенная методика оценки объема заиления водохранилища – прототипа / Д. Д. Дубовик // Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – No 18 (1190). – С. 164-169. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.24. (Index copernicus).

5. Дубовик, Д. Д. Экспериментальное определение донного рельефа на базе исследований нижнего участка р. Самара / Д. Д. Дубовик, Ю. І. Борохович // Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – No 32 (1254). – С. 98-103. – doi:10.20998/2413-4295.2017.32.16. (Index copernicus).

6. Дубовик Д.Д. Методические особенности оценки процессов заиления искусственных водохранилищ на основе метода аналогии / Д. Д. Дубовик // Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – No 16 (1292). – С. 145-150. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.22. (Index copernicus).

7. Дубовик Д.Д. Структура информационной модели заиления искусственных водохранилищ. Научно-теоретический и практический журнал. Оралдын Ғылым Жаршысы №29 (160) Казахстан 2016. 66-71С.

8. Шапар А.Г, Скрипник О.О., Тараненко О.С, Дубовик Д.Д. Визначення актуальних екологічних параметрів Дніпропетровських водосховищ за допомогою геоінформаційних технологій/Екологія і природокористування №18, Дніпропетровськ, 2014. – С. 139-146.

9. Дубовик Д.Д. Процесс заиления искусственных водохранилищ – одна из важнейших экологических проблем Материалы XII международной научно-практической конференции. Научная мысль. 7-15 марта 2016. Польша. 38-40 С.

10. Дубовик Д.Д. Об оценке стойкости русла р.Днепр в системе водохранилищ /Международная междисциплинарная конференция молодых ученых «Шевченковская весна»: тезисы докладов. Киев, 2015. – С. 73.

11. Тараненко О.С., Дубовик Д.Д., Оцінка інтенсивності накопичення донних відкладень у Дніпровському водосховищі за допомогою ГІС / «Міжнародний день ДНІПРА. Дніпропетровськ, 2015. – С. 21.

12. Дубовик Д.Д. Моделирование процессов заиления искусственных водохранилищ. Постановка задачи / VIII международная научно-практическая конференция «Проблемы природопользования, устойчивого развития и техногенной безопасности регионов». г. Днепропетровск, 6 октября 2015. – С. 53.

13. Дубовик Д.Д. Моделирование процессов заиления искусственных водохранилищ. Приднепровский научный вестник №6 (160) Днепр. 2016. 67-70 С.

14. Дубовик Д.Д. Оцінка багаторічних коливань температури повітря та води річок басейну південного Бугу. Міжнародна междисциплинарна конференція молодих вчених Шевченківська весна. Географія. Київ, 2-3 квітня 2015. 73-76 С.

15. Дубовик Д.Д. Расчёт заиления каскада Днепровского водохранилища с помощью ГИС технологии (на примере устья р. Орель) / Дубовик Д.Д. / Актуальные вопросы ядерно-химических технологий: тезисы докладов. Севастополь, 2014. – С. 106.

16. «День доквілля 2014» (28 квітня 2014 р., м. Дніпропетровськ) за темою «Розрахунок замулення каскаду Дніпровського водосховища за допомогою ГІС технологій» м. Дніпропетровськ, 2014. – С. 81.

## АНОТАЦІЯ

**Дубовик Д.Д.** Інформаційна технологія оцінки замулення штучних водосховищ – кваліфікаційна праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології. Черкаський державний технологічний університет, МОН України, Черкаси, 2021.

Дисертацію присвячено порівнянню процесів замулення, що відбуваються в близькими за характеристиками водоймах, обраному прототипі шляхом розробки інформаційної технології оцінки замулення великих штучних водосховищ. Інформаційна технологія розроблена на основі методу аналогії, пов'язаної з розробкою системи критеріїв аналогії, інформаційних моделей замулення та відповідних оцінок замулення водосховищ Дніпровського каскаду.

Виконано оцінку об'єму замулення водосховищ Дніпровського каскаду. Оцінки процесів замулення штучних водосховищ є актуальними, мають практичне значення і були використані при розробці концепції та методологічних аспектів відносно відстеження техногенної безпеки м. Дніпро.

**Ключові слова:** інформаційна технологія, інформаційна модель, метод аналогії, критерії аналогії, замулення водосховищ, математична модель замулення, водосховище - прототип, водосховище - аналог, прогнозні оцінки.

## АННОТАЦИЯ

**Дубовик Д.Д.** Информационная технология оценки заиления искусственных водохранилищ - квалификационная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 - информационные технологии. Черкасский государственный технологический университет, МОН Украины, Черкассы, 2021.

