

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНЕ КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ МЕХАНІКИ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

Дубовик Денис Дмитрович

Прим №

УДК 004.942.519.876.5+574.5

ДИСЕРТАЦІЯ
**ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ОЦІНКИ ЗАМУЛЕННЯ ШТУЧНИХ
ВОДОСХОВИЩ**

05.13.06 – «Інформаційні технології»

05 ТЕХНІЧНІ НАУКИ

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Д.Д. Дубовик

Науковий керівник – **Алпатов Анатолій Петрович**, член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор

Черкаси – 2021

АНОТАЦІЯ

Дубовик Д.Д. Інформаційна технологія оцінки замулення штучних водосховищ.

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.

В роботі 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. В роботі 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'єму та складу первинних даних про невідомий стан водосховища-аналогу, потрібних для перетворення інформації про стан прототипа в інформацію про стан аналогу. В роботі 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.

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. 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.

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.

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.

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 Дніпропетровському відділі МНС України.

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.

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

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 comparison of siltation processes occurring in reservoirs similar in characteristics to the selected prototype by developing information technology for siltation assessment of large artificial reservoirs. The information technology is developed on the basis of the method of analogy connected with development of system of criteria of analogy, information models of siltation and the corresponding estimations of siltation of reservoirs of the Dnieper cascade.

The information technology of research and calculation of siltation characteristics of artificial reservoirs is developed in the work. this information according to the developed algorithms in accordance with the requirements of end users. The method of estimation of sludge formation volumes in large artificial reservoirs is improved, which differs from the existing ones by the proposed system of complex criteria, combining quantitative

assessment of proximity of artificial reservoirs by the nature of sludge formation processes and expert estimation of weights of components of complex criteria. artificial reservoirs of the prototype and analogue and to form requirements for the volume and composition of the primary data on the unknown state of the reservoir-analogue, required to convert information about the state of the prototype into information about the state of the analogue. The method of analogy for the assessment of the state of the analogue reservoir with the use of information about the state of the prototype reservoir was further developed in the work, which gives wider opportunities for its application. models and calculation algorithms based on the zonal approach to processing information about the state of reservoirs, which allows in accordance with the requirements of end users of information technology to selectively use the information system to calculate sludge formation processes in selected areas of the reservoir and the reservoir as a whole.

The system of analogy criteria reflects the characteristics of the volume ratios of reservoirs, their ecological status, external and internal factors of formation of reservoirs, allows to more quantitatively determine the proximity of reservoirs to their characteristics of silt formation. Information technology, which includes mathematical models of relevant siltation processes and algorithms for determining characteristics and has a zonal structure, corresponds to the zonal structure of artificial reservoirs, ie local properties of their individual constituent waters (zones), allows to determine the intensity of silt formation in the reservoir prototype, and more quickly determine on this basis, the characteristics of the formation of silt in the reservoir-analogue.

The theoretical results obtained by the author are brought to specific engineering methods, algorithms and programs, namely, developed a method of operational assessment of the ecological status of artificial reservoirs of the Dnieper cascade to calculate the rate of siltation.

The main provisions of the dissertation are aimed at further development of decision support technologies for adjusting the ecological status of reservoirs in conditions of uncertainty. The developed models and methods form the methodological basis for optimizing the decision-making processes using the results of the forecast of siltation intensity. The research materials were used in compiling annual forecasts of siltation of the Dnieper reservoir, in the annual forecast of the ecological condition of the Dnieper region,

as well as in the development of recommendations for changes in the rules of operation of the Dneprodzerzhinsk reservoir.

Siltation information technology and related software (environmental monitoring of artificial reservoirs) have been implemented as a calculation module in the information retrieval and expert information processing system for decision-making in the Dnipropetrovsk department of the Ministry of Emergencies of Ukraine.

On the basis of the developed information technology calculations of volumes of siltation of artificial reservoirs of the Dnieper cascade (reservoirs-analogues) on the basis of information on volume of siltation of the Samara reservoir according to experimental measurements of depths in 2015, 2016 accordingly are executed. Based on the statistical material for measuring the depths of the Samara Reservoir, regression models of depth change are constructed, which allow predicting the rate of siltation of the reservoir.

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.

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати

Публікації у фахових виданнях України з технічних наук

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

Особистий внесок здобувача: розробка алгоритму інформаційної технології та використання власно розроблених програм ГІС систем для визначення замулення участку р. Дніпро.

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).

Особистий внесок здобувача: розробка зональних характеристик штучних водоймищ та їх розрахунок.

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. 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).

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

Особистий внесок здобувача: за допомогою інформаційних технологій, ГІС-технологій, ДЗЗ проведено експериментальне визначення донного рельєфу.

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

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

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.

Наукові праці, які додатково відображають результати дисертаційної роботи

12. Дубовик Д.Д. Моделирование процессов заиления искусственных водохранилищ. Постановка задачи / VIII международная научно-практическая конференция «Проблемы природопользования, устойчивого развития и техногенной безопасности регионов». 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 міждисциплінарна конференція молодих вчених Шевченківська весна. Географія. Київ, 2-3 квітня 2015. 73-76 С.

15. Дубовик Д.Д. Расчёт заиливания 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 довкілля 2014» (28 квітня 2014 р., м. Дніпропетровськ) за темою «Розрахунок замулення каскаду Дніпровського водосховища за допомогою ГІС технологій».

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	13
ВСТУП.....	15
РОЗДІЛ 1 ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОЦІНОК ПРОЦЕСА ЗАМУЛЕННЯ ШТУЧНИХ ВОДОСХОВИЩ.....	21
1.1 Аналіз інформації, характеристики і фактори замулення штучних водосховищ.....	21
1.2 Характеристика ГІС-технологій для задач опису гідрологічних процесів у водоймах.....	26
1.3 Особливості інформаційного аналізу замулення водосховищ Дніпровського каскаду.....	33
1.4 Обґрунтування і постановка завдань дослідження	38
Висновки до першого розділу.....	43
РОЗДІЛ 2 ІНФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ ВОДОСХОВИЩА-ПРОТОТИПУ.....	45
2.1 Загальна характеристика інформаційної моделі.....	45
2.2 Алгоритм розробки інформаційної моделі.....	48
2.3 Математична модель замулення штучного водосховища наносами.....	51
2.3.1 Модель динаміки наносів в річковому потоці.....	51
2.3.2 Спрощена модель динаміки донних наносів.....	53
2.3.3 Оцінка товщини активного шару донних відкладень.....	54
2.3.4 Визначення параметрів донних наносів.....	58
2.3.5 Обчислювальний алгоритм.....	59
2.3.6 Результати перевірочних розрахунків.....	62
2.4 Морфометрична модель водосховища.....	63
2.5 Моделі балансу.....	70
2.5.1 Модель теплового балансу.....	70
2.5.2 Модель водного балансу.....	70
2.5.3 Балансова модель донних відкладень.....	71

2.6 Модель території водозбору.....	71
2.7 Модель процесів утворення продуктів життєдіяльності.....	72
2.8 Модель утворення донних відкладень.....	74
2.8.1 Алгоритм оцінки термінів замулення штучного водосховища.....	74
2.8.2 Опадонакопичення як функція району седиментації.....	75
Висновки до другого розділу.....	79
РОЗДІЛ 3 КРИТЕРІЇ АНАЛОГІЇ В ЗАДАЧАХ ОЦІНКИ ДИНАМІКИ ЗАМУЛЕННЯ ШТУЧНИХ ВОДОСХОВИЩ.....	81
3.1 Структура критеріїв аналогії.....	81
3.2 Первинні і комплексні критерії.....	82
3.3 Оцінка рівня аналогії водосховищ прототипу та аналогу.....	85
3.4 Аналіз міри аналогії (міри невідповідності).....	90
3.5 Концепція послідовного аналізу і прогнозу стану ШВ на основі редукції критеріїв замулення.....	98
3.6 Розрахунок системи первинних критеріїв.....	102
3.6.1 Критерії, засновані на морфометричних характеристиках водосховища.....	102
3.6.2 Критерії аналогії на основі характеристик басейну водозбору.....	104
3.6.3 Критерії, залежні від характеристики об'ємів води, яка надходить.....	106
3.6.4 Критерії аналогії для оцінки процесів надходження речовини з повітря.....	107
3.6.5 Критерії, пов'язані з біологічною продуктивністю водосховища.....	107
Висновки до третього розділу.....	108
РОЗДІЛ 4 ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ОЦІНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАМУЛЕННЯ ШТУЧНОГО ВОДОСХОВИЩА З ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДА АНАЛОГІЇ.....	109
4.1 Системи координат.....	109
4.2 Методика розрахунку відкладень в комірках з вертикальною структурою.....	115
4.3 Методика оцінки площі зонального елемента водосховища – прототипу.....	118
4.4 Методика наближеної оцінки процесу замулення.....	120
4.5 Зональна методика експериментального визначення об'єму замулу за результатами вимірювань глибин водосховища-прототипу.....	124

4.6 Інформаційна технологія оцінки замулення водосховища на основі метода аналогії та алгоритм її використання.....	128
Висновки до четвертого розділу.....	134
РОЗДІЛ 5 ОЦІНКА ІНТЕНСИВНОСТІ ЗАМУЛЕННЯ ВОДОСХОВИЩ ДНІПРОВСЬКОГО КАСКАДУ НА ОСНОВІ РОЗРОБЛЕНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ.....	135
5.1 Оцифрування картографічних даних Самарського водосховища-прототипу і Дніпровського водосховища-аналога.....	135
5.1.1 Загальний опис Самарського та Дніпровського водосховищ.....	135
5.1.2 Оцифрування картографічних даних Самарського та Дніпровського водосховищ.....	137
5.2 Експериментальне визначення об'єму намулу за результатами вимірювань глибин водосховища-прототипу.....	142
5.3. Розрахунок критеріїв аналогії для водосховищ прототипу і аналогів.....	144
5.3.1 Розрахунок первинних критеріїв.....	144
5.3.2 Розрахунок комплексних критеріїв.....	146
5.4 Оцінка замулення штучного водосховища-прототипа.....	148
5.5 Перерахунок оцінок замулення водосховища-прототипу в оцінки замулення водосховищ Дніпровського каскаду.....	150
Висновки до п'ятого розділу.....	151
ВИСНОВКИ.....	153
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	155
ДОДАТОК А.....	166
ДОДАТОК Б.....	169
ДОДАТОК В.....	172
ДОДАТОК Г.....	173
ДОДАТОК Д.....	177

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВП, НП	верхня, нижня греблі.
ВА	обчислювальний алгоритм.
ГІС	геоінформаційна система.
ДЗЗ	дистанційне зондування Землі.
ДЛРКБ	донна лінія рівновіддалених контурів берегів.
ШВ	штучне водосховище.
ШВА	штучне водосховище - аналог.
ШВП	штучне водосховище - прототип.
ІМ	інформаційна модель.
ІС	інформаційна система.
ІТ	інформаційні технології.
КК	комплексний критерій.
ЛРКБ	лінія рівновіддалених контурів берегів.
МА	метод аналогії.
МГУА	метод групового обліку аргументів.
МНК	метод найменших квадратів.
ММ	математична модель.
МНС	Міністерство надзвичайних ситуацій.
НДР	науково-дослідна робота.
НПР	нормальний підпірних рівень.
ПЗ	програмне забезпечення.
ППП	пакет прикладних програм.
ПрСШВ	подовжній перетин штучного водосховища.
ПСШВ	поперечний переріз штучного водосховища.
ЗП	зведення правил щодо визначення розрахункових гідрологічних характеристик.
СФК	комплекси, які формують стік.
СКБД	система управління базами даних.

ТН	технічний носій.
РМО	рівень мертвого об'єму.
РНС	рівень навігаційної спрацювання.
ФПР	форсований підпірних рівень.
ЦМР	цифрова модель рельєфу.
ЦМРД	цифрова модель рельєфу дна.
ЕІС	еколого-інформаційна система.
ЕІСІВ	еколого-інформаційна система штучного водоймища.
ЕС	експертна система.

ВСТУП

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.

У ситуації, що склалася стала очевидною необхідність розробки і застосування інформаційних експериментально-аналітичних технологій, які можуть бути покладені в основу розробки автоматизованих систем управління. Це вимагає використання великих обсягів структурованої і оновлюваної інформації про процеси замулення. Системний аналіз великих обсягів такої інформації практично неможливий без розробки і використання інформаційного забезпечення 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 водойм на річках є актуальним завданням.

При цьому структурний синтез елементів інформаційної технології, заснований на використанні інформації щодо процесів замулення спеціального добре вивченого водоймища – прототипу (еталона) для оцінки стану замулення інших водосховищ – аналогів, формування інформації визначається комплексом локальних, регіональних і глобальних властивостей великих штучних водосховищ, до числа яких відносяться водосховища Дніпровського каскаду.

Таким чином розробка інформаційної експериментально-аналітичної технології, їх 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-прототипа з водоймищами-аналогами

2. Розробити інформаційну технологію дослідження стану водосховищ, використовуючи математичне моделювання та аналізу параметрів процесів замулення.

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 водоймищ.

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'ємах та складу первинних даних

про невідомий стан водосховища-аналогу, потрібних для перетворення інформації про стан прототипа 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 Дніпропетровському 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.

Праці [1, 3, 5, 8] виконано без співавторів.

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 науковій конференції "Інформаційні технології в управлінні складними системами", Дніпропетровськ, 6 грудня 2013 р.; на міжнародній молодіжній науково-практичній конференції «Людина і космос», Дніпропетровськ, 27 листопада 2014 р., 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: 7 статей (4 - без співавторства) у збірниках України, 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 177 сторінок, з яких анотація на 5 сторінках, зміст на 3 сторінках, перелік умовних позначень на 2 сторінках, основний текст на 168 сторінках, список використаних джерел із 128 найменування на 12 сторінках, додатки на 8 сторінках. Робота містить 20 таблиць і 136 рисунків.

РОЗДІЛ 1. ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОЦІНОК ПРОЦЕСА ЗАМУЛЕННЯ ШТУЧНИХ ВОДОСХОВИЩ

На основі аналізу наукових публікацій, описані особливості інформаційного простору основних характеристик екологічного стану штучних водосховищ, інформаційних властивостей механізмів і процесів, що відбуваються в ерозійно-руслених системах територій водозборів, проаналізовані моделі, що описують зв'язок процесів наносів, типів водних наносів з ерозійно-аккумулятивними процесами. Розглянуто причини, процеси і моделі замулення штучних водойм та особливості формування модулів інформаційної моделі осадоутворення в штучних водосховищах, які містять прописання зв'язків параметрів русел з водністю потоків і стоком наносів.

Метою огляду є підготовка матеріалів для постановки завдання створення інформаційної моделі процесів замулення рівнинних водосховищ типу водосховищ Дніпровського каскаду і оцінки процесу замулення спостережуваних водосховищ на основі використання інформаційної моделі штучних водойм-прототипів і системи відповідних критеріїв порівняння ключових особливостей процесів замулення штучних водосховищ прототипів і водосховищ-аналогів.

1.1 Аналіз інформації, Характеристики і фактори замулення штучних водосховищ

Водосховища – об'єкти, створювані і керовані людиною, одночасно відчують також вплив природних факторів. З цієї причини водосховища займають проміжне положення між «природними» і «технічними» утвореннями, іншими словами, яка є природно-технічною системою. Для водосховищ характерна висока динамічність розвитку, обумовлена мінливістю гідрометеорологічних процесів, що визначають режим водойми, зміною впливу господарства на природне середовище, змінами (з різних причин) режиму експлуатації.

Динамічні процеси в водосховищах є об'єктом математичного опису з використанням апарату диференціальних і алгебраїчних рівнянь, теорії матриць,

теорії множин, регресійного аналізу та інших розділів математики, гідромеханіки і біології [1]. На цій основі створюються різні компоненти інформаційної моделі, що дозволяє виконувати аналітичні дослідження різних процесів в штучних водосховищах (далі ШВ), включаючи процеси осадо-утворення.

Механізм замулення ШВ включає наступні процеси: вступ седиментаційного матеріалу з водозбору (алохтонна речовина) і його утворення в самому водосховищі (автохтонна речовина); транспорт суспензій у водосховищі; перетворення; осадження і винос з водосховища; перетворення донних відкладень в породу, що осідає. Замулення штучних водойм часто відбувається з великою інтенсивністю. Автохтонна речовина утворюється в результаті берегової абразії, гравітаційних процесів в береговій зоні, продукування гідробіонтів і хемогенної седиментації. Хемогенне відкладення виникають в результаті хімічних реакцій, що протікають в водосховищі.

Кількість седиментаційного матеріалу, що потрапило в ШВ, зменшується з часом. Співвідношення між алохтонною і автохтонною речовинами зростає. Осадконакопичення є складним багатофакторним нестационарним процесом. Інтенсивність накопичення опадів залежить від надходження алохтонної і автохтонної речовини та від наносотримуючої здатності водосховища. Останнє оцінюється кількістю відкладень матеріалу і загальним надходженням седиментаційного матеріалу на відповідному інтервалі часу. Баланс речовини визначається рівнянням седиментаційного балансу ШВ:

$$R_{п}+R_{б}+R_{р}+R_{орг}+R_{хем}=R_{о}+R_{с}+R_{хоз}+DR_{взв}+DR \quad (1.1.1)$$

де $R_{п}$ та $R_{б}$ – приплив наносів річки і прилеглих берегів; $R_{р}$ – продукти розмиву берегів; $R_{орг}$ – продукти життєдіяльності; $R_{хем}$ – продукти хемогенної седиментації; $R_{о}$ – осадо-накопичення; $R_{с}$ – скидання суспензій в нижній б'єф; $R_{хоз}$ – вилучення суспензій в процесі забору води з ШВ; $DR_{взв}$ – зміна кількості суспензій у відповідний період; DR – нев'язка балансу. Всі елементи балансу речовини в рівнянні (1.1.1) мають розмірність маси (кг).

Наносотримуюча здатність водосховища залежить: від ставлення об'єму води, що скидається з ШВ до об'єму його водної маси на тому ж інтервалі часу,

глибини; конфігурації водного дзеркала; об'єму надходження твердого матеріалу. Залежно від цих чинників наносоутримуюча здатність водосховища змінюється в широких межах. Показником інтенсивності замулення водосховища може слугувати відношення об'єму водосховища W при НІР до річного вступу річкових наносів R , вираженого в об'ємних величинах.

Показники середньої річної каламутності для рівнинних ШВ змінюються в широкому діапазоні значень від 10 г/м^3 до 150 г/м^3 і більше. При цьому середня річна величина шару змиву в басейні водосховища також знаходиться в широких межах ($0,0076 \text{ мм}$ - $0,030 \text{ мм}$, по різних типам ШВ). Максимальні значення мутності відносяться до періоду весняного водопілля та різко зменшуються в межень. (Наприклад витрата зважених наносів р. Воронеж у вхідному створі водосховища становить $5,8 \text{ кг/с}$, витрата наносів дорівнює $0,5 \text{ кг/с}$. Річний стік зважених наносів дорівнює 190 тис. т або 144 тис. м^3 , наносів – 16 тис. т або 12 тис. м^3 . Повний стік наносів річки (зважених) – 206 тис. т (156 тис. м^3), тобто $V_{ра} = 156 \cdot 0,02 = 3,12 \text{ тис. м}^3$).

Сукупність впливу різних чинників призводить до того, що водосховища рідко можна вважати стаціонарними об'єктами. У зв'язку з цим виникають особливі вимоги до складу екологічної інформації, періодичності її оновлення, розвитку систем екологічного моніторингу, а також аналітичних досліджень для виявлення фундаментальних механізмів і причин замулення ШВ, розвитку механізмів раціонального водокористування на основі широкого інформаційного забезпечення процесів управління експлуатацією ШВ.

Інформаційний аналіз розподілу наносів пов'язаний з отриманням інформації від різних систем спостереження, включаючи системи дистанційного зондування Землі з космічного простору, подальшою інтеграцією цієї інформації в стаціонарні інформаційні процеси екологічного моніторингу з використанням геоінформаційних технологій (ГІС).

Інформаційна модель замулення дозволяє прогнозувати стан водосховища, зміни рельєфу дна, оцінити об'єм замулу, що надходять у водосховищі в певні інтервали часу.

Це породжує проблему побудови ємного інформаційного забезпечення всіх видів моніторингу таких водосховищ в силу великих об'ємів робіт, що забезпечують

необхідний стан ШВ. По генезису ці водосховища створені шляхом підпору в річковій долині, що передбачає поєднаний інформаційний аналіз як ШВ, так і в гирлі річки.

Оскільки форми водосховищ досить різноманітні, то їх контури в плані і морфометричні показники не є сталими.

Це тягне за собою необхідність великомасштабного спостереження для повноцінного інформаційного забезпечення, в тому числі з використанням систем дистанційного зондування поверхні Землі, розробки відповідних моделей і інформаційних технологій обробки поточної інформації про стадії утворення намулу, включаючи ГІС-технології [2-5].

Інформаційний аналіз характеристик представляє інтерес зовнішнього обміну, заснований на класифікації водойм по інтенсивності зовнішнього обміну ($a_{\text{вод}}$), що показує як співвідносяться транзит з акумуляцією води і речовини у водоймі поділяють на чотири групи: транзитні ($a_{\text{вод}} = 50-300$ і більше); транзитно-акумулятивні ($a_{\text{вод}}=1-50$); акумулятивно-транзитні ($a_{\text{вод}}$ менше 1); акумулятивно-безстічні озера. Очевидно, що ШВ Дніпровського каскаду відносяться до третього типу.

При формуванні інформаційної моделі евтрофікації водойм дослідники основну увагу приділяють біогенним елементам, серед яких процес евтрофікації лімітують, головним чином, азот і фосфор [6]. Особливості інформаційного аналізу процесів осадження фосфору в набагато більшому ступені пов'язані з зовнішнім навантаженням фосфору і його зовнішнім балансом, оскільки швидкості осадження набагато менше швидкостей метаболічних перетворень фосфору в процесі біологічного кругообігу.

Сумарна площа каскаду ШВ Дніпра становить 6991 км^2 , об'єм - $43,81 \text{ км}^3$. Середнє значення відносного об'єму V_m (до площі дзеркала) становить величину $43,81 / 6991 \text{ км}^3 / \text{км}^2 = 0,00627 \text{ км}^3 / \text{км}^2$. Відносні об'єми водосховищ наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Відносні об'єми ШВ

В	Київське	Канівське	Кременчугське	Кам'янське	Дніпровське	Каховське
m	4,0	3,89	6,0	4,3	7,9	8,4

Відкладення дрібних (зважених) наносів називається замуленням, великих (ваблених) - занесенням. Якщо не вдається виділити дрібні і великі наноси, то загальний процес акумуляції наносів називається замуленням.

Для формування необхідної інформаційної бази необхідно класифікувати, залучаючи необхідну інформацію з найрізноманітніших джерел, типові для каскаду Дніпровських водосховищ морфологічні особливості, умови експлуатації та проектного призначення, фактичний матеріал по їх замуленню, оцінити потужність і особливості джерел виникнення в них донних відкладень.

Інформаційна модель призначена для визначення основних складових, необхідних для розрахунку об'єму замулення ШВ. Зокрема, вона повинна дозволити визначити середню багаторічну інтенсивність замулення ШВ каскаду Дніпровських водосховищ, врахувати особливості ерозійних процесів на їх водозборах в залежності від ландшафтних, ґрунтових, агрокліматичних, геоморфологічних та інших умов. Необхідною складовою інформаційної бази є дані, отримані на основі фактичних польових вимірювань глибин водойм.

Результати моделювання необхідні для розробки системи заходів щодо зниження інтенсивності замулення і продовження термінів експлуатації ставків і водосховищ Дніпровського каскаду.

Предметом опису при моделюванні є чаші, гідрографічні мережі і водозбори водосховищ каскаду. Особливий інтерес представляє опис та моделювання ерозійно-акумулятивних процесів на водозборах і механізмів замулення водосховищ.

Для аналізу та оцінки стану водосховищ і їх басейнів до накопиченої багаторічної інформації повинні додаватися оновлені дані польових досліджень і зібраного фактичного матеріалу для розрахунку об'єму надходження наносів в чаші штучних водойм водосховищ Дніпровського каскаду. Це дозволить здійснити

просторове моделювання їх замулення, визначити ключові і інтегральні характеристики екологічного стану, запропонувати систему заходів щодо зниження інтенсивності цього процесу.

Замулення водосховища обумовлено осадженням в ньому, що надходять з річок і струмків, а також твердих субстанцій, що потрапляють у водойму при розмиванні берегів і вітрового перенесення пилу з суші. Відкладення, що утворилися в чаші водосховища, утворюють тіло замулення. Основним фактором замулення є стік наносів. В разі обвалення високих з легко розмивними породами (лісів) берегів, замулення водосховища може бути значним. Еоловий фактор має особливе значення для районів з пиловими бурями.

Перенесення і осадження наносів у водосховищах залежить від характеру рози вітрів, течії та їх інтенсивності, турбулентності водних мас [4,5].

1.2 Характеристика ГІС-технологій для задач опису гідрологічних процесів у водоймах

На початку масового впровадження ГІС-технологій найбільшого поширення набули пакети ArcView і Arc/Info, засновані на використанні растрових даних і растрової алгебри.

ГІС-технології використовуються для об'єднання в банк просторових даних при розробці цифрових моделей рельєфу (ЦМР), опису гідрографічної мережі, розробці моделей стоку, аналізу стану схилів та інших просторових процесів, пов'язаних з аналізом водойм, підземних вод, оцінкою водних ресурсів [7]. Сформувався (з часом) перелік типових для ГІС-технологій завдань (Gurnell, Montgomery, 1998): формалізація первинної інформації, обробка даних ДЗЗ, накопичення даних мережевих спостережень, підготовка цифрових карт, мережевих вимірювань полів опадів, морфологічних характеристик водойм, цифрових карт ландшафтної структури і землекористування (Land Cover/Land Use Maps) та ін. [8]. Великий блок завдань включає побудову ЦМР і розрахунок по ній полів ухилів, експозицій, побудови рельєфу, припливу сонячної радіації. Ще один блок технологій

включає визначення по ЦМР водозбірних поділу, напрямків стоку, акумуляції стоку і дренажу порядку водотоків за схемою Стралера та іншим методам.

ГІС-технології забезпечують широкі можливості тривимірної візуалізації результатів моделювання, які використовуються при виконанні просторових розрахунків різного призначення, в тому числі стану ШВ. Для завдань управління водними ресурсами створено корпоративні ГІС. Програмним продуктом широкого використання даного типу є модель SWAT (Soil and Water Assessment Tool), яка має ГІС-інтерфейси, реалізовані в програмних продуктах ArcGis (ArcSWAT) і відкритої ГІС Qgis (QSWAT).

Технологія застосування ГІС ґрунтується на комбінованому використанні можливостей стандартних ГІС-пакетів, наприклад пакети для моделі формування стоку і прогнозу якості води SWAT та для гідравлічної моделі HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System), включеної в ГІС за допомогою програми HEC-GeoRAS.

Перераховані програмні продукти в даний час є найбільш поширеними інструментами для прогнозування якості води та моделювання затоплення територій відповідно. Блоки введення і виведення для більшості розрахункових програм стандартизовані і реалізовані у вигляді пре- і постпроцесорів.

У комерційних ГІС, орієнтованих на масового споживача, зазвичай реалізовані часто використовувані гідрологічні інструменти, такі як розрахунок похідних по ЦМР, виділення річкової мережі і водозборів. Найбільш потужним аналітичним апаратом в області гідрологічних додатків мають такі пакети, як ГІС GRASS, ГІС SAGA, ГІС Whitebox GAT (Джон Ліндсем). У відкритих ГІС реалізовані елементи «монопрограмного підходу» до гідрологічного моделювання, при якому інструменти моделювання процесів навколишнього середовища вбудовуються безпосередньо всередину ГІС.

Першою розподіленою гідрологічною моделлю була підготовка вихідних даних реалізована в пакеті ArcView 3.2a в складі інформаційного-моделюючого комплексу (ІМК) ECOMAG.

ГІС-технології також стали застосовуватися для підготовки даних в гідрологічних моделях з зосередженими параметрами, які використовуються в

системах оперативного прогнозу повеней, розроблених Гідрометцентром. Актуальним є створення інформаційно-аналітичних систем, що включають в себе інформацію про водні об'єкти, в тому числі штучні водні об'єкти типу ШВ. Цифрове картографічне моделювання для розрахунку морфометричних показників річок включає виявлення зв'язків характеристик стоку; вибір річки-аналога, виявлення і оцінку прогнозу гідрологічних процесів [9-10].

У роботі (Калінін, Пьянков, 2010) наведено огляд гідрологічних ГІС різного призначення і територіального охоплення. Серед гідрологічних ГІС інформаційно-довідкового характеру, можна виділити ГІС «Річкові басейни Європейській частині Росії», розроблену у вигляді картографічного веб-сервісу. Розроблено технології моделювання водо-, тепло-, енергообміну від яких залежить процес формування стоку (Антохіна, 2012). Відомі наукові групи в сфері математичного моделювання стоку Л.С. Кучмент, А.Н. Гельфана, Д.А. Буракова, Ю.Б. Виноградова, Б.І. Гарцман, Е.М. Гусєва, С.А. Кондратьєва, Ю.Г. Мотовилова. Ними створені математичні моделі річкового стоку різної складності - від найпростіших до складних. Складні розрахунки не завжди влаштовують споживача, оскільки вимагають великого обсягу вихідної інформації. Тому при побудові моделі необхідно дотримуватися балансу між детальністю опису процесів формування стоку і можливістю забезпечити реальну інформаційну наповненість моделі (Антохіна, 2012).

Гідрологічні моделі поділяються на дві групи: моделі руху водних мас в річкових руслах та моделі формування стоку на водозборі. Складні гідродинамічні моделі засновані на рівняннях Сен-Венана. З спрощених методів найбільш відомі метод Калініна-Мілюкова, інтеграл Дюамеля та ін. В даний час відомий ряд програмних комплексів на основі гідродинамічних моделей. Клас моделей, призначених для моделювання процесів формування стоку в басейнах річок, містить групу математичних моделей, що відображають реальні процеси, які утворюють стік на водозборі. Це моделі чотирьох типів: «чорний ящик», концептуальні моделі стоку з зосередженими параметрами, моделі з розподіленими параметрами та динаміко-стохастичні моделі.

Моделі типу «чорного ящика», побудовані на підставі даних на вході і виході. Ці моделі можуть використовуватися для короткострокових прогнозів стоку при

нестачі інформації про характеристики водозбору. Необхідність інтеграції таких моделей з ГІС-технологіями відсутня.

Концептуальні моделі стоку засновані на емпіричних співвідношеннях і апріорних залежностях. Вони застосовуються при неповноті даних про формування стоку на водозборі і дефіциті вихідної інформації (Антохіна, 2012). З концептуальних моделей широкого поширення набула модель HBV. Вона використовується в 95 країнах світу. Для цих моделей також немає необхідності використання ГІС-технологій.

Фізико-математичні моделі з розподіленими параметрами засновані на математичному моделюванні процесів формування стоку на основі апріорної інформації. Параметри фізико-математичних моделей, як правило, мають фізичний зміст (Гельфана, 2007; Антохіна, 2012). Фізично обґрунтована розподілена модель формування стоку «Гидрограф» розроблена науковою групою під керівництвом Ю.Б. Виноградова (Виноградов, Виноградова, 2008; Vinogradov et al., 2011). Її відрізняє схематизація водозбору.

(див. наприклад Wigmosta et al., 1994; Beven & Freer, 2001; Klok et al., 2002; Motoya et al., 2002; Kunstmann & Stadler, 2005; Lehning et al., 2006; Zhao et al., 2009).

Динаміко-стохастичні моделі формування стоку (четвертий тип) засновані на моделюванні гідрологічних процесів і застосуванні сучасних стохастичних метеомоделей, що впливають на водозбір. Вони використовуються для вирішення різних діагностичних і прогностичних завдань (Гельфана, 2007). Моделі останніх двох груп тісно інтегровані з ГІС-технологіями. Це дає можливість обробляти великі масиви різномірної просторової інформації. На основі інтеграції розподілених моделей формування стоку ГІС-технологій розроблені інтегровані інформаційно-моделюючі системи (ІМС). Вони включають в себе бази даних і системи управління ними, ГІС-технології для попередньої підготовки, обробки, виведення і візуалізації даних. ІМС – це закінчена технологія для аналізу геосистем (Антохіна, 2012). Так само як комплекс ECOMAG (ECO logical Model for Applied Geophysics) (Motovilov et al., 1999). Це розподілена модель гідрологічного циклу і формування стоку для великих водозборів. Просторова схематизація річкового басейну виконується на основі електронних карт (ГІС-пакет ArcView 3.2a)

До складу програмного комплексу входить: математична модель на основі звичайних диференціальних рівнянь, спеціалізована ГІС, бази даних, і керуюча оболонка [8,10].

Засобами ГІС-технологій проводиться інтеграція даних, їх приведення до єдиного формату, системи координат і просторовому вирішенню, цифрового аналізу рельєфу (схематизація мережі водотоків і території водозбору (Clark, 1998; Gurnell & Montgomery, 1998).

Розроблена відкрита модель даних, гідрологічна інформаційна система CUASHI HIS та стандартизована структура реляційної бази даних для зберігання і опису точкових спостережень.

Для інтеграції програмних продуктів, що забезпечують різні функції створений проект Harmon IT. Цей проект включає розробку глобального стандарту інтеграції моделей – відкритого інтерфейсу OpenMI (<http://www.openmi.org/>), який підтримує обмін даними між різними моделями, а також динамічний обмін даних в інтегрованих моделюючих системах (Бугаєць, 2014 року).

Технологія підготовки і випуску прогнозів заснована на басейновому принципі і повністю автоматизована. Система включає глобальну модель прогнозу погоди ECMWF, регіональні моделі прогнозу погоди, моделі стоку LISFLOOD, а також модель затоплення території. Для використання цих моделей необхідно мати дані про рельєф, характеристики підстильної поверхні. На виході система EFAS надає користувачам, поряд з іншою інформацією, ансамблеві прогнози стоку, необхідні для розрахунку характеристик ШВ.

Параметри гідрологічної моделі розподілені за основними елементами регулярної сітки ситеми ALADIN і ECMWF. Площа осередків розрахунку становить 1 км². Для кожного осередку виконується розрахунок динаміки снігового покриву, процесів переміщення ґрунтової вологи і трансформації стоку (Гельфан, 2007; Семенова, 2008).

Більшість параметрів моделей стоку відображають властивості рельєфу і ґрунтово-рослинного покриву в межах басейну (Гельфана, 2007; Виноградов, Виноградова, 2008; Семенова, 2008). Класифіковано п'ять груп параметрів: ґрунтово-рослинний покриву; кліматичні; параметри поверхні схилу, ґрунту; елементи стоку.

Для розрахунку параметрів здійснюють розбиття території на ділянки, близькі за характером процесу формування стоку. Це завдання вирішується на основі ГІС-технологій, даних ДЗЗ, ґрунтових і ландшафтних карт. ЦМР і характеристики ґрунтово-рослинного покриву є елементом інформаційної основи всіх гідрологічних моделей (Яковченко 2007). Така характеристика, як дозвіл ЦМР, визначається площею водозбору і ступенем детальної інформації. Зокрема, модель ЕСОМАГ використовує ЦМР GLOBE (розмір комірки 1 км, ґрунтова карта і карта ландшафтів масштабу 1:2500000 (Антохіна, 2012). З'явилися глобальні ЦМР з кроком сітки від 30 до 250 м (SRTM, GMTED2010, ASTER GDEM), а також карти з детальністю 300-500 м, (GLOBCOVER), (Arino et al., 2008), MODIS Land Cover Types (Friedl et al., 2010).

Метод схематизації водозбору залежить від способу опису стоку. Як правило, в розподілених моделях стік води описується за допомогою рівняння кінематичної хвилі (передбачається тонкий однорідний шар). При цьому для опису структури поверхні використовують набір кінцевих елементів. Водозбір розбивається на схили для схематизації стікання води до розрахункових ділянок. Моделі стоку розраховуються засобами ГІС-технологій. Для цього використовується ЦМР. Виділення водозборів різних порядків забезпечується відповідними ГІС-пакетами.

У процесі попередньої обробки ЦМР і розрахунку напрямків стоку можуть бути використані різні методи розрахунку. У моделі «Гідрограф», (Виноградов, Виноградова, 2008; Семенова, 2008) для схематизації водозбору є набір репрезентативних точок (РТ), що характеризує водороздільний контур. При цьому вони впорядковані у вигляді гексагональної сітки. Число точок залежить від міри подробности опису басейну. Модель «Гідрограф» дозволяє задавати ступінь подробности, яка визначається характером розв'язуваної задачі [8].

Стандартний підхід до опису гідрологічних моделей реалізований в моделі ЕСОМАГ (Антохіна, 2012). Її програмний комплекс містить вбудовані бази даних «Ґрунт», «Землекористування» і «Басейн», які містять інформацію про об'єкти, типи ґрунтів.

Інформація про типи ґрунтів і ландшафтів з необхідними даними з баз даних «Ґрунт» і «Землекористування» зчитуються в програмному комплексі ArcView. Ця

інформація використовується для опису процесів в елементарних водозборах. У моделі «Гідрограф» (Виноградов, Виноградова, 2008) застосовується структуризація стокооднородних ділянок, визначених системою точок в межах вододільного контуру басейну.

Області, однорідні за типом стоків, мають комплекси, які формують стік (СФК). Таким чином, вся водозбірна площа може бути представлена одним або декількома СФК. Розміри і детальність виділених СФК визначаються, в основному, розміром басейну, характеристиками ландшафтів і масштабом карт, які використовуються (Семенова, 2008). Для територій з плоским рельєфом, характерним для каскаду ШВ Дніпра, окремою проблемою є адекватна схематизація території басейну з метою визначення меж водозборів за ЦМР. Це завдання також вирішується засобами ГІС-технологій.

Таким чином, розвиток інформаційного забезпечення є одним з найважливіших напрямків вдосконалення сучасних ГІС-технологій. Вимоги до інформаційного забезпечення сформульовані Семеновим А.Г. (2016). У загальному вигляді інформаційне забезпечення повинно відповідати наступним вимогам (Семенова, 2016): модель використовує доступну (стандартну) метеоінформацію; параметри моделі повинні мати можливість прямого виміру. Більшість параметрів відображають гідрологічно значимі властивості рельєфу і ґрунтового-рослинного покриву. Вони постійні для однорідних ділянок за умов формування стоку і змінюються в залежності від фізико-географічних умов. Частина завдань в сучасних ГІС пов'язана з вибором алгоритму визначення напрямку стоку. Для цього часто розглядається поверхня, складена з горизонтальних осередків певної висоти. Вода «впливає» з комірки з більшою висотою в клітинку з меншою висотою. Найбільшого поширення набув алгоритм визначення напрямку стоку Deterministic Eight-Neighbor (D8), який характеризується простотою реалізації. На достовірність водозбірного поділу впливає вибір розміру осередку ЦМР і порогового значення водозбірної площі (K_r) при визначенні водотоків. У роботі (Gyasi-Agyei et al., 1995) запропонована формула для оцінки мінімального розміру комірки растра.

Таким чином, ГІС-технології є одним з основних засобів отримання якісних вихідних даних при визначенні параметрів стоку в умовах рідкісної мережі

спостережень і різноманітних властивостей підстильної поверхні території водозбору.

1.3 Особливості інформаційного аналізу замулення водосховищ Дніпровського каскаду

Оскільки традиційні методи розрахунку замулення ШВ засновані на параметрах річкового стоку, каламутності, наносах, то існує проблема інформаційного забезпечення цих розрахунків і відповідного аналізу. Проблема полягає в тому, що екологічний моніторинг не забезпечений в потрібній мірі надійними вихідними даними через недостатню вивченість цих характеристик водозборів. Тому інформаційний підхід до вивчення замулення водосховищ є, очевидно, актуальним. Інформаційне моделювання необхідно для вивчення особливостей процесу замулення штучних водойм, розрахунку термінів їх експлуатації і деградації. При цьому виникає ряд спеціальних завдань, кожне з яких вимагає свого інформаційного забезпечення, розробки спеціальних моделей і методів аналізу.

Основою можуть слугувати нові сучасні системи віддаленого моніторингу, такі як космічні системи дистанційного зондування Землі, з одного боку, і спеціалізовані системи аналізу великомасштабних процесів на планеті, такі як геоінформаційні системи [9]. Таким чином, мова йде про створення спеціалізованих баз даних і баз знань, а також – про залучення сучасних потужних обчислювальних технологій для інформаційно-методичного забезпечення екологічного моніторингу ШВ і процесів їх замулення.

Основою ж повинні слугувати спеціалізовані моделі і алгоритми, які враховують особливості досліджуваних ШВ Дніпровського каскаду. Нижче представлена інформація про загальні характеристики Дніпровського каскаду ШВ [12]. Сумарна площа каскаду ШВ Дніпра становить 699 км², об'єм (згідно даних таблиці 3.1) 43,81 км³. Середнє значення відносного об'єму V_m (до площі дзеркала) становить величину $43,81/6991 \text{ км}^2/\text{км}^2 = 0,00627 \text{ км}^2/\text{км}^2$, (6,27 м). Для формування необхідної інформаційної бази слід класифікувати, залучаючи необхідну інформацію

з найрізноманітніших джерел, типову для каскаду Дніпровських водосховищ, таку як морфологічні особливості, умови експлуатації та проектне призначення, фактичний матеріал про їх замулення, оцінити потужність і особливості джерел виникнення в них донних відкладень.

На основі цих даних необхідно визначити середню багаторічну інтенсивність замулення ШВ каскаду Дніпровських водосховищ, врахувати особливості ерозійних процесів на їх водозборах в залежності від ландшафтних, ґрунтових, агрокліматичних, геоморфологічних та інших умов.

Це дозволить розрахувати замулення водосховищ, використовуючи формули схилового змиву. Необхідною складовою інформаційної бази є дані, отримані на основі фактичних польових вимірювань глибин водойм. Аналіз повторного відкладення ерозійного матеріалу в процесі транспорту в верхніх ділянках гідрографічної мережі необхідний для уточнення моделей перенесення матеріалу на основі використання коефіцієнтів доставки наносів.

Алгоритм моделювання процесу замулення штучних водойм синтезується з використанням ГІС-технології, накопиченого статистичного матеріалу, власних польових досліджень, а також даних космічного моніторингу на основі технологій ДЗЗ. Результати моделювання необхідні для розробки системи заходів щодо зниження інтенсивності замулення і продовження термінів експлуатації ставків і водосховищ Дніпровського каскаду.

Предметом опису при моделюванні є чаші, гідрографічні мережі і водозбори водосховищ каскаду. Особливий інтерес представляє опис та моделювання ерозійно-аккумулятивних процесів на водозборах і механізмів замулення водосховищ.

Для розробки методологічної основи можуть бути використані різні концепції. Феноменологічний аналіз вказує на використання басейнової концепції. Підставою такого висновку слугують дослідження, що базуються на розробках провідних вітчизняних наукових шкіл та їх представників в області гідрології, лімнології, ерозієзнавства, флювіальної геоморфології, інженерної гідрології. В якості системи параметричної ідентифікації інформаційної моделі будуть використані ключові параметри: характеристики суспензій, яка носить, каламутність води, об'єми надходжень субстанцій від різних джерел, їх екологічні

характеристики, динамічні показники накопичення опадів, параметри просторового розподілу, показники припливу наносів через греблю, сезонна динаміка надходжень та інші спеціальні показники екологічного стану водойми, включаючи донні відкладення, і його басейну, близькість до території водозбору промислових підприємств, рельєф території, агрокліматичні характеристики, розташування на території баз відпочинку і санаторіїв, показники ГДК шкідливих речовин у воді, наявність рослинності, боліт, характер берегової лінії, епідеміологічні показники.

Структурна побудова моделі визначається її основними модулями: бази даних різних наборів числових характеристик екологічного стану різних депозитаріїв, бази знань, що містять необхідний комплекс розрахункових методик, оперативні бази даних, що містять поточні характеристики, отримані за допомогою космічного моніторингу і польових оперативних вимірювань, алгоритми різних екологічних оцінок за компонентами забруднюючих речовин і їх зональному розподілу, блок інтегральних (локальних, регіональних і глобальних) оцінок екологічного стану, масиви статистичної інформації відповідно до державної системи моніторингу екологічного стану ШВ, блок прогнозу процесу замулення.

При розробці інформаційної моделі задіяні ресурси геоінформаційних систем. Єдиний інформаційний потік містить інформаційні фрагменти у формі різних наборів вихідних даних, критеріїв інформативності вихідних даних, що показують в якому ступені та чи інша інформація може бути використана для виконання певного виду робіт; керуючі модулі, які визначають порядок, обсяг і інтенсивність обробки вихідних даних, види продукції – похідна інформація (результати аналізу і розрахунків), коефіцієнти переваг (вагові коефіцієнти) в показнику інтегральної якості.

Для аналізу і оцінки стану водосховищ та їх басейнів до накопиченої багаторічної інформації повинні додаватися оновлені дані польових досліджень і зібраного фактичного матеріалу для розрахунку об'ємів надходження наносів в чаші штучних водойм водосховищ Дніпровського каскаду, морфологічні характеристики розраховані із залученням оперативної інформації ДЗЗ. Це дозволить здійснити просторове моделювання їх замулення, визначити ключові та інтегральні

характеристики екологічного стану, запропонувати систему заходів щодо зниження інтенсивності цього процесу.

Для побудови інформаційної моделі щодо забезпечення аналізу процесів замулення необхідно побудувати математичні моделі, розробити алгоритми і дослідити ряд проблемних питань, кожне із яких дозволять сформувати відповідний модуль інформаційної системи. До числа таких завдань відносяться: моделювання замулення ШВ, яке включає в себе встановлення кореляційних залежностей інтенсивності замулення від глибини акваторії ШВ, моделювання замулення ШВ за різні періоди часу, моделювання замулення штучних водойм із застосуванням ГІС-технологій і даних ДЗЗ. Оцінка впливу на стан штучних водойм антропогенних чинників, характерних для території басейну ШВ.

Таким чином, для вирішення завдань, пов'язаних з розробкою і застосуванням методик розрахунку замулення ставків і водосховищ, необхідна систематизація різноманітних відомостей про стан водоймищ, їх басейнів і прилеглих територій. Для цього необхідно використовувати функціонально-генетичну класифікацію водосховищ Дніпровського каскаду.

Загальну структурну схему інформаційної експериментально-аналітичної технології, що відповідає темі дослідження, представлено на рисунку 1.4.1.

Згідно цієї схеми процеси замулення ШВ залежать від зовнішніх впливів. Схемою передбачена процедура розрахунку оцінки замулення ШВ-аналогів на підставі інформації про замулення ШВ-прототипу.

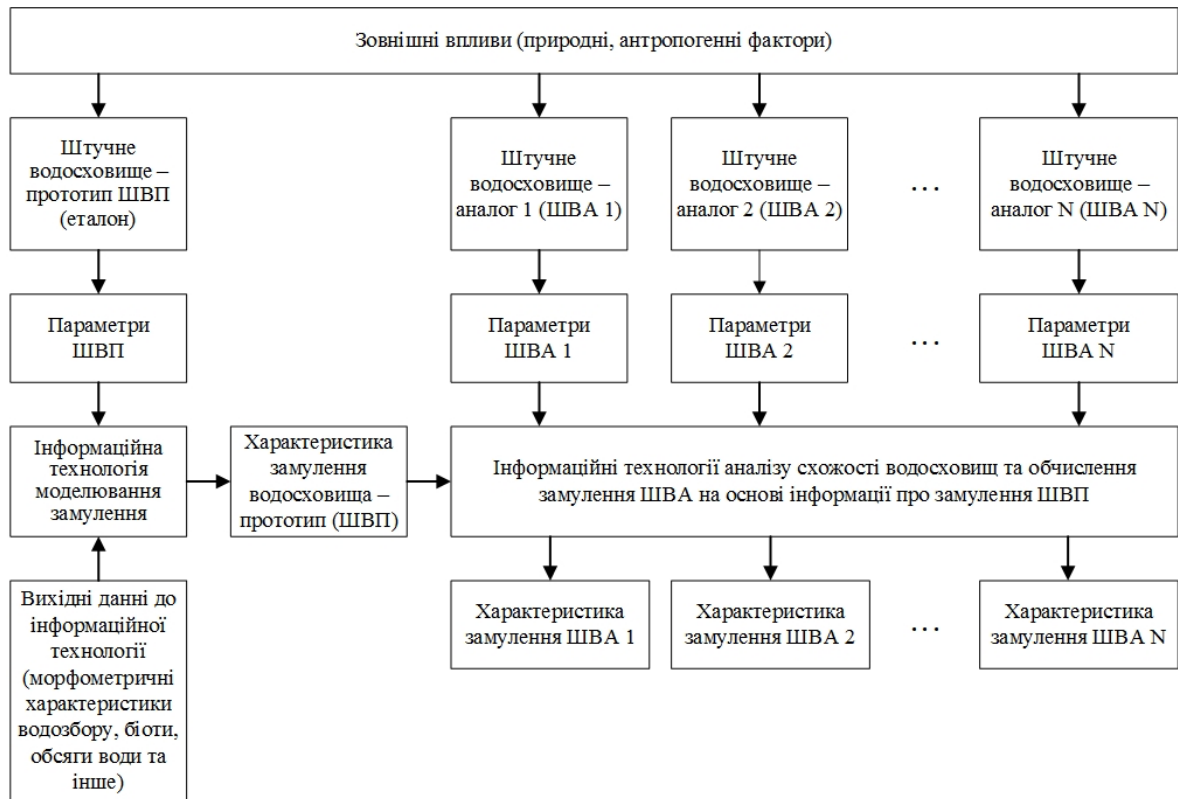


Рисунок 1.3.1. Існуюча структурна схема інформаційної технології оцінки замулення водосховищ

З усіх морфометричних характеристик штучних водойм (довжина, середня і найбільша ширина, нерівномірна структура берегової лінії, ухил ложа і т.д.) найголовнішими, які необхідні для розрахунку об'ємів їх замулення, є об'єм, площа дзеркала води і глибина.

Для репрезентативності порівняння площі різних ставків і водосховищ, її величину зазвичай наводять при позначці нормального підпірного рівня (НПР). За величиною площі дзеркала води ставки і водосховища поділяють на 4 типи: малі (площею до 2 га), середні (площею від 2 до 10 га), великі (площею від 10 до 50 га) і дуже великі (площею понад 50 га) [12-13]. Водосховища Придніпровського каскаду відносяться до четвертого типу.

1.4 Обґрунтування і постановка завдань дослідження

Метод порівняльного аналізу є універсальним загальнонауковим методом дослідження. Він є орієнтиром, що дає загальний напрямок дослідження і регулює взаємодію всіх методів. Він використовується, зокрема, як базовий при статистичному, соціологічному і факторному аналізі, при класифікації, оцінюванні, прогнозуванні процесів і явищ.

В ході аналізу кожен з порівнюваних об'єктів логічно роздвоюється: в ньому виявляється, з одного боку, те, що є спільним з іншими об'єктами, а з іншого - те, що відрізняє його від інших об'єктів. Оптимальний вибір об'єкта передбачає кількісну оцінку його якості, на основі обраних критеріїв. Іншими термінами, які використовуються для критеріїв, є локальні критерії, показники якості, цільові функції, чинники і т.п. Завдання оцінки якості відноситься до багатокритеріального завдання оптимізації. Відомо безліч підходів для вирішення таких завдань [12-18]:

- застосування теорії корисності для багатокритеріального вибору альтернатив з дискретної множини в умовах ризику і невизначеності;
- зведення багатокритеріальної задачі до задачі скалярної оптимізації за допомогою деякого згортання векторного критерію;
- розробка людино-машинних процедур розв'язання багатокритеріальних задач оптимізації в інтерактивному режимі;
- інші.

Можна виділити наступні основні проблеми, що виникають при оцінці об'єктів за багатьма критеріями:

- суперечливість критеріїв: поліпшення за одним критерієм зазвичай призводить до погіршення по якимось іншим критеріям;
- неможливість аналітичного (у вигляді формул) відображення зв'язків між оцінками за різними критеріями;
- оцінки за різними критеріями мають різний вигляд: числові, змістовні ("відмінно", "добре", "так-ні" і т.д.), бальні, у вигляді ранжування і т.д. У загальному випадку під нечисловими даними розуміють елементи різних просторів;

- числові оцінки відрізняються по розмірності, за спрямованістю (мінімум або максимум критерію), за діапазоном значень;
- відмінність критеріїв за важливістю.

Метод фізико-географічної подібності розкритий в роботах Кучмент Л.С. і Гельфана А.Н., Виноградова Ю.Б., Виноградової Т.А., Гусєва О.М., Насонової О.Н. Ідея методу заснована на пошуку «найближчого сусіда» за критерієм географічної близькості. Критерієм близькості слугує параметр евклідова відстані між невивченим водозбором і водозбором мішенню. Цей підхід близький до методу аналогії, в якому критеріями слугують спеціально обрані безрозмірні характеристики водосховищ.

Для кожного об'єкта розраховується деяка узагальнена оцінка, в якій враховуються оцінки за всіма критеріями. Для приведення оцінок за різними критеріями до єдиної форми і отримання узагальненої оцінки об'єкта використовуються наступні основні методи [19]:

Перехід від оцінок різного виду до експертних оцінок. Для числових оцінок зазвичай виконується перехід до оцінок, які мають значення від 0 до 1 і спрямовані на максимум. Зазвичай максимальній оцінці по критерію відповідає значення 1.

Для словесних оцінок виконується перехід до числової форми, зазвичай в діапазоні (0-1). Числова оцінка виставляється людиною (експертом), виходячи з його суб'єктивних суджень. Результатом порівняння об'єктів повинна бути деяка упорядкована їх послідовність, яка розташовує об'єкти в порядку їх переваги. За принципом приведення оцінок об'єктів до єдиної оцінки можна виділити наступні класи методів:

Методи на основі вибору головного критерію. Тобто обирається один основний (головний) критерій, а на інші критерії, як правило, накладаються обмеження. До цього ж класу слід віднести методи, звані "методами на основі лексикографічного впорядкування критеріїв". У цих методах об'єкти спочатку впорядковуються по одному (головному) критерію; якщо за даним критерієм виявляється кілька еквівалентних об'єктів, то використовується наступний за важливістю критерій, і т.д. Методи цього класу досить прості. Однак вони невикористовуються для задач, в яких потрібно враховувати кілька критеріїв, близьких за важливістю.

Методи на основі компенсації критеріїв. Принцип роботи цих методів полягає в тому, що від експерта потрібно вказати, яка величина виграшу за одним критерієм компенсує певний (заданий) програш за іншим критерієм. Однак вказівка таких величин компенсації вкрай складно для людини. Тому такі методи не знайшли широкого застосування [20].

Методи на основі обчислення узагальнених оцінок (узагальненого критерію). Принцип роботи цих методів полягає в обчисленні узагальненої оцінки для кожного з об'єктів на основі їх оцінок за окремими критеріями [21]. Перевага таких методів – невеликий обсяг інформації, необхідної від експерта. Ці методи знайшли широке застосування і реалізовані в багатьох програмних продуктах. У той же час вони мають ряд суттєвих недоліків:

- методи цього класу не дозволяють в достатній мірі врахувати суб'єктивні судження експерта про перевагу об'єктів друг над другим, про бажаність (або небажаність) значень критеріїв і т.д.;

- застосування цих методів важке при використанні критеріїв з нечисловими оцінками (словесні оцінки, оцінки "так-ні", оцінки у вигляді ранжування об'єктів і т.д.).

Методи на основі попарного порівняння об'єктів. При використанні таких методів для кожної пари об'єктів визначається оцінка переваги одного об'єкта над іншим; ця оцінка може безпосередньо позначатись людиною або обчислюватися на основі оцінок за окремими критеріями. Такі методи мають наступні переваги:

- можливість повного обліку суджень експерта про об'єкти;
- можливість використання оцінок будь-яких видів: числових,
- змістовних, "так-ні" і т.д.

Основний недолік методів цього класу - необхідність великої кількості парних порівнянь, тобто великий обсяг роботи для людини (експерта).

Великого поширення набули методи подібності та методи аналогії. Метод подібності має досить сувору математичну формалізацію. Його застосування для слабо формалізованих завдань є важким. Аналіз показує, що для оперативної оцінки замулення доцільно використовувати метод аналогій. Наприклад, такий підхід використовується для розрахунків гідрологічних характеристики водотоків на основі

інформації про річках-аналогах. Характеристики досліджуваних водотоків оцінюються з використанням даних, які визначаються як середнє арифметичне значення характеристик річок-аналогів, що мають найбільш тривалі ряди спостережень. Однорідність параметрів розподілу встановлюється з використанням статистичних критеріїв однорідності. Загальні умови щодо вибору аналогів включають:

- оцінку просторової структури штучного водосховища, що відбиває характер просторової пов'язаності даної гідрологічної характеристики, включаючи оцінку просторової кореляційної функції з урахуванням її фізичної і статистичної однорідності;

- однотипність стоку і досліджуваної водойми;

- географічну близькість розташування водозборів;

- однорідність умов формування стоку, схожість кліматичних умов, однотипність ґрунтів (грунтів) і гідрологічних умов, близьку ступінь озерності, залісеності, заболоченості і розораності водозборів;

- середні висоти водозборів не повинні істотно відрізнятися, для гірських і напівгорних районів, слід враховувати експозицію схилів і гіпсометр;

- відсутність чинників, які істотно спотворюють природний річковий стік (регулювання річкового стоку, скиди води, вилучення стоку на зрошення і інші потреби).

В ситуації, що склалася, стала очевидною необхідність зміни реалізованої водогосподарської політики, розробки і застосування нових комплексних методів управління, що виключають нанесення шкоди не тільки галузям з суперечливими вимогами до водних ресурсів, а й природним системам. Це вимагає розробки та використання методів аналізу процесів пересування води, речовин, що потрапляють у воду, процесів замулення в їх взаємозв'язку. Такий аналіз неможливий без системного дослідження всього різноманіття фізико-хімічних, біологічних та антропоморфних факторів, що впливають на замулення Дніпра і його водосховищ. Такий системний аналіз неможливий без розробки інформаційного забезпечення екологічного моніторингу Дніпра і його водойм. Традиційна технологія аналізу цих матеріалів веде до значних витрат сил, часу, випадання частини інформації з

наукового обігу, а також може викликати помилки, що знижують цінність остаточних висновків.

Оптимізувати процес аналізу можуть інформаційні технології.

Загальні підходи для розробки сучасних інформаційних технологій наведені в фундаментальних теоретичних і прикладних роботах в галузі кібернетики (Н. Вінер, І. Бріллюен), загальної теорії систем (АА Богданов, Л. Берталанфі, Н.Д. Месарович, Д.С. контори), системно-інформаційного підходу до управління (А.Д. Урсул, А.І. Берг, Б.Н. Петров, Ю.М. Горський, К.К. Колін та ін.).

Особливу роль при зборі, зберіганні та аналізі просторової інформації відіграють геоінформаційні системи та ГІС-технології, що дозволяють значно підвищити якість проведених досліджень.

Таким чином, актуальною є розробка інформаційної моделі процесів осадоутворення і замулення великого штучного степового водосховища, типового для басейну р. Дніпро. Інформаційна база має складну ієрархічну структуру. Необхідно виділити топологічну і семантичну структури інформації.

Топологічна структура визначається архітектурою системи збору, обробки, накопичення і зберігання екологічної інформації за станом штучних водойм на річках. Семантична структура характеризується процесом прийняття управлінських рішень, неможливих без відповідного інформаційного забезпечення.

Формалізація завдань моніторингу істотно залежить від засобів спостереження і методів обробки первинної інформації до стану узагальнюючих висновків. З огляду на швидкі зміни в технологіях отримання первинної інформації про стан ШВ, методах обробки інформації, розвитку комп'ютерної техніки і програмного забезпечення актуальність завдання екологічного моніторингу не знижується [24].

Таким чином, необхідність створення на основі сучасних інформаційних засобів і технологій інформаційних моделей, реалізованих у формі оцінок замулення штучних водойм на річках, їх змістовного наповнення та науково-аргументованих рекомендацій на базі нових методологічних та інструментальних засобів уявлення, аналізу і синтезу інформаційн визначає актуальність теми дисертаційного дослідження.

Висновки до першого розділу

Можна відзначити, що актуальність інформаційного моніторингу екологічного стану ШВ, розробки інформаційної моделі процесів їх замулення визначається комплексом локальних, регіональних і глобальних чинників, до числа яких відносяться:

- зростання дефіциту прісної води поряд зі збільшенням обсягів водокористування,
- збільшення об'єму водостоків, які несуть частки гумоса та інших видів твердих утворень в річки і водоймища в зв'язку зі скороченням площ лісових масивів,
- збільшення частки орних земель та інших сільгоспугідь, що змінюють руслові структури,
- зростання об'єму поливного землеробства,
- збільшення мертвого об'єму ставків і водосховищ,
- зростання вартості прісної води,
- підвищення інтенсивності замулення штучних водосховищ та, зокрема, водосховищ дніпровського каскаду,
- необхідність збору та аналізу інформації для оперативної оцінки темпів замулення штучних водосховищ як елемента екологічного моніторингу експлуатованих штучних водосховищ. В результаті оперативного отримання та аналізу інформації про поточний стан ШВ і їх перспективи розвитку як основних компонент водних ресурсів України.

На основі викладеного, постановка задачі оцінки і прогнозу об'єму замулення великих рівнинних водосховищ включає наступні положення.

Необхідно розробити концепцію оцінки об'єму замулення, що дозволяє оперативно виконувати розрахунки об'єму наносів на заданому інтервалі часу на базі інформації про процеси замулення водосховища-прототипу. В основі концепції представлений підхід, заснований на критеріальному порівнянні основних властивостей досліджуваного водосховища-аналога з властивостями вивченого водосховища-прототипу.

Базою для такого порівняння слугують інформаційна модель водосховища, яка включає в себе набір моделей процесів, які визначають динаміку замулення, а також набір критеріїв, які дозволяють судити про близькість властивостей порівнюваних штучних водосховищ. Звісно, необхідно виконати розрахунки об'єму і темпів замулення на основі декількох методик:

- класичної, заснованої на прямих розрахунках процесів надходження компонентів наносів в донні відкладення принесені водою з верхнього б'єфу, з атмосферного повітря, з території водозбору, а також результатів процесів евтрофікації;

- спеціальної методики, заснованої на об'ємно-геометричному розрахунку осадження включення осадо-утворюючих матеріалів з використанням експериментальної інформації про каламутність води і швидкість осадження опадів;

- прямих розрахунків об'єму замулу, заснованих на вимірі глибин водосховища через певний проміжок часу;

- розрахунків прогнозних значень об'єму замулу на основі регресійних моделей.

Порівняння результатів, отриманих на основі зазначених підходів до оцінки об'єму муло-утворення слугують основою верифікації результатів, отриманих в даній роботі.

РОЗДІЛ 2. ІНФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ ВОДОСХОВИЩА-ПРОТОТИПУ

2.1 Загальна характеристика інформаційної моделі

Районування території штучного водосховища станом водного середовища і намулу в аспекті процесів муло-утворювання здійснюється з використанням зонального підходу на основі комплексної оцінки факторів замулення на базі диференціації джерел, які продукують речовин, що випадають в мул і виділення з них найбільш значущих. Інтегрована інформація містить відомості про ступінь забруднення вод, що потрапляють в ШВ, а також про питомі маси і об'єму зважених матеріалів.

Таке структурування інформації про екологічний стан території, пов'язаної функціонально з водосховищем і безпосередньо самого водосховища є основою для розробки баз даних входять в інформаційну модель, вибору їх структури, ключів, типу СУБД і т.д.

Штучне водосховище, як об'єкт інформаційного моделювання, дослідження, моніторингу та управління характеризується обов'язковою умовою – всі вхідні змінні, або фактори, x_1, x_2, \dots, x_n є вимірюваними за заданим алгоритмом на заданому інтервалі часу [25-30]. При цьому ШВ розглядається як єдина система з набором певних якостей.

Введемо наступні позначення: фактори x_1, x_2, \dots, x_n – вимірювані вхідні змінні ШВ (незалежні змінні); перешкоди z_1, z_2, \dots, z_s – неконтрольовані, випадковим чином змінюються змінні об'єкта, недоступні для вимірювання; вони проявляються лише в тому, що змінюють вплив факторів на вихідні змінні; вихідні змінні y_1, y_2, \dots, y_t – контрольовані змінні, які визначаються факторами і пов'язані з метою моніторингу. Вони можуть виступати в якості параметрів оптимізації (показники екологічного стану ШВ). Якщо вдається обмежуватися одним параметром оптимізації, то вектор Y перетворюється в скаляр y . Тоді функція відгуку $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, зв'яже параметр оптимізації з факторами, які в загальному випадку можуть змінюватися. Фактори і вихідна змінна повинні мати області визначення, задані принциповими обмеженнями. Для вирішення завдання оптимізації необхідно отримати якісну, як правило,

статистичну інформацію про фактори і залежать від них вихідної змінної. На цій основі будується інформаційна або математична модель ШВ, як об'єкта моніторингу та управління екологічним станом. Багатоцільова задача екологічного моніторингу в даній роботі зводиться до задачі оцінки інтенсивності замулення.

Одним з модулів ІМ є модуль статистичного аналізу. Якщо простір з координатами x_1, x_2, \dots, x_n розглядати як факторний, то графічне зображення функції відгуку в факторному просторі характеризується поверхню відгуку. У стаціонарному стані, математичну модель представимо поліномом [31]:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n, \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n) \quad (2.1)$$

Після обробки експериментальних даних визначаються коефіцієнти регресії тобто оцінки теоретичних коефіцієнтів. Математична модель у формі рівняння регресії в загальному випадку буде мати вигляд:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_i b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_i b_{ii} x_i^2 + \dots \quad (2.2)$$

Поряд зі статистичними математичними моделями в інформаційну модель повинні бути включені моделі, що описують фізико-хімічні закономірності модельованих процесів. Ці моделі видаються системами алгебраїчних і різних диференціальних рівнянь. Чисельні значення коефіцієнтів моделі за даними статистичної інформації знаходяться на основі рішення задачі ідентифікації.

Визначимо основні терміни, які будуть використовуватися при розробці інформаційної моделі штучного водоймища, яке розглядається як система, що володіє деяким набором унікальних властивостей і характеристик.

При цьому будемо розуміти систему як сукупність пов'язаних елементів, об'єднаних в одне ціле для досягнення певної мети. Під поняттям «елемент» будемо розуміти мінімальний неподільний об'єкт. Властивості елемента – його властивості як цілого. Неподільність елемента при цьому є формальне поняття, але не його властивість. Властивості елемента будуть залежати від того, з чого складається елемент (вода, речовини, мікроорганізми, організми). При необхідності (в залежності від цілей) елементи можуть бути представлені розкладанням на складові або інтегровані в більші. Під метою розуміється сукупність результатів, які визначаються призначенням системи. Мета визначає умови об'єднання елементів в систему. В

даному дослідженні метою є фактори середовища і процеси муло-утворювання, які визначають вид, структуру і наповнення інформаційної моделі.

ШВ, як система, описується з використанням понять функцій і структур. Функція системи визначає правила отримання результатів, визначених цілю системи. При вирішенні різних завдань функції системи будемо описуватися з різним ступенем деталізації.

Під структурою системи будемо розуміти фіксовану сукупність елементів і зв'язків між ними. Елементами слугують моделі факторів і джерел, які визначають процеси муло-утворювання.

Найважливішим поняттям при аналізі властивостей і якостей інформаційної моделі ШВ є ефективність моделі як ступеня її відповідності адекватному опису процесів муло-утворювання в ШВ. Для формалізованої оцінки ефективності ШВ необхідно вибрати або сформулювати показник ефективності як міру зазначеного відповідності.

Показник ефективності може бути багатокomпонентним, тобто може містити кілька кількісних характеристик, що відносяться до різних властивостей водосховища і джерел муло-утворювання. Ступінь ефективності інформаційної моделі оцінюється значенням критерію ефективності, який має кількісний характер, узагальнює всі її властивості в одній оцінці – міру ефективності системи. Будемо використовувати два типи критеріїв – прямий і інверсний. Прямий, якщо при збільшенні ефективності значення критерію зростає (рівень аналогії), в іншому випадку - критерій інверсний (рівень невідповідності).

Для забезпечення адекватності ІМ на всіх етапах її розробки будемо забезпечувати збереження властивостей ізоморфізму, тобто взаємно-однозначної відповідності властивостей ШВ і відповідної інформаційної моделі. У разі, коли забезпечення ізоморфізму моделі і системи виявиться важко виконуваним або зайвим, будуть забезпечуватися умови гомоморфізму, тобто взаємно-однозначна відповідність замінюється вимогою тільки однозначного відповідності моделі об'єкту, при цьому зворотня відповідність об'єкта моделі – неоднозначна.

У даній роботі наведені визначення та формулювання припускають, що основним завданням є моделювання процесів замулення, а використання терміну «елемент» розвивається до визначення елементів зональної структури ШВ.

2.2 Алгоритм розробки інформаційної моделі

Бази знань і бази даних є структурною основою інформаційної моделі. База знань ІМ містить методики аналізу, спрямованого на опис процесу замулення, методики формування частних і комплексних показників забруднення, методики зонального аналізу території водозбору, класифікації територій водозбору за рівнями впливу на замулення ШВ, виділення територій для спостереження і контролю, довідники, необхідні для екологічного аналізу і ін.). База даних включає в себе моделі джерел інформації, а також необхідні посилання на відповідні СУБД [32]. З урахуванням викладеного, розробка інформаційної моделі здійснюється у відповідності з наступним алгоритмом (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Алгоритм розробки інформаційної моделі

Дія в відповідності з алгоритмом	Результат виконання
1 Вербальний опис території водозбору штучного водосховища. Оцінка якості інформації.	Загальні характеристики території водозбору. Структура інформації
2 Зональне представлення водосховища.	Вибір загальних зон водосховища з урахуванням морфометричних характеристик та рівня забруднення
3 Схема розподілу локальних джерел екологічної інформації по території водосховища	Структура інформаційної моделі по локальних територій
4. Аналіз інформаційних можливостей джерел інформації про стан водосховища	Склад вимірюваних характеристик і їх періодичність, оцінка об'єму накопичених статистичних даних за досліджуваний період

Дія в відповідності з алгоритмом	Результат виконання
5. Аналіз розподілу локальних джерел екологічної інформації по території водозбору	Склад вимірюваних характеристик замулення і їх періодичність, оцінка об'єму накопичених статистичних даних за досліджуваний період по зонам ШВ
6. Оцінка діапазонів зміни концентрацій хімічних сполук в зонах водосховища	Діапазони зміни концентрацій хімічних речовин по зонам водосховища
7. Модель динаміки концентрацій хімічних сполук у водах водосховища	Графіки зміни концентрацій на досліджуваному інтервалі часу
8. Розрахунок середніх значень пріоритетних забруднюючих речовин по локальних зон на інтервалі часу	Середні значення пріоритетних забруднюючих речовин по локальним зонам на інтервалі часу
9. Аналіз джерел надходження матеріалів намулу в водосховище Дія відповідно до алгоритму	Зональний розподіл території водозбору за характером внесених в воду речовин, результат виконання
10. Обчислення об'ємів наносів, що вносяться до водосховищ з зональних територій водозбору за відомими методиками	Обчислювальні модулі, що реалізують різні методики розрахунку об'ємів наносів, модулі баз даних, що забезпечують роботу обчислювальних модулів
11. Збір даних про характер розподілу наносів по території водосховища на підставі відомої картографічної інформації, даних ДЗЗ, експедиційних вимірювань	Модуль бази даних про розподіл глибин в зональній системі координат (Рівень НІР)
12. Обчислення об'єму води квазіпараллелепіпедів зонального розподілу на задані моменти часу	Динаміка зміни об'ємів наносів, як функції зміни об'єму води в зональній системі координат.
13. Побудова зонального розподілу наносів для різних інтервалів часу	Динамічні характеристики процесу замулення
14. Оцінка екологічного стану наносів по комплексному коефіцієнту K_{Σ}	Ієрархічна структура зон водосховища по комплексному коефіцієнту K_{Σ}

Дія в відповідності з алгоритмом	Результат виконання
15. Визначення категорії забруднення намулу в зонах з комплексного коефіцієнту і об'єднання зон із заданими діапазонами його значень	Площі забруднення інтегровані за категоріями в залежності від значень комплексного коефіцієнта
16. Розробка карти наносів	Карта наносів
17. Вибір екологічних характеристик для оцінок замулення за спеціальними заявками	Оперативний протокол екологічного стану зони водосховища або водосховища в цілому
18. Формування планового протоколу про екологічний стан штучного водосховища за місяць, квартал, рік.	Протокол про екологічний стан
19. Розробка моделі прогнозу замулення штучного водоймища на різні інтервали часу	Протокол прогнозу замулення
20. Формування інтегрального показника екологічних характеристик території водозбору	Визначення зональних територій для екологічного аналізу

Відповідно до цього алгоритмом розроблено структурну модель інформаційної моделі, основні модулі та зв'язк представлени на рис.2.2.1

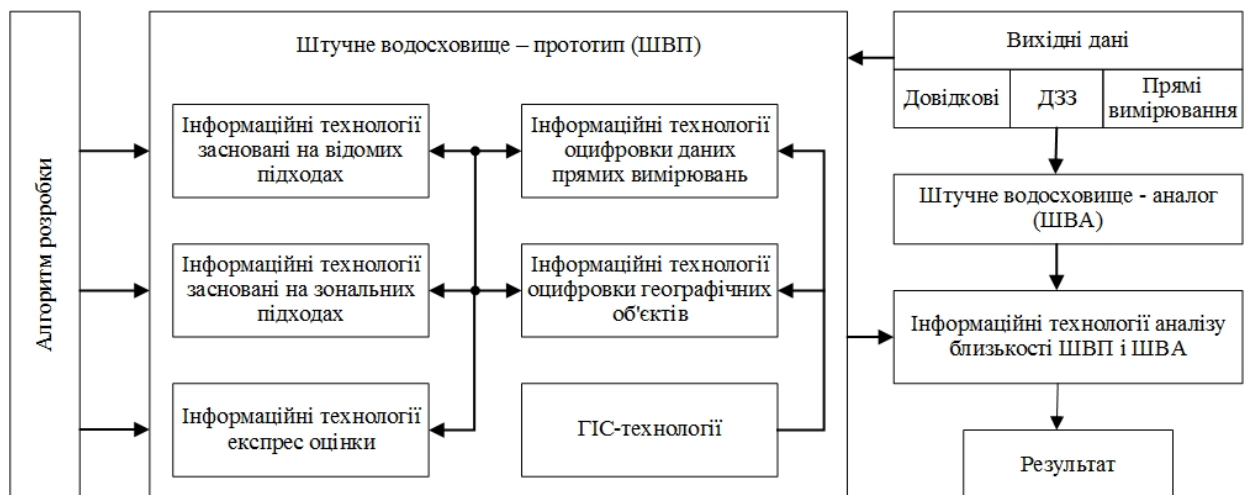


Рисунок 2.2.1 – Оцінка характеристик замулення водоймищ-аналогів

2.3 Математична модель обробки замулення штучного водосховища наносами

2.3.1 Модель динаміки наносів в річковому потоці

Одним з основних джерел замулення є наноси зважені і насомі. Наноси насомі можуть стати суспензіями, нерухомі – стати рухомими [33]. В результаті таких процесів замулюється русло водойми. Це особливо проявляється в водоймах з повільною течією, таких як ШВ.

Динаміка руслових процесів представлена різними авторами в роботах [33-35]. Математична модель і алгоритм розрахунку наносів, що використовуються при побудові інформаційної моделі представлена в роботі [33].

Гідравлічною умовою залучення в рух частинок в активному руслі є $u > U_n$, (U_n – нерозмиваюча швидкість). Проміжним станом замулення стає формування рухомого придонного шару з питомою витратою матеріалу Q_b . Збільшення швидкості водотоку призводить зважування частинок з активного шару. Таким чином, формується питома витрата зважених наносів. Динаміка зважених або частинок, які опускаються в рідині залежить від гідравлічної крупності частинок w_g , яка визначається швидкістю рівномірного падіння частки в спокійній воді. Вона обчислюється за відомою формулою Стокса [25]:

$$w_g = \frac{\rho_s - \rho_v}{\rho_v} \frac{g}{18\nu} d^2 \quad (2.3)$$

тут ρ_v – щільність води, ρ_s – щільність частинок, g – прискорення вільного падіння, ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, d – діаметр частинки.

Розподіл концентрації зважених наносів по глибині потоку знаходиться за формулою Рауза — Великанова [25]:

$$S = S_0 \left(\frac{h-z}{z} \frac{\sigma}{h-\sigma} \right)^{w_g/ku} \quad (2.4)$$

де S ; S_0 — концентрація наносів на відстанні z від дна та біля дна, при $z = \delta$; h — глибина; $\delta = d/(30h)$; d — діаметр зважених частинок; $k = 0.4$ — незмінна Кармана; $u_* = 0.4\sqrt{ghI}$ — динамічна швидкість; I — уклон поверхні. S_0 визначається виразом:

$$S = \frac{2.17w_g d}{\exp[0.39(p_s - p_b)d/p_b/h] - 1} \quad (2.5)$$

Витрата наносів Q_b [35]

$$Q_b = m u_r d, \quad (2.6)$$

де m — динамічний коефіцієнт суцільності (відношення об'єму рухомих частинок до всього об'єму частинок в шарі товщиною d).

Швидкість руху наносів обчислюється за формулою:

$$u_r = u_b - u_n, \quad (2.7)$$

де u_b — середня за глибиною швидкість води, u_n — гранична швидкість, при якій відкладаються наноси [26]:

$$u_n = 6d^{1/3} h^{1/6} \quad (2.8)$$

Повна витрата - це підсумок витрат, наносів зважених і які тягнуться. Перенесення зважених наносів, в першому наближенні, визначається рівнянням:

$$\frac{\partial S_i}{\partial t} + u_b \frac{\partial S_i}{\partial x} = \frac{q_{Si}}{h} + \frac{q}{\omega} S_{iq} \quad (2.9)$$

де S_i — концентрація i -й фракції, кг/м^3 ; S_{iq} — домішки i -й фракції; q_{Si} — витрата домішки i -й фракції; ω — площа поперечного перерізу русла.

Для розрахунку масообміну між дном і водним потоком використовується методика, представлена в роботах [35]. Гранулометричний склад донних відкладень заданий параметрами $\alpha_{i\text{дн}}$, де $\alpha_{i\text{дн}}$ - процентний вміст i -й фракції в донних відкладеннях, $i = 1, 2, \dots, N$. З умови $w_{gi} \leq w^*$ визначаються фракції, які муться. Тут w_g і - гідравлічна крупність, визначається за формулою (2.3.1) для $d = d_i$, $w^* = 0.4 u_*$, $u_* = 0.4\sqrt{ghI}$.