Диссертация посвящена сравнению процессов заиления, происходящих в близком по характеристикам водоемах, выбранном прототипе путем разработки информационной технологии оценки заиления больших искусственных водохранилищ. Информационная технология разработана на основе метода аналогии, связанной с разработкой системы критериев аналогии, информационных моделей заиления и соответствующих оценок заиления водохранилищ Днепровского каскада.

Выполнена оценка объема заиления водохранилищ Днепровского каскада. Оценки процессов заиления искусственных водохранилища актуальны, имеют практическое значение и были использованы при разработке Концепции и методологических аспектов относительно отслеживания техногенной безопасности г. Днепр.

**Ключевые слова:** информационная технология, информационная модель, метод аналогии, критерии аналогии, заиления водохранилищ, математическая модель заиления, водохранилище - прототип, водохранилище - аналог, прогнозные оценки.

## ANNOTATION

**Dubovyk D.D.** Information technology for assessing siltation of artificial reservoirs. - qualification work as a manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.13.06 - information technology. - Cherkasy State Technological University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Cherkassy, 2021.

The dissertation is devoted to the problem of development of information technology of siltation assessment of large artificial reservoirs on the basis of analogy method, connected with development of system of analogy criteria, siltation information model and corresponding siltation assessments of reservoirs of Dnieper cascade.

Analysis and generalization of the results of information analysis of the properties of artificial reservoirs allowed the author to formulate for the first time the task of comparative analysis of models of artificial reservoir-prototype and artificial reservoir-analogue, to give a theoretical justification and quantitative description of such analysis. and pace.

On this basis, the basic ideas about the composition of the data necessary for the formation of a cluster of criteria and further analysis of the possibility of estimating the volume of sediments in the reservoir-analogue based on information about the processes of siltation in the reservoir-prototype. Comparison of the results obtained on the basis of these approaches to the estimation of siltation volumes with the data of direct measurements is the basis for verification of the results obtained in this work, which confirms their reliability.

The estimation of volumes of siltation of reservoirs of the Dnieper cascade is executed. Estimates of siltation processes of artificial reservoirs are relevant, have practical significance and were used in the development of the Concept and methodological aspects regarding the monitoring of technogenic safety of the Dnieper.

The aim of the study. Improving the efficiency of assessment of siltation processes of artificial reservoirs by developing information technology for modeling their siltation using analogy methods.

Research objectives:

1. Develop a system of analogy criteria to compare the characteristics of the reservoir-prototype with reservoirs-analogues.

2. To develop information technology for assessment of siltation of reservoirs.

3. To substantiate the information technology for assessing the siltation of the reservoir-analogue on the basis of information about the siltation of the reservoir-prototype (standard), using the criteria of analogy.

4. To carry out modeling of processes of siltation of artificial reservoirs of the Dnieper cascade with use of the developed information technology. Estimate the intensity of siltation of reservoirs of the Dnieper cascade.

Object of research - processes of siltation of artificial reservoirs of the Dnieper cascade.

The subject of research - models, methods and information technology for assessing the processes of siltation of large artificial reservoirs.

Scientific novelty of the obtained results.

The main results that determine

scientific novelty of the dissertation:

1. For the first time:

-Developed information technology for research and calculation of siltation characteristics of artificial reservoirs, which in contrast to existing, in accordance with the needs of assessing the ecological status of reservoirs, describes the state of the prototype reservoir and allows converting this information into information about the unknown state of the analogue reservoir. information according to the developed algorithms in accordance with the requirements of end users.

2. Improved:

-Method of estimating the volume of sludge formation in large artificial reservoirs, which differs from the existing proposed system of complex criteria, combining quantitative assessment of the proximity of artificial reservoirs by the nature of siltation processes and expert assessment of weights of components of complex criteria, which allows comprehensive assessment prototype and analogue and to form requirements for the volume and composition of the primary data on the unknown state of the analogue reservoir required to convert information about the state of the prototype into information about the state of the analogue.

### 3. Received further development:

- method of analogy for assessing the state of the reservoir-analogue using information about the state of the reservoir-prototype, which gives more opportunities for its application.

-Models and calculation algorithms based on the zonal approach to processing information about the state of reservoirs.

The practical use of the scientific results obtained in the dissertation is evidenced by the relevant act of implementation.

**Key words:** information technology, information model, analogy method, analogy criteria, siltation of reservoirs, mathematical model of siltation, prototype reservoir, reservoir analog, forecast estimates.