Фракції, що збурюються позначимо індексами $i = 1, 2, \dots, i^*$. Тоді процентний вміст i -й фракції $\alpha_i = 100\alpha_{i\text{дн}} / r$, $r = \alpha_{1\text{дн}} + \alpha_{1\text{дн}} + \dots + \alpha_{i^*\text{дн}}$, $i = 1, 2, \dots, i^*$. $\alpha_{i\text{дн}}$, де $\alpha_{i\text{дн}}$ - процентний вміст i -й фракцій в донних відкладеннях, $i = 1, 2, \dots, N$. Середній діаметр $d_{\text{ср}}$ визначається:

$$d_{cp} = 0.01 \sum_{i=1}^{i^*} a_i d_i \quad (2.10)$$

Транспортна здатність потоку $S_{тр}$ [27,28]

$$S_{тр} = \begin{cases} 0.2 \frac{u_b^3}{ghw_g}, & w_g < w_*, \\ 0 & \end{cases} \quad (2.11)$$

$$w_q = \frac{p_s - p_b}{p_b} \frac{g}{18\nu} d_{cp}^2, \quad w_g \geq w_*, \quad (2.12)$$

Згідно [28] визначимо масообмін з дном:

$$qS_i = (S_{imp} - S_{i0})w_{gi}, \quad S_{imp} = 0.01\alpha_p S_{mp} \quad (2.13)$$

$$qS = \sum_i qS_i \quad (2.14)$$

де q_s — масообмін з дном; S_{i0} — концентрація i -ої фракції біля дна.

При $S_{итр} > S_{идн}$ нехай $S_{итр} = S_{идн}$. Якщо $S_{i0}=0$, то и $S_{итр}=0$. З огляду на те, що зміна складу донних наносів в основному відбувається за рахунок збурення і седиментації. При $qS > 0$ наноси надходять в потік, а при $qS < 0$ – відбувається замулення русла.

Розглянута одномірна модель дозволяє досліджувати динаміку домішок в річковому потоці з урахуванням морфометричних та гідравлічних характеристик потоку, седиментації і збурення.

2.3.2 Спрощена модель динаміки донних наносів

Спрощена модель динаміки донних наносів [35] представлена з урахуванням наступних умов: динаміка донних відкладень визначається седиментацією, збуренням і переміщенням наносів; шар донних наносів представлений в'язко-пластичним середовищем; рух донних наносів описується рівняннями повільних шаруватих течій. Гідравлічні характеристики потоку визначаються одновимірними рівняннями Сен-Венана (малі деформації русла не враховуються). Модель донних

наносів (в'язкопластичне середовище Бінгама-Ільюшина, поєднання сил в'язкого і сухого тертя), визначається формулою:

$$\frac{\tau}{p} = \text{sign} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) \frac{\tau_0}{p} + \nu_0 \frac{\partial u}{\partial z} \quad (2.15)$$

де τ — дотичне напруження між рухомими шарами; τ_0 - початкова напруга зсуву; ν_0 – коефіцієнт ефективною в'язкості; ρ – щільність донних відкладень; u – горизонтальна проекція швидкості середовища [36, 37]. При $|\tau| \leq \tau_0$, швидкість деформації дорівнює нулю, тобто $\partial u / \partial z = 0$. При $\tau_0 = \text{const}$, і $|\tau| > \tau_0$ рівняння руху середовища збігаються з рівняннями для ньютонівської рідини ($\nu = \nu_0$).

2.3.3 Оцінка товщини активного шару донних відкладень

У прямокутній системі координат x, z , (вісь x – по ходу водотоку, вісь z – вниз, $x = 0, z = 0$, на кордоні розділу «вода - дно». α – ухил дна) рівняння вільної поверхні в'язко-пластичного середовища, водної поверхні, нижньої межі активного шару [38] мають вигляд, відповідно:

$$z = \eta(t, x) \quad (2.16)$$

$$z = -H(t, x) \quad (2.17)$$

$$z = \gamma(t, x) \quad (2.18)$$

Повільні шари в'язко-пластичного середовища в наближенні тонкого шару описуються рівняннями:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{p} \frac{\partial \tau}{\partial z} + g \sin \alpha \\ \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial z} = g \cos \alpha \end{cases} \quad (2.19)$$

тут p – тиск; дотичне напруження τ визначається по формулі (2.19) (при цьому $\partial u / \partial z \leq 0$).

На мережі розділу «вода - дно» ($z = \eta$) має місце умова (кінематичне):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u|_{z=\eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{qs}{\rho} \quad (2.20)$$

динамічна умова безперервності тензора напружень ($h = \eta - H$ – глибина водотоку) визначається формулами:

$$p|_{z=\eta} = \rho g h, \quad (2.21)$$

$$\left(-\frac{\tau_0}{\rho} + v_0 \frac{\partial u}{\partial z}\right)_{z=\eta} = -\frac{\tau_{гр}}{\rho} \text{ при } \tau_{гр} > \tau_0 \quad (2.22)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_{z=\eta} = 0 \text{ при } \tau_{гр} \leq \tau_0 \quad (2.23)$$

$$p|_{z=\eta} = \rho_B g h_p, \rho v_0 \frac{\partial u}{\partial z} |_{z=\eta} = \begin{cases} 0 & \text{при } \tau_{гр} \leq \tau_0 \\ -\tau_{гр} + \tau_0 & \text{при } \tau_{гр} > \tau_0 \end{cases} \quad (2.24)$$

При цьому вираз для дотичного напруження $\tau_{гр}$ має вигляд:

$$\tau_{гр} = \rho g u^2 \epsilon / C_{ш}^2 \quad (2.25)$$

де u_B – середня по глибині швидкість течії; $C_{ш}$ – коефіцієнт Шези;
 ρ_B – щільність води.

В цьому випадку :

$$\tau_{гр} = \rho g h i_0 \quad (2.26)$$

Формула для обчислення i_0 в разі малих кутів має вигляд:

$$i_0 = tg \alpha + \frac{\partial \eta}{\partial x} \approx \sin \alpha + \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (2.27)$$

із (2.27) знаходимо величину тиску:

$$\frac{p}{\rho} = g(z - \eta) \cos \alpha + \frac{\rho_B}{\rho} g h \quad (2.28)$$

із виразу для горизонтальної проекції швидкості:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial z} + g \sin \alpha - \frac{\rho_B g}{\rho} \frac{\partial h}{\partial x} \\ \frac{\tau}{\rho} = -\frac{\tau_0}{\rho} + v_0 \frac{\partial u}{\partial z} \end{cases} \quad (2.29)$$

Начальні умови (нестационарна задача): $u = u_0(x, z)$, $\eta = \eta_0(x)$. (2.29) При умові:

$$\tau_{гр} - \tau_0 / \rho = \tilde{\tau} > 0, \quad (2.30)$$

наноси рухаються подібно в'язкій рідині. На границі $z = \eta^*$, дотичне напруження збігається з τ_0 . У даній моделі реалізується тільки $\tau_{гр} - \tau_0 / = \tau > 0$. При $\tau_0 = \text{const}$ (стаціонарний випадок) має місце:

$$v_o \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = -g \sin \alpha + \frac{\rho_E}{\rho} g \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.31)$$

$$v_o \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=h} = \begin{cases} -\tau \text{ при } \tau > 0, \\ 0 \text{ при } \tau \leq 0, \end{cases} \quad (2.32)$$

$$u|_{z=\gamma} = 0 \quad (2.33)$$

При $qS = 0$ (стаціонарний випадок) з кінематичної умови (2.13) випливає, що $\partial \eta / \partial x = 0$, що відповідає стіканню вязкопластичного середовища по похилій площині під дією напруги тертя водного потоку.

Завдання (2.18) має рішення (при $\tilde{\tau} > 0$):

$$u = \frac{A}{2v_o} z^2 + \frac{C_1}{v_o} z + \frac{C_2}{v_o} \quad (2.34)$$

$$u(\tau_1) = -\frac{C_1}{v_o} (\gamma - \eta) - \frac{A}{2v_o} (\gamma^2 - \eta^2) \quad (2.35)$$

$$C_1 = -(\tau + A\eta), C_2 = -\frac{A}{2} \gamma^2 - C_1 \gamma \quad (2.36)$$

$$A = -g \sin \alpha + \frac{\rho_E}{\rho} g \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.38)$$

При $\tilde{\tau} \leq 0$ $u \equiv 0$. В нестаціонарному випадку при $\tilde{\tau} > 0$ маємо:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = v_o \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - A, \quad (2.39)$$

$$v_o \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=\eta} = -\tau \quad (2.40)$$

$$u|_{z=\eta} = 0 \quad (2.41)$$

Межі розділу «вода-дно» визначається з рівняння (2.13). Завдання з відомою нижньою межею (2.20) вирішується методом прогонки.

При невідомому кордоні активного шару $z = \gamma(t, x)$, Граничні умови попередньої задачі доповнюються такими умовами прослизання на кордоні розділу «вода-дно»:

$$v_0 \frac{\partial u}{\partial z} |_{z=\eta} = k_1 (u_\eta - u_{вд}) \text{ при } \tau > 0 \quad (2.42)$$

$$u_\eta = u|_{z=\eta} = 0 \text{ при } \tilde{\tau} \leq 0. \quad (2.43)$$

де $u_{вд}$ швидкість води на дні; k_1 — коефіцієнт прослизання ($k_1 \geq \tilde{\tau}/u_{вд}$). При $k_1 \rightarrow \infty$ $u_\eta \rightarrow u_{вд}$. Якщо $k_1 \rightarrow \tilde{\tau}/u_{вд}$, то $u_\eta \rightarrow 0$, $\gamma = \gamma_0(x)$.

Для визначення придонної швидкості води розраховується логарифмічний розподіл поздовжньої швидкості [38]:

$$u_{вд} = \frac{1.25u_b}{\lg\{6.15[0.35(1+\frac{1}{\lambda})]^\lambda\}} \quad (2.44)$$

Тут $\lambda = (0.35\Delta/h)$, $\Delta = 0.7d$, d — середній розмір частинок; u_b — швидкість води середній по перетину. Для $h/\Delta > 50$ вираз (2.3.42) має вигляд:

$$u_{вд} = \frac{1.25u_b}{\lg\{6.15[0.35(1+\frac{1}{\lambda})]^\lambda\}} \quad (2.45)$$

$$u_{вд} = \frac{1.25u_b}{\lg(\frac{6.15h}{\Delta})} \quad (2.46)$$

Якщо $|\tau_{Гр}| \leq \tau_0$ можуть бути реалізовані процеси взмучивання або осаження. При $|\tau_{Гр}| > \tau_0$, процеси описуються виразом (2.30), (2.31), (2.32), (2.33), (2.34). Рішення стаціонарної задачі при $\tilde{\tau} > 0$ описується співвідношенням (2.39), в яких $\gamma(t, x)$ не визначена. Рівняння для обчислення товщі активних наносів $\tilde{\gamma} = \gamma - \eta$ слідує із виразів (2.41) та (2.43):

$$\tilde{\gamma}^2 - 2(\tilde{\tau}/A)\tilde{\gamma} + 2v_0u_\eta/A = 0, u_\eta = u_{вд} - \tilde{\tau}/k_1, \quad (2.47)$$

Його рішення:

$$\gamma = \begin{cases} \frac{\tau}{A} + \sqrt{\left(\frac{\tau}{A}\right)^2 - \frac{2v_0 u_\eta}{A}} \text{ при } A < 0, \\ \frac{\tau}{A} + \sqrt{\left(\frac{\tau}{A}\right)^2 - \frac{2v_0 u_\eta}{A}} \text{ при } A > 0 \end{cases} \quad (2.48)$$

Фізичний смисл має рішення, для якого $\gamma \geq \eta$. Рішення рівняння (2.29) визначає межу поділу $\eta(t,x)$. Із співвідношення (2.39) знаходиться середня за товщиною активного шару швидкість руху донних наносів:

$$u_{\text{ср}} = \frac{\gamma}{v_0} \left(\frac{\tau}{2} - \frac{A\gamma}{3} \right) \quad (2.49)$$

Рівняння збереження маси i -ї фракції в донних відкладеннях $S_{i\text{дн}}$ має вигляд:

$$\frac{\partial(z_* S_{i\text{дн}})}{\partial t} + u_{\text{ср}} \frac{\partial(z_* S_{i\text{дн}})}{\partial x} = -q_{Si} \quad (2.50)$$

де z_* – товща активного шару донних відкладень, $u_{\text{ср}}$ – швидкість переміщення наносів, які несуться. Оскільки мають місце вирази:

$$\sum_i q_{Si} = q_s \quad (2.51)$$

$$\sum_i S_{i\text{дн}} = \rho \quad (2.52)$$

то z_* розраховується із рівняння:

$$\frac{\partial z_*}{\partial t} + u_{\text{ср}} \frac{\partial z_*}{\partial x} = -\frac{q_s}{\rho} \quad (2.53)$$

Концентрація зважених наносів розраховується на основі вирішення рівняння (2.3.4).

2.3.4 Визначення параметрів донних наносів

Дотичне напруження і нерозмиваюча швидкість U_n визначається виразами [2.45, 2.46]:

$$(2.54)$$

$$\frac{\tau_0}{\rho_B} = u_*^2,$$

$$u_H = \frac{C_{\text{ш}}}{\sqrt{g}} u_* \quad (2.55)$$

де ρ – щільність донних відкладень, ν_0 – коефіцієнт ефективної в'язкості та τ_0 – початкова напруга зсуву.

Тоді:

$$\tau_0 = \rho_B g \frac{u_H^2}{C_{\text{ш}}^2} \quad (2.56)$$

Тут значення U_H обчислюється з (3), $C_{\text{ш}} = h1/6/n$ (n – шорсткість), При цьому τ_0 визначається виразом:

$$\tau_0 = 36\rho_B g n^2 d^{2/3} \quad (2.57)$$

де d – середній діаметр донних наносів. У розрахунках використовуються такі одиниці виміру: кілограм-сила, метр, секунда. Щільність донних відкладень ρ визначається виразом:

$$\rho = (1 - \sigma)\rho_S + \sigma\rho_e \quad (2.58)$$

В'язкість мулистих ґрунтів лежить в діапазоні 0.01- 0.32 кг / м • с, початкова напруга зсуву τ_0 - в діапазоні 0.5-5.5 кг / м • с². [33]

2.3.5 Обчислювальний алгоритм

Для розрахунку динаміки зважених і донних наносів використовується обчислювальний алгоритм, наведений в роботі [38].

Етапи алгоритму:

1. Виходячи зі складу донних відкладень: $(d_i, \alpha_{i\text{дн}})$, d_i – діаметр частинок i -ї фракції, мм; $\alpha_{i\text{дн}}$ – процентний вміст i -ї фракції в донних відкладеннях, $i = 1, 2, \dots, n$. Вихідна концентрація донних відкладень визначається виразом:

$$S_{i\text{дн}}^o = \frac{\rho \alpha_{i\text{дн}}}{100} \quad (2.59)$$

де ρ – щільність донних опадів.

2. Швидкості U_B і глибина h визначається рішенням рівнянь Сен-Венана.

3. Товщина активного шару наносів і їх середня швидкість визначаються виразами (2.15), (2.23) - (2.27).

4. Визначення масообміну між дном і водним потоком. З умови (2.7) визначаються взмучивають фракції з індексами $i = 1, 2, \dots$

$$I = \text{tg} \alpha + \partial H / \partial x \quad (2.60)$$

Тут α_i - процентний вміст фракцій, $\alpha_i = 0$ при $i = i^* + 1, i^* + 2, \dots, n$. Тоді процентний вміст зважують i -й фракції

$$\alpha_i = (100/r) \alpha_{i\text{дн}}, \quad i = 1, 2, \dots, i^* \quad (2.61)$$

де $r = \alpha_{1\text{дн}} + \alpha_{2\text{дн}} + \dots + \alpha_{i^*\text{дн}}$.

Якщо $r = 0$, то все $\alpha_i = 0$. Масообмін між дном і придонним шаром визначається за формулами (2.8) - (2.10). Середня по глибині концентрація i -ї фракції S_i , на основі формули (2.2), визначається виразами [39]:

$$S_i = \beta_i S_{i0} \quad (2.62)$$

$$\beta_i = \int_0^1 \left(\frac{1-z}{1+\frac{hz}{\Delta}} \right) \lambda_i dz, \quad \lambda_i = \frac{\varpi S_i}{\varpi_*} \quad (2.63)$$

5. Для визначення концентрацій зважених і донних наносів і положення кордону розділу «вода - дно» використовуються чисельні рішення рівнянь (2.6, 2.13, 2.15, 2.28). Для їх вирішення використовується обчислювальний алгоритм за схемою біжучого рахунку, зазвичай використовувана для вирішення систем рівнянь [40], що включають рівняння в частинах похідних (змішана задача Коши):

$$S_{i,j}^{n+1} = \frac{S_{i,j}^n + u_B \frac{\Delta t}{\Delta x} S_{i,j-1}^{n+1} + \frac{\Delta t}{h} q_{S_{i,j}}^n + \frac{\Delta t q}{\omega} S_{i,q,j}^n}{1 + u_B \frac{\Delta t}{\Delta x}} \quad (2.64)$$

$$z_{*j}^{n+1} = \frac{z_{i,j}^n + u_{cp} \frac{\Delta t}{\Delta x} z_{*j-1}^{n+1} - \frac{\Delta t}{\rho} q_{S_j}^n}{1 + u_{cp} \frac{\Delta t}{\Delta x}} \quad (2.65)$$

$$S_{i_{дн},j}^{n+1} = \frac{\frac{z_*^n}{z_*^{n+1}} S_{i_{дн},j}^n + u_{ср} \frac{\Delta t}{\Delta x} S_{i_{дн},j-1}^{n+1} - \frac{\Delta t}{z_*^{n+1}} q_{S,i,j}^n}{1 + u_{ср} \frac{\Delta t}{\Delta x}} \quad (2.66)$$

$$S_{i_{дн},j}^{n+1} = \frac{\eta_{дн,j}^n + u_{\eta,j}^n \frac{\Delta t}{\Delta x} \eta_{дн,j-1}^{n+1} + \frac{\Delta t}{\rho} q_{S,j}^n}{1 + u_{n,j}^n \frac{\Delta t}{\Delta x}} \quad (2.67)$$

де Δt — шаг за часом; Δx — шаг по просторової змінної; індекс j відповідає координаті x_j , $x_{j+1}=x_j+\Delta x$; $t_{n+1}=t_n+\Delta t$, $f_j^n=f(t_n, x_j)$.

6. Розрахунок гранулометричного складу донних відкладень:

$$\alpha_{i_{дн}} = \frac{S_{i_{дн}}^{n+1}}{\rho} 100 \quad (2.68)$$

7. Витрата зважених наносів в створі $x = x_j$ обчислюється на основі виразів:

$$Q_w = Q S_j, \quad (2.69)$$

$$S_j = \sum_{i=1}^{i_*} S_{i,j}^{n+1} \quad (2.70)$$

8. Витрата зважених наносів:

$$Q_b = \tilde{\gamma} B u_{ср} \rho, \quad (2.72)$$

де Q — витрата води, B — ширина русла.

9. Загальні витрати наносів:

$$Q_S = Q_w + Q_b. \quad (2.73)$$

2.3.6 Результати перевірочних розрахунків

Результати визначення каламутності води в гранулометричному складі зважених і донних наносів р. Самара отримані в декількох перетинах відповідно до зональної ситеми координат (розділ 3). Верифікація моделі проводилася для конкретної ділянки Самарського водосховища. Розглядалася ділянка річки з постійною вздовж русла глибиною, шириною і швидкістю течії, (дані, схематизує реальне русло в нижній течії) [41-56].

За даними ІППЕ НАНУ для витрати $Q = 14\,500 \text{ м}^3/\text{с}$ каламутність води в районі експериментальної ділянки Самарського водосховища склала $1.15 \text{ мг}/\text{дм}^3$. В табл. 4.1 наведені дані розрахунку характеристик наносів. У табл. 2.3.1 представлені дані польових експериментальних досліджень, отриманих ІППЕ НАН України.

Номери стовпців таблиці відповідають номерам перетинів зональної структури Самарського водосховища.

Таблиця 2.3.1 – Дані порівняння розрахунків та результатів експериментального дослідження характеристик насосів

Параметр	Перетин 1		Перетин 2		Перетин 3	
	Експеримент	Розрахунок	Експеримент	Розрахунок	Експеримент	Розрахунок
S - каламутність (концентрація), $\text{мг}/\text{дм}^3$	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

Параметр	Перетин 4		Перетин 5		Перетин 6	
	Експеримент	Розрахунок	Експеримент	Розрахунок	Експеримент	Розрахунок
S - каламутність (концентрація), $\text{мг}/\text{дм}^3$	1,06	1,16	1,22	1,24	1,06	1,15
d - діаметр частинок мм	0,07	0,06	0,05	0,03	0,04	0,05

Гідравлічні характеристики для завдання транспорту наносів (глибина, швидкість течії) отримані з рішення одновимірної задачі Сен-Венана.

Порівняння результатів розрахунку і даних експерименту підтверджують адекватність моделі і алгоритму її розрахунку.

2.4 Морфометрична модель водосховища

Морфометричний модуль інформаційної моделі включає три функціональні компоненти:

– Розрахункові співвідношення (рівняння, формули, алгоритми).

– Вихідні дані для розрахунків, що включають картографічну, табличну, графічну і числову інформацію.

– Результати розрахунків і аналізу.

До морфометричних характеристик водозбору відносять:

– площу басейну F [км²];

– довжину вододільної лінії l_0 [км];

– довжину басейну L_b [км], яка зазвичай визначається як пряма, що сполучає гирло річки і точку на вододілі, прилеглу до витоку річки;

– максимальну ширину басейну V_{max} [км], яка визначається по прямій, нормальній до осі басейну в найбільш широкій його частині;

– середню ширину басейну VCP [км], яка обчислюється за формулою:

$$VCP = F/L_b \quad (2.74)$$

– де L_b – довжина басейну;

– висоту поверхні водозбору h_{cp} [м], яка визначається за гіпсографічною кривою або розраховується за формулою:

$$H_{cp} = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^n H_i f_i \quad (2.75)$$

де H_i — середня висота будь-яких висотних інтервалів в межах басейну, що обчислюється як середнє з відміток, що обмежують ці інтервали горизонталей (ізогипс), f_i – площа частини басейну між цими горизонталями, F – повна площа басейну, n – число висотних інтервалів;

– середній ухил схилів басейну i_{cp} [‰ або в частках одиниці], розраховується за формулою:

$$i_{cp} = \frac{\Delta H}{F} \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (l_R + l_{R+1})_i \quad (2.76)$$

де l_R и l_{R+1} – довжини суміжних горизонталей, ΔH – різниця відміток суміжних горизонталей (перетин рельєфу), F – повна площа басейну, n – число висотних інтервалів.

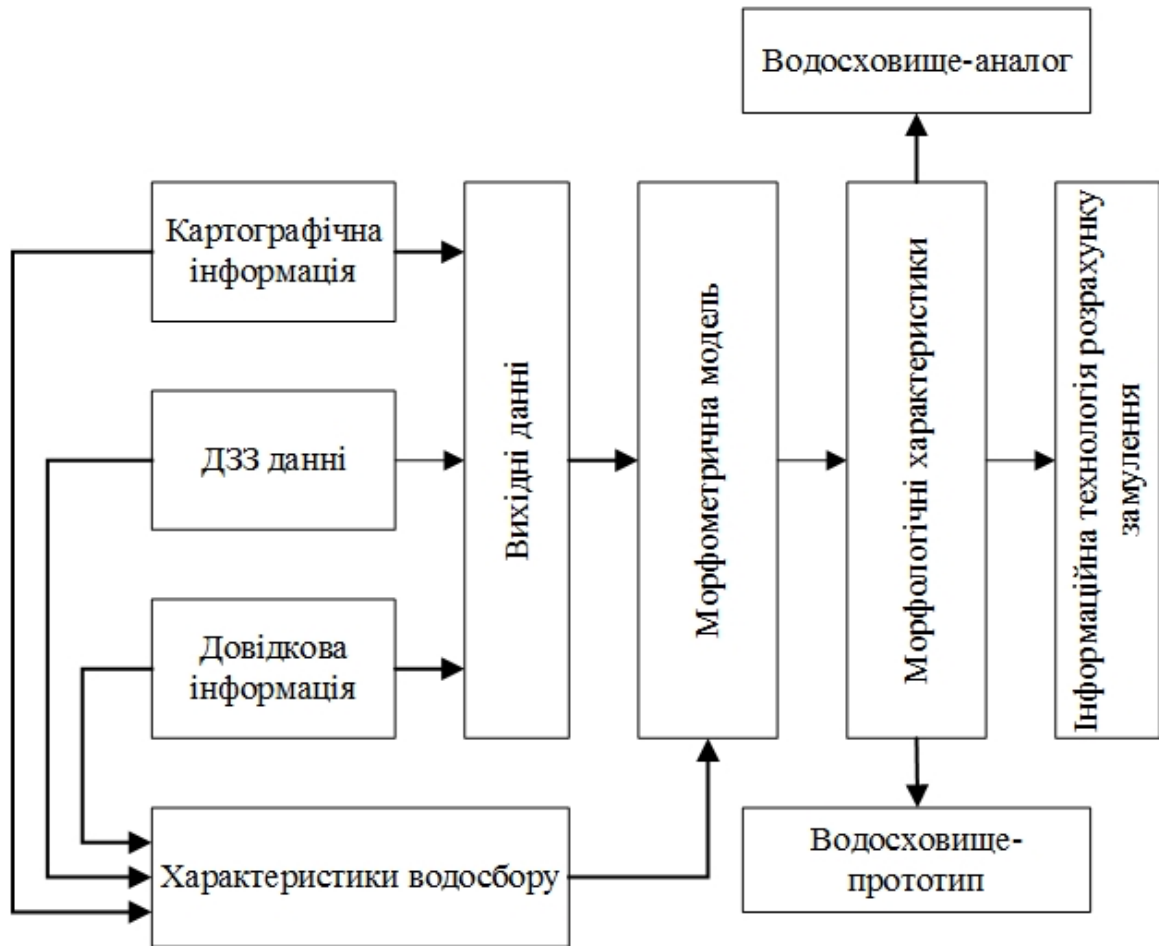


Рисунок 2.4.1. Алгоритм розрахунку морфометричних характеристик водосховищ

Морфометричні характеристики пов'язані з рівнем води, під яким розуміють висоту поверхні води, яка відліковується до деякої постійної площини порівняння (за замовчуванням – щодо середнього багаторічного рівня води у водоймі, а також нуль футштока на водомірних постах, що фіксує цей рівень). Зміни рівня описуються гідрографом – графіком ходу рівнів. Таким чином, блок вихідної інформації містить наступні основні параметри водосховища:

- Нормальний підпірний рівень, м над р.м.
- Рівень мертвого об'єму, м над р.м.
- Глибина спрацювання водосховища, м.
- Середня глибина водосховища при УМО.

- Середня глибина водосховища при НПР, м.
- Повний об'єм водосховища, млн. м³
- Корисний об'єм водосховища, млн. м³ (картографічна інформація).
- Мертвий об'єм водосховища, млн. м³
- Площа дзеркала водосховища при НПР, млн м²
- Площа дзеркала водосховища при УМР, млн м²
- Площа мілководь при УМР, млн м²
- Площа мілководь при НПР, млн м²

Основною моделлю, що використовує водойми в найбільшій мірі морфометричні характеристики ШВ є модель водообміну. Модель водообміну є найважливішою характеристикою замулення будь-якого з штучних водосховищ [34]. Водообмін є поєднанням різноманітних динамічних процесів, що одночасно протікають у водоймі під дією на воду різних зовнішніх сил, її в'язкості та інерції [35]. Компонентами водного балансу слугують зовнішній і внутрішній водообмін. Зовнішній водообмін позначає заміну вод, що знаходяться у водоймі, новими водами, які надійшли ззовні. При внутрішньому водообміні відбувається переміщення і змішання водних мас в самій водоймі.

Він може бути пов'язаний як із зовнішнім водообміном і водним балансом, так і з перемішуванням – горизонтальних і вертикальних зовнішній і внутрішній водообмін. Зовнішній водообмін визначається турбулентним обміном. У першому випадку фактором, що визначає водообмін, є стокові течії, у другому випадку турбулентне перемішування відбувається при хвилях і течіях (як стічних, так і вітрових) [36].

В цілому інтерполярна модель водного балансу визначається приходом і витратою води відповідно. Інформаційна технологія розрахунку балансу води у водосховищі приведена на рисунку 2.4.2.

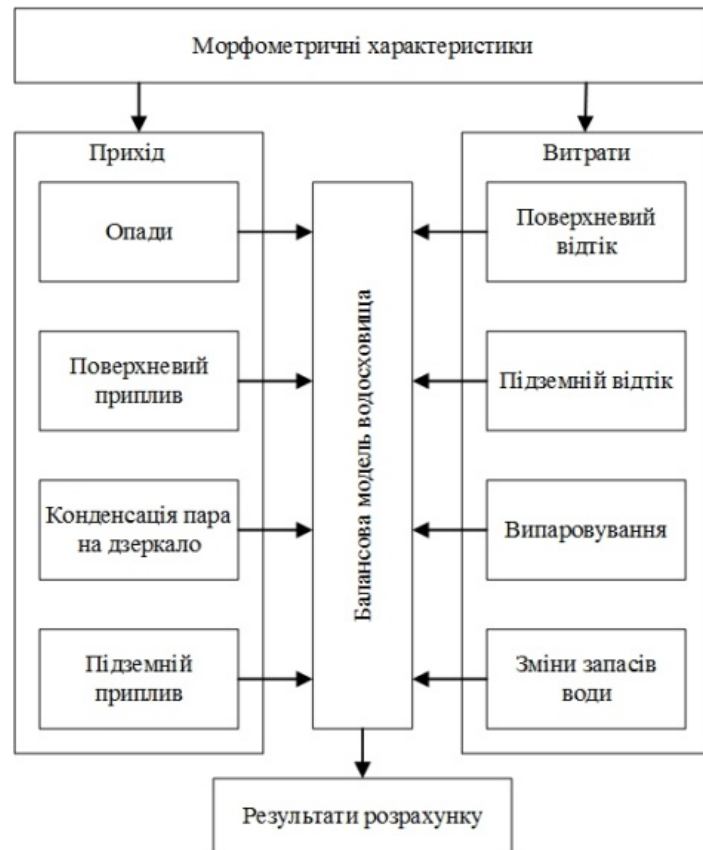


Рисунок 2.4.2. Алгоритм розрахунку балансу води

Зовнішній водообмін будь-якого проточного водоймища обумовлений проявом чотирьох гідрологічних процесів [42] надходження води поверхневим і підземним шляхом та у вигляді атмосферних опадів:

- тимчасова акумуляція води у водоймі;
- відтік води в іншу водну систему;
- випаровування води з водної поверхні водойми [45].

Зовнішній водообмін визначається ступенем участі водойми в глобальному гідрологічному циклі і складається в обміні водою з сусідніми ділянками гідрографічної мережі, ґрунтами ложа і атмосферою. Співвідношення інтенсивності складових зовнішнього водообміну залежить від морфометричних параметрів водойми, його географічне розташування і місця в гідрографічній мережі.

Перший показник, що оцінює інтенсивність зовнішнього водообміну у водосховищах, коефіцієнт проточності, який показує, скільки разів або яка частина водної маси обмінюється за певний проміжок часу:

$$D = \frac{W_{ст.ГЭС}}{V} \quad (2.77)$$

де $W_{ст.}$ – об'єм скидання води в нижній б'єф, V – об'єм водосховища.

Показник умовного водообміну [36, 37] дорівнює відношенню об'єму припливу у водойму за деякий проміжок часу ($W_{пр}$) до середнього для цього проміжку часу об'єму води водойми (V):

$$D_0 = \frac{W_{пр}}{V} \quad (2.78)$$

Характеристика інтенсивності зовнішнього водообміну в штучних водоймах [36,40] має вигляд:

$$D = \frac{W_6}{V} \quad (2.79)$$

де W_6 — об'єм всіх вод, що беруть участь в зовнішньому водообміні (атмосферні опади, приплив з басейну, стік з водойми, випаровування з водної поверхні).

При відсутності фактичних даних інтегральна оцінка водообміну виконується виходячи з того, що водообмін прямо пропорційний модулю стоку. Виконується розрахунок водообміну деякого умовного водойми, картування цієї величини і подальший розрахунок по карті водообміну реальних водойм з урахуванням їх фактичних розмірів [41].

$$D_{фак} = A * D_{умов}, \quad (2.80)$$

де $D_{фак}$ и $D_{умов}$ – фактичний і умовний (знятий з карти) коефіцієнти водообміну, A – перехідний коефіцієнт, що враховує фактичну площу водозбору (F) і відношення умовного ($V_{умов}$) і фактичного ($V_{фак}$) об'ємів водойм, тобто:

$$A = \frac{F \cdot V_{умов}}{100 \cdot V_{фак}} \quad (2.81)$$

При відомих надходжень та витоків [42] використовують відповідні показники зовнішнього водообміну штучних водойм по притоку і відтоку вод з них:

$$D_{пр} = \frac{W_{пр}}{V} \quad (2.82)$$

$$D_{от} = \frac{W_{от}}{V} \quad (2.83)$$

де $W_{от}=W_{ст.}$ – показники зовнішнього водообміну (формули 2.1 і 2.2).

Середній коефіцієнт водообміну водосховища, що враховує як об'єм припливу вод у водойму, так і стік з нього [43],

$$D = \frac{W_{np} + W_{cm}}{2V}$$

де W_{cm} – об'єм скидання вод з водойми (тобто $W_{cm} = W_{cm.гес}$).

Практично всі представлені показники інтенсивності зовнішнього водообміну відображають його горизонтальну складову. У формулі Н.В.Буторіна враховується вертикальна складова (атмосферні опади і випаровування з водної поверхні).

Узагальнена формула В.Н. Штефана має вигляд:

$$D = \frac{\sum W_{np} + \sum W_p}{2V} \quad (2.85)$$

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

Об'єм водосховища (в залежності від розрахункового періоду-середня за рік, місяць і т.д.). визначається за значеннями рівнів води з використанням об'ємних кривих. Стосовно до зональної ділянки (конкретні морфометричні ділянки) використовується формула Л.І. Дубровіна (2.1) в зміненому варіанті:

$$D_{уч} = \frac{W_{cm.гес}}{V_{уч}} \quad (2.86)$$

де $V_{уч}$ – об'єму морфометричної ділянки водойми.

Величина зовнішнього водообміну конкретної ділянки визначається за формулою:

$$D_i = D \cdot \frac{H}{H_i} \cdot \frac{B}{B_i} \quad (2.87)$$

де D , H та B – відповідно зовнішній водообмін, глибина і ширина водойми в цілому; D_i , H_i і B_i – ці ж характеристики стосовно конкретної ділянки водосховища.

Формула для оцінки інтенсивності зовнішнього водообміну морфоділянок водойми має вигляд:

$$D_{уч} = \frac{W_{cm.уч}}{V_{уч}} \quad (2.88)$$

де $V_{уч}$ – об'єм конкретної морфометричної ділянки водосховища.

Крім того, для оцінки інтенсивності зовнішнього водообміну ШВ використовують рівняння водного балансу, тим самим визначають тривалість перебування води в ШВ. В якості основної характеристики зовнішнього водообміну прийнятий показник умовного водообміну (ПУВ) [44,45]:

$$K_B = (V_{np} + V_{oc}) / V_{оз}; \quad (2.89)$$

де $V_{оз}$ – об'єм водойми. При розрахунках умовно вважають, що весь об'єм води водойми замінюється новим за час T . K_B характеризує зв'язку водойми з його басейном, і властивості внутришньоводоймних процесів. Для цієї мети використовують також відношення припливу або стоку з водойми до його об'єму. (Коефіцієнти умовного водообміну по притоку (K'_B) і по стоку (K''_B)). Величина K'_B припливу, а K''_B визначає транзитно-акумуляційні властивості ШВ. Малі значення K'_B означають малу роль припливу, а малі значення K''_B характеризують великі акумуляційні можливості ШВ.

Величина, зворотна K_B , відповідає періоду часу, протягом якого відбувається повна зміна води у водоймі. За цими характеристиками водойми діляться на: транзитні (K''_B – від 100 до 300, період водообміну – години, доба); транзитно-акумулятивні (K''_B 10 – 100, період водообміну – тиждні, місяці); акумулятивно-транзитні (слабопроточні, $K''_B = 1-10$, період водообміну – місяці, роки); акумулятивні (водосховища і озера з уповільненим водообміном. (K''_B змінюється від тисячних часток до 1, період водообміну – роки, сотні років). У безстічних водоймах акумулюються всі речовини, які надходять.

Характеристики водообміну, що обчислюються на основі моделі, описаними співвідношеннями (2.1-2.2) слугують для подальшого визначення об'ємів намулу, що потрапляє в ложі водосховища протягом певного інтервалу часу.

Для простих оцінок в припущенні рівномірного розподілу наносів період замулення визначається виразом [44]:

$$\tau_{zl} = \frac{V_{MO}}{W_R(1 - \sigma)}; \quad (2.90)$$

де V_{MO} – мертвий об'єм водосховища, m^3 ; W_R – середній річний стік наносів річки, m^3 ; σ – частка стоку наносів, що проходить через водосховище транзитом (для рівнинних водосховищ $\sigma = 0,3 - 0,4$).

Сток наносів річки W_R , в свою чергу, визначають за формулою:

$$W_R = \frac{\bar{R} \cdot 31,5 \cdot 10^6}{\rho_{отл}}; \quad (2.91)$$

де \bar{R} – середня річна витрата наносів, кг/с; $31,5 \cdot 10^6$ – кількість секунд в році;
 $\rho_{отл}$ – щільність донних відкладень ($700-900 \text{ кг/м}^3$ – мул, $1900-1300 \text{ кг/м}^3$ – піскуватий мул, $1500 - 2200 \text{ кг/м}^3$ – пісок, гравій).

2.5 Моделі балансу

2.5.1 Модель теплового балансу

Модель теплового балансу штучного водосховища описується рівністю [45]:

$$d\theta/dT = \theta_{пр.} - \theta_{эф.} \pm \theta_{т.т} \pm \theta_{дно} \pm \theta_{р} \pm \theta_{исп.} \pm \theta_{в} \quad (2.92)$$

де $\theta_{пр.}$ – пряма і розсіяна сонячна радіація; $\theta_{эф.}$ – ефективне випромінювання; $\theta_{е.т}$ – ефективний теплообмін; $\theta_{дно}$ – теплообмін з дном; $\theta_{р}$ – надходження і втрата тепла з водою, яка впадає і витікає; $\theta_{вип.}$ – тепло, яке виділяється при конденсації (випаровування); $\theta_{в}$ – тепловміст водної маси (теплозапасів). Теплозапаси визначається за формулою:

$$\theta_{в} = tV\rho C \quad (2.93)$$

де t – температура води (град. C^0), V – об'єм води (м^3), ρ – щільність води (г/м^3), C – питома теплоємність води.

2.5.2 Модель водного балансу

Водний баланс водосховищ визначається приходом і витратою води, відповідно. Прихід включає: опади x , поверхневий приплив y_1 , конденсацію пару на дзеркало z_1 , підземний приплив w_1 . Витрата включає: поверхневий відтік y_2 , підземний відтік (фільтрація) w_2 , випаровування z_2 ΔU – зміна запасів води водосховища [46]. Тоді рівняння водного балансу має вигляд:

$$\theta_{в} = tV\rho x + y_1 + z_1 + w_1 = y_2 + z_2 + w_2 + \Delta U \quad (2.94)$$

Слід зазначити, що для структури водного балансу водосховищ характерне переважання припливу річкових вод в прихідній і переважання стоку у видатковій частині рівняння водного балансу. Для обчислення відсотка опадів [47], що випадають у твердій і рідкій фазі, використовується рівняння регресії:

$$N = -0,179T_2 - 0,034T_{925} - 0,078T_{850} + 0,372$$

де N – частка опадів, що випали в твердому вигляді, T_2 – приземна температура повітря, T_{925} і T_{850} – температура на ізобаричних поверхнях 925 і 850 гПа відповідно.

2.5.3 Балансова модель донних відкладень

Балансова модель донних відкладень визначається приходом і витратою наносів. Прихід включає в себе кілька процесів: $R_{реч}$, $R_{бер}$ – руйнування берегів, R_e – еоловий пререніс, $R_{отм}$ – відмирання живих організмів. Витрата має дві складові: $R_{річ}$ –, $R_{акк}$ – акумуляція на дні. ΔR – зміна змісту зважених частинок. На цій підставі рівняння балансу наносів водосховища має вигляд:

$$R_{реч}^+ + R_{бер} + R_e + R_{отм} = R_{річ}^- + R_{акк} + \Delta R. \quad (2.96)$$

2.6 Модель території водозбору

Ця модель характеризує інтенсивність надходження мулоутворюючих речовин з території водозбору. Кількісний зв'язок об'єму водойми замикає їх басейном або водозбором визначається показником питомого водозбору і показником умовного водообміну. Показник питомого водозбору – відношення площі водозбору до площі водойми (діапазон зміни для водойм світу від 1,4 до 10306,0). Показник питомого водозбору ΔF визначається виразом:

$$\Delta F = S_b / F, \quad (2.97)$$

де F – площа водозбору, S_b – площа водосховища.

Примітка. У тих випадках, коли немає вихідних даних, використовують картографічні дані. При цьому виконується розрахунок умовної водойми, потім картування і розрахунок її по карті реальної водойми [41]

$$D_{факт} = A D_{умов}, \quad (2.98)$$

де $D_{факт}$, $D_{умов}$ – фактичний і умовний (знятий з карти) коефіцієнти водообміну. A – перехідний коефіцієнт, що враховує фактичну площу водозбору F з урахуванням умовного ($V_{ум}$) і фактичного ($V_{факт}$) об'ємів [43]:

$$A = F \times V_{\text{усл.}} / 100 \times V_{\text{факт.}}$$

При каскадному розташуванні водоймищ:

$$D_{\text{факт}} = F(V_{\text{усл.}} - W) / 100 \times V_{\text{факт.}} \quad (2.100)$$

де W – об'єм стоку вищерозміщеної водойми. K_d – для проточних водойм, $K_b=365$ (змінюється вода 1 раз на добу), $K_y=0,02-0,03$ – змінюється вода один раз в 30-50 років. Значення ΔF коливається в межах – 0,6-13500. За показником питомого водозбору водойми розбиті на п'ять основних груп [48] питомий водозбір (ΔF) дуже малий – менше 2;

- питомий водозбір (ΔF) малий – 2-8;
- питомий водозбір (ΔF) середній – 8-32;
- показник питомого водозбору (ΔF) великий – 32-128;
- питомий водозбір (ΔF) дуже великий – понад 128.

Коефіцієнт умовного водообміну (K_y) визначається формулою:

$$K_y = (V_{\text{пр.}} + V_{\text{ст.}}) / 2W \quad (2.101)$$

де $V_{\text{пр.}}$ – об'єм припливу води, $V_{\text{ст.}}$ – об'єм стоку води, W – об'єм ШВ. Водообмін, в залежності від значень коефіцієнта K_y , визначають: уповільнений ($K_y < 0,1$); зменшений ($0,1 < K_y < 5,0$); інтенсивний ($K_y > 5,0$).

2.7 Модель процесів утворення продуктів життєдіяльності

Основні джерела органічних речовин у воді ШВ – приплив органічних речовин (ОР) з річковим стоком (алохтонна органічна речовина) і продукція водних організмів (автохтонна органічна речовина).

Процес седиментації органічної речовини у водоймах супроводжується безперервною мінералізацією його у водній товщі. Від співвідношення інтенсивності седиментації і мінералізації залежить частка зваженої органічної речовини, що досягає дна водойм. Численні експериментальні дослідження, проведені на континентальних водоймах, показують, що частка мінералів в водній товщі органічної речовини коливається в межах 60-90%.

Найбільш надійний метод кількісної оцінки трансформації ОР в водоймі уповільненого водообміну – розрахунок балансу ОР.

Простим і в той же час досить інформативним показником впливу водойми на трансформацію стоку ОР може слугувати відносна частка зміни маси ОР в водоймі в процесі уповільнення стоку, або коефіцієнт утримання ОР ($KR_{ов}$) (за аналогією з відомим коефіцієнтом утримання фосфору)

$$KR_{ов} = \frac{П - P}{П} \quad (2.102)$$

де $П$ та P – сума прихідних і витритних складових балансу ОР в водоймі.

Головними факторами трансформації стоку ОР як у водосховищах, так і озерах виступає ступінь уповільнення стоку, яка характеризується коефіцієнтом зовнішнього водообміну або часом перебування води у водоймі, і структура балансу ОР (співвідношення алохтонної і автохтонної складової в прихідній його частині). У свою чергу структура балансу ОР також побічно пов'язана з інтенсивністю водообміну. Чим вище проточність водойми, тим більшу роль в балансі ОР в ньому грає приплив аллохтонного ОР.

Таблиця 2.7.1 – Характеристики органічної речовини, її утримання та водообміну Київського та Кременчугського водосховищ [Sakamoto, 1996]).

	ОР _{ал}	ОР _{авт}	ОР _{ал} /ОР _{авт}	К _в	Н _{ср}	KR _{ор}
	г/м ² рік		г/м ² рік	рік ⁻¹	м	%
Київське	408	418	0.98	8.90	4.0	58
Кременчугське	410	1000	0.41	2.25	6.0	-

Прямий зв'язок між співвідношенням алохтонної і автохтонної органічної речовини у водоймах і коефіцієнта водообміну обумовлена впливом проточності на приплив органічної речовини.

У слабоводообмінних водоймах більш глибоко і повно відбувається біоседиментація (процес, коли біологічні сполуки забруднюють воду речовинами, які утворюють в осад.) ОР алохтонного походження, посилюється фізична седиментація (осідання дрібних частинок в рідині) зважених ОР.

Два головні чинники самоочищає водойми від ОР – інтенсивність водообміну і співвідношення автохтонної і алохтонної складових в балансі ОР – вважають відносно незалежними, оскільки продукція автохтонного ОР прямо не визначається

текучістю водойми. Рівняння множинної регресії (з коефіцієнтом кореляції 0.90) в цьому випадку має вигляд [49,50]:

$$KR_{ов} = 11.0 \cdot \ln \frac{OB_{аст}}{OB_{алл}} - 5.4 \cdot K_e + 65.8 \quad (2.103)$$

Тривалість перебування води у водосховищах визначає також інтенсивність окислення алохтонних органічних речовин, які включають гумінові речовини, що визначають кольоровість води, як один з факторів, що визначає товщину фотичної зони і розвиток продукційних процесів [43,44].

2.8 Модель утворення донних відкладень

2.8.1 Алгоритм оцінки термінів замулення штучного водосховища

Об'єм замулення розраховується за формулою, наведеною нижче.

$$W_{заил} = \frac{S\rho(l+r)T_{заил}}{y_n} \text{ млн.м}^3 \quad (2.104)$$

де S – середньобагаторічний стік, Смлн.м^3 ; каламутність води, $\rho=0,4 \text{ г/м}^3$;

r – частка насосів, що несуться; $T_{заил}$ – розрахунковий термін замулення водосховища; y_n – об'ємна вага обкладань, кг/м^3 .

Терміни замулення. Розрахунок замулення пов'язаний з терміном служби водосховища. $T_{сл}$ – час, протягом якого наносами заповнюється мертвий об'єм. При заданому терміні $T_{сл}$ може вирішуватися задача про призначення відповідного мертвого об'єму $V_{мо}$. Для водосховищ, що споруджуються для цілей водопостачання, часто приймають $t_{сл}=50-75$ років.

Середньобагаторічний об'єм наносів V_n річки, що впадають у водосховище, в загальному вигляді можна представити як суму об'ємів зважених $V_{взв}$ і насосів (донних), що несуться $V_{вл}$.

Алгоритм розрахунку:

За вказаною в завданні значенні середньої каламутності річки τ_0 визначають середню витрату зважених наносів R_n за формулою:

$$R_H = \frac{\rho \cdot \bar{Q}}{10^3}, \text{ кг/с,} \quad (2.105)$$

де \bar{Q} – середньобагаторічна витрата води, м³/с; r_0 – середньобагаторічна розрахункова каламутності води, г/м³.

Середньобагаторічний об'єм за рік зважених наносів:

$$\bar{V}_{\text{взв}} = \frac{31,54 \cdot R_H}{\rho_{\text{взв}}}, \text{ млн.м}^3 \quad (2.106)$$

де $\rho_{\text{взв}}$ – щільність зважених наносів.

Об'єм за рік зважених наносів, який заповнює ложе водосховища за $t_{\text{сл}}$ років:

$$V_{\text{взв}} = \bar{V}_{\text{взв}} (1 - \delta) t_{\text{сл}}, \text{ млн.м}^3, \quad (2.107)$$

де σ – транзитна частина зважених наносів, які виносяться в НБ, приймається $\sigma=0,20-0,30$, $(1 - \sigma)$ – доля тих, що відкладаються.

Об'єм наносів, що відкладаються за $t_{\text{сл}}$ років:

$$V_{\text{сл}} = 31,54 \bar{R}_H \frac{\beta}{\rho} t_{\text{сл}}, \text{ млн.м}^3, \quad (2.108)$$

де β – відношення мас ваблених і зважених наносів. Для Дніпра 0,05-0,1; $\rho_{\text{вабл}}$ – щільність ваблених наносів, кг/м³. Сумарний об'єм зважених і наносів, що несуть ($V_{\text{зв}}+V_{\text{вабл}}$). З урахуванням коефіцієнта $j=1,1-1,20$ додаткового надходження (руйнування берегів та вітрової ерозії):

$$V_H = \varphi(V_{\text{взв}} + V_{\text{сл}}), \text{ млн.м}^3 \quad (2.109)$$

Приймають з умови замулення водосховища мертвий об'єм $V_{\text{мо}} = V_H$.

2.8.2 Оподнакопичення як функція району седиментації

Показники накопичення опадів (середні річні значення):

об'єм відкладень,	R_o , тыс. м ³ ;
модуля замулювання,	M_z , м ³ / км ² ;
втрати об'єму на замулення,	R_o / W_o , %.

Показник накопичення опадів (залежить від району) – середній річний об'єм відкладень. Основні фактори накопичення опадів наведені в табл.2.8.1.

Таблиця 2.8.1 – Фактори накопичення опадів

Назва	Показник, од.вим.
Об'єм водойми,	W_0 , тис. м ³
Площа водозбору,	F , км ² ;
Шар акумуляції,	W_0/F , мм;
Протяжність експлуатації,	T , років;
Річна сума опадів,	X , мм;
Середній ухил водозбору,	I_F , %;
Середній ухил русла,	I_R , %;
Розораність,	P , %;
Лесистість,	Λ , %;
Заболоченність водозбору,	δ , %.

При цьому оцінюються показники кількості води (табл. 2.8.2.).

Таблиця 2.8.2 – Показники кількості води

Параметри	Одиниці виміру
Колір	Градус
Запах	Бали
Мутність	мг/дм ³
Водний показник	Рн
Лужність загальна	HCO_3^- /дм ³
Біокарбонати	(HCO_3^-) мг/дм ³
Сухий залишок	мг/дм ³
Жорсткість	мг-екв/дм ³
Кальцій	(Ca^{2+}) , мг/дм ³
Магній	(Mg^{2+}) , мг/дм ³
Натрій та калій	$(\text{Na}^+ \text{ і } \text{K}^+)$, мг/дм ³
Нітрати	(NO_3^-) мг/дм ³
Перманганатна окислюваність	мгО/дм ³
Біохроматна окислюваність	мгО/дм ³
Нітрити	(NO_2^-) , мг/дм ³

Амоній (азот амонійний, аміак)	(азот амонійний, аміак), мг/дм ³
Загальний фосфор	Рмг/дм ³
Загальний азот	Нмг/дм ³

Середній річний об'єм відкладень має вигляд [Прыткова, 1980]:

$$R_0=f(X, K_x, F, W, T, I_F, n, p, \delta, A, \alpha) \quad (2.110)$$

де X – річна сума опадів за багаторічний період, K_x – модульний коефіцієнт річної суми опадів, α – вміст в ґрунті часток менш 0,01 мм.

Показники A і n визначаються для кожного седиментаційного району. Для кожного седиментаційного району відомі 2 види рівнянь регресії показників накопичення опадів по всіх аргументах:

$$y=a_0+a_1x_1+ a_2x_2+\dots + a_nx_n \quad (2.111)$$

$$\lg y = a_0+a_1 \lg x_1+ a_2 \lg x_2+\dots + a_n \lg x_n \quad (2.112)$$

де y – середній річний показник опадонакопичення; $x_1, x_2\dots x_n$ – незалежні змінні, $a_0, a_1, a_2\dots a_n$ – коефіцієнти регресії. Показник редуції n в залежності від часу експлуатації змінюється в діапазоні 0,4÷0,88 в лісостеповій зоні (Канівське та Київське водосховища) і в діапазоні 0,5÷1,0 – в степовій зоні (Кременчуцьке, Дніпродзержинське, Дніпровське, Каховське). [Прыткова, 1980]: Середня щільність відкладень γ_{cp} , т/м³:

$$\gamma_{cp} = \gamma_{0cp} ((1 + \alpha / (n + 1)) h_{cp}^n) \quad (2.113)$$

де γ_{0cp} – початкова щільність, т/м³; h_{cp} – середній шар відкладень в водоймі, см; α – параметр проточності водойми.

$$\gamma_{0cp} = 1,7d^{0,15}-0,3l^{0,2} + 0,01C^{0,9}_{HCl} \quad (2.114)$$

d – середній діаметр частинок відкладень; l – втрата при прожарюванні;

C_{HCl} – втрата при обробці HCl,%. Показник n визначається виразом:

$$n=0,064/d^{0,27} \quad (2.115)$$

$$\alpha = 0,06 (c/w)^{0,6} \quad (2.116)$$

$$\gamma_{0cp} = 1,7d^{0,15}-0,3l^{0,2} + 0,01C^{0,9}_{HCl} \quad (2.8.117)$$

де c/w – коефіцієнт водообміну, зазвичай $\alpha=0,66-0,32$.

Переважний вплив на замулення каскадних водойм визначається продуктами розмиву берегів і ложа, (18 ÷ 50% приходу наносів), органіки (1-4%), хемогенна седиментація (продукту, отриманного хімічним шляхом) – (7-13%). Скидається в нижній б'єф менше 2% опадів. Рівняння регресії повної наносоутримуючої здатності водосховищ має вигляд:

$$\lg \alpha_2 = 1,89 + 0,06 \lg (W/\Sigma Q) + 0,04 \lg \rho \quad (2.8.118)$$

Висновки до другого розділу

Розглянуто основні положення розробки інформаційної моделі замулення штучного водоймища – прототипу, заснованої на побудові групи спеціальних моделей, розроблених різними авторами, що визначають інтенсивність і динаміку цих процесів. Створення інформаційної моделі пов'язано безпосередньо з синтезом алгоритмів формування відповідних блоків інформаційної моделі на підставі опису механічних, біофізичних, хімічних, фізичних процесів, що визначають механізми утворення і перенесення компонентів мулу. Процедура створення інформаційної моделі передбачає аналіз властивостей і особливостей штучного водоймища, на основі вивчення фізико-географічних характеристик басейну водосховища, геологічних особливостей, характеристики вод, що надходить, кліматичні особливості, ґрунтів і рослинності, гідродинамічні режими, особливості проектного призначення ШВ, розміщення його на території басейну і регіону використання.

Моделювання замулення ШВ включає в себе встановлення залежностей інтенсивності замулення від глибини акваторії ШВ, моделювання замулення ШВ за різні періоди часу, моделювання замулення штучних водойм із застосуванням ГІС – технологій і даних ДЗЗ. Оцінка впливу на стан штучних водойм антропогенних чинників, характерних для території басейну ШВ.

При розрахунках можуть використовуватися різні спеціальні моделі процесів в залежності від набору вихідних даних і розв'язуваної задачі для оцінки елементів процесів муло-утворювання.

Загальна характеристика інформаційної моделі містить результати районування території штучного водосховища за станом водного середовища і намулу в аспекті

процесів муло-утворювання виконується з використанням зонального підходу на основі комплексної оцінки факторів замулення на базі диференціації джерел, які продукують речовини, що випадають в мул і виділення з них найбільш значущих. Інтегрована інформація містить відомості про ступінь забруднення вод, що потрапляють в ШВ, а також про питомі маси і об'єми зважених матеріалів.

Штучне водосховище описується як об'єкт інформаційного моделювання, дослідження, моніторингу наборами вхідних і вихідних змінних з визначенням зовнішніх чинників впливу. При цьому ШВ розглядається як єдина система з набором певних якостей. Багатоцільова задача екологічного моніторингу в даній роботі зводиться до задачі оцінки інтенсивності замулення і оцінки окремих процесів, що беруть участь в муло-утворюванні.

Поряд зі статистичними математичними моделями в інформаційну модель включені фізико-хімічні моделі, які описують фізико-хімічні закономірності модельованих процесів [38, 51]. Ці моделі видаються системами алгебраїчних і різних диференціальних рівнянь. Чисельні значення коефіцієнтів моделі за даними статистичної інформації знаходяться на основі рішення задачі ідентифікації.

Розробка інформаційної моделі здійснюється відповідно до спеціального алгоритма, що визначає порядок і технології формування елементів інформаційної моделі як об'єкта дослідження [39, 51]. Модуль інформаційної моделі, представлений в даному розділі, містить п'ять ключових моделей для розрахунку складових процесу муло-утворювання:

1. Морфометрична модель.
2. Модель території водозбору.
3. Модель водного балансу.
4. Модель процесів утворення продуктів життєдіяльності.
5. Модель створення донних відкладень з потоку.

Відповідна структура схеми приведена на рис. 2.9.1.

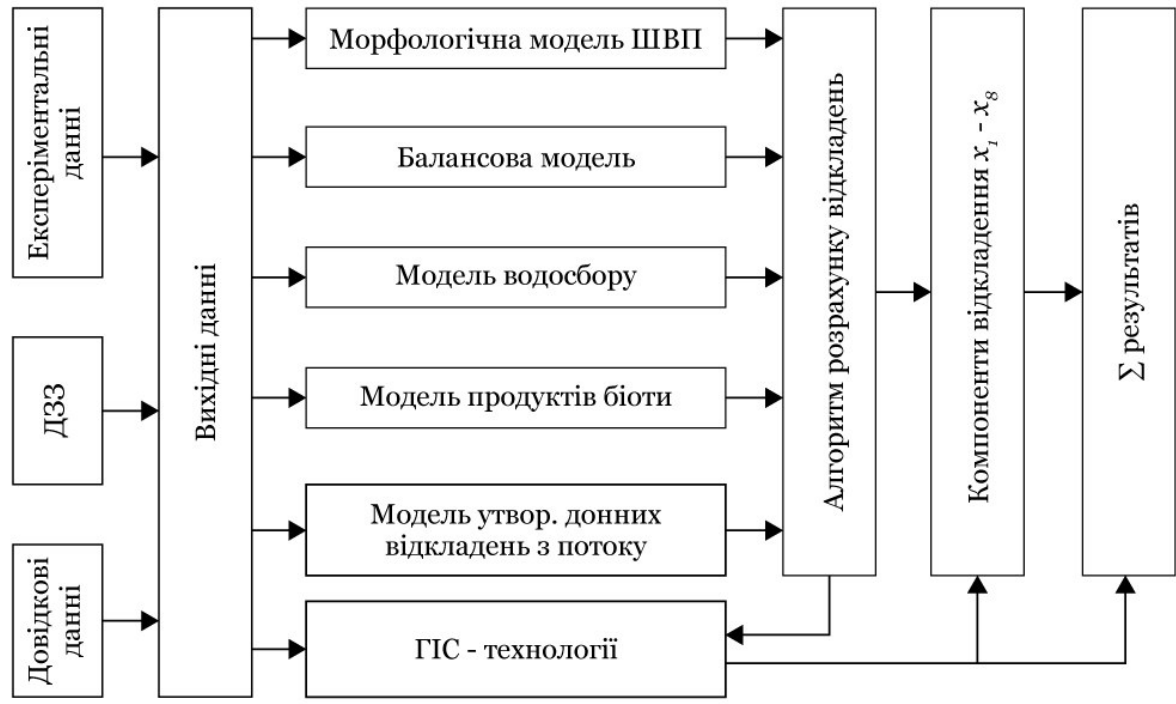


Рисунок 2.9.1. Математичні моделі структурної взаємодії оцінки утворення мулу водойми-прототипу

Кожна з зазначених моделей визначає відповідний обчислювальний модуль інформаційної системи як компонент загальної моделі, яка описує динаміку муло-утворювання. Це дозволяє оцінити і кількісно описати процеси муло-утворювання в штучному водоймищі–прототипі для подальшого порівняння з водосховищем-аналогом.

РОЗДІЛ 3. КРИТЕРІЇ АНАЛОГІЇ В ЗАДАЧАХ ОЦІНКИ ДИНАМІКИ ЗАМУЛЕННЯ ШТУЧНИХ ВОДОСХОВИЩ

3.1 Структура критеріїв аналогії

Критеріями вибору водойми – моделі (прототипу) водосховищ може слугувати комплекс основних характеристик – морфологічних, гідрологічних, фізико-хімічних і біологічних, а характеристики берегових зон водосховищ і прилеглих територій визначають вплив природних і антропогенних територіальних комплексів на формування якості води, структуру мулових відкладень, кількість речовин, що переносяться у воді, характер зміни глибини водойми по перетинах. Таким чином, для вибору водойм – моделей необхідно розробити систему критеріїв аналогії.

Важливим етапом створення моделі прототипу є налагодження і верифікація моделі. Проблемою є відсутність достатніх об'ємів інформації про екологічний стан ШВ, тому для вибору параметрів, що налаштовуються та їх вагових коефіцієнтів повинна бути розроблена відповідна методика оцінки ступеня аналогії або рівня подібності. В основу такої методики в роботі пропонується використовувати набори комплексних критеріїв різного рівня повноти, що визначаються кількістю частинних критеріїв, що входять в комплексний критерій з відповідними ваговими коефіцієнтами. Ці вагові коефіцієнти визначаються шляхом їх вибору на основі максимального рівня аналогії.

Побудова системи комплексних критеріїв є багатокритеріальним завданням. Для його вирішення слід визначити ієрархію критеріїв. Існують різні методи оптимізації за Парето. В багатокритеріальних задачах: скалярне ранжування, зважена сума, функція скаляризації Чебишева, метод зміни обмежень. З огляду на скалярний характер первинних критеріїв використаємо метод зваженої суми. Адитивності (зважена сума) має вигляд:

$$K_i = \sum_{j=1}^r c_j K_j \quad (3.1)$$

де r – кількість первинних критеріїв; C_j – коефіцієнт важливості (ваговий коефіцієнт первинного критерію k_j , при цьому $C_j \in [0,1]$). K_i – комплексний критерій зберігає впорядкованість за Парето для $C_j > 0$. При $C_j \geq 0$, c_j є слабким по Парето.

Рівень аналогії визначається коефіцієнтом невідповідності, який дорівнює модулю відношення різниці критеріїв аналогії порівнюваних водосховищ до їх середнього значення. У разі рівного розподілу нулю цього коефіцієнта аналогія є повною. Рівень аналогії визначається різницею обчислених комплексних критеріїв для пари віртуальних умовно ідентичних водосховищ. В якості віртуальних водосховищ використовуються дві еквівалентні частини одного і того ж водосховища. Очевидно, що для такої пари віртуальних ШВ граничне значення коефіцієнта невідповідності повинно наближатися до нуля. Віртуальні ідентичні водосховища формуються на обраному водосховищі шляхом фрагментації водосховища на малі елементи поперечними перетинами. Безліч парних і непарних елементів такої фрагментації, відповідно, відносяться до двох умовних ідентичних водойм, які порівнюються за обраними критеріями.

3.2 Первинні і комплексні критерії

Для розробки системи критеріїв, які необхідні для використання в методі аналогії для вирішення завдань аналізу замулення водосховищ, виберемо фізичні величини, пов'язані з досліджуваними характеристиками водойм, визначальними процесами замулення, які відповідно до прийнятої термінології, віднесемо до первинних або основним. Як відомо, для цих комбінацій для морфологічних і гідрологічних характеристик водосховища. До них відносяться l , t , v , a , ρ , φ (l – довжина, m – маса, t – час, v – швидкість, a – прискорення, ρ – щільність речовини, p – тиск, φ – кут, виміряний в радіанах). З цього переліку кут φ є безрозмірною величиною, l має розмірність довжини, at – розмірність швидкості, ρl^3 – розмірність маси, ρl^2 – розмірність тиску. Тому відразу можна написати наступні величин одиниць виміру і вони встановлюються довільно і незалежно. Використовуємо в першу чергу для опису морфометричєких характеристик водойм систему LMT, в якій за основні величини приймаються довжина, маса і час. Побудуємо безрозмірні комбінації: $Vt/$

$l, at/v, \rho l^3/m, \rho l^2/p, \varphi$ [53]. Цей набір основних (первинних) величин є першою групою критеріїв аналогії, впершу чергу він буде використовуватися при багатокритеріальному порівнянні характеристик водосховищ в системі відповідних одиниць виміру для оцінки їх ступеня аналогії.

Первинні критерії, розглянуті в розділі, мають різну фізичну природу і тому різну розмірність. Це ускладнює вирішення багатокритеріальних задач. У зв'язку з цим розроблені різні методи нормування критеріїв. Вони передбачають заміну критерію в природних одиницях виміру його відношення до деякої нормованої величини, яка має розмірність нормованого критерію. Після нормування простір існування критеріїв симетричний, оскільки всі використовувані первинні критерії, координати просторів, приведені до безрозмірного вигляду. Проблема полягає у виборі нормованого дільника. Одним з найбільш поширених є метод нормування до максимуму [54]. Недолік його в тому, що чим довше його максимально можлива величина, тим менше його нормоване значення. Таким чином ієрархія нормованих критеріїв, їх співвідношення на шкалі порівняння буде визначатися не тільки їх фізичною значимістю для модельованого процесу, а й максимальним значенням діапазону його зміни [55-58].

Для вирішення цієї проблеми використовується підхід, відповідно до якого первинні (приватні) критерії $K_i (i = \overline{1, n})$ об'єднуються певним способом в складові комплексні критерії $K_j (j = \overline{1, m})$.

Ці критерії далі оптимізуються за функціоналом, який забезпечує максимальну відповідність розглянутих ШВ в системі обраних критеріїв. Різна значимість первинних критеріїв при формуванні комплексного адитивного критерію враховується за допомогою вагових коефіцієнтів, що призначаються експертами:

$$K = \sum_{i=1}^n C_i \left(\frac{K_i}{K_{i0}} \right) \quad \sum_{i=1}^n C_i = 1 \quad (3.2)$$

Тут K_i – i -й первинний критерій, K_{i0} – i -й нормований дільник, C_i – ваговий коефіцієнт i -го критерію; n – число первинних критеріїв.

Для спрощення роботи експертів за призначенням вагових коефіцієнтів використовуємо ранжування за важливістю, тобто за ступенем впливу відповідного фактора на процеси замулення. Ранги переводяться в вагові коефіцієнти.

Передбачається, що первинному критерію присвоєно номер призначеного йому рангу, n відповідає старшому рангу. Для групи первинних критеріїв, для яких різниця по важливості не є очевидною, використовуємо мультиплікативний комплексний критерій:

$$K_m = \prod_{i=1}^n K_i \quad (3.3)$$

Цей критерій не вимагає нормування первинних критеріїв.

Для оцінки в абсолютних одиницях виміру використовуємо такі фізично зрозумілі співвідношення, вибір яких є результатом феноменологічного аналізу. Площі в ШВП і ШВА співвідносяться (α_{Π} – коефіцієнт відношення площ):

$$S_A = \alpha_{\Pi} S_{\Pi} \quad (3.4)$$

Площі водозбору $S_{ВП}$, $S_{ВА}$ співвідносяться:

$$S_{ВА} = \alpha_B S_{ВП} \quad (3.5)$$

$$\alpha_B = \frac{S_{ВА}}{S_{ВП}} \quad ((3.6)$$

Об'єми ШВП і ШВА V_{Π} , V_A співвідносяться:

$$V_A = a_0 V_{\Pi}, \quad a_0 = \frac{V_A}{V_{\Pi}}. \quad (3.7)$$

Довжина берегової лінії, l_{Π} , l_A :

$$l_a = a_D l_{\Pi}, \quad a_D = \frac{l_A}{l_{\Pi}}. \quad (3.8)$$

Для оцінки аналогії в абсолютних одиницях використовуємо абсолютні значення характеристик ШВ.

Критерії аналогії оцінки в абсолютних одиницях (додаткових) підпорядковуються таким співвідношенням в разі максимальної аналогії.

$$a_0 \cong a_D^3, \quad a_{\Pi} \cong a_D^2, \quad a_0 \cong a_{\Pi} a_D.$$

Елементи бази даних характеристик, які використовуються при створенні базового списку первинних критеріїв містять наступну інформацію. Критерії за групами характеристик представлені в такий спосіб:

1. Морфометричні характеристики.
2. Характеристика території водозбору.
3. Характеристика балансу води, що поступає.
4. Надходження речовин з повітря.
5. Продукти життєдіяльності.

Комплексні критерії формуються по цих групах. Для групи 1 комплексні критерії визначаються наступними виразами:

$$\begin{aligned}
 K_{11} &= C'_{11}K_1 \\
 K_{12} &= C'_{21}K'_1 + C'_{22}K'_2 \\
 K_{1l} &= C'_{l1}K'_1 + C'_{l2}K'_2 \cdots + C'_{ll}K'_l
 \end{aligned}
 \tag{3.9}$$

Аналогічно для групи 2:

$$\begin{aligned}
 K_{21} &= C''_{11}K''_1 \\
 K_{22} &= C''_{21}K''_1 + C''_{22}K''_2 \\
 &\dots\dots\dots \\
 K_{2m} &= C''_{m1}K''_1 + \cdots + C''_{mm}K''_m
 \end{aligned}
 \tag{3.10}$$

Далі за цим же алгоритмом формуються комплексні критерії для виділених груп.

3.3 Оцінка рівня аналогії штучних водосховищ прототипу і аналога

У зв'язку з відсутністю великої і регулярної статистичної інформації для широкого кола екологічних параметрів штучних водосховищ використання статистичних методів при побудові системи критеріїв для оцінки їх аналогії вкрай важко і не завжди обгрунтовано. Тому для вибору корегуємих параметрів критеріїв

аналогії та їх вагових коефіцієнтів повинна бути розроблена відповідна методика детермінованої оцінки ступеня аналогії або рівня аналогії ШВ.

В основу такої методики в роботі пропонується використовувати набори комплексних критеріїв різного рівня повноти, що визначаються кількістю приватних критеріїв, що входять в комплексний критерій з відповідними ваговими коефіцієнтами. Ці вагові коефіцієнти визначаються шляхом їх вибору на основі експертних оцінок значущості характеристик, що визначають значення критерію аналогії. Рівень аналогії визначається коефіцієнтом аналогії, який дорівнює модулю відношення різниці критеріїв аналогії порівнюваних водосховищ до їх середнього значення [59-62].

Для визначення виду детермінованого критерію аналогії ШВ введемо такі позначення: n – максимальне число використовуваних первинних критеріїв; m – максимальна кількість комплексних критеріїв; l – кількість досліджуваних ШВ; K_j – комплексний критерій, $j = \overline{1, m}$; k_i – первинний критерій $i = \overline{1, n}$; C_{ji} – ваговий коефіцієнт i -го первинного критерію в j -ом комплексному критерію, який підпорядковується умові:

$$\sum_{i=1}^n C_{ji} = 1. \quad (3.11)$$

Визначимо коефіцієнт Q_{kj} , мірою аналогії для j -го комплексного критерію і кожного k -го ШВ, $k = \overline{0, 1}$ ($k = 0$ для ШВ-прототипу).

$$Q_{ij}^0 = \frac{|K_{0j} - K_{kj}|}{K_{0j} + K_{kj}}, \quad (3.12)$$

де $k=0$ для ШВП; K_{0j} – j -й комплекс критерію для ШВП і ШВА; K_{kj} – j -й комплексний критерій для кожного k -го ШВ.

Опускаючи індекс k , запишемо комплексні критерії K_1, K_2, \dots, K_n у вигляді:

$$\begin{aligned}
K_1 &= C_{11}k_1 \\
K_2 &= C_{21}k_1 + C_{22}k_2 \\
K_3 &= C_{31}k_1 + C_{32}k_2 + C_{33}k_3 \\
&\dots\dots\dots \\
K_j &= C_{j1}k_1 + C_{j2}k_2 + \dots + C_{jj}k_j \\
&\dots\dots\dots \\
K_n &= C_{n1}k_1 + C_{n2}k_2 + \dots + C_{nn}k_n.
\end{aligned}
\tag{3.13}$$

Тобто кожен $j+1$ критерій K_j відрізняється від попереднього на величину одного доданка (одного первинного критерію) вихідних віртуальних водойм. Для змінених віртуальних водойм обчислюються критерії аналогії і оцінюється їх відмінність з вихідним значенням, відповідним віртуальним ідентичним ШВ [63].

Для визначення виду детермінованого критерію аналогії ШВ введемо такі позначення: n - максимальне число використовуваних первинних критеріїв; m - максимальна кількість комплексних критеріїв; l – кількість досліджуваних ШВ; K_{j-} комплексний критерій, $j = \overline{1, n}$; k_{i-} первинний критерій $i = \overline{1, n}$; C_{ji} – ваговий коефіцієнт i -го первинного критерію в j -му комплексному критерії, який підпорядковується умові:

$$\sum_{i=1}^n C_{ji} = 1.
\tag{3.14}$$

Первинні критерії ранжовані за їх умовною вагою та визначаються порядковим номером в узагальненому списку первинних критеріїв. Базові (вихідні) списки представлені групами однорідних первинних критеріїв. Систему комплексних критеріїв формуємо покроково, доповнюючи на кожному кроці в попередній комплексний критерій доданок в формі первинного критерію. З узагальненого переліку: матриця вагових коефіцієнтів комплексних критеріїв має вигляд:

$$\|C_m\| = \begin{vmatrix} C_{11} \\ C_{21}C_{22} \\ C_{31}C_{32}C_{33} \\ \dots\dots\dots \\ C_{i1}C_{i2}\dots C_{ij} \\ \dots\dots\dots \\ C_{n1}C_{n2}\dots C_{nj}\dots C_{nm} \end{vmatrix} \quad (3.15)$$

Очевидно, що для випадку: $\bar{S}_\Pi = \bar{S}_A$

$$\begin{aligned} \bar{S} &= \bar{S}_\Pi + \bar{S}_A : |\bar{S}| = |\bar{S}_\Pi| + |\bar{S}_A|; \\ \|\bar{S}_\Pi \bar{S}_A\| &= \bar{S}_\Pi^2 = \bar{S}_A^2; \\ S_\Pi &= |\bar{S}_\Pi|, \quad S_A = |\bar{S}_A|. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Тоді комплексні критерії K_j визначаються матричним добутком:

$$|K_j| = \|C_{ij}\| [k_j] \quad (3.17)$$

де $\|C_{ij}\|$ – матриця вагових коефіцієнтів, $\|K\|$ – матриця-стовпець комплексних критеріїв аналогії, $[k_j]$ – матриця-стовпець коефіцієнтів відмінності (розбіжності) ШВ. Для визначення значень вагових коефіцієнтів використовуються експертні оцінки. $j=1$ відповідає максимальним значенням коефіцієнта C_{ij} $j=n$ – мінімального. При цьому:

$$\sum_{y=1}^n C_{ij} = 1. \quad (3.18)$$

Нехай число експертів дорівнює N , число вагових коефіцієнтів дорівнює $n(j=1, n)$, значення j -го коефіцієнта, призначеного S експертом позначимо C_{sj} ($s=1, N$). Отримаємо наступні результати експертних висновків для i -го комплексного критерію, індекс i для простоти запису опускаємо.

$$\text{Експерт 1} \quad C_{11}C_{12}C_{13}\dots C_{1n}$$

Експерт 2	$C_{21} C_{22} C_{23} \dots C_{2n}$
Експерт ν	$C_{\nu 1} C_{\nu 2} C_{\nu 3} \dots C_{\nu n}$
Експерт N	$C_{N1} C_{N2} C_{N3} \dots C_{Nn}$

Тоді усереднюючи значення C_{sj}^* , призначеними експертами по числу експертів, знайдемо значення вагових коефіцієнтів C_{sj} .

$$C_{sj} = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N C_{sj}^*. \quad (3.19)$$

Для оцінки ступеня узгодженості думок експертів про ранжирування експертів, використаний коефіцієнт конкордації W , який змінюється в межах від 0 до 1:

$$W = \frac{12 \sum_{i=1}^{i=n} \left[\sum_{j=1}^{j=m} (x_{ij}) - 0,5m(n+1) \right]^2}{m^2(n^3 - n)} \quad (3.20)$$

де m – число експертів, n – число критеріїв, ранг x_{ij} вказує місце, яке займає в послідовності критеріїв, визначених j -м експертом, i -й критерій.

Введемо векторний образ дискретизованного ШВ по елементарним площам:

$$\begin{aligned} \bar{S}_\Pi &= \bar{S}_\Pi(S_1, S_3, \dots, S_{2M-1}) \\ \bar{S}_A &= \bar{S}_A(S_2, S_4, \dots, S_{2M}) \end{aligned} \quad (3.21)$$

При повному співпадінні ШВП і ШВА по площі скалярний добуток їх дискретних образів максимальний. Міра невідповідності визначається за аналогією з коефіцієнтом кореляції сигналів:

$$\begin{aligned} \cos \gamma &= \frac{\|\bar{S}_\Pi \bar{S}_A\|}{S_\Pi S_A} \\ \gamma &= \arccos \frac{\|\bar{S}_\Pi \bar{S}_A\|}{S_\Pi S_A} \end{aligned} \quad (3.22)$$

$$\|\bar{S}_\Pi \bar{S}_A\| = \bar{S}_\Pi \bar{S}_A \cos \gamma. \quad (3.23)$$

3.4 Аналіз міри аналогії (міри невідповідності)

Для перевірки адекватності системи критеріїв аналога використовуємо запропонований в роботі підхід, заснований на розбитті водойми – моделі (найбільш вивченої водойми) на два ідентичних віртуальних водосховищ ІВВ шляхом його дискретизації. Для цього водойму в площині дзеркала при НІР розбиваємо поперечними перетинами на N ділянок. Кожній ділянці присвоюються відповідний порядковий номер (вниз за течією). Далі безліч дискретних елементів ШВ ділиться на дві віртуальні водойми. Одна ІВВ містить суму непарних елементів (цю водойма умовно віднесемо до водойми-прототипу (ВІІ)). Друга ІВВ утворюється сумою парних елементів [64-67]. Цю ШВ віднесемо до водойми-аналогу (ШВА). Нумерація елементів вихідного водойми і віртуальних водойм здійснюється у відповідності з наступною таблицею.

Таблиця 3.3.1 – Нумерація елементів вихідного водойми

Індекси	Номери індексів							
i	1	2	3	4	5	...	$N - 1$	N
$2i$		2		4		...		$2M$
$2i - 1$	1		3		5	...	$2M - 1$	

Площі віртуальних водойм прототипу S_{II} і аналога S_A визначаються наступними виразами:

$$S_{II} = \sum_{i=1}^M \Delta S_{2i-1}, \quad (3.24)$$

$$S_A = \sum_{i=1}^M \Delta S_{2i} \quad (3.25)$$

При цьому виконується наближена рівність:

$$S_M \approx S_A. \quad (3.26)$$

Рівність тим точніше, чим менше величина дискретних елементів.

У межі при:

$$\Delta S_{2i} \rightarrow 0; \Delta S_{2i-1} \rightarrow 0 \quad S_M = S_A : \quad S = S_M + S_A :$$

де S – загальна площа ШВ.

Слід зазначити, що поділ на віртуальні водойми може бути визначено також по довжині берегової лінії. В цьому випадку площі дискретних елементів будуть відрізнятися, при цьому різниця може бути суттєвою. Ще один спосіб дискретизації може бути заснований на дискретизації об'ємів води, укладених в вирізаних двома перетинами, нормальними до площі дзеркала ШВ при НПР, обмеженими поверхнею дна між двома перетинами.

Міра невідповідності визначається різницею обчислених комплексних критеріїв для пари умовних ідентичних водосховищ. В якості ідентичних водосховищ використовуються дві еквівалентні частини одного і того ж водосховища. Очевидно, що для такої пари ШВ граничне значення коефіцієнта аналогії повинно наближатися до нуля. Параметри критеріїв аналогії, таким чином повинні визначатися з умови мінімізації критерію аналогії. За цієї умови визначається структура критерію аналогії і його вагові коефіцієнти. Умовні ідентичні водосховища формуються на обраному водосховищі шляхом фрагментації водосховища на малі елементи поперечними перетинами. Безлічі парних і непарних елементів такої фрагментації, відповідно, відносяться до двох умовних ідентичних водойм, які порівнюються за обраними критеріями [67].

Для оцінки зв'язку значень критерію аналогії і ступеня відмінності характеристик порівнюваних ШВ введемо дискретно кількісні відмінності для ідентичних в раніше обумовленому сенсі ШВ (ІШВ). Для цього дискретно будемо змінювати характеристики водойм, додаючи до однієї частини ШВ елементи іншої. Тобто частина непарних елементів додаватиметься до парних, тим самим зміняться характеристики вихідних віртуальних водойм. Для змінених віртуальних водойм обчислюються критерії аналогії, і оцінюється їх відмінність з вихідним значенням, відповідним віртуальним ідентичним ШВ [68].

Область можливих рішень у виборі водойми-прототипу визначається мірою аналогії при реалізації критеріїв аналогії. Визначення критичного рівня аналогії, після якого відповідність характеристик ШВП (ШВ-прототип) і ШВА (ШВ-аналог) є неправдоподібним і визначається дослідним шляхом, порівнянням реальних процесів

замулення на інтервалі, достатньому для оцінки динамічних характеристик цього

процесу, швидкості накопичення маси замулу $\frac{dM_{\Pi}}{dt}$ $\frac{dM_a}{dt}$ в ШВП і ШВА, відповідно:

$$\frac{\Delta M_{\Pi}}{\Delta t} ; \quad \frac{dM_{\Pi}}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta M_{\Pi}}{\Delta t} \quad \text{та} \quad \frac{dM_a}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta M_a}{\Delta t} .$$

Другий шлях – моделювання процесів замулення ШВП і ШВА. Очевидним фактом є точний збіг значень критеріїв аналогії, обчислених для ШВП і ШВА, співпадаючих абсолютно за всіма вимірюваним характеристикам. Це відповідає тотожному збігу водойм. Виникає завдання визначення міри аналогії, при якій ШВП і ШВА не є близькими по їх морфометричним, біологічним та іншим властивостям. Найбільш обґрунтованим методом визначення такого завдання є експериментальний метод, який дозволив би визначити відповідність завдання аналогії і помилки визначень досліджуваних процесів замулення в об'ємних, просторових і часових координатах [69]. Очевидно, що такий експеримент практично неможливий. Він передбачає великі матеріальні і часові витрати. Інший метод, запропонований в даній роботі, полягає в експертному підході до оцінки міри аналогії з подальшою її коригуванням при накопиченні статистичних даних про процеси замулення.

Значення рівня аналогії залежить від характеристик ШВ, за якими обчислюються відповідні критерії, а також від інтервалу часу, на якому здійснюється прогноз процесу замулення в водоймі-аналогу. На рис. 3.3.1 представлені графіки випадання мулу в ШВП і ШВА в часі.

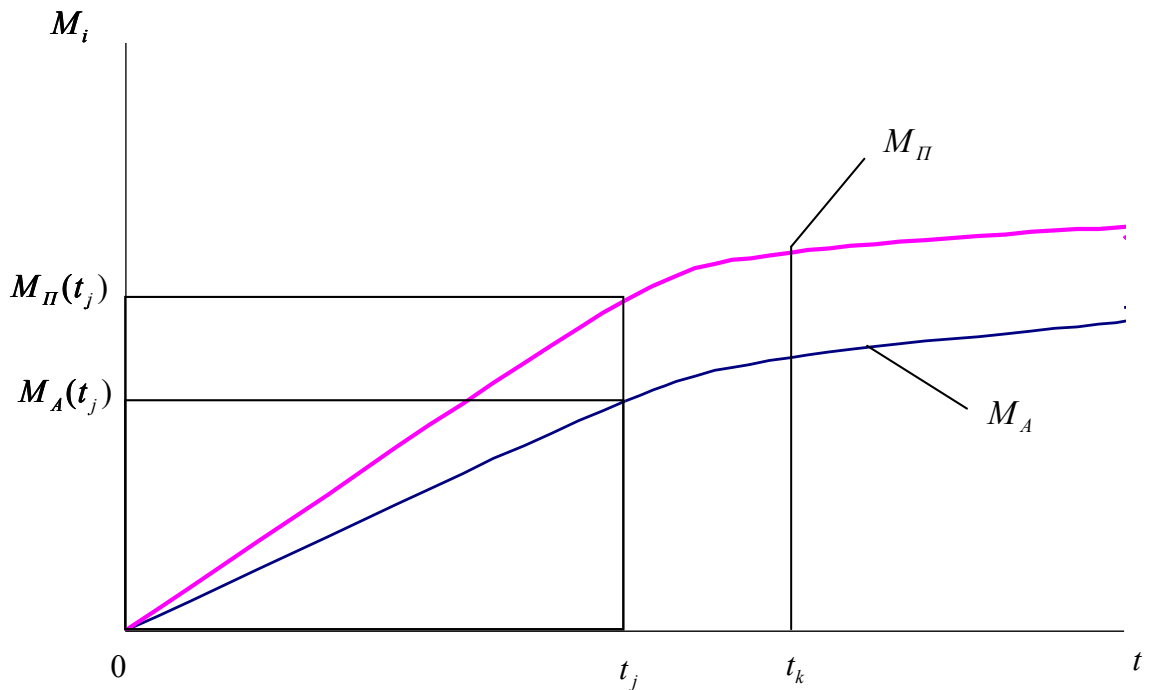


Рисунок 3.3.1. Зміна відносної маси M_{Π} мулу в штучних водоймах, M_A — маси мулу в ШВП і ШВА, відповідно

З графіка видно, що величина розбіжності значень маси мулу, що утворився в ШВП і ШВА росте в часі. До певного значення міра невідповідності, δM , яка визначається виразом:

$$\delta M = |M_{\Pi}(t_j) - M_A(t_j)| \quad (3.27)$$

росте в часі і в момент часу t_k досягає критичного значення, тобто, з цього моменту можна говорити про відповідність прогнозу замулення водойми-аналога на основі кількості моделей і початкових умов. З моменту часу t_k слід виконати коригування моделі або почати новий прогноз, використовуючи нові уточнені вихідні дані для опису процесу замулення водойми-аналога [70-72].

Зміна різниці мас новоствореного мулу в ШВП і ШВА представлено на рис. 3.3.2, а на рис.3.3.3 представлений графік зміни відносних мас мулу в ШВП і ШВА від початкової до критичної точки.

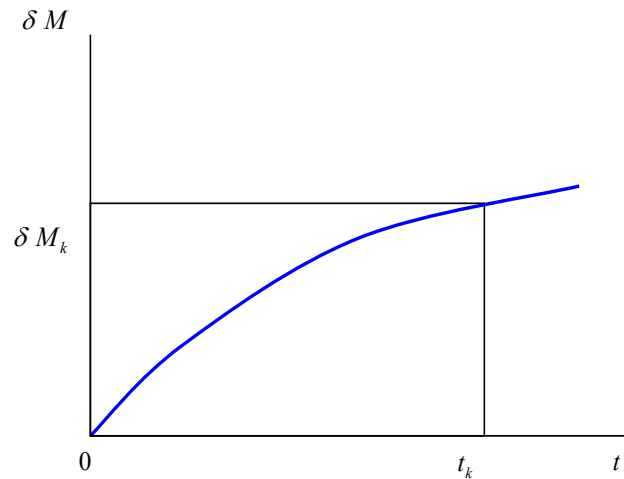


Рисунок 3.3.2. Зміна різниці мас накопичуються маси мулу в ШВП і ШВА, відповідно (t_k - критична точка аналогії).

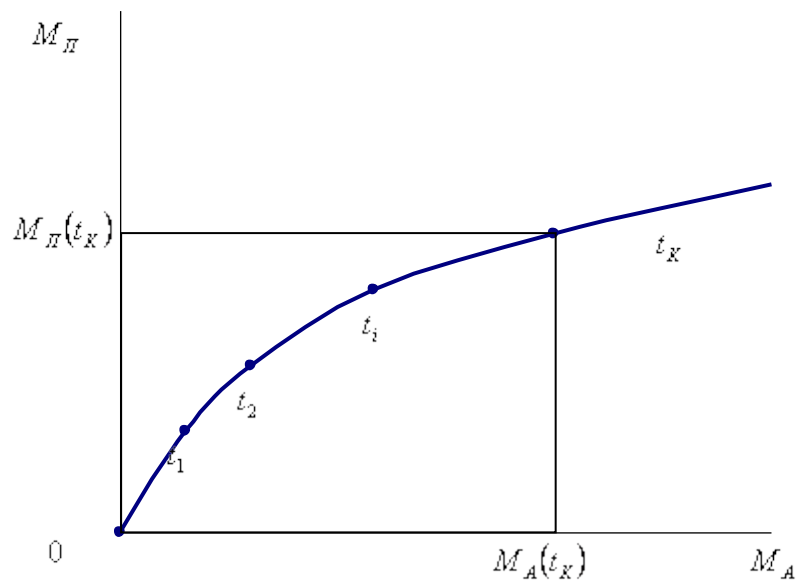


Рисунок 3.3.3. Межа застосованості методу аналогії по аргументу тривалості (t_k – критична точка аналогії).

Відповідно до (3.27) в якості межі відмінності або невідповідності запропонований коефіцієнт відмінності (невідповідності або розбіжності), далі коефіцієнт відмінності Q_{Kj}^0 , де індекс K відповідає K -му водойми-аналогу, j –

відповідає j -му комплексному критерію аналогії. Опускаючи для зручності індекс запишемо вираз для оцінки рівня невідповідності ШВП і ШВА у вигляді:

$$Q_j^0 = \frac{|K_{0j} - K_j|}{K_{0j} + K_j} \quad (3.28)$$

При повній аналогії ШВП і ШВА маємо коефіцієнт відмінності (невідповідності)

$$K_{0j} \equiv K_j \quad (3.29)$$

при цьому $Q_j^0 = 0$. Очевидно, що рівень відмінності ШВ може бути як завгодно великим.

Задамо значення K ; в долях K_{0j} , коефіцієнт міри відповідності a :

$$K_j = aK_{0j} \quad (3.30)$$

Де $a = 0 \div 1$. Очевидно, що при $a = 1$ маємо повну відповідність ШВП і ШВА, а при $a = 0$ – максимальну невідповідність відповідно до прийнятого його визначенням. Підставляючи (3.22) в (3.23), отримаємо:

$$K_j^0 = \frac{2(1-a)}{1+a} \quad (3.31)$$

Задамося десятковими частками коефіцієнта a от $a=0$ до $a=1$ і обчислимо відповідні значення K_j^0 через 0,1.

Таблиця 3.3.1 – Оцінка міри невідповідності віртуальних водосховищ

α	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
K_j^0	2	1,63	1,33	1,08	0,86	0,66	0,5	0,35	0,22	0,11	0,0

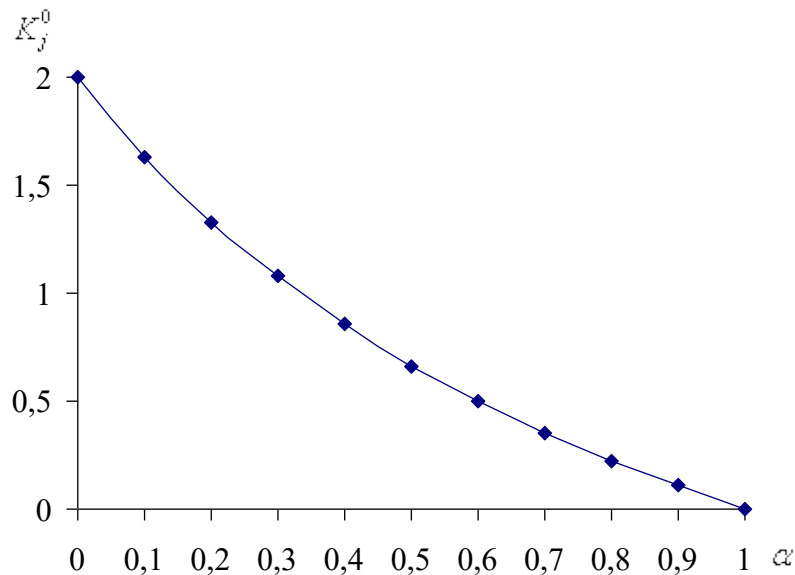


Рисунок 3.4.4. Зміна коефіцієнта невідповідності в залежності від ступеня відмінності віртуальних водосховищ

Для комплексного критерію можемо записати:

$$Q_j^0 = \frac{2(C_{j1}(K_{01} - K_1) + C_{j2}(K_{02} - K_2) + \dots + C_{jn}(K_{0n} - K_n))}{C_{j1}(K_{01} + K_1) + C_{j2}(K_{02} + K_2) + \dots + C_{jn}(K_{0n} + K_n)} \quad (3.32)$$

Використовуючи підстановку $K_i = a_i K_{0i}$, $j = \overline{1, n}$, отримаємо:

$$K_j^0 = \frac{2(C_{j1}K_{01}(1 - a_1) + C_{j2}K_{02}(1 - a_2) + \dots + C_{jn}K_{0n}(1 - a_n))}{C_{j1}K_{01}(1 + a_1) + C_{j2}K_{02}(1 + a_2) + \dots + C_{jn}K_{0n}(1 + a_n)} \quad (3.33)$$

Тут $a_n = 0 \div 1$.

Слід зазначити, що первинні критерії, що входять в систему комплексних критеріїв, мають різну розмірність і різні діапазони їх значень. У зв'язку з цим адитивні комплексні критерії матимуть обґрунтований об'єктивний характер, якщо ваги доданків, в першу чергу, будуть визначатися ваговими коефіцієнтами. Для цього первинні коефіцієнти повинні бути приведені до безрозмірного вигляду у однаковому діапазоні змін [73].

Можна вирішити завдання оцінки ШВ на основі порівняння критеріїв обчислених за характеристиками ШВП і ШВА, які визначаються не абсолютними значеннями обчислюваних критеріїв, а на основі різниці їх значень, відповідно до:

$$A = 2 \left[C_{j1} \left(\frac{K_{01} - K_1}{K_{1\max}} \right) + C_{j2} \left(\frac{K_{02} - K_1}{K_{2\max}} \right) + \dots + C_{jn} \left(\frac{K_{0n} - K_n}{K_{n\max}} \right) \right] \quad (3.34)$$

$$B = \left[C_{j1} \left(\frac{K_{01} + K_1}{K_{1\max}} \right) + C_{j2} \left(\frac{K_{02} + K_2}{K_{2\max}} \right) + \dots + C_{jn} \left(\frac{K_{0n} + K_n}{K_{n\max}} \right) \right] \quad (3.35)$$

$$K_j^0 = \frac{A}{B} \quad (3.36)$$

де $K_{j\max}$ – максимальне значення діапазону зміни критеріїв K_{0j} та K_j . У такій формі адитивний критерій K_j^0 складається з доданків, які відображають різниці первинних критеріїв для ШВП і ШВА, відповідно в безрозмірному вигляді і єдиному масштабі зміни від 0 до 1.

У такій формі зміст первинних критеріїв визначається їх ваговими коефіцієнтами.

Введемо позначення:

$$\frac{K_{0i} - K_i}{K_{i\max}} = q_{1i} \quad (3.37)$$

$$\frac{K_{0i} + K_i}{K_{i\max}} = q_{2i} \quad (3.38)$$

$$K_j^0 = \frac{2 | C_{j1} q_{11} + C_{j2} q_{12} + \dots + C_{jn} q_{1n} |}{| C_{j1} q_{21} + C_{j2} q_{22} + \dots + C_{jn} q_{2n} |} \quad (3.39)$$

Поряд з коефіцієнтом невідповідності введемо коефіцієнт аналогії, який за змістом є зворотним по відношенню до коефіцієнта невідповідності. Коефіцієнт аналогії Q_j може бути обчислений як за відомими значеннями первинних критеріїв невідповідності, так і по комплексними критеріями. Оскільки коефіцієнт невідповідності K_j може бути представлений в двох видах – нормований і ненормований, відповідно і вирази для визначення критерію аналогії також запишемо в двох видах [74].

Для нормованих значень коефіцієнта маємо:

$$Q_j = \begin{cases} 1 & \text{если } K_j = 0 \\ 0 & \text{если } K_j = 1 \end{cases} \quad (3.40)$$

Проміжні значення визначаються наступним чином:

$$Q_j = 1 - n \quad \text{при } K_j = n; \quad n = 0 \div 1.$$

Для ненормованих значень:

$$Q_j = \begin{cases} 1 & \text{при } K_j = K_{j\min} \\ 0 & \text{при } K_j = K_{j\max} \end{cases} \quad (3.41)$$

Тут $K_{j\min}$, $K_{j\max}$ – мінімальні і максимальні значення ненормованих коефіцієнтів невідповідності.

Проміжні значення визначаються наступним чином:

$$Q_j = \frac{n}{100} \quad \text{при } K_j = K_{j\max} - \frac{n}{100}(K_{j\max} - K_{j\min}), \quad n = 0 \div 100.$$

3.5 Концепція послідовного аналізу і прогнозу стану ШВ на основі редуції критеріїв замулення

Нехай є два абсолютно ідентичних ШВ. У цьому випадку маємо граничні значення критерію аналогії $Q_n=1$, і значення критерію невідповідності:

$$Q_n = (Q_{n1} - Q_{n2}) / Q_n = 0, \quad (3.42)$$

$$Q_n = 0, \quad \text{при } Q_{n1} = Q_{n2}.$$

Інший граничний стан критеріїв порівняння відповідає абсолютній розбіжності критеріїв аналогії $Q_n=0$ і максимальне значення критерію невідповідності $Q_n=1$. Тобто значення критеріїв аналогії і невідповідності знаходяться в діапазоні $0 \div 1$. У цьому ж діапазоні змінюються і ймовірності збігу характеристик ШВ. На підставі феноменологічного аналізу можна стверджувати наступне. Якщо всі критерії розбіжності при порівнянні ШВ по процесам замулення мають максимальні значення, а значення критеріїв аналогії дорівнюють нулю, то ймовірність збігу характеристик замулення прямує до нуля. І навпаки, ймовірність збігу характеристик замулення наближається до одиниці при максимальному (одиниця) відповідно значень критеріїв аналогії ШВ і мініимальному значенні критеріїв розбіжності (нуль) [75].

Точне підтвердження кореляції значень критеріїв аналогії (невідповідності) з відповідними можливостями збігу динаміки процесів замулення вимагає великого об'єму статистичного матеріалу. Разом з тим висловлені міркування про імовірнісний характер процесів замулення і стохастичної відповідності процесів замулення в ШВП і ШВА представляються корисними для більш глибокого розуміння природи як самих процесів, так і їх порівняльного аналізу.

При порівняльному аналізі можливі дві моделі порівняння. Перша модель передбачає наявність одного ШВ – прототипу і n ШВ – аналогів. Друга модель – модель з редукацією, передбачає можливість використання в якості моделі – прототипу одного з ШВ – аналогів, найбільш близького до відповідного ШВА за своїми характеристиками по прийнятим критеріям аналогії. У першому випадку розглянемо систему ШВ, до складу якої входять ШВП і n ШВА. Використовуючи критерії аналогії або невідповідності, розглянемо пари порівняння ШВП, ШВА $_i$ ($i=1, n$). Позначимо критерії порівняння ШВП і ШВА $_i$ Q_i . Тоді маємо n значень Q_i для пар ШВ, відповідно:

$$\begin{aligned} Q_1 & (\text{ШВП}, \text{ШВА1}) \\ Q_2 & (\text{ШВП}, \text{ШВА2}) \\ & \dots\dots\dots \\ Q_n & (\text{ШВП}, \text{ШВAn}) \end{aligned} \quad (3.43)$$

Домовимось вважати, що збережена така ієрархічна послідовність, при якій виконуються нерівності:

$$Q_1 > Q_2 > Q_i > Q_n, \quad (3.44)$$

де Q_1 характеризує максимальне значення коефіцієнта аналогії в розглянутій послідовності. Попередній аналіз показав, що точність правильної оцінки прогнозу замулення ШВА на підставі даних прогнозу оцінки ШВП становить величину порядку 30% при значенні Q_i більше 0,65. Розрахунки проводилися на основі порівняння віртуальних моделей Самарського водосховища для різних рівнів невідповідності з використанням даних прямих вимірювань об'ємів муло-утворення [76].

Далі розглянемо другу модель порівняння – модель з редукацією. Ця модель відповідає випадку, коли в якості моделі – прототипу може бути обрана модель –

аналога з високими значеннями критерію аналогії даної пари ШВ. В цьому випадку розглядаються значення критерію аналогії для всіх можливих пар з розглянутого набору ШВ. Таким чином, в початковому стані для аналізу є наступні безліч ШВ: ШВП, ШВА1, ШВА2,... ШВА i ..., ШВAn.

Обчислимо дві групи критеріїв аналогії. Перша, аналогічна розглянутому випадку, тобто $Q_1, Q_2, \dots, Q_i, \dots, Q_n$, Друга група, в якій кожне ШВ порівнюється з кожним, представлена матрицею розміру $n \times n$, Q_{ij} :

$$Q_{ij} = \{ Q_{ij} \}, \quad (3.45)$$

де

$$\begin{aligned} & Q_{11} (\text{ШВА1}, \text{ШВА1}) \\ & Q_{12} (\text{ШВА1}, \text{ШВА2}) \\ & \dots\dots\dots \\ & Q_{1n} (\text{ШВА1}, \text{ШВAn}) \\ & Q_{21} (\text{ШВА2}, \text{ШВА1}) \\ & Q_{22} (\text{ШВА2}, \text{ШВА2}) \\ & Q_{23} (\text{ШВА2}, \text{ШВА3}) \\ & \dots\dots\dots \\ & Q_{nn} (\text{ШВAn}, \text{ШВAn}) \end{aligned} \quad (3.46)$$

Відповідно до гіпотези про близькість значень критеріїв аналогії і ймовірностей близькості процесів замулення на підставі правила множення ймовірностей, можемо записати для ієрархічної послідовності:

$$\text{ШВП} \rightarrow \text{ШВА1} \rightarrow \dots \text{ШВА}i \dots \rightarrow \text{ШВAn}, \text{ де } Q_1 > Q_2 > \dots Q_i > \dots Q_n,$$

Вирази для наближеного визначення коефіцієнтів аналогії:

$$\begin{aligned} Q_{1n} (\text{ШВА1}, \text{ШВAn}) &= Q_1 Q_2 \dots Q_i \dots Q_n \\ Q_{2n} (\text{ШВА1}, \text{ШВAn}) &= Q_2 \dots Q_i \dots Q_n \\ & \dots\dots\dots \\ Q_{in} (\text{ШВА}, \text{ШВAn}) &= Q_i \dots Q_n \end{aligned} \quad (3.47)$$

$$Q_{nn}(\text{ШВА}_n, \text{ШВА}_n) = 1$$

Дотримуючись цієї схеми в якості ШВП можна використовувати кожне ШВ системи в ієрархічній послідовності критеріїв аналогії тобто ШВА1 використовується в якості прототипу ШВП1 для ШВА2. Далі, як ШВП2 для ШВА3 використовується ШВА2. Будемо розглядати три системи порівняння [77]:

- система стандартна, рис. 3.5.1;
- система з незмінною інформацією (ентропія зростає), рис. 3.5.2;
- система з генерованою інформацією (ентропія зменшується на кожному кроці порівняння, оскільки здійснюються додаткові коригувальні вимірювання характеристик ШВ, яке слугує прототипом) (рис 3.5.3)

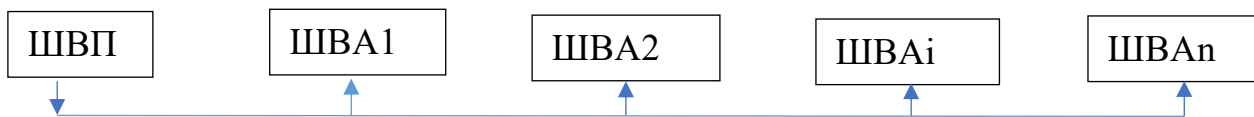


Рисунок 3.5.1 – Стандартна модель порівняння



Рисунок 3.5.2 – Модель порівняння з редукцією без додаткової інформації

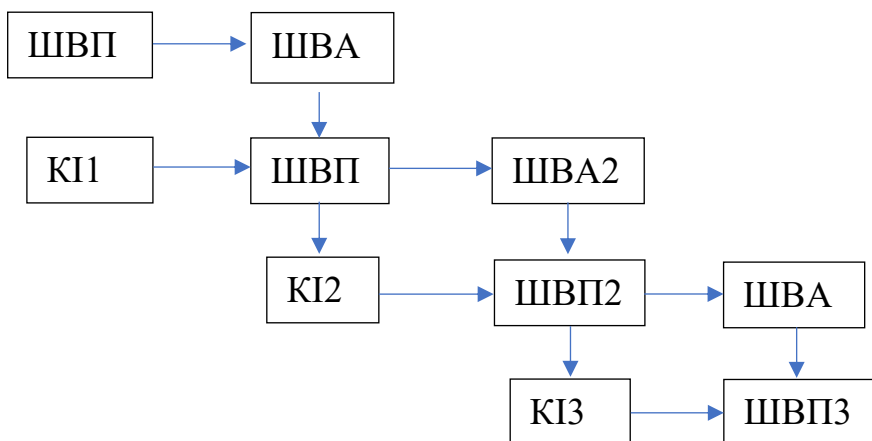


Рисунок 3.5.3 – Модель порівняння з редукцією і корегуючою інформацією (КІ)

3.6 Розрахунок системи первинних критеріїв

3.6.1 Критерії, засновані на морфометричних характеристиках водосховища

Стосовно до водосховищ будемо розрізняти наступні класи критеріїв: однофакторні, багатофакторні та комплексні. Однофакторні критерії слугують для порівняння по одному показнику, наприклад, глибина, площа, об'єм, довжина берегової лінії, довжина рівновіддаленої лінії штучного водоймища та ін. Багатофакторний однорідний критерій містить групу показників одного виду – морфологічних, гідрологічних і ін. Багатофакторний неоднорідний (комплексний) критерій включає в себе пов'язаний комплекс показників – морфометричних, гідрологічних, фізико-хімічні та гідробіологічних. Крім того, необхідно розглядати критерії аналогії як для водойми, так і для його території водозбору. З урахуванням отриманих безрозмірних одиниць виберемо безрозмірні одиниці виміру другого рівня.

До основних морфометричних характеристик відносяться:

- Географічне положення (широта, довгота і висота над рівнем моря).
- Площа басейну водосховища.
- Площа водосховища (площа водної поверхні) при НІР.
- Показник площі – відношення площі дзеркала водосховища до площі його водозбору.
- Питомий водозбір – відношення площі водозбору озера до площі дзеркала озера. Обернений до показника площі.
- Довжина водосховища – найкоротша відстань між двома найбільш віддаленими точками, розташованими на берегах водосховища, що вимірюється по поверхні водоймища. Лінія довжини ламаної для звивистих водосховищ.
- Найбільша ширина озера – найдовший діаметр (перпендикуляр) до лінії довжини озера.
- Середня ширина озера – відношення площі озера до його довжини.

– Велика вісь водосховища – лінія між двома найбільш віддаленими один від одного точками його контуру.

– Мала вісь водосховища – лінія, проведена між точками в місці найбільшої ширини водосховища перпендикулярно до великої осі.

– Коефіцієнт звивистості берегової лінії – відношення довжини берегової лінії до довжини окружності кола, що має площу, рівну площу водосховища.

– Максимальна глибина водосховища – максимальна вертикальна відстань від поверхні дзеркала озера до його дна при НПР.

– Крива зміни площі з глибиною (батиграфічна крива) – графік зв'язку між площею горизонтального перерізу водосховища на деякій глибині і цієї глибини.

– Крива зміни об'єму водосховища (крива об'ємів) – графік зв'язку між вмістом води, що знаходяться нижче горизонтального перетину озера на деякій глибині і цієї глибини. Батиграфічна крива і крива об'ємів дають можливість визначити величину дзеркала і об'єму води для будь-якого рівня.

– Об'єм води у водосховищі – кількісна характеристика простору, займаного водою при заданому рівні води.

– Середня глибина водосховища – відношення об'єму води в озері до площі поверхні водосховища.

– Коефіцієнт ємності – відношення середньої глибини до максимальної глибини.

– Показник відкритості – відношення площі озера до його середньої глибини.

– Середній ухил схилів водосховища визначається за формулою:

$$\tan(\Theta) = (0,5L + l_1 + l_2 + l_{n-2} + 0,5l_{n-1})h_{\max} / \Omega \quad (3.48)$$

де L — довжина берегової лінії, l — довжина окремих ізобат, n — число ізобат, h_{\max} — найбільша глибина озера, Ω — площа водосховища.

З цього набору 19-ти характеристик для визначення критерію аналогії в групі морфометричних характеристик водосховища виберемо такі, які визначаються відносними безрозмірними значеннями і не залежать від абсолютних розмірів. До таких відносяться: K_{11} — показник площі, K_{12} — питомий водозбір, K_{13} — відношення

середньої ширини до найбільшої ширини, K_{14} – відношення малої вісі до великої вісі, K_{15} – коефіцієнт звивистості, K_{16} – коефіцієнт ємності, K_{17} – показник відкритості, K_{18} – середній ухил схилів [78].

3.6.2 Критерії аналогії на основі характеристик басейну водозбору

До числа характеристик басейну водозбору належать такі:

- площа басейну F [км²];
- довжина басейну L_b [км], визначається як пряма, що з'єднує гирло річки і точку на вододілі, прилеглу до витoku річки;
- максимальна ширина басейну V_{\max} [км], яка визначається по прямій, нормальній до осі басейну в найбільш широкій його частині;
- середня ширина басейну V_{cp} [км], обчислюється за формулою:

$$V_{cp} = F/L_b, \quad (3.49)$$

де L_b – довжина басейну;

– висота поверхні водозбору H_{cp} [м], визначається по гіпсографічній кривій або розраховується за формулою:

$$H_{cp} = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^n H_i f_i, \quad (3.50)$$

де H_i – середня висота будь-яких висотних інтервалів в межах басейну, що обчислюється як середнє з відміток, що обмежують ці інтервали горизонталей (ізогипс), f_i – площа частини басейну між цими горизонталями, F – повна площа басейну, n – число висотних інтервалів [79-83];

– середній ухил схилів басейну i_{cp} [‰ або в частках одиниці], розраховується за формулою:

$$i_{cp} = \frac{\Delta H}{F} \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} l_R / l_{R+1} \quad (3.51)$$

де l_R та l_{R+1} – довжини суміжних горизонталей, ΔH – різниця відміток суміжних горизонталей (перетин рельєфу), F – повна площа басейну, n – число висотних інтервалів.

- число водойм; площа, км²;
- густина ярово- балкової мережі, км/км²;
- глибина базису ерозії, м;
- лісистість, %;
- розораність, %.
- середній ухил схилів басейну i_{cp} [‰ або в частках одиниці]

Ці характеристики басейну водозбору статистично пов'язані між собою по-різному залежно від характеристик території водозбору: лісостепова зона, степова зона.

На основі феноменологічного аналізу наведених характеристик як критеріїв аналогії для обґрунтування використання методу аналогів використовуємо відомі класичні співвідношення між морфометричними характеристиками водойм і водозборів:

- K_{21} – питомий водозбір (відношення площі водозбору до площі дзеркала),
- K_{22} – середній ухил схилів басейну i_{cp} [‰ або в частках одиниці];
- K_{31} – коефіцієнт ємності водойми (відношення об'єму водойми до річного стоку водотоку).
- K_{24} – лісистість, %;
- K_{25} – розораність, %;

Показник зовнішнього водообміну (коефіцієнт проточності).

$$D = \frac{W_{стгэс}}{V} \quad (3.52)$$

$W_{стгэс}$ – об'єм скидання води в нижній б'єф, V – об'єм водосховища.

Показник умовного водообміну стічних водойм (С.В.Григорьев, 1959).

$$\Gamma = \frac{W_{пр}}{W} \quad (3.53)$$

$W_{\text{ПР}}$ – об'єм припливу води в водойму за проміжок часу Δt , W – середній для Δt об'єму води водосховища.

Середній коефіцієнт водообміну водосховищ, враховуючи об'єми припливу і стоку.

$$D = \frac{W_{\text{ПР}} + W_{\text{СТ}}}{2V} \quad (3.54)$$

$$W_{\text{СТ}} = W_{\text{СТГЭС}} \quad (3.55)$$

3.6.3 Критерії, залежні від характеристики об'ємів води, яка надходить

У загальному вигляді рівняння водного балансу водосховища без холостих скидів за деякий час T може бути представлено наступною рівністю:

$$W_{\text{рег}} = W_{\text{прит}} \pm \Delta V - W_{\text{заб}} + W_{\text{пов}} - W_{\text{пот}}, \quad (3.56)$$

де $W_{\text{рег}}$ – зарегульований об'єм стоку, тобто той об'єм води, який пройшов за час T через створ гідро-вузол; $W_{\text{прит}}$ – приплив води у водосховищі за час T (приплив від вищерозміщеної ГЕС з урахуванням відстані між створами); ΔV – використаний об'єм водосховища за період T . (У формулі знак мінус відноситься до періоду наповнення, знак плюс – до періоду спрацювання водосховища); $W_{\text{заб}}$ та $W_{\text{пов}}$ – величини забираються з водосховища і повертаються в нього учасниками водогосподарського комплексу за час T об'єму стоку; $W_{\text{пот}}$ – втрати води з водосховища за час T , які включають втрати на фільтрацію, випаровування, льодоутворення та шлюзування. Якщо кожен член цього рівняння розділити на час T , то умова балансу стоку може бути виражена через відповідні витрати.

Як критерій аналогії виберемо відношення об'єму води, що поступає з рівняння балансу до об'єму водосховища в період НПР [83].

$$K_{31} = W_{\text{рег}} / W_{\text{НПР}} \quad (3.57)$$

3.6.4 Критерії аналогії для оцінки процесів надходження речовини з повітря

В якості критерію K_{41} використовуємо відношення маси речовини, яка знаходиться в одиниці об'єму повітря (m_a , m^3) до маси речовини, що знаходиться в одиниці об'єму води (M_w , m^3). Використовуються середні значення за рік.

$$K_{41} = m_a / M_w \quad (3.58)$$

3.6.5 Критерії, пов'язані з біологічною продуктивністю водосховища

В замкнутій водній екосистемі органічні речовини продукуються в основному в процесі фотосинтезу. Повне рівняння процесу продукції має вигляд:

1 300 000 кал променевої енергії + 106 C O + 90 H₂O + 16 NO + IPO₄ мінеральні елементи = 13 000 кал потенційної енергії, укладеної в 3258 р протоплазми (106 C, 180 H, 46 O, 16 N, 1 P, 815 г зольних речовин) + 154 02 + 1 287 000 кал. розсіяної теплової енергії (99%).

Це рівняння використовується для визначення продуктивності шляхом вимірювання кількості будь-якого з компонентів рівняння за певний період часу.

В якості критерію порівняння K_{51} використовують відношення маси речовин m_t , утворених за обраний період часу (рік) до маси води в об'ємі водосховища в період ННР $M_{ННР}$:

$$K_{51} = W_{pez} / W_{ННР} \quad (3.59)$$

Висновок до третього розділу

Розглянуто підходи до формування системи критеріїв для порівняння еквівалентності штучних водосховищ з позиції аналізу процесів муло-утворення. Визначено загальний вигляд первинних і комплексних критеріїв. Введено поняття аналогії водосховищ по заданих властивостях, пов'язаних з процесами муло-

утворення. Крім того, для зручності введено поняття невідповідності штучних водосховищ прототипу і аналога. Використовуючи поняття віртуальних водосховищ виконаний аналіз зв'язку значень рівня невідповідності водосховищ і значень відповідних критеріїв невідповідності. Виконано оцінку застосовності методу аналогій в залежності від рівня помилки кількісних показників замулення прогнозованих для водосховища-аналога в залежності від характеристик замулення водосховища-прототипу. Визначено п'ять груп первинних критеріїв:

1. Морфометричні характеристики.
2. Характеристики території водозбору.
3. Характеристики балансу води, що поступає.
4. Надходження речовин з повітря.
5. Продукти евтрофікації.

Для кожної групи обрані критерії, характерні для процесів, з оцінкою яких вони пов'язані.

Запропоновано концепцію послідовного аналізу і прогнозу стану ШВ на основі редукції критеріїв замулення шляхом транспонування функцій водойми- аналога у водойму-прототип з подальшим його використанням в цій якості.

РОЗДІЛ 4. ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ОЦІНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАМУЛЕННЯ ШТУЧНОГО ВОДОСХОВИЩА З ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДА АНАЛОГІЇ

4.1 Системи координат

Однією з особливостей великого ШВ є зональні особливості локальних властивостей окремих його ділянок, а також значна міра невизначеності берегового контуру, пов'язана як зі зміною рівня водосховища при його наповненні та спрацювання, так і з природними процесами розмивання берегів. У зв'язку з цим традиційні системи координат не забезпечують сталість зональної структури. Це призводить до необхідності враховувати при аналізі характеристик змінне число зон, що піддаються аналізу, що не завжди зручно. Для забезпечення сталості зональної структури введемо так звану зональну систему координат, яка дозволить зберегти число зон з відносно постійними в їх просторі екологічними і гідродинамічними характеристиками заданого складу параметрів.

Для великих водосховищ є характерним наявність великого набору територіальних зон, що мають значні розбіжності щодо їх локальних екологічних характеристик. Тому в дослідженні запропонований підхід до оцінки процесів утворення мулу, заснований на зональному підході.

Зональна система координат заснована на використанні лінії рівновіддаленої від змочуваних контурів берегів – лінія рівновіддалених контурів берегів (ЛРКБ), поперечних перерізів простору ШВ, а також горизонтальній площині, що збігається з площиною дзеркала ШВ в період НПР. Крім того, вводяться поперечні і поздовжні перерізи вертикальними до дзеркала води поверхнями. Поперечні перерізи задаються певною кількістю поперечних ліній на горизонтальній площині [84]. Контур берегової лінії описує лінію перетину в горизонтальній площині водної поверхні з береговою поверхнею і греблями крім зон впадання у водойму струмків, річок і штучних каналів [85-88]. У цих зонах контур берегової лінії директивно визначається

прямою, що з'єднує дві крайні точки водної горизонталі з береговою поверхнею (точки АВ, рис.4.1.1).

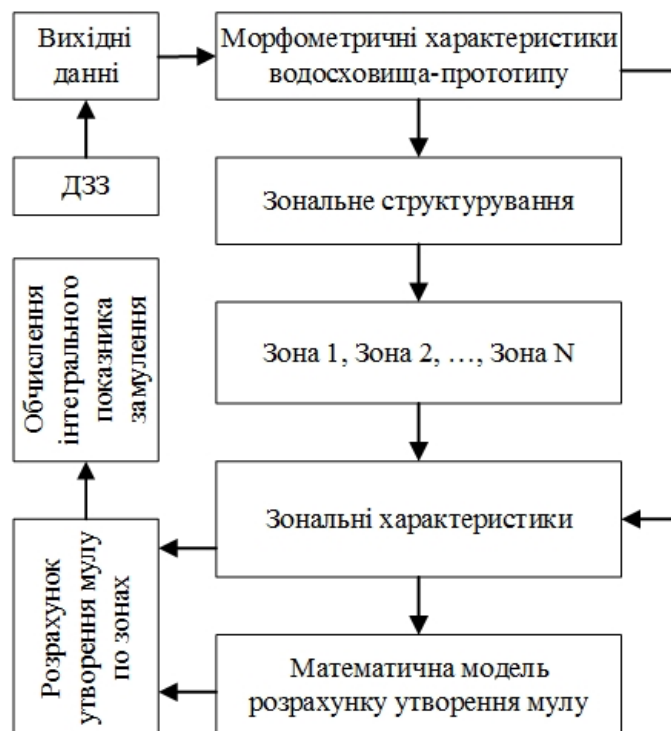


Рисунок 4.1.1 Алгоритм зонального розрахунку замулення водосховища – прототипу

Характерною для зонального аналізу є донна лінія стоку (ДЛС). Це безперервна лінія, що з'єднує точки максимальних глибин водойми. Вона характеризується двома проекціями: на горизонтальній площині поверхні водойми (рис. 4.1.2) і на вертикальну поверхню перпендикулярну горизонтальній (рис. 4.1.3) площині та проходить через ДЛС. Площина поверхні водойми (ППВ), яка визначається дзеркальною поверхнею водосховища (при абсолютній відсутності хвиль). Поряд з прийнятими, введемо так само наступні системи координат.

Вертикальна система координат (ТСК) знаходиться в площині верхньої греблі на перетині з горизонтальною лінією проходить через найглибшу точку водойми в площині нижньої греблі [88].

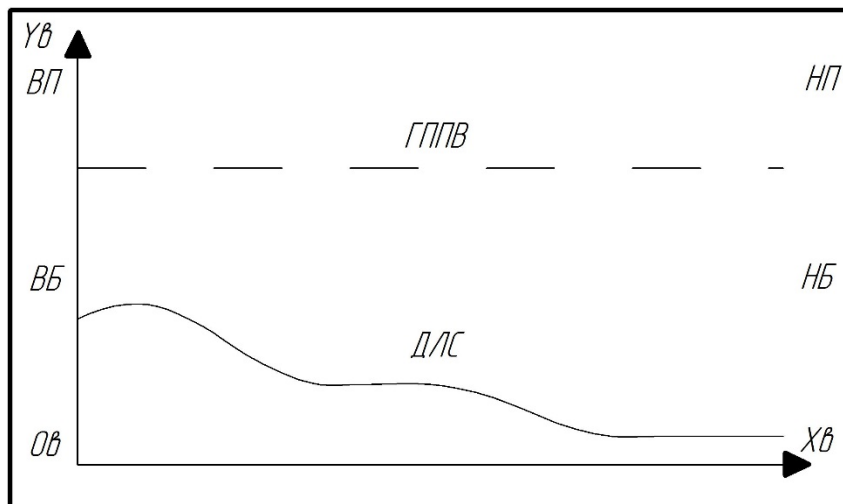


Рисунок 4.1.2. Вертикальна система координат

Горизонтальну систему координат (ГСК) $O_{г}X_{г}Y_{г}$ зв'яжемо з ГППВ. Початок координат розмістимо в основній площині верхньої греблі (ВГ) в точці перетину з лінією, яка перпендикулярна основній площині греблі (ОПГ). Основна площина греблі збігається з площиною, що проходить через дві її граничні вертикальні лінії. Вісь абсцис включає найнижчу точку перетину ОПГ нижньої греблі (НГ) з береговою лінією, $Y_{г}$ доповнює систему координат до правої і знаходиться в ОПГ ВГ. Лінія рівновіддалених контурів берегів (ЛРКБ) лежить в ГППВ таким чином, що в кожній її точці відстані від берегової лінії лівого і правого берегів є однаковими. Якщо верхня дамба відсутня або відстань до неї греблі є такою, що нижня гребля мало впливає на зміну контуру берега, будемо використовувати поняття умовної верхньої греблі (УВП). Як УВП будемо розглядати директивно призначений перетин річки у верхній частині штучної водойми [89,90]. Донна лінія рівновіддалених контурів берегів визначається, як проекція ЛРКБ на дно штучного водоймища і позначається аббревіатурою ДЛРКБ.

Поперечний переріз ШВ в системі рівновіддалених ліній в зональній системі координат – поперечний переріз штучного водоймища (ППШВ), визначається як перетин водойми площиною перпендикулярною до дотичній до ЛРКБ в точці її перетину поперечної вертикальної площини (рисунок 4.1.3).

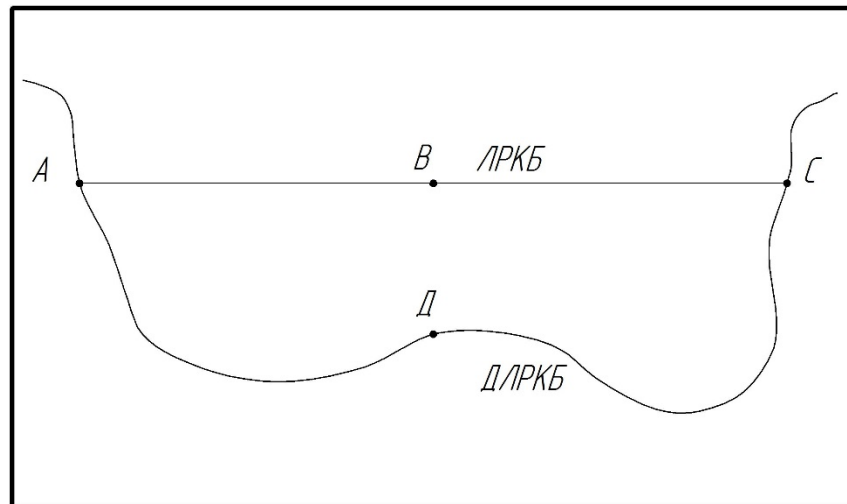


Рисунок 4.1.3. Характерні точки вертикального перетину ABCD

В - ЛРКБ (лінія рівновіддаленого контуру берега)

Д – ДЛРКБ (донна лінія рівновіддаленого контуру берега)

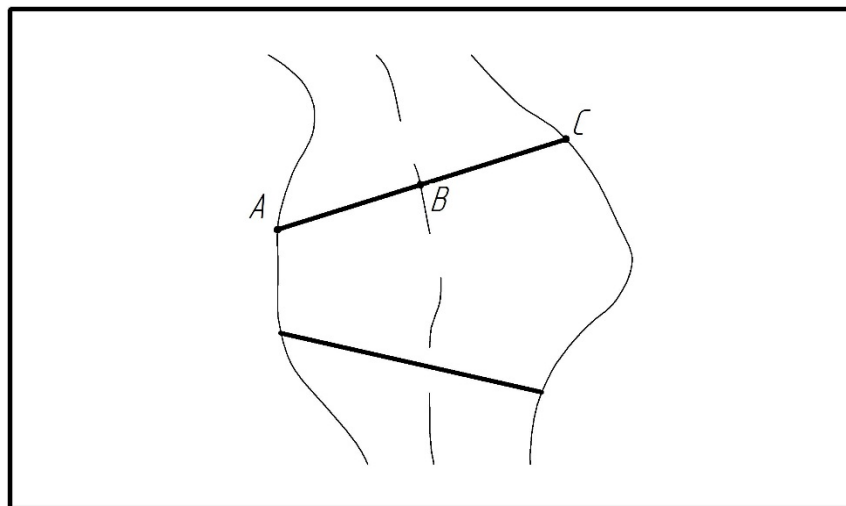


Рисунок 4.1.4. Характерні точки перетину ABC в горизонтальній площині

А - лівий берег

С – правий берег

В - ЛРКБ (лінія рівновіддаленого контуру берега)

Поздовжній перетин ШВ (ПрСІВ) визначається як перетин водоюми вертикальною поверхнею, що проходить через ЛРКБ по місцевій вертикалі. Сімейство рівновіддалених ліній (СРЛ) СРЛ визначають дискрети, які визначають кількість ліній сімейства. Будемо розрізняти СРЛ лівого і правого берегів. Сімейства цих ліній будуються відповідно до наступного алгоритму:

- Будується рівновіддалена лінія лівим (правим) берегом ЛРКБ-центральнона. Позначимо РЛ1Л, РЛ1П відповідно щодо лівого і правого берегів. Перетин центральної рівновіддаленої лінії назвемо генеральним перетином (рис. 4.1.5).
- Будуються дві рівновіддалені лінії для лівого і правого сімейства далі саме це маємо на увазі, якщо не обумовлено РЛ21Л і РЛ22Л. Будуються чотири рівновіддалені лінії.
- Будуються вісім рівновіддалених ліній.
- Процес триває поки не буде виконана умова $\max rk$, відповідне заданому числу відліків.

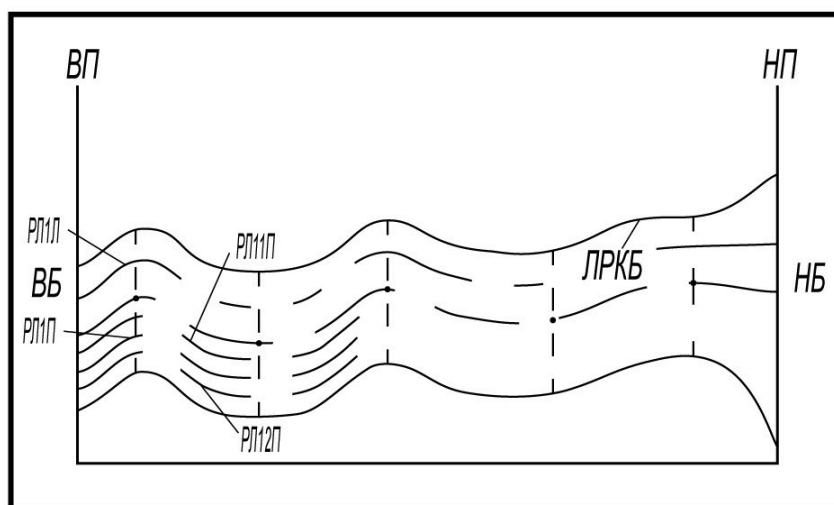


Рисунок 4.1.5. Сімейство рівновіддалених ліній пов'язаних з контурами берегів. ВП - верхня гребля, НП – нижня гребля, ВБ - верхній б'єф, НБ - нижній б'єф, РЛ1Л - рівновіддалена лінія 1, лівий берег; РЛ1П - рівновіддалена лінія 1, правий берег; РЛ11Л - рівновіддалена лінія 1, лівий берег; РЛ12П - рівновіддалена лінія 1, правий берег;

Кількість перетинів водойми визначається заданим значення поздовжнім (граничним) числом, яке визначаються на основі феноменологічного аналізу або з досвіду моделювання структури водойми, а також від його абсолютних розмірів [90]. Використання сітки, яка утворена поперечними і поздовжніми перерізами дозволить забезпечити прив'язку основних характеристик водойми до його геометричних характеристик (рис. 4.1.6) [91-93].

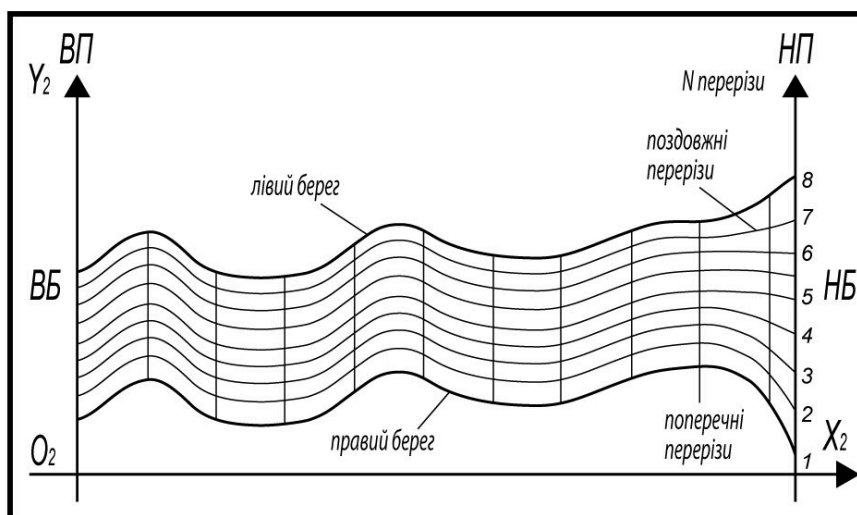


Рисунок 4.1.6. Сітка поздовжніх і поперечних перерізів водойми у площині дзеркала води. ВП - верхня гребля, НП – нижня гребля, ВБ - верхній б'єф, НБ - нижній б'єф

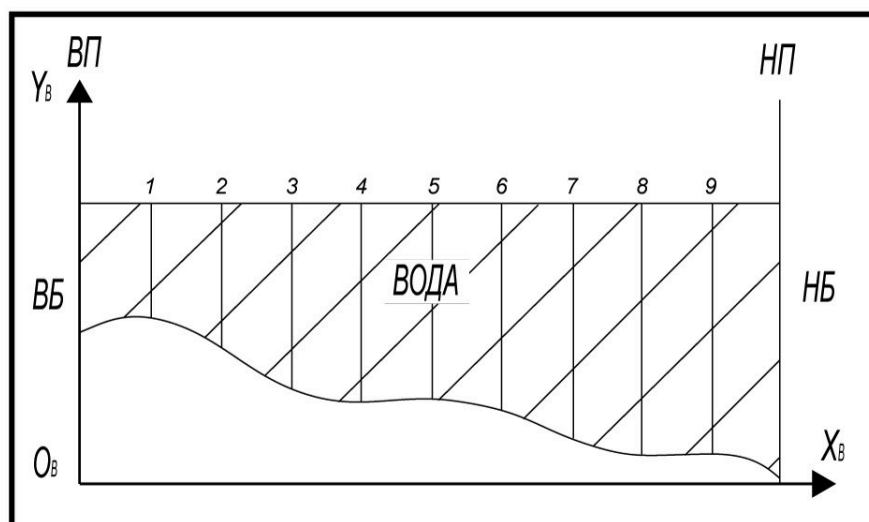


Рисунок 4.1.7. Поперечні перетини водойми у профіль. ВП - верхня гребля, НП – нижня гребля, ВБ - верхній б'єф, НБ - нижній б'єф

Рисунку 4.1.7 відповідає N поздовжнім перетинам. Проекції сітки на дно водойм за допомогою вертикальних поверхонь проектують координатну структуру на дні водойм. Значення вузлів сітки приводяться в $O_e X_e Y_e$ і $O_r X_r Y_r$ системах координат відповідно. Таким чином, в зональній системі координат визначені неправильні паралелепіпеди (квазіпаралелепіпеди), які характеризуються $(X_b Y_e)$ і 8 координат $(X_r Y_r)$ $i = 1, 2, 3, 4$. Паралелепіпеди обмежені зверху площиною поверхні води, знизу поверхнею дна ШВ, з боків поверхнями поздовжніх і поперечних перерізів [94-96]. Таким чином, структура ШВ характеризується набором

просторових зон - квазіпараллелепіпедів, кожен з яких характеризується набором постійних в його зоні характеристик.

4.2 Методика розрахунку відкладень в комірках з вертикальною структурою

Кожна з просторових зон, визначених у розділі 4.1, по вертикалі характеризується набором комірок з різними властивостями мулоутворення. З урахуванням такої структури розрахункова область відкладень в структурних елементах по вертикалі складається з $K=N+M+4$ осередків, де N - початкова кількість комірок в нерухомих (пасивних) пухких відкладеннях [97]. Ці комірки для розрахунку при ерозії; M – резерв порожніх комірок для накопичення відкладень. Комірки позначені: 0 – активна комірка нерухомого дна, 1 – комірка викликаного по дну шару наносів, 2 – комірка дрейфуючого і зваженого придонного шару, 3 – комірка зваженого шару в верхніх шарах води. P_{ij} , W – вертикальні потоки опадів між комірками, Q_1V_1 , Q_2V_2 -В комірці "0" відбувається накопичення осаду на кроці розрахунку. В процесі ерозії осередок "0" опускається вниз і включає в себе частину нижележащої комірки. При накопиченні комірка "0" піднімається вгору на висоту, відповідно об'єму надійшовшого в неї матеріалу. На кожному кроці обчислень створюється нова нижележаща комірка, що має склад комірки "0", який створений на початку кроку обчислень. Активна комірка "1" містить покликаний по дну рухливий шар наносів, що обмінюється потоками матеріалу з з нижньою і верхньою комірками. "0" (нульовий шар) і "2" (другий шар).

Комірка "2" (другий шар) обмінюється матеріалом з коміркою "0", коміркою "1" (покликаний шар) і коміркою "3" (турбулентний зважений шар). У третьому шарі здійснюється перенесення опадів між зонами абразії і накопичення. Третій шар поповнюється суспензією з областей розмиву і еолового перенесення частинок. Дана методика дозволяє розрахувати об'єми уламкової речовини кожної фракції в комірках.

Активна донна комірка "0" має об'єм $H_0 dX$, де H_0 – висота активного шару в донних відкладеннях. Об'єм, який міститься в комірці фракцій позначен: Q_0 для

безрудного матеріалу; Q_{r0} – для рудного. Об'єм комірки "1" змінний, рівний $H_1 dX$, де H_1 – висота ваблених наносів, рівномірно розподілених. Об'єм в комірці нерудних і рудних фракцій Q_1 та Q_{r1} . При досягненні граничного об'єму Q_{m1} опадів в цій комірці припиняється обмін між комірками "0" і "2". Комірка "2" має змінний об'єм, рівний $H_2 dX$, де H_2 – висота утвореного з неї зваженого і дрифуючого матеріалу. об'єми фракцій позначені Q_2 і Q_{r2} . Сума цих об'ємів відповідає каламутності придонного шару води. Комірка "3" відповідає виваженому матеріалу, що знаходиться в верхніх шарах води. Матеріал з комірки "3" переходить в клітинку "2" в обсязі в одиницю часу: W – для нерудних частинок і W_r – для рудних частинок. При моделюванні передбачається, що вертикальні потоки між комірками "0" - "1", "1" - "0", "0" - "2", "2" - "0", "1" - "2", "2" - "1" і "2" - "3" пропорційні з коефіцієнтами K_{01} , K_{10} , K_{02} , K_{20} , K_{12} , K_{21} , K_{23} . Останні залежать від величини природної швидкості V відповідно кількості, що знаходиться в комірках матеріалу кожної фракції. Для опису обміну між комірками "2" і "0" потік залежить від частки S площі контакту шарів "0" - "2" від загальної площі дна комірки. Можливі переходи "0" - "1" і "2" - "1" крім площі контакту з коефіцієнтами k_{01} , k_{21} . Відповідні коефіцієнти для рудної фракції мають підрядковий індекс "r". Вертикальні потоки речовини позначені через P_{ij} , де i – шар, з якого надходить матеріал, j – шар, в який йде надходження.

Процес обміну речовиною між комірками описується системою рівнянь [98-100]. Їх вигляд однаковий для обох фракцій. Тому рівняння системи наведені тільки для нерудного матеріалу:

$$\frac{\partial Q_1}{\partial t} = P_{01} + P_{21} - P_{10} - P_{12} - \frac{\partial(V_1 Q_1)}{\partial X}, \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial t} = P_{02} + P_{12} + W - P_{20} - P_{21} - P_{23} - \frac{\partial(V_2 Q_2)}{\partial X}, \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial Q_0}{\partial t} = P_{20} + P_{10} - P_{01} - P_{02} - P, \quad (4.3)$$

$$P_{01} = K_{01} Q_0 S + k_{01} Q_0 (1 - S), \quad (4.4)$$

$$P_{21} = K_{21} Q_2 S + k_{21} Q_2 (1 - S), \quad (4.5)$$

$$P_{10} = K_{10} Q_1, \quad (4.6)$$

$$P_{12} = K_{12} Q_1, \quad (4.7)$$

$$P_{02} = K_{02} Q_0 (1 - S), \quad (4.8)$$

$$P_{20} = K_{20}Q_2(1-S), \quad (4.9)$$

$$P_{23} = K_{23}Q_2, \quad (4.10)$$

де V_1 і V_2 – швидкості переміщення уздовж осі X матеріалу в шарах "1" і "2" відповідно (4.1–4.10). Для рудного матеріалу використовується позначення Q_r замість Q .

При $Q_1 + Q_{r1} < Q_{m1}$ має місце:

$$S = (Q_1 + Q_{r1}) / Q_{m1}, \quad (4.11)$$

Для об'ємів Q_{r1} , Q_{r2} , Q_{r0} , швидкостей горизонтального переносу V_{r1} і V_{r2} та потоків матеріалу P_{rij} аналогічні виразами (4.1–4.10) з додаванням нижнього індексу "r". Розмір нових комірок обмежуються до розміру комірки "0" завдяки зменшенню кроку. Згідно з обмеженнями для комірки "0":

$$Q_0 + Q_{r0} = q \equiv const. \quad (4.12)$$

Введемо позначення:

$$p = P_{20} + P_{10} - P_{01} - P_{02}, \quad (4.13)$$

$$p_r = P_{r20} + P_{r10} - P_{r01} - P_{r02}. \quad (4.14)$$

Тоді із (3.14) виходить:

$$\frac{\partial Q_0}{\partial t} + \frac{\partial Q_{r0}}{\partial t} = p + p_r - P - P_r = 0. \quad (4.15)$$

$$\sum p = p + p_r. \quad (4.16)$$

При $\sum p > 0$, йде накопичення і в комірці "0" проводиться:

$$P = \sum p Q_0 / (Q_0 + Q_{r0}), \quad (4.17)$$

$$P_r = \sum p Q_{r0} / (Q_0 + Q_{r0}), \quad (4.18)$$

і частина комірки "0" об'ємом $\sum p$ переходить до новоствореної комірки.

$$P = \sum p Q_k / (Q_k + Q_{rk}), \quad (4.19)$$

$$P_r = \sum p Q_{rk} / (Q_k + Q_{rk}), \quad (4.20)$$

де Q_k - кількість відкладень, що знаходяться в комірці, розташованій під активною коміркою. Якщо $\sum p = 0$, то $P = P_r = 0$. Якщо $0 < \sum p < q$, відбувається акумуляція. Система рівнянь (4.1-4.10) вирішується чисельними методами, які

використовуються для систем звичайних диференціальних рівнянь першого порядку з початковими умовами. Використовується змінний крок інтегрування.

4.3 Методика оцінки площі зонального елемента водосховища - прототипу

В якості вихідних даних будемо вважати відомими контур берегової лінії ШВ. Розрахунки прив'язані до актуального рівню поверхні водойми, зазвичай НПР. Тому в якості вихідних точок відліку використовуємо дані, відповідні НПР [101-104].

Всю директивну поверхню ШВ розіб'ємо апроксимуючими перетинами на $2N$ елементарних перетинів, кожному з яких відповідає елементарний об'єм. Кожен елементарний об'єм $V_i (i = \overline{1, 2N})$ визначається множення площі S_i i -го перерізу на довжину l_i (Вздовж берегів лінії вниз за течією), на якій площі перетину наближено вважається постійною. Площі $S(l)$ змінюються над пів-сегментами $l_1, l_2, \dots, l_i, \dots, l_{2N}$ і приймають значення $S_i(l)$. Якщо $S_i = const$ над l_i , то $S = S_i$ при $l \leftarrow l_i$. $\sum_{i=1}^{2N} l_i = L$, де L довжина берегової лінії, піддана розбиттю апроксимуючої дискретизації. Дискретні елементи довжини $l_i (i = 1, 2, \dots, 2N)$ визначені в такий спосіб:

$$l_1 = \{l: l_{11} \leq l \leq l_{12}\} \quad l_2 = \{l: l_{21} \leq l \leq l_{22}\} \quad \dots \quad l_{12} = l_{21} \quad \dots \quad (4.21)$$

де l_{i1}, l_{i2} – межі інтервалів l_i . Площа перерізу S_i – безперервні функції довжини на інтервалах їх визначення.

З урахуванням цих визначень наближений вираз для об'єму водосховища V_n , що включає n елементарних об'ємів матиме вигляд:

$$V_n = S_n(l_{n2} - l_{n1}) + \dots + S_i(l_{i2} - l_{i1}) + \dots + S_1(l_{12} - l_{11}). \quad (4.22)$$

Якщо пам'ятати $l_{11} = 0$, $l_{(n-1)2} - l_{(n-1)1} = l_{i2} - l_{i1} = \Delta l$, тоді:

$$V_n = \sum_{i=1}^n S_i \Delta l. \quad (4.23)$$

Для визначення площі перерізу використовуємо методику, засновану на імовірнісному підході (метод Монте-Карло) [105, 106].

Для цієї мети впишемо переріз водойми в прямокутник у відповідності з рис.3.3.1.

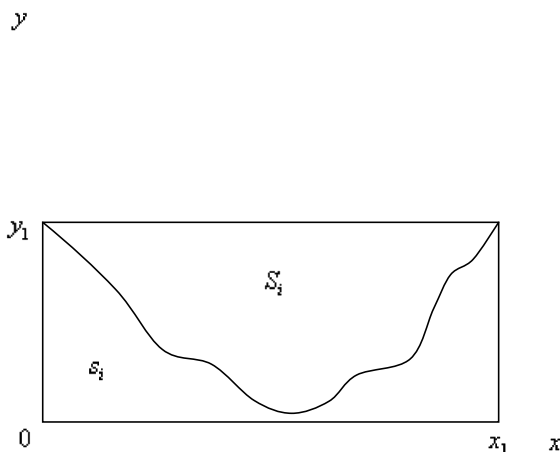


Рисунок 4.3.1. Визначення площі перерізу ШВ.

Позначимо s_i – площа описаного прямокутника. Очевидно:

$$s_i = x_i y_i \quad (4.24)$$

Використовуємо таблицю випадкових чисел для генерації пар чисел R та G рівномірно розподілених в інтервалі від 0 до 1. Число R буде імітувати координату $x(0 \leq x \leq x_1)$, число G буде імітувати координату $z(0 \leq z \leq z_1)$. Статистична гіпотеза полягає в тому, що кількість точок в описаному прямокутнику K_i з площею s_i , які потрапили в контур перетину k_i пропорційні площі S_i , тобто:

$$k_i / S_i = \frac{K_i}{s_i}, \quad (4.25)$$

Звідки випливає:

$$S_i = \frac{s_i k_i}{K_i}, \quad (4.26)$$

де K_i число точок, які потрапили в прямокутник, k_i - кількість точок, що потрапили в контур перетину S_i . При великих значеннях K_i , співвідношення k_i / K_i приблизно можна вважати вірогідністю P_i попадання точок при їх випадковому розміщенні в прямокутнику s_i , тоді:

$$S_i = s_i P_i. \quad (4.27)$$

4.4 Методика наближеної оцінки процесу замулення

Нехай в елементарному обсязі води в результаті дії суми різних факторів є певна кількість речовин різного походження. Частина цих речовин осідає на дно водойми з певною інтенсивністю. Кількість речовин, що потрапляють на дно водойми можна визначити теоретично і експериментально. Для теоретичного аналізу необхідно мати моделі процесів осадкоутворення, які в свою чергу вимагають певного набору вихідних даних. Отримання як моделей, так і вихідних даних в умовах дії великої кількості нестабільних зовнішніх факторів є вкрай складним і трудомістким завданням [107].

Разом з тим значні інтервали часу функціонування ШВ характеризуються досить постійними характеристиками стану ШВ, значення яких мають зональний розподіл. Якщо експериментально визначити кількісні характеристики накопичення опадів в різних зонах ШВ, то можна використовувати наближені методики експрес-оцінок накопичення відкладень в ШВ. По суті експериментально можна визначити швидкості накопичення маси опадів з одиниці об'єму V_m в кожній m – й зоні водосховища на певному інтервалі часу, для якого ця характеристика залишається досить постійною. Такими інтервалами часу можуть слувати місяці або сезони. В цьому випадку потрібно буде отримати експериментальні дані про осадконакопичення в кожній зоні ШВ в кожному з інтервалів (12 місяців року або чотири сезони). Більш наближеною оцінкою буде визначення ШВ по сезонах [108].

Для створення такої методики необхідно в якості вихідних даних мати наступну інформацію. $T_j (j = \overline{1,4}; j = \overline{1,12})$ – для періодів "сезон" і "місяць", відповідно (періоди, в які можна вважати незмінними характеристики накопичення відкладень) [109].

вона приймає на Θ постійні значення, тобто $A = A_i$ при $t \in \theta_i$, $A = A_2$ при $t \in \theta_{2i} \dots$

Напів-сегменти $\theta_i (i=1,2,\dots)$ визначені в такий спосіб:

$$\theta_1 = \{t : t_1 \leq t < t_2\}; \quad \theta_2 = \{t : t_2 \leq t < t_3\}; \quad \dots, \quad (4.31)$$

де t_1, t_2, \dots точки зміни значень матриці A_i в залежності від розглянутого інтервалу часу. $\bar{V}_i(t)$ – оцінка дій неврахованих факторів на відповідні компоненти маси, яка осідає. Елементи матриці A_i в загальному випадку безперервні функції часу на інтервалах їхнього визначення θ_i . Вирішення цієї системи можна шукати методом додавання або його узагальненням з використанням мультиплікативних інтегралів.

Розглянемо випадок відсутності дій неврахованих факторів, тобто покладемо $\bar{V}_i(t) = 0$. Візьмемо перші n рівнянь системи (1), тоді квадратна матриця X_i – матриця системи (1), що відповідає першим рівнянням системи (зон n на різних інтервалах θ_j) і початковими умовами $X_i(0) = E$.

Розіб'ємо напів-сегмент (t_0, t_K) на k елементів точкам $t_r (r=0,1,\dots,k)$. Над введеними таким чином елементами визначимо матрицанти $X_i^{(tr)}$. записуються в такий спосіб [110].

$$X_{t_0}^{t_k} = X_{t_{k-1}}^{t_k} \dots X_{t_2}^{t_1} X_{t_0}^{t_1}. \quad (4.32)$$

В силу малості елементів $\Delta t_r = t_n - t_{n-1}$ матрицю коефіцієнтів можна вважати постійною над кожним r -им елементом. При цьому матрицант $X_{t_{r-1}}^{t_r}$ як рішення системи диференціальних рівнянь з постійними коефіцієнтами має вигляд:

$$X_{t_{r-1}}^{t_r} = e^{A_r \Delta t}. \quad (4.33)$$

Розклавши праву частину цієї рівності в матричний ряд Тейлора, відкинувши члени ряду, що мають порядок малості вище першого і підставивши в (2), отримаємо:

$$X_{t_0}^{t_k} = (E + A_k \Delta t_k) \dots (E + A_2 \Delta t_2) \cdot (E + A_1 \Delta t_1) \quad (4.34)$$

Межа цього нескінченного добутку чисел при $\Delta \rightarrow 0$ за визначенням є мультиплікативним інтегралом [111-113]:

$$\int_{t_0}^{t_k} (E + A dt) = \lim_{\Delta t_r \rightarrow 0} (E + A_k \Delta t_k) \dots (E + A_1 \Delta t_1) \quad (4.35)$$

Використовуючи позначення початкового часу $t_{j,j-1} = t_0$, запишемо вираз, що зв'язує значення вектора \bar{x} на початку і кінці інтервалу Δt :

$$\bar{x}^{ji} = \left\{ \int_{t_{j,i-1}}^{t_{ji}} (E + A_{ji} dt) \right\} \bar{x}^{j,i-1} \quad (4.36)$$

тут $x^{ji} = x(t = t_{ji})$.

Користуючись властивостями мультиплікативного інтеграла, об'єднаємо n інтервалів Δt і отримаємо вираз, що зв'язує значення вектора \bar{x} на початку і кінці j -го інтервалу T_j (j -го полусегмента осі часу Θ_j):

$$\bar{x}^j = \left\{ \prod_{i=1}^n \int_{t_{j,i-1}}^{t_{ji}} (E + A_{ji} dt) \right\} \bar{x}^{j-1} \quad (4.37)$$

де \bar{x}^{j-1}, \bar{x}^j – значення вектора \bar{x} відповідно на початку і кінці інтервалу часу T_j .

Для послідовності m інтервалів, пронумерованих в порядку $j = 1, 2, \dots, m$, отримаємо вираз:

$$\bar{x}^m = \left\{ \prod_{j=1}^m \prod_{i=1}^n \int_{t_{j,i-1}}^{t_{ji}} (E + A_{ji} dt) \right\} \bar{x}^0, \quad (4.38)$$

де \bar{x}^0 – значення вектора \bar{x} на початку періоду T_1 .

Таке рішення зручно використовувати для кусково-лінійних систем, особливо для систем кусково-постійних, якому в періоди стабільності відповідає стан ШВ. Використання такого рішення передбачає знання постійних матриць A_i , які визначають розподіл різних складових маси, яка осідає в відповідних зонах (умовах) ШВ. Ці значення визначаються на основі лабораторного аналізу проб води, взятих у відповідних зонах ШВ і у відповідні періоди часу, основним параметром є каламутність води, яка і визначає елементи матриць A для різних зон. Якщо $\bar{v}(t) \neq 0$, то значення вектора \bar{x} на T -ому інтервалі часу має вигляд:

$$\bar{x}^r = \bar{x}(t_r) = X_r^t(A)\bar{x}\left[t_{r-1} + \int_{t_{r-1}}^{t_r} k(t_0, \tau)\bar{v}(\tau)d\tau\right] \quad (4.39)$$

Тут $k(t_0, \tau)$ – матриця Коші, $(k(t_0, \tau) = X(A)_{t_0}^t [X_{t_0}^\tau(A)]^{-1}$. Підставивши в (4.39) вираз для $\bar{x}(t_{r-1})$, а в $\bar{x}(t_{r-1})$ вираз $\bar{x}(t_{r-2})$ і т.д., отримаємо

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{x}^r = \prod_r \bar{x}(t_0) + \prod_{r-1} J^1 + \prod_{r-2} J^2 + \dots + \prod_2 J^{r-2} + \prod_1 J^{r-1} + J^r \\ \text{зде} \quad \prod_r = X_{t_{r-1}}^t \dots X_{t_0}^{t_1}; \\ \quad \quad \prod_{r-1} = X_{t_{r-1}}^t \dots X_{t_1}^{t_2}; \\ \dots \\ \quad \quad \prod_1 = X_{t_{r-1}}^{t_r}; \\ J_1 = \int_{t_{r-1}}^{t_r} k(t_1, \tau)\bar{v}(\tau)d\tau, \dots, J^r = \int_{t_{r-1}}^{t_r} k(t_r, \tau)\bar{v}(\tau)d\tau. \end{array} \right. \quad (4.40)$$

Використовуючи поняття мультиплікативного інтеграла, вираз (4.11) запишемо у вигляді:

$$\begin{aligned} x = \left[\int_r (E + Adt) \right] x(t_0) + \int_{t_1}^{t_r} (E + Adt) \int_{t_0}^{t_1} k(t_1, \tau)\bar{v}(\tau)d\tau + \dots \\ + \int_{t_{r-1}}^{t_r} (E + Adt) \int_{t_{r-1}}^{t_r} k(t_{r-1}, \tau)\bar{v}(\tau)d\tau. \end{aligned} \quad (4.41)$$

$$\text{Тут } k(t_r, \tau) = X_{t_{r-1}}^{t_r} [X_{t_{r-1}}^\tau]^{-1}.$$

Дана методика дозволяє провести оцінки об'ємів намулу на заданому інтервалі часу на основі експериментально вимірних характеристик каламутності в зональних елементах ШВ з відомими об'ємами води. Точність оцінок визначається точністю визначення об'єму питомих опадів, які випадають в одиницю часу з використаного об'єму води. Результати будуть тим точніше, чим точніше буде виконано зональний розподіл водойми при визначенні кількостей речовини, яка випадає з відповідних зон ШВ на основі вимірних значень каламутності [113].

4.5 Зональна методика експериментального визначення об'єму намулу за результатами вимірювань глибин водосховища-прототипу

Методика заснована на експериментальному визначенні донного рельєфу шляхом вимірювання глибин досліджуваної частини ШВ, лабораторного визначення

та мутності води і швидкості осадження речовин, які містяться у воді. В результаті можлива наближена оцінка об'єму випадального мулу для досліджуваної ділянки штучного водоймища на основі послідовно виконаних двох вимірювань глибин через певний інтервал часу. Одночасно з вимірюванням глибин з заданим розподілом точок вимірювання виконується забір води для лабораторного визначення її каламутності і швидкості випадання мулу [113].

Вимірювання глибин ШВ здійснюються по точкам, заданим сіткою вимірів відповідно до Технічного завдання на виконання експериментальних робіт з оцінки об'ємів мулів, що випали на дно водойми протягом інтервалу часу T [114, 115]. Згідно з типовим технічним завданням процедури вимірювання глибин водосховища здійснюються у відповідності з наступним алгоритмом.

1. Для розробки моделей оцінки темпів замулення штучних водосховищ типу водосховищ Дніпровського каскаду визначається характер інформації про розподіл глибин акваторії водосховища-прототипу. В якості такого може слугувати, наприклад, Самарське водосховище. Для перевірки даних, отриманих на основі цифрової обробки існуючих картографічних даних необхідно провести прямі виміри глибин і зіставити з даними, отриманими шляхом вимірювань в тих же точках через певний інтервал часу T . Мінімальним інтервалом часу є один рік, представлений чотирма сезонами, кожен з яких характеризується погодними, гідрологічними, фізико-хімічними та біологічними особливостями процесів мулоутворення в водосховищі.

2. Під час експедиційних досліджень профілів поперечних перерізів водосховища-прототипу отримують інформацію в формі прямих вимірювань глибин в створах заданих поперечних перерізів. Подальша обробка даних вимірювань, при необхідності доповнюється результатами графо-аналітичного аналізу даних картографії та космічних зйомок, виконаного за допомогою відповідних методик для верифікації просторово-часового розподілу показників виміряних профілів поперечних перерізів вимірюваної акваторії водосховища- прототипу.

3. Досліджувана частина акваторії задається координатами основного та резервного створів досліджуваної частини ШВ, також задається число поперечних перерізів, в загальному випадку розподілених нерівномірно, з урахуванням

особливостей передбачуваної форми профілю дна в конкретному перерізі. Також задається діапазон довжин кроку вимірювань, який залежать від крутизни падіння схилу дна в площині перетину.

4. Вимірювання проводяться за допомогою ехо-лота і приладів GPS. Допускається подальше перетворення даних GPS в формат даних локальної прямокутної системи координат, прив'язаної до досліджуваної частини акваторії. Схема точок вимірювання представлена на мапі штучного водоймища з відповідною розміткою точок вимірювання, при необхідності окремими схемами розміток.

5. Дані вимірювань наводяться до нормального подпорного рівня (НПР), для чого використовується інформація про поточне значення рівня штучного водосховища щодо НПР в кожен день дослідження.

6. В кожному перетині беруться проби води (не менше заданої кількості пар проб в кожному перетині) для аналізу відносної кількості зважених речовин у воді відповідно вимог методик лабораторних досліджень.

7. За значеннями глибин першого і другого циклу вимірювань відновлюються відповідні профілі дна D_1 і D_2 .

8. На підставі апроксимованих профілів дна і відповідних глибин, а також відстаней між точками кожного попереднього і наступних вимірювань обчислюються площа перетину замулу, доданого протягом інтервалу спостереження T [116].

Для оцінки об'єму замулу, який сформувався за період часу T між двома послідовними вимірами глибин водосховища, використовуємо зональний підхід, запропонований в роботі. Схема розбивки досліджуваного водосховища приведена на малюнку в розділі 5, на якому позначено: S_0 , S_i , S_N – початкове, кінцеве і проміжні перетини досліджуваної зони ШВ, l_i – довжина i -го поперечного перерізу по поверхні ШВ, $dl_{i,i+1}$ – відстань між i -м та $i+1$ поперечними перетинами. НПР – стандартний підпирний рівень; U_1 , U_2 – рівні водосховища в моменти першого і другого циклів вимірювання; D_1 , D_2 – профілі дна в поперечному перерізі, відповідні періоду першого і другого циклів вимірювання; s_j – j -ий перетин; F_j – площа перетину замулу в поперечній площині, накопиченого в період T ; h_{1j} – глибина водосховища при першому вимірі, h_{2j} – глибина водосховища при другому вимірювання (через інтервал

часу T) в j – ом перетині i - ій поперечній площині (індекс i опущений); d_1, d_2 – різниця між НПР і рівнями водосховища в першій і другий цикли вимірювань, відповідно.

Глибини H_{1j} в – j -ому перетині i - ій поперечній площині першого і другого комплексів вимірювань з урахуванням значення НПР визначаються за формулами:

$$H_{1j} = h_{1j} + d_1, \quad (4.42)$$

$$H_{2j} = h_{2j} + d_2. \quad (4.43)$$

Висота намулу в j -их перетинах визначається модулем різниці $|H_{1j} - H_{2j}|$:

$$|h_{1j} + d_1 - h_{2j} - d_2|. \quad (4.44)$$

На рис 5.2 ці відрізки АВ і ДС. Таким чином, площа F_j є площа фрагмента перетину намулу, який утворився в перетині S_i між лініями дискретизації s_j та s_{j+1} протягом інтервалу часу T . Це площа чотирикутника зі сторонами АВ, ВС, CD і DA, відповідно. Побудувавши такий же чотирикутник в суміжному перетині і з'єднавши лініями однойменні точки, отримаємо квазіпараллелепіед $A_i B_i C_i D_i A_{i+1} B_{i+1} C_{i+1} D_{i+1}$, який визначає об'єм фрагмента намулу V_n , укладеного між двома суміжними поперечними перетинами і двома площинами, що проходять через вертикальні прями, певними точками А, В і D, С (з індексами), відповідно, а також апроксимуючими поверхнями, що проходять через $B_i C_i B_{i+1} C_{i+1}$ и $A_i D_i A_{i+1} D_{i+1}$ [117].

В результаті виконаних вимірювань відомі всі відрізки ліній, що визначають розміри квазіпараллелепіеда. Впишемо цей квазіпараллелепіед в паралелепіед, розміри якого визначаються трьома максимальними розмірами ребер квазіпараллелепіеда. Шуканий об'єм фрагмента намулу V_n визначимо, використовуючи метод Монте-Карло, відповідно до викладеного вище алгоритмом. Тоді об'єм намулу, що утворився в досліджуваній зоні водосховища протягом інтервалу часу T визначиться сумою:

$$V_{\text{нШВ}} = V_{n11} + V_{n12} + \dots + V_{n1m} + V_{n21} + V_{n22} + \dots + V_{n2m} + \dots + V_{nij} + \dots + V_{nmm} \quad (4.45)$$

де n – кількість локальних зон, утворених поперечними перетинами ШВ, m – кількість фрагментів в поперечній площині при $m - 1$ точках вимірювань. Середня умовна (за об'ємом) швидкість осадження намулу W_y в досліджуваному обсязі зони визначиться відношенням:

$$W_y = V_{\text{ншв}}/T \text{ од. об'єму/од. часу} \quad (4.46)$$

Визначимо далі масу одиниці об'єму намулів, використовуючи найбільш часто зустрічаючи об'ємну щільність мулових відкладень або питому вагу річкового мулу. Щільність і питома вага ρ в фізиці прийнято вимірювати в грамах на кубічний сантиметр: ρ гр/см³. У практичних завданнях зручніше використовувати більші одиниці вимірювання, а саме в тоннах на метр кубічний в обсязі води досліджуваної зони:

$$W_m = \rho \text{ од. маси/ од. об'єм } V_{\text{ншв}}/T \text{ од. об'єму/од. часу} \quad (4.47)$$

де $\rho = 1,6 \text{ тн/м}^3$, $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$, $\rho = 1,6 \text{ гр/см}^3$ в залежності від використовуваної одиниці виміру маси і об'єму.

Використовуючи результати вимірювань, наведені в додатку, отримуємо, що сумарний об'єм намулу, який випав протягом року в досліджуваній зоні р. Самара (водосховище від створу 1 до створу 2) становить 40011 тис. Тонн. Швидкість осадження мулу по всьому об'єму зони склала 109,59 тн/добу, або 4,57 тн/год. Якщо об'єм води в досліджуваній зоні становить 10:6 м³, то з одного кубічного метра води випадає осад зі швидкістю 0,45 гр/год. Лабораторні дослідження води, засновані на вимірі випадання осаду, показали результат 0,395 гр/год, що дає хороший збіг результатів вимірювання, відмінність складає 12,22%.

4.6 Інформаційна технологія оцінки замулення водосховища на основі метода аналогії та алгоритм її використання

Інформаційна технологія оцінки замулення водосховища на основі метода аналогії має три складові:

Розділ 1. Моделі та алгоритми розрахунків замулення водосховища-прототипу.

Розділ 2. Система критеріїв та алгоритмів обчислення показника аналогії водосховища - прототипу та водосховища- аналогу.

Розділ 3. Перерахунок оцінок замулення водосховища-прототипу в оцінку замулення водосховищ- аналогів.

Відповідні моделі, рівняння, формули та алгоритми наведені у дисертаційному дослідженні.

Розділ 1. Оцінка замулення водосховища-прототипу.

Розрахунки проводяться за однією із трьох моделей, реалізованих відповідними програмними модулями.

Модуль 1.1. Оцінка замулення водосховища-прототипу на основі класичної моделі.

Етап 1.1.1. Формування вихідних даних для реалізації морфометрична моделі водосховища на основі даних ДЗЗ, картографічних, довідкових та даних польових вимірювань.

Етап 1.1.2. Формування вихідних даних для відтворення моделі території водозбору на основі даних ДЗЗ, картографічних, довідкових та даних польових вимірювань

Етап 1.1.3. Обчислення параметрів моделі теплового балансу штучного водосховища з урахуванням характеристик прямої і розсіяної сонячної радіації; надходження і втрати тепла з водою, яка впадає і витікає; тепла, яке виділяється при випаровуванні; тепловмісті водної маси.

Етап 1.1.4. Обчислення параметрів моделі водного балансу, яка визначається приходом і витратою води, відповідно. Прихід включає: опади, поверхневий приплив, конденсацію пару на дзеркало¹, підземний приплив. Витрати включають: поверхневий відтік, підземний відтік, випаровування, зміну запасів води водосховища.

Етап 1.1.5. Обчислення параметрів балансової моделі донних відкладень з урахуванням процесів приходу та витрат наносів, які, в свою чергу, включають процеси руйнування берегів, еоловий пререніс, відмирання живих організмів. Витрата має дві складові: акумуляція на дні. зміна змісту зважених частинок.

Етап 1.1.6. Розрахунок характеристик седиментації органічної речовини для балансової моделі процесів утворення продуктів життєдіяльності з урахуванням алохтонна органічна речовина і автохтонної органічної речовина з урахуванням

Етап 1.1.7. Розрахунок характеристик замулення.

Шаг 1.1.7.1. Обчислення концентрації донних відкладень

Шаг 1.1.7.2. Розрахунок швидкості осідання фракцій та глибини, на основі рішення рівнянь Сен-Венана.

Шаг 1.1.7.3. Обчислення товщини активного шару наносів і їх середньої швидкості згідно рівняння для обчислення товщі активних наносів.

Шаг 1.1.7.4. Визначення масообміну між дном і водним потоком з використанням умов взмучиваності фракції.

Шаг 1.1.7. 5. Обчислення середньої по глибині концентрація i -ї фракції S_i .

Шаг 1.1.7.6. Визначення концентрацій зважених і донних наносів і положення кордону розділу «вода - дно».

Шаг 1.1.7.7. Розрахунок гранулометричного складу донних відкладень:

Шаг 1.1.7. 8. Обчислювання витрат зважених наносів в створі $x = x_j$.

Шаг 1.1.7.9. Розрахунок витрат зважених наносів за умов відповідних витрат води та ширини русла.

Шаг 1.1.7. 10. Обчислення інтегральних витрат наносів.

Шаг 1.1.7.11. Оцінка термінів замулення штучного водосховища в залежності від об'єму замулення, середнього багаторічного стоку; каламутності води, частки наносів, що несуться, мертвого об'єму водосховища.

Модуль 1.2. Інформаційна технологія зональної оцінки характеристик замулення водосховища –прототипу.

Етап 1.2.1. Вводиться зональна система координат для водосховища-прототипу, яка дозволяє обчислювати локальне утворення мулу в відповідних зонах водосховища з огляду на локальні характеристики кожної зони.

Етап 1.2.2. За результатами введення зональної системи формується відповідна структурна матриця Slk з елементами slk , що є унікальними координатами зон водосховища, за формою – номером геометричного центру площі зональної частки поверхні. Цей номер є основою алгоритму послідовного розрахунку замулення кожної зони водосховища.

Етап 1.2.3. Для кожної зони виконуються розрахунки за методиками розрахунку відкладень в комірках з вертикальною структурою. Використовуються набори комірок з різними властивостями мулоутворення. Розрахункова область відкладень в структурних елементах по вертикалі складається з K осередків, що

включають початкову кількість комірок в нерухомих (пасивних) пухких відкладеннях. Ці комірки моделюють розрахунки при ерозії. Частина осередків відтворює резерв порожніх комірок для накопичення відкладень. Комірки позначені: 0 – активна комірка нерухомого дна, 1 – комірка викликаного по дну шару наносів, 2 – комірка дрейфуючого і зваженого придонного шару, 3 – комірка зваженого шару в верхніх шарах води. W – вертикальні потоки опадів між комірками,

Етап 1.2.4. Визначення площі перерізу згідно методики, заснованої на імовірнісному підході (метод Монте-Карло).

Етап 1.2.5. Розрахунок зонального об'єму води.

Етап 1.2.6. Підготовка вихідних даних та їх аналіз для визначення періодів, в які характеристики замулення можуть бути визнаними незмінними: «сезон», «місяць», «неділя».

Етап 1.2.6. Визначення елементів матриць диференційних рівнянь, що описують динаміку осідання мулу, для інтервалів їх незмінності.

Етап 1.2.6. Обчислення характеристик замулення для кожної зони на заданому інтервалі часу з використанням визначених інтервалів незмінності.

Етап 1.2.7. Визначення інтегральних характеристик замулення водосховища – прототипу. за результатами розрахунку зональних характеристик замулення.

Модуль 1.3. Інформаційна технологія оцінки характеристик замулення водосховища – прототипа на основі експериментальних вимірювань.

Етап 1.3.1. Формування морфометричних характеристик водосховища – прототипу на основі картографічних досліджень та інформації, наданої з допомогою космічних технологій дистанційного зондування Землі.

Етап 1.3.2. Розробка зональної структури водосховища та відповідної схеми точок на поверхні для проведення заміру глибин та взяття проб води на каламутність з прив'язкою точок замірів до обраної системи координат з допомогою технологій GPS або GLONASS.

Етап 1.3.3. Заміри глибин водосховища – прототипу згідно розробленої схеми вимірювань та відбір проб води на каламутність.

Етап 1.3.4. Обробка статистичного матеріалу. Розробка моделі дна водосховища в середовищі ГІС – платформи.

Етап 1.3.5. Виконання дій згідно етапів 1 – 4 через заданий інтервал часу.

Етап 1.3.6. Кластерний аналіз даних вимірювань для визначення близьких даних по глибинам.

Етап 1.3.7. Визначення статистичних характеристик: математичне очікування різниці глибин та дисперсії по кластерам.

Етап 1.3.8. Розробка регресійних моделей щодо характеристик замулення.

Розділ 2. Система критеріїв та алгоритмів обчислення показника аналогії водосховища- прототипу та водосховища- аналогу;

Модуль 2.1. Підготовка вихідних даних для обліку первинних критеріїв.

Етап 2.1.1. Обчислювання та первинна обробка морфометричних характеристик водосховища – прототипу та водосховища – аналогу.

Етап 2.1.2. Обчислювання та первинна обробка характеристика території водозбору водосховища – прототипу та водосховища – аналогу.

Етап 2.1.3. Обчислювання та первинна обробка характеристик балансу води, що поступає водосховища – прототипу та водосховища – аналогу.

Етап 2.1.4. Обчислювання та первинна обробка характеристик надходження речовин з повітря водосховища – прототипу та водосховища – аналогу.

Етап 2.1.5. Обчислювання та первинна обробка характеристик надходження продуктів життєдіяльності водосховища – прототипу та водосховища – аналогу.

Модуль 2.2. Обчислювання критеріїв аналогії.

Етап 2.2.1. Обчислювання первинних критеріїв.

Шаг 2.2.1.1. Обчислювання первинних критеріїв кластеру морфометричних характеристик.

Шаг 2.2.1.2. Обчислювання первинних критеріїв кластеру території водозбору.

Шаг 2.2.1.3. Обчислювання первинних критеріїв кластеру балансу води, що поступає.

Шаг 2.2.1.4. Обчислювання первинних критеріїв кластеру надходження речовин з повітря.

Шаг 2.2.1.5. Обчислювання первинних критеріїв кластеру продуктів життєдіяльності

Модуль 2.3. Розрахунок вагових коефіцієнтів комплексного критерія аналогії.

Шаг 2.3.1. Підготовка вихідних даних для обраної групи експертів.

Шаг 2.3.2. Обробка результатів роботи групи експертів

Шаг 2.3.3. Обчислення коефіцієнта конкордації.

Шаг 2.3.4. Визначення вагових коефіцієнтів для відповідних кластерів первинних коефіцієнтів.

Шаг 2.3.5. Визначення значущих компонент комплексного критерія з огляду на назначені експертами значення вагових коефіцієнтів.

Шаг 2.3.6. Формування та обчислення комплексного коефіцієнту аналогії для кожного водосховища..

Шаг 2.3.7. Обчислення міри аналогії для водосховища –прототипу та відповідного водосховища –аналогу.

Розділ 3. Перерахунок оцінок замулення водосховища-прототипу в оцінку замулення водосховищ- аналогів..

Модуль 3.1. Перерахунок оцінок замулення

Шаг 3.1.1. Побудова таблиці вихідних даних для перерахунку оцінок замулення водосховищ-аналогів.

Шаг3.1.2. Визначається відношення об`ємів води у водосховищах прототипу і аналогів:

Шаг 3.1.3. Розрахунок середнього значення коефіцієнтів каламутності водосховищ.

Шаг 3.1.4. Обчислення коефіцієнтів відносної каламутності водосховищ:

Шаг 3.1.5. Розрахунок об`ємів та мас намулу в водосховищах-аналогах:

Модуль 3.2. Оформлення протоколів з результатами розрахунків замулення водосховищ-аналогів.

Шаг 3.2.1. Формування протоколів.

Шаг 3.2.2. Передача протокольної інформації до відповідної бази даних.

Шаг 3.2.3. Друк протоколів [118-120].

Висновки до четвертого розділу

Значна міра невизначеності берегового контуру, пов'язана як зі зміною рівня водосховища при його наповненні та спрацюванні, а також з природними процесами розмивання робить необхідним вибір системи координат, яка буде забезпечувати сталість зональної структури ШВ берегів. Для вирішення цього завдання введена так звана зональна система координат, яка дозволить зберегти число зон з постійними в їх просторі екологічними характеристиками заданого складу [121]. Зональна система координат заснована на використанні лінії рівновіддаленої від змочуваних контурів берегів (ЛРКБ), поперечних перерізів простору ШВ, а також горизонтальній площині, що збігається з площиною дзеркала ШВ в період НПР. Крім того вводяться поперечні і поздовжні перерізи вертикальними до дзеркала води поверхнями. Поперечні перерізи задаються певною кількістю поздовжніх і поперечних ліній на горизонтальній площині. Контур берегової лінії описує лінію перетину в горизонтальній площині водної поверхні з береговою поверхнею і греблями крім зон впадання у водойму струмків, річок і штучних каналів. Введено поняття дискрета, яке визначає густоту координатної сітки зональної системи координат. Запропоновано алгоритм побудови зональної системи координат.

На підставі зонального підходу розроблена наближена методика оцінки об'єму замулення водосховища-прототипу. В якості вихідних даних використані відомий контур берегової лінії ШВ і профілі його донної поверхні. Розрахунки прив'язані до актуального рівня поверхні водойми, зазвичай НПР. Методика дозволяє виконати оцінки об'ємів замулення для кожної зони ШВ і всього водосховища в цілому за певний інтервал часу. В якості вихідної інформації використовуються результати вимірювання питомих показників вмісту частинок, що осідають в одиниці об'єму, зокрема каламутність води і швидкість осадження домішок.

РОЗДІЛ 5. ОЦІНКА ІНТЕНСИВНОСТІ ЗАМУЛЕННЯ ВОДОСХОВИЩ ДНІПРОВСЬКОГО КАСКАДУ НА ОСНОВІ РОЗРОБЛЕНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

5.1 Оцифрування картографічних даних Самарського водосховища – прототипу і Дніпровського водосховища - аналога

5.1.1 Загальний опис Самарського та Дніпровського водосховищ

Довжина Самари 311 км, площа басейну 22660 км². Ухил річки 0,33м/км. Долина трапецієвидна, асиметрична, на окремих ділянках незрозуміло виражена. Заплава двостороння, ширина 3-4 км (максимальна 6 км). Бере початок на західних схилах Донецького кряжа. Впадає в Дніпровське водосховище. Самарське водосховище або Самарська затока має протяжність 27 км. Ширина зростає до 12 км на пригирловій ділянці. Довжина наведеної окружності при площі 5,5 км² становить 26,18 км.

Самарська затока має близький гідрологічний режим [122] до Дніпровського водосховища (швидкість течії, співвідношення глибини і площі дзеркала). На рисунках 5.1.1 представлені Самарська затока і Дніпровське водосховище в зоні впадання р. Самара. Для дослідження в якості водойми-аналога Дніпровського водосховища найбільш підходящою ділянкою по гідрологічним параметрам морфометрії є ділянка від мосту на Ігрені до моста на Придніпровськ [123].

Дніпровське водосховище розташоване в Запорізькій і в Дніпропетровській областях, утворено греблею Дніпровської ГЕС, рисунок 5.1.2.

Площа водосховища становить 420 км², Об'єм 3,53 км³. Його довжина 129 км, максимальна ширина досягає 5 км, середня глибина – 8,4 м, максимальна – 60 м. В нього впадають річки: Самара, Оріль, Мокра Сура. Довжина окружності кола рівна за площею дзеркала води 419 км², дорівнює 72,78 км.

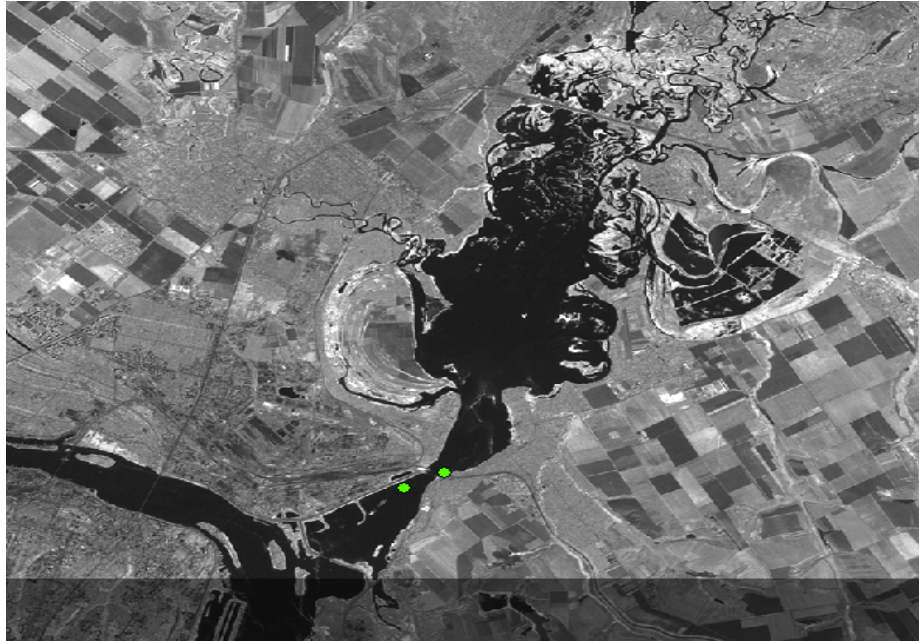


Рисунок 5.1.1. Карта нижньої ділянки р. Самара (Самарський затока),
(Знімок КА Landsat)

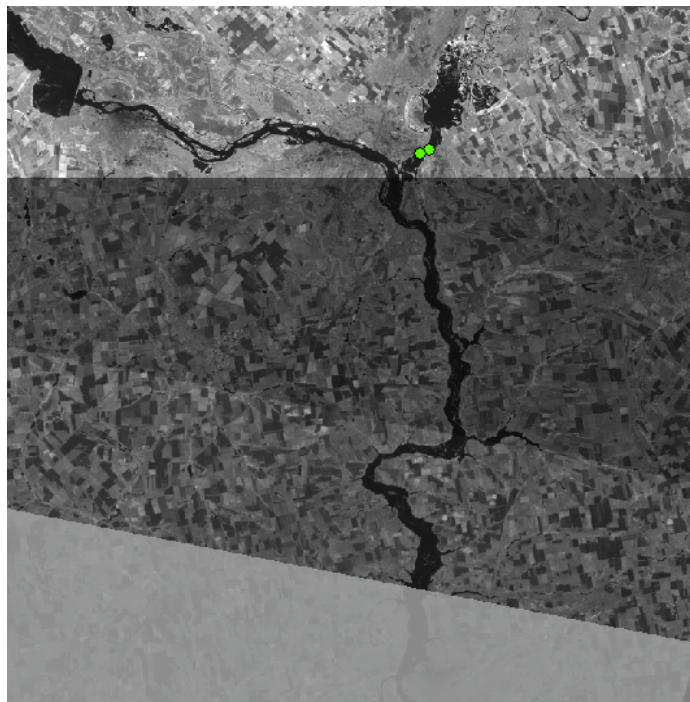


Рисунок 5.1.2. Карта р. Дніпро (Дніпровське водосховище),
(Знімок КА Landsat 8)

5.1.2 Оцифрування картографічних даних Самарського та Дніпровського водосховищ

Для обчислення критеріїв аналогії і вихідних даних, необхідних для розрахунків з використанням інформаційної моделі, було проведено оцифрування Самарської затоки і Дніпровського водосховищ. При формуванні множини точок використана інтерполяція по методу обернено зважених відстаней (ОВР), яка дозволяє визначити значення комірок з використанням лінійно зваженої комбінації значень з піднабору опорних точок, рис.5.1.3.

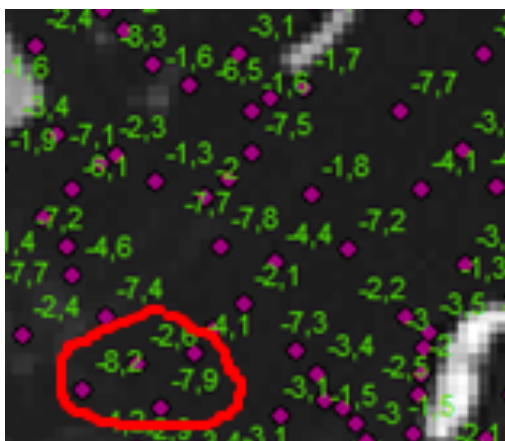


Рисунок 5.1.3. Околиця ЗВР для обраної точки

Вагою точки слугує функція зворотної відстані. Інтерпольована поверхня являє собою поверхню просторово залежною змінною – глибини. Інтерполяція за методом ЗВР визначає значення комірок з використанням лінійно зваженої комбінації значень з піднабору опорних точок. Вагою слугує функція зворотної відстані. На рис. 5.1.4 приведена схема точок замірів глибин Самарського водосховища в формі матриці точок і осередків для методу ЗВР [124-125]. Цей метод передбачає, що вплив картіруемой змінної зменшується в міру віддалення від місця розташування зразка.

На рисунку 5.1.5 представлені результати оцифрування точок глибин Самарського ШВ. Інформація призначена для порівняльного аналізу результатів модельних розрахунків і результатів експериментальних досліджень глибин Самарського ШВ як моделі-прототипу.

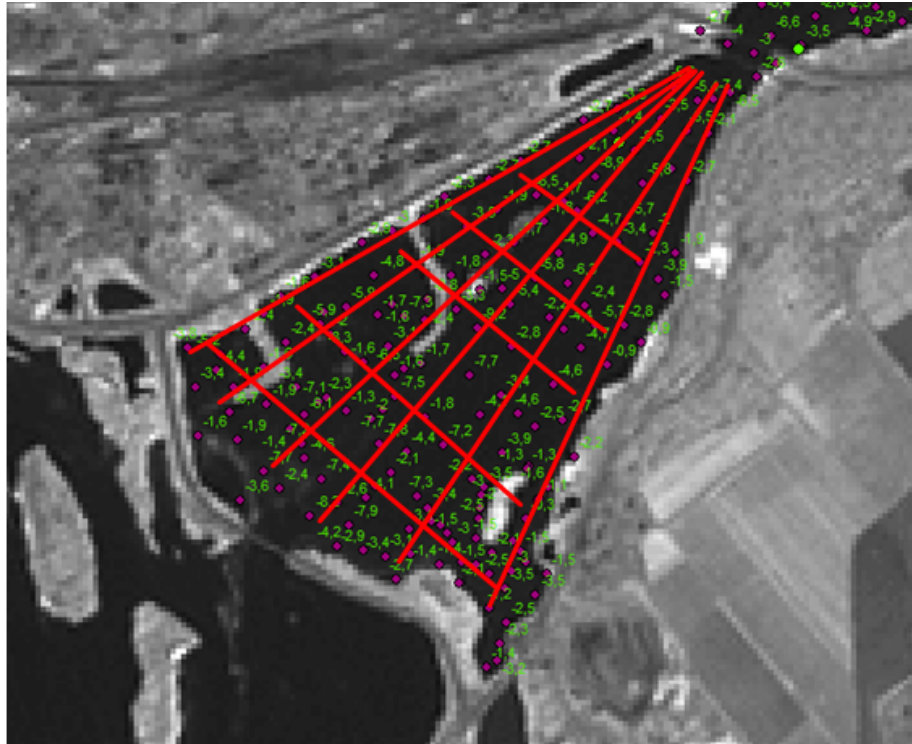


Рисунок 5.1.4. Схема точок замірів глибин Самарської затоки для створення моделі-прототипу (матриця точок для методу ЗВР)

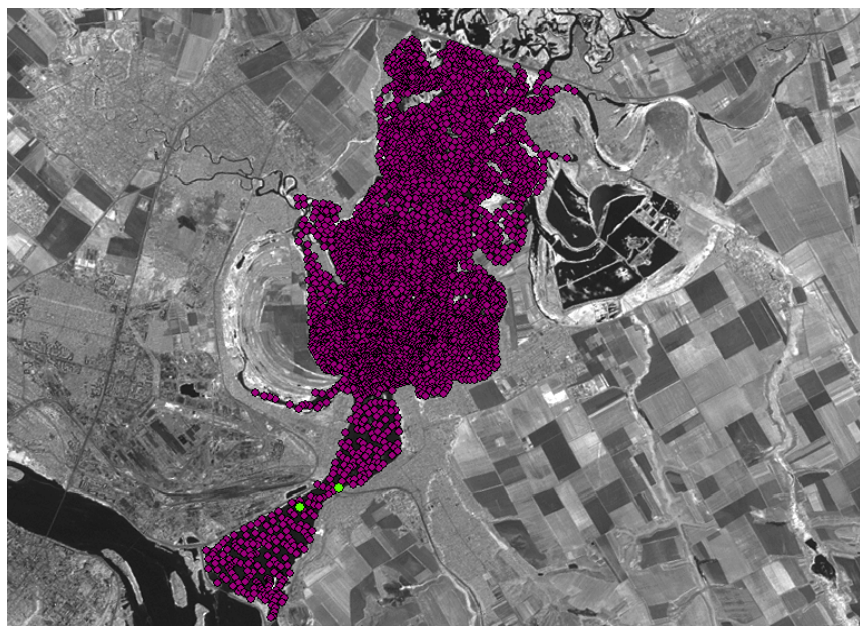


Рисунок 5.1.5. Оцифрування точок глибин Самарської затоки

Робота з моделювання рельєфу дна ділянки р. Самара (водойми-прототипу) виконана на ГІС-платформі. На підставі вимірів глибин знайдена різниця двох Grid-тем (Самарське водосховище): Grid. «ЦМР дна 2015 р.» -Grid. «ЦМР дна 2016 р.».

Результуючий растр містить інформацію про просторовий розподіл товщини донних відкладень.

Для визначення середніх потужностей донних відкладень на різних ділянках побудовані і суміщені профілі дна Самарського водосховища по глибинах 2015 і глибин 2016 рр. Для розрахунку використаний ГІС-модуль GRASS.

При побудові цифрових моделей рельєфу дна ШВ з використанням програмного забезпечення «Surfer 7.0» використані методи інтерполяції, які реалізовані в модулях Geostatistical Analyst і Spatial Analyst ГІС ArcGIS 9.1. Проблема визначення урізу води вирішується за допомогою даних ДЗЗ, зокрема КА Landsat.

Моделювання гідрологічних характеристик Самарського водосховища проводилося в середовищі ArcGIS за допомогою інструменту Hydrology, модуля просторового аналізу Spatial Analyst. Попередньо вихідні файли на модельовану територію в форматі *.HGT були конвертовані в формат * .DEM за допомогою програми GlobalMapper 9.0. Потім зшитий растр (грід) висот був імпортований в ArcGIS. На підставі польових досліджень були побудовані моделі рельєфу дна 2015 і 2016 рр. Ці моделі дозволяють оцінити зміну глибин в точках вимірювань і на цій основі визначити експериментальний об'єм намулу, накопиченого за один рік на інтервалі 2015 - 2016 рр. Результати представлені на рисунках 5.1.6 і 5.1.7. На рисунку 5.1.8 представлені результати оцифровки площі дзеркала води Дніпровського водосховища, а на рисунку і 5.1.9 – результати оцифрування точок глибин Дніпровського водосховища [125-126].

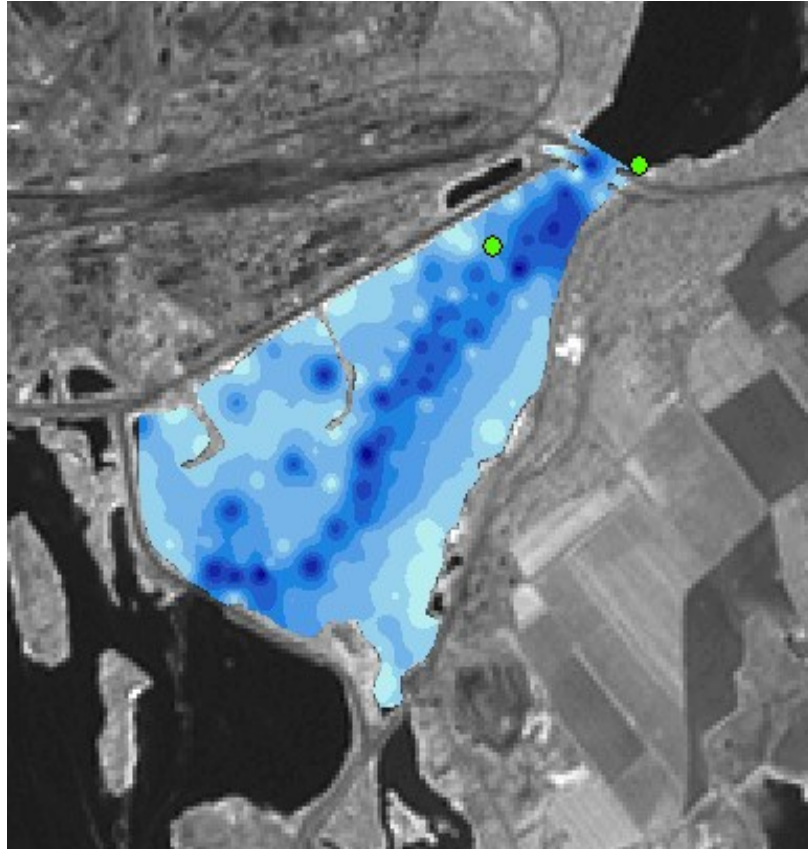


Рисунок 5.1.6. Карта нижньої ділянки Самарського водосховища, модель рельєфу дна 2015 р, (КА Landsat 8)

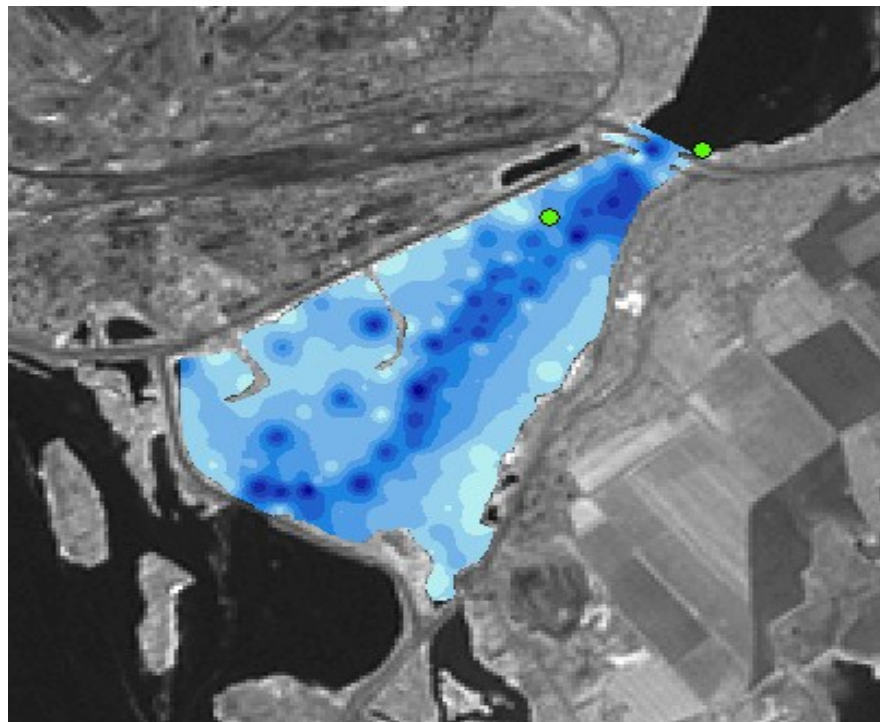


Рисунок 5.1.7. Карта нижньої ділянки Самарського водосховища, модель рельєфу дна 2016 р, (КА Landsat 8)

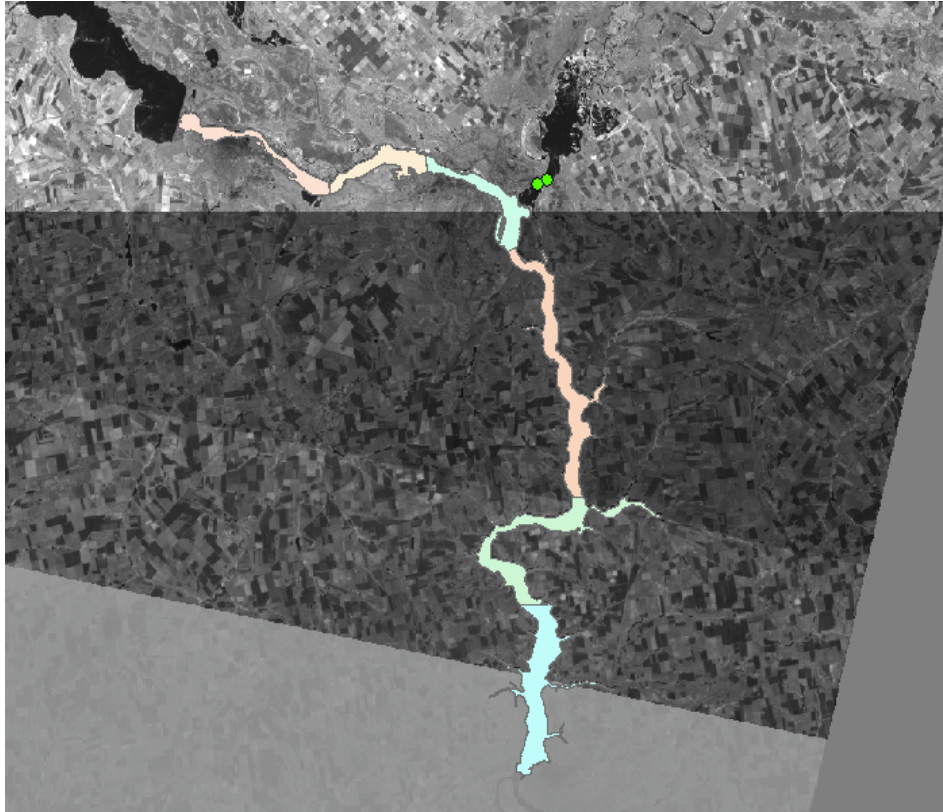


Рисунок 5.1.8. Оцифрування площі дзеркала води Дніпровського водосховища

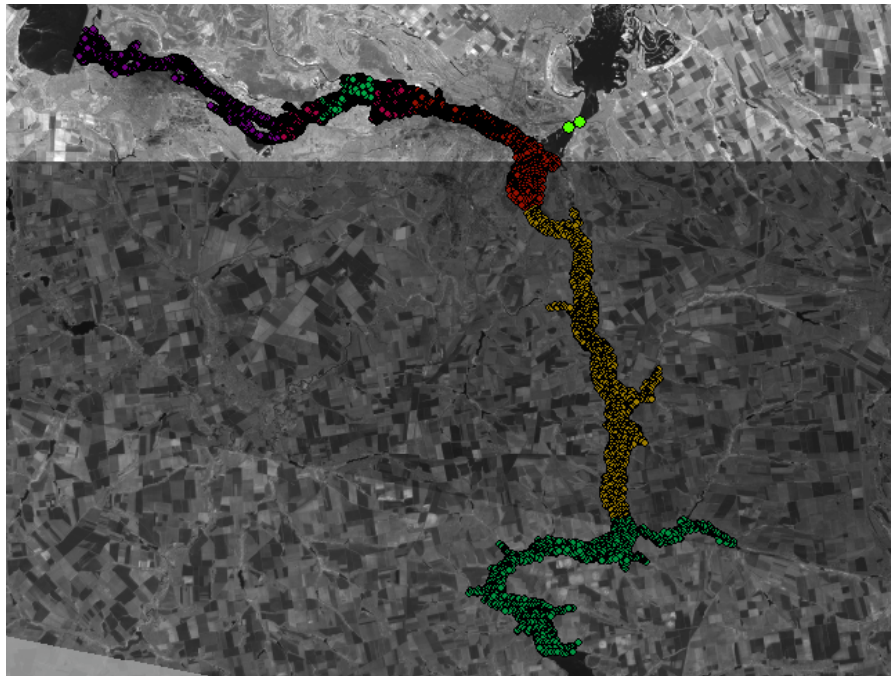


Рис. 5.1.9. Оцифрування точок глибин Дніпровського водохранилища

5.2 Експериментальне визначення об'єму замулу за результатами вимірювань глибин водосховища-прототипу

Експериментальне визначення донного рельєфу здійснюється шляхом вимірювання глибин досліджуваної частини ШВ, лабораторного визначення каламутності води і швидкості осадження речовин, які містяться у воді. Вимірювання глибин ШВ здійснюється по точкам, заданим сіткою вимірів (рис. 5.1.4) відповідно до Технічного завдання на виконання експериментальних робіт з оцінки об'ємів мулів, що випали на дно водойми протягом інтервалу часу T (один рік). Згідно з типовим технічним завданням процедури вимірювання глибин водосховища здійснюються відповідно до алгоритму, наведеними в розділі 3 даної роботи.

Для перевірки даних, отриманих на основі цифрової обробки існуючих картографічних даних і результатів моделювання процесів осадкоутворення проведені прямі виміри глибин в 2015 і 2016 роках (інтервал 1 рік). Відстані між точками вимірювання в поперечному перерізі становлять 20-30 м), відстані між поперечними перетинами лежать в діапазоні 50 м до 180 м.

Структурна схема експериментально-аналітичного модуля розрахунку об'ємів відкладень за визначеній час приведена на рисунку 5.2.1.

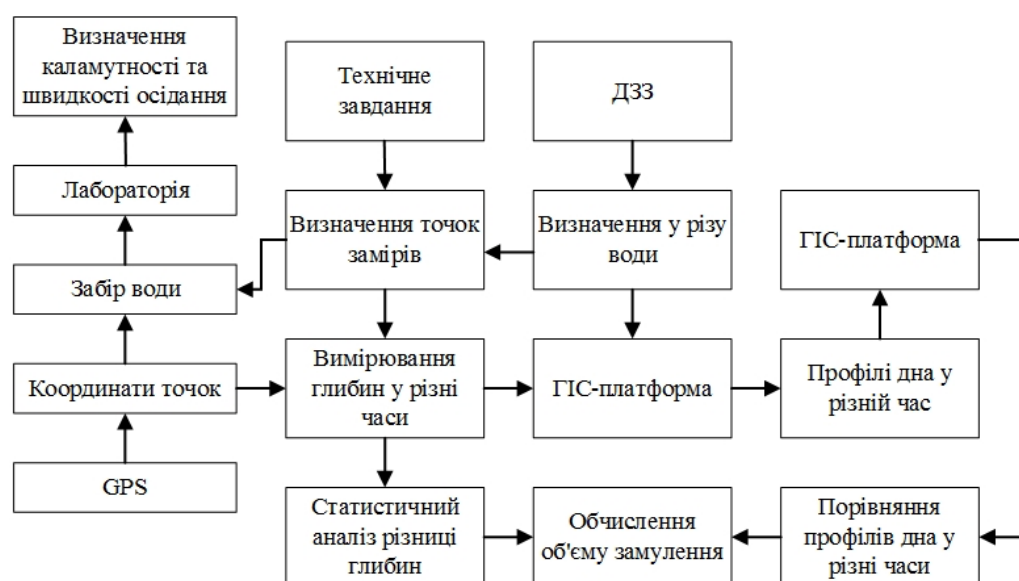


Рисунок 5.2.1. Експериментально-аналітична інформаційна технологія розрахунку замулення водосховища-прототипу

В ході експедиційних досліджень профілів поперечних перерізів водосховища-прототипу інформація отримана в формі прямих вимірювань глибин в створах заданих поперечних перерізів. Досліджувана частина акваторії задається верхнім створом (міст на Ігрень) і нижнім створом (міст на Придніпровськ). Число поперечних перерізів за течією розподілені нерівномірно [127]. З урахуванням даних оцифрування враховуються особливості форми профілю дна в конкретному перерізі. Також задається діапазон довжини кроку вимірювання, яка залежать від крутизни падіння схилу дна в площині перетину. Кількість точок замірів приблизно відповідає кількості точок оцифрування глибин Самарського ШВ.

Виміри проводилися за допомогою ехолота (Garmin fenix 2) і GPS. Дані вимірювань приведені до нормального підпорного рівня, для чого використано інформацію про поточне значення рівня штучного водосховища щодо НПР в кожен день дослідження в реперних точках. В кожному перетині взяті проби води (від 5 до 12 точок в кожному перетині, виконаний аналіз відносної кількості зважених речовин у воді відповідно вимог методик лабораторних досліджень).

За значеннями глибин першого і другого циклу вимірювань (2015-го, 2016 р.р.) відновлені на ГІС-платформі відповідні профілі дна Д1 і Д2 (рис. 5.1.6,5.1.7). На підставі статистичної різниці глибин 2015 року, 2016 років визначено об'єм замулу, що утворився протягом одного року. Цей об'єм склав 40 011 м³.

Для розрахунку об'єма замулу за методикою наближеної оцінки використовуються експериментальні дані про розподіл мутності води і швидкості осадження зважених речовин. За наближеною методикою (підрозділ 3.4) виконані оцінки кількості замулу, осадженого протягом року в заданих зонах водосховища - прототипу. Кількість замулу становило 42046 м³. Використовувався показник щільності річкового мулу $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$. Швидкість осадження мулу по всьому об'єму зони склала 109,59 тн/добу, або 4,57 тн/год. Таким чином, в експерименті об'єм замулу склав 40011 м³, а за результатами наближеної методики – 42046 м³. Такий збіг результатів дає підставу вважати методику наближеної оцінки валідною.

5.3 Розрахунок критеріїв аналогії для водосховищ прототипу і аналогів

5.3.1 Розрахунок первинних критеріїв

В якості ШВ – прототипу використовується ділянка водосховища річки Самара, від Ігреньського моста до Придніпровського (Самарське водосховище). Вибір даної ділянки заснований на феноменологічних оцінках аналогії морфометрических характеристиках Дніпровського штучного водоймища і Самарського водосховища. Більш точні оцінки аналогії виконуються на основі критеріїв аналогії ШВП і ШВА. Розрахунок первинних критеріїв аналогії ШВП і ШВА проводиться по формулам інформаційної моделі, наведеної в розділі 4. Шість водосховищ Дніпровського каскаду є водосховищами-аналогами. Найбільш близьким до прототипу з них за попередніми оцінками є Дніпровське штучне водосховище. Нижче наведено перелік первинних критеріїв (індекси позначень впорядковані), обумовлений доступністю отримання вихідних даних по водосховищах Дніпровського каскаду, для їх розрахунку.

- K_{11} – показник площі, відношення площі дзеркала водоймища до площі його водозбору,
- K_{12} – відношення річного об'єму води, що поступає до об'єму водосховища в період НПР,
- K_{13} – відношення малої вісі до великої вісі,
- K_{14} – коефіцієнт звивистості, відношення довжини берегової лінії до довжини окружності кола, з площею, що дорівнює площі водойми,
- K_{15} – коефіцієнт ємності, відношення середньої глибини до максимальної глибини,
- K_{21} – питомий водозбір, відношення площі водозбору до площі дзеркала,
- K_{22} – лісистість, %;
- K_{23} – розораність, %;
- K_{51} – каламутність води.

Результати розрахунку первинних критеріїв наведені в таблиці 5.3,1, в якій зазначено:

- ШВП – штучне водосховище-прототип (Самарське),
- А1 – Київське водосховище,
- А2 – Канівське водосховище,
- А3 – Кременчуцьке водосховище,
- А4 – Дніпродзержинське водосховище,
- А5 – Дніпровське водосховище,
- А6 – Каховське водосховище.

Таблиця 5.3.1 Первинні критерії ШВ Дніпровського каскаду

K_{ij}	ШВП	A1	A2	A3	A4	A5	A6
K_{11}	12,73	259,0	354,0	169,8	765,0	1107,0	221,0
K_{12}	0,45	12,81	18,38	3,54	19,50	14,60	2,61
K_{13}	0,33	0,25	0,08	0,19	0,14	0,09	0,11
K_{14}	1,30	1,97	1,72	3,12	2,02	2,61	3,51
K_{15}	0,20	0,28	0,19	0,30	0,27	0,15	0,24
K_{22}	0,22	0,29	0,23	0,12	0,10	0,12	0,14
K_{23}	0,39	0,22	0,26	0,39	0,48	0,41	0,39
K_{51}	1,80	0,45	0,55	0,47	0,68	0,58	0,49

Пронормуємо K_{ij} по кластеру розглянутих для порівняння водосховищ, виключаючи водосховище-прототип, використовуючи формулу:

$$Q_{Ai} = K_{Ai} - K_{min} / K_{max} - K_{min} \quad (5.1)$$

где $A_i = 1, 2, \dots, 7$. ШВП = А7

Таблиця 5.3.2 Первинні критерії аналогії (нормовані)

Критерій	Самарське (П)	Київське (А1)	Каневське (А2)	Кременчуцьке (А3)	Дніпродзержинське (А4)	Дніпровське (А5)	Каховське (А6)
K_{11}	0,000	0,225	0,312	0,144	0,687	1,000	0,190
K_{12}	0,000	0,649	0,941	0,162	1,000	0,736	0,113
K_{13}	1,000	0,676	0,000	0,432	0,241	0,031	0,108
K_{14}	0,000	0,285	0,190	0,824	0,326	0,593	1,000
K_{15}	0,329	0,838	0,233	1,000	0,790	0,000	0,571
K_{22}	0,621	1,000	0,684	0,089	0,000	0,111	0,211
K_{23}	0,645	0,000	0,151	0,683	1,000	0,730	0,653
K_{51}	1,000	0,000	0,074	0,015	0,170	0,096	0,030

Для формування комплексних критеріїв визначимо вагові коефіцієнти первинних критеріїв відповідно до методики викладеної в розділі 2. В оцінці вагових коефіцієнтів брали участь п'ять експертів-екологів (позначені E_i , $i = 1, 2 \dots 5$) з ІППЕ НАНУ. Результати експертного визначення значення вагових коефіцієнтів наведені в таблиці 5.4.3. Коефіцієнт конкордації дорівнює 0,87.

Таблица 5.3.3 Вагові коефіцієнти первинних критеріїв аналогії

Критерии аналогии	Э1	Э2	Э3	Э4	Э5	C _{ij}
K ₁₁	0,10	0,12	0,07	0,12	0,09	0,100
K ₁₂	0,15	0,12	0,18	0,18	0,15	0,156
K ₁₃	0,01	0,03	0,02	0,04	0,02	0,024
K ₁₄	0,03	0,06	0,04	0,05	0,03	0,042
K ₁₅	0,10	0,09	0,11	0,14	0,12	0,112
K ₁₆	0,04	0,07	0,06	0,05	0,08	0,060
K ₂₁	0,12	0,08	0,10	0,07	0,05	0,084
K ₂₂	0,03	0,04	0,05	0,03	0,06	0,042
K ₂₃	0,02	0,03	0,02	0,02	0,04	0,026
K ₃₁	0,05	0,04	0,02	0,04	0,01	0,032
K ₅₁	0,35	0,32	0,33	0,26	0,35	0,322

5.3.2 Розрахунок комплексних критеріїв

Використовуючи дані таблиць 5.3.2 та 5.3.3 виконаємо розрахунок комплексних критеріїв аналогії штучних водосховищ прототипу і аналогів (Дніпровський каскад водосховищ). Розрахунок проведемо, дотримуючись методики, викладеної в розділі 2. Отримаємо:

$$K_1 = 0,1K_{11} + 0,156K_{12} + 0,024K_{13} + 0,042K_{14} + 0,112K_{15} + 0,06K_{16},$$

$$K_2 = 0,084K_{21} + 0,042K_{22} + 0,025K_{23},$$

$$K_3 = 0,032K_{31}, \tag{5.2}$$

$$K_5 = 0,322K_{51},$$

$$K_{\text{сум}} = K_1 + K_2 + K_3 + K_5.$$

Результати розрахунку представлені в таблиці 5.4.4

Таблиця 5.3.4 – Комплексні критерії аналогії

Комплексні критерії аналогії	K_{Π}	K_{A1}	K_{A2}	K_{A3}	K_{A4}	K_{A5}	K_{A6}
K_1	0,061	0,246	0,212	0,197	0,333	0,240	0,145
K_2	0,126	0,045	0,035	0,026	0,025	0,027	0,025
K_3	0,322	0,000	0,024	0,005	0,055	0,041	0,010
K_5	0,509	0,291	0,271	0,228	0,413	0,308	0,180
$K_{\text{сум}}$	0,061	0,246	0,212	0,197	0,333	0,240	0,145

Пронормуємо $K_{\text{сум}}$ по кластеру розглянутих для порівняння водосховищ, виключая водосховище-прототип, використовуючи формулу (5.1). Виконаємо розрахунок коефіцієнта невідповідності за формулою 4.3.1, яка визначає міру відмінності K_{oi} ($i = 1, 2, \dots, 6$) порівнюваних водосховищ, використовуючи значення $K_{\text{сум}}$ з табл.5.4.4. Очевідно, що максимальне значення цей результат приймає, якщо в розглянутому нормированном ряду значення критерію водосховища-прототипу приймає одне з граничних значень 0 або 1. У цьому випадку максимально відрізнятиметься водосховище-аналог, для якого значення критерію в нормированном ряду стандартних значень 1 або 0, відповідно.

Результати для водосховищ Дніпровського каскаду представлені в таблиці 5.8.

Таблиця 5.3.5 – Міра відмінності критеріїв аналогії ШВ прототипу і аналогів

Π	A5	A3	A2	A6	A4	A1
$K_{\text{оп}}$	K_{o5}	K_{o3}	K_{o2}	K_{o6}	K_{o4}	K_{o1}
0	0,144	0,275	0,337	0,389	0,707	1,000

В результаті порівняння даних з таблиці 5.4.5 отримаємо наступний ієрархічний ряд розглянутих пар водосховищ:

ШВП-А5, ШВП-А3, ШВП-А2, ШВП-А6, ШВП-А4 ШВП-А1

Таблиця 5.3.6 – Ієрархічний ряд водойм-аналогів

ШВ	Значення	Рівень невідповідності
A5	0,144	Мінімум
A3	0,275	
A2	0,337	
A6	0,389	
A4	0,707	
A1	1,000	Максимум

Провівши аналогічні розрахунки для всіх поєднань пар водосховищ-аналогів, отримаємо наступну матрицю відмінностей:

Таблиця 5.3.7 – Матриця відмінностей водосховищ аналогів

	A1	A2	A3	A4	A5	A6
A1	0,00	0,50	0,57	0,17	0,75	0,61
A2	0,50	0,00	0,10	0,35	0,40	0,14
A3	0,57	0,10	0,00	0,44	0,31	0,17
A4	0,17	0,35	0,44	0,00	0,66	0,29
A5	0,75	0,40	0,31	0,66	0,00	0,46
A6	0,61	0,07	0,17	0,29	0,46	0,00

5.4 Оцінка замулення штучного водосховища-прототипа

Розрахунки об'єму мулу, утвореного в водосховищі прототипі (Самарське) проведено за трьома методиками. Перша методика заснована на використанні інформаційної моделі водосховища, представленої в другому розділі дисертаційного дослідження. Друга методика заснована на використанні експрес-оцінки об'єму замулення (підрозділ 3.4), на базі експериментальних даних про каламутності води у водосховищі-прототипі (вересень 2015 – вересень 2016 рр.) А також лабораторного визначення швидкості осадження зважених речовин у воді водосховища. Третя

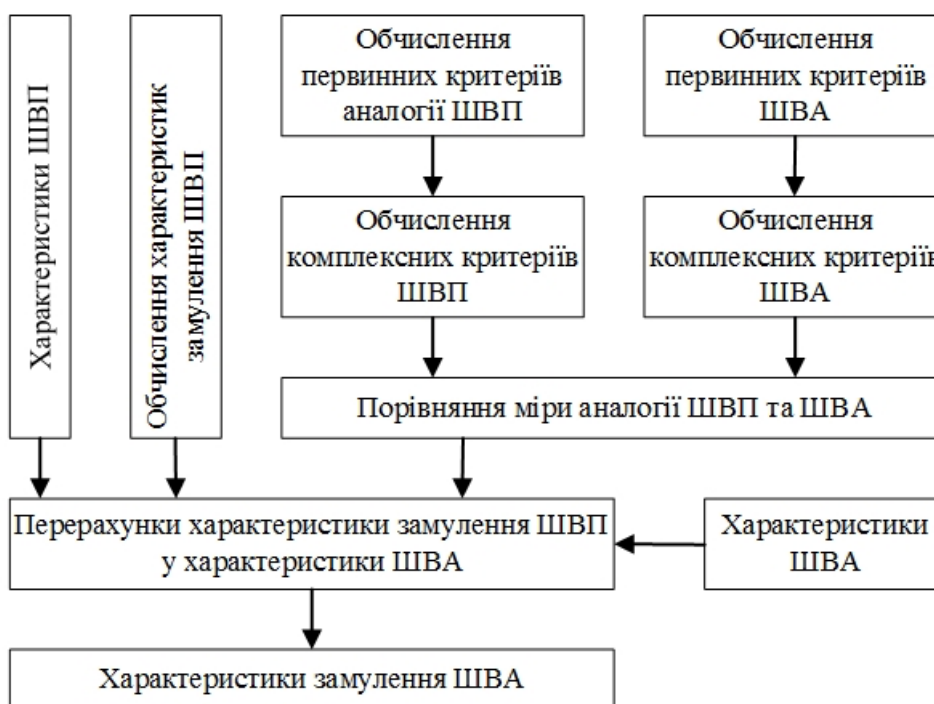
методика заснована на прямих вимірах об'ємів намулу, що осів на дно Самарського водосховища. Методика і дані експерименту наведені в підрозділі 3.4 даного дослідження.

Результати розрахунків за трьома методиками представлені нижче. Об'єм W_n і маса M_n намулу, утвореного в 2015-2016 рр. в Самарському водосховищі при показнику щільності річкового мулу $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$ склав:

- | | |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.Методика 1 | $W_n = 2,05 \cdot 10^5 \text{ м}^3$, $M_n = 3,28 \cdot 10^5 \text{ т}$, $h=4,11 \text{ см}$ |
| 2.Методика 2 | $W_n = 2,8 \cdot 10^5 \text{ м}^3$, $M_n = 4,48 \cdot 10^5 \text{ т}$, $h=4,77 \text{ см}$ |
| 3. Методика 3 | $W_n = 2,4 \cdot 10^5 \text{ м}^3$, $M_n = 3,84 \cdot 10^5 \text{ т}$, $h=4,26 \text{ см}$ |

Для валідації методики, порівнюємо дані з раніше отриманими вченими ІППЕ НАН України. За результатами розрахунків було отримано осаджень в кількості 2,7 см в рік, що підтверджує правильність методики [128].

Перерахунок даних оцінки замулення водосховища-прототипу в дані оцінки замулення водосховища-аналога здійснювався згідно інформаційної моделі, розробленої з урахуванням співвідношення об'ємів води і характеристик каламутності води (рисунок 5.4.1).



ШВП – штучне водосховищ-прототип;

ШВА – штучне водосховищ-аналог

Рисунок 5.4.1. Інформаційна технологія обчислення замулення водосховища-аналога

5.5 Перерахунок оцінок замулення водосховища-прототипу в оцінку замулення водосховищ Дніпровського каскаду

Перерахунок даних оцінки замулення водосховища-прототипу в дані оцінки ШВА здійснюється за такою методикою:

1. Будується таблиця вихідних даних для перерахунку оцінок замулення.

Таблиця 5.5.1 – Вихідні дані для оцінок замулюванні ШВА

Параметри	П	A5	A3	A2	A6	A4	A1
n	1	82,5	337,5	65	457,5	61,25	93,25
K _{Mi}	1	0,32	0,26	0,31	0,27	0,38	0,25
W*10 ⁵ , м ³	2,4	63,80	211,50	47,67	299,51	55,53	55,95
M*10 ⁵ , т	3,84	102,08	338,40	76,27	479,22	88,85	89,52

2. Визначається відношення n об'ємів води у водосховищах прототипу W_П і аналога W_А:

$$n = W_A / W_{\text{П}} \quad (5.3)$$

3. Розраховується середнє значення коефіцієнта каламутності ШВ

$$m_{Aic} = m_{12} + m_{Ai\dots} + \dots + m_{An} \quad (5.4)$$

4. Обчислюється коефіцієнт відносної мутності m_{Aic} і-го водосховища:

$$K_{Mi} = m_{Aic} / m_{\text{П}} \quad (5.5)$$

де m_{Aic} – каламутність в і-му водосховищі-аналогу, m_П – каламутність в водосховище прототипі.

Дані зберігають в таблицю.

Таблиця 5.5.2 – Середні значення коефіцієнта відносної каламутності

Параметри	ШВП	A1	A2	A3	A4	A5	A6
m _{Aic}	1,8	0,45	0,55	0,47	0,68	0,58	0,491

5. Визначаються об'єми та маси намулу в і-их водосховищах-аналогах:

$$W_{Ai} = n_i W_H K_{Mi},$$

$$M_{Ai} = n_i M_H K_{Mi}, \quad (5.6)$$

Результати розрахунку заносяться в таблицю 5.6.3.

Таблиця 5.5.3 – Об'єми та маси намулу в водосховищах-аналогах

Параметры	ШВП	A1	A2	A3	A4	A5	A6
$W_{Ai} * 10^5, \text{м}^3$	2,4	55,95	47,67	211,50	55,53	63,80	299,51
$M_{Ai} * 10^5, \text{т}$	3,84	89,52	76,27	338,40	88,85	102,08	479,22

Таблиця 5.5.4 – Маса намулу, що випадає в водосховище Дніпровського каскаду

Водосховище	Об'єм намулу*10 ⁵ , м ³	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 до п'ятого розділу

Загальна характеристика водосховищ Дніпровського каскаду, до яких відносяться: Київське водосховище, Канівське водосховище, Кременчуцьке водосховище, Дніпродзержинське водосховище, Дніпровське водосховище, Каховське водосховище демонструє дві групи водосховищ, які розташовані в лісостеповій та степовій зонах України.

Виконано оцифрування Дніпровського водосховища та його прототипу для порівняння характеристик замулення. Представлена інформація про результати прямих вимірювань глибин Самарського водосховища, виконаних з інтервалом в один рік для оцінки його замулення. Ця інформація використовується для верифікації результатів моделювання, виконаних за різними методиками – на базі повної інформаційної моделі і на базі експрес-методики, заснованої на використанні такого

інтегрального показника для завдання замулення як «каламутність води». Цей показник визначався для Самарського водосховища і для Дніпровського водосховища експериментально.

Розраховані значення критеріїв аналогії для всіх водосховищ каскаду, а також для водосховища-прототипу. Виконано порівняльний аналіз значень критеріїв аналогії ШВП і ШВА. Також виконано порівняльний аналіз значень критерію аналогії всіх поєднань пар водосховищ Дніпровського каскаду. На цій основі побудована матриця відмінностей водосховищ-аналогів, яка дозволяє оцінити можливість застосування методу аналогії, використовуючи в якості аналога одне з водоймищ каскаду, якщо воно відповідає критерію аналогії.

Виконано розрахунки об'єму і маси намулу в водосховище-прототипі за трьома методиками – двом аналітичним і однією експериментальною. Розрахунок маси проводився при показнику щільності річкового мулу $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$.

ВИСНОВКИ

У результаті дисертаційних досліджень, виконаних автором, вирішено важливе науково-технічне завдання – створення інформаційної технології оцінки замулення штучних водосховищ.

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.

Створену інформаційну технологію оцінки замулення штучних водосховищ, яка реалізує на практиці розроблені алгоритми, моделі та метод, 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 модель замулення і відповідне програмне забезпечення впроваджені в якості розрахункового модуля в інформаційно-пошукову і експертну систему обробки інформації для прийняття рішень в Дніпропетровськiм відділі МНС України. Алгоритм розробки інформаційної системи замулювання великих водосховищ використано у процесі підготовки технічного завдання на розробку, побудову та впровадження автоматизованої системи технічного діагностування стану безпеки територій, що входять в коло відповідальності Дніпровського відділу МНС України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пономаренко В.С., Мінухін С.В., Кавун С. В., та ін.. Методи та моделі розроблення комп'ютерних систем і мереж. Монографія. Харків. 2008. 316 с.
2. Журкин И. Г., Шайтура С. В. Геоинформационные системы. Москва. 2009. – 272 с.
3. Браун Л. А. История географических карт. Москва. 2006. – 479 с.
4. Сферы применения ГИС MapInfo [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://goods.marketgid.com/goods/249/1900528/>
5. Михайлов В.Н., Добровольский А.Д., Добролюбов С.А. Гидрология: учебник. – М.: Высш. шк., 2005. – 463 с.
6. 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.
7. Пьянков С.В., Калинин В.Г. ГИС и математико-картографическое моделирование при исследовании водохранилищ (на примере камских) Пермь: ООО "Алекс-Пресс", 2011. — 158 с. — ISBN: 978-5-7944-1429-5
8. Тараненко О.С., Дубовик Д.Д., Оцінка інтенсивності накопичення донних відкладень у Дніпровському водосховищі за допомогою ГІС / «Міжнародний день ДНІПРА. Дніпропетровськ, 2015.
9. A. Shapar, O. Skrypnyk, O. Taranenko, D. Dubovik. «Determination of bottom sediments intensity accumulation in samara gulf of dnierper reservoirs using geographic information systems (GIS)» / Екологічна безпека № 1/2015 (19), Кременчуг, 2015. – С. 33-36.
10. 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;
11. «День довкілля 2014» (28 квітня 2014 р., м. Дніпропетровськ) за темою «Розрахунок замулення каскаду Дніпровського водосховища за допомогою ГІС технологій»

12. Кидин В.В., Торшин С.П. Агрохимия. Учебник. – Проспект, 2015. – 619 с. – ISBN 9785392187676.
13. Михайлов В.Н., Добровольский А.Д., Добролюбов С.А. Гидрология. – М.: Высш. шк., 2007. – 463 с.
14. Журкін І.Г., Шайтура С.В. Геоінформаційні системи. – Москва: КУДИЦ-ПРЕСС, 2009. – 272 с.
15. Браун Л.А. Історія географічних карт. – Москва: Центрполіграф, 2006. – 479 с.
16. Пархаєва Н. В. Проблеми та перспективи розвитку логістичної інфраструктури в Україні / Н. В. Пархаєва, Б. В. Колосова // Теоретичні і практичні аспекти економіки та інтелектуальної власності. – 2013. – Вип. 1(2). – С. 259–263. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Traeiv_2013_1\(2\)58](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Traeiv_2013_1(2)58). 17 2.
17. Обзор онлайн-картографических сервисов [Электронный ресурс]: – Режим доступа: http://www.3dnews.ru/software/online_maps_review
18. Водный фонд Украины: Искусственные водоемы - водохранилища и пруды: Справочник / Под ред. В.К. Хильчевского, В.В. Гребня. – К.: Интерпрес, 2014. – 164
19. Батищев Д.И., Шапошников Д.Е. Многокритериальный выбор с учетом индивидуальных предпочтений. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1994 г. – 92 с.
20. Смородинский С.С., Батин Н.В. Методы анализа и принятия управленческих решений. Учебное пособие по курсу "Методы и системы принятия решений" для студентов экономико-управленческих специальностей. Минск: БКУУ, 2000 г. – 101 с.
21. Ступницький О. І. Інформаційні технології у інфраструктурі глобальних логістичних мереж / Ступницький О. І., Дашкуєв М. А. //Актуальні проблеми міжнародних відносин: Зб. наук. праць. — Випуск 122, Частина II. — К. : Київ. нац. ун-т ім. Т. Шевченка, Ін-т міжнар. відносин, 2014. — С. 104–115. — Режим доступу: <http://journals.iir.kiev.ua/index.php/apmv/article/viewFile/2472/2204>
22. Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. М., Наука, 2007 – 294 с.
23. Прыткова М.Я., Виноградова О.М. Районирование бассейна Ладожского озера по условиям формирования годового стока рек. Научный журнал география и природные ресурсы 2007 – С. 76-83.

24. Прыткова М.Я. Воронцова Н.К. Котрехов Е.П. Водные тресурсы рек Карельского перешейка // Изв РГО. – 2000. Вып 3
25. Боровков В.С. Русловые процессы и динамика речных потоков на урбанизированных территориях. Л.. 1989. 286 с.
26. Барышников Н.Б. Морфология, гидрология и гидравлика пойм. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 280 с.
27. Россинский К.И., Дебольский В.К. Речные наносы. М.: Наука, 1980. 218 с.; Численное моделирование задач гидроледотермики водотоков / В.М. Белолипецкий, С.Н. Генова, В.Б. Туговиков, Ю.И. Шокин. Новосибирск: СО РАН, ИВТ, ВЦ (г. Красноярск), 1994. 136 с.
28. Белолипецкий В.М., Генова С.Н. Вычислительный алгоритм определения динамики взвешенных донных наносов в речном русле. Вычислительные технологии. Том9, №2, 2004.С.10–24
29. Боровков В.С. Русловые процессы и динамика речных потоков на урбанизированных территориях. Л.: Гидрометеиздат. 1989. – 286 с.
30. Милитеев А.Н., Базаров Д.Р. Математическая модель для расчета двумерных (в плане) деформаций русел // Водные ресурсы. 1999. –Т. 26, No 1. С. 22–26.
31. Адесман А.В. Основные уравнения диффузионной модели общих русловых деформаций // Динамика и термика рек, водохранилищ, внутренних и окраинных морей: Тез. докл. четвертой конф. 1994. Т. 1. М., С. 171–173.
32. Дубовик Д.Д. Структура информационной модели заиления искусственных водохранилищ. Научно-теоретический и практический журнал. Оралдын Ғылым Жаршысы №29 (160) Казахстан 2016. 66-71С.
33. Россинский К.И., Дебольский В.К. Речные наносы. М.: 1980. 218 с.
34. Михайлов В.Н., Добровольский А.Д. Общая гидрология. Учебник для ВУЗов: М. "Высшая школа", 1991. – 368 с.
35. Шмакова М.В. Теория и практика математического моделирования речных потоков. — СПб: Издательство Лема, 2013. — 142 с.].
36. Алпатов А.П. Системный анализ и управление сложными системами в условиях неопределенности. Алпатов А.П. Марченко В.Т., Прокопчук А.Ю., Сарычев А.П./ Днепрпетровск: ИТМ НАН и ГКА Украины, 2015. – 195 с.

37. Алпатов А.П. Информационные модели в технологии борьбы с антропогенным загрязнением ближнего космоса. Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.—Випуск 3(116)—Дніпро,2018.—с.3–13.
38. Maidment D., Djokic D. Hydrologic and Hydraulic Modeling Support with Geographic Information Systems. Redlands, California, 2000. 232 p.
39. Farr T.G., Hensley S., Rodriguez E. et al. The shuttle radar topography mission // CEOS SAR Workshop. Toulouse 26-29 Oct. 1999. Noordwijk, 2000. P. 361-363.
40. Зарубина Р.Ф., Копылова Ю.Г., Зарубин А.Г. Анализ и улучшение качества природных вод. Часть 2. Методы оценки качества природных вод Учебное пособие. — Томск, ТПУ, 2011. — 151 с.
41. Караушев А.В. Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод. Л.: Гидрометеиздат, 1987. — 285 с.
42. Белоліпецький В.М., Генова С.Н. Вычислительный алгоритм определения динамики взвешенных донных наносов в речном русле. Вычислительные технологии. Том 9, №2, 2004.С.10–24.
43. Сагомоян А.Я. К вопросу дождевой эрозии на склонах возвышенностей под действием дождя // Изв. РАН. Механика твердого тела. 1998. No 6. С. 143–148.
44. А.Б. Китаев. Методы оценки внешнего водообмена водохранилищ, 2005
45. Эдельштейн К. К. Водохранилища России: экологические проблемы, пути их решения / К.К. Эдельштейн. М.: ГЕОС, 1998.
46. Трифонова Т.А., Селиванова Н.В. Охрана и рациональное использование водных ресурсов Учебное пособие. - Владимир, ВлГУ, 2010. - 108 с.
47. Ступницький О. І. Інформаційні технології у інфраструктурі глобальних логістичних мереж / Ступницький О. І., Дашкуєв М. А. //Актуальні проблеми міжнародних відносин: Зб. наук. праць. — Випуск 122, Частина II. — К. : Київ. нац. ун-т ім. Т. Шевченка, Ін-т міжнар. відносин, 2014. — С. 104–115.
48. Тимощук О. М. Інформаційно-логістичні системи в сучасних транспортних технологіях / О. М. Тимощук, О. В. Мельник // Інвестиції: практика та досвід. — 2015. — № 22. — С. 79–82.

49. Обухов Е.В., Куклева Д.С., Максютя О.М. Обобщенные оценки испарения с водной поверхности Кременчугского водохранилища // Український гідрометеорологічний журнал.- 2013.- №13.- С. 116 – 126.
50. Богословский Б.Б. Филь С.А. Классификация водоемов по внешнему водообмену / В кн.: Географо-гидрологический метод исследования вод суши. – Л., 1984. – С. 54–60.
51. Китаев А.Б. Особенности оценки внешнего водообмена в водохранилищах //Труды межд. н.-пр. конф. «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов», Т.1. – Пермь, 2013. – С.203–209
52. Штефан В.Н. К расчету водообмена долинного водохранилища // Вестник Моск. ун-та. Сер. Геогр. –1975. – №5. – С. 71–75.
53. Дубровин Л.И. Новые данные к гидрометеорологической характеристике Камского водохранилища / Л.И. Дубровин // Докл. IV Всеурал. совещ. по физико- и экономико-географическому районированию. Пермь, 1958. Вып. 1. С. 46-51.
54. Мамаев Е. Microsoft SQL Server 2000 / Мамаев Е. – СПб.: БхВ-Петербург, 2007. – 1280 с.
55. Нильсен Пол. Microsoft SQL Server 2005. Библия пользователя / Нильсен Пол. – М.: Диалектика, 2007. – 1232 с.
56. Пирогов В. MS SQL Server 2000: управление и программирование. / Пирогов В. – СПб.: БхВ-Петербург, 2007. – 608 с.
57. Харинатх Сивакумар. SQL Server 2005 Analysis Services и MDX для профессионалов / Сивакумар Харинатх, Стивен Куинн – М.: Диалектика, 2007. – 848 с.
58. Хотек М. Microsoft SQL Server 2008. Реализация и обслуживание / Хотек – М.: Русская Редакция, 2011. – 576 с.
59. Нейгел Кристиан. С# 2005 для профессионалов. Си шарп / Кристиан Нейгел – М.: Диалектика, 2006 – 1376 с.
60. Браверман Э. М. Математические модели планирования и управления в экономических системах. / Браверман Э. М. – М.: Наука, 1976. – 368 с.
61. Майер Р. В. Математическая модель процесса обучения. / Майер Р. В. – Новости школы. 2006. – № 1. – С. 56 – 63.

62. Колодницький М. М. Основи теорії математичного моделювання систем: Навчально-довідковий посібник / Колодницький М. М. – Житомир: ЖТТУ, 2001. – Т. 1. - 2001. – 718 с.
63. Дубровин Л.И. Камское водохранилище / Л.И. Дубровин, Ю.М. Матарзин, И.А. Печеркин. Пермь: Перм. кн. изд-во, 1959. 159 с.
64. Абальянц С.Х. Устойчивые и переходные режимы в искусственных руслах. Л.: Гид-рометеиздат, 1981. 238 с.
65. А.Б. Китаев. Методы оценки внешнего водообмена водохранилищ, 2005
66. Эдельштейн К. К. Водоохранилища России: экологические проблемы, пути их решения / К.К. Эдельштейн. М.: ГЕОС, 1998.
67. Зырянов А.Г. Динамика заиления водохранилища Учкурганской ГЭС и опыт борьбы с наносами // Гидротехническое строительство, № 1. – М., 1973, – С. 32–37.
68. Исаев, Г.Н. Информационные технологии: Учебное пособие / Г.Н. Исаев. – М.: Омега-Л, 2013. – 464 с. 16. Любарский, Ю.Я. Интеллектуальные информационные системы: / Ю.Я. Любарский. – М.: Наука, – 2014. – 228 с.
69. Румянцева, Е.Л. Информационные технологии: Учебное пособие / Е.Л. Румянцева, В.В. Слюсарь; Под ред. Л.Г. Гагарина. – М.: ИД ФОРУМ, НИЦ ИНФРА-М, 2013. – 256 с. 18.
70. Федотова, Е.Л. Информационные технологии и системы: Учебное пособие / Е.Л. Федотова. – М.: ИД ФОРУМ, НИЦ ИНФРА-М, 2013. – 352 с. 19. Хлебников, А.А. Информационные технологии: Учебник / А.А. Хлебников. – М.: КноРус, 2014. – 472 с.
71. Домарев, В.В. Безопасность информационных технологий. Методология создания систем защиты [Текст]/ В.В. Домарев. – М.; СПб.; Киев: ООО «ТИД «ДС», 2001. – 688с.
72. Пилко, И.С. Информационные и библиотечные технологии [Текст]: учеб. пособие/ И.С. Пилко. – СПб.: Профессия, 2006. – 342с.
73. Поздеев А.Г. Системный эколого-экономический анализ состояния водных ресурсов: Научное издание / А.Г. Поздеев, Е.Ю. Разумов, Ю.А. Поздеева, Е.В. Моспанова, А.В. Башкиров. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2002. – 71 с.; Поздеев А.Г. Информационно-технологическая модель водного баланса речного бассейна\

А.Г.Поздеев, Ю.А.Кузнецова, А.Ю.Ржепкин/ *Фундаментальные исследования* № 11, 2014.–с.1253-1256

74. HRM: Классификация HRM-систем. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.tadviser.ru/index.php/Статья_Классификация_HRM-систем.

75. Иванов І.І. Огляд програм для автоматизації HRM / Иванов І.І. / *Управління персоналом*. – Україна. – 2009. – № 11 (194).

76. Ручкин В.Н., Фулин В.А. Универсальный искусственный интеллект и экспертные системы. – СПб.:БХВ-Петербург, 2009. – 240с. Яхьяева Г.Э. Нечеткие множества и нейронные сети. М.: Интерент – Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатори знаний, 2008. – 316 с.

77. Эддоус М., Стедфилд Р. Методы принятия решений/ Пер. с англ. – М.: Аудит, ЮНИТИ, 1997. – 590 с.

78. Андрейчиков А.В. Анализ, синтез, планирование решений в экономике: Учебник/ А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова / 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Финансы и статистика, 2004. -464 с.

79. Федотова, Е.Л. Информационные технологии и системы: Учебное пособие / Е.Л. Федотова. - М.: ИД ФОРУМ, НИЦ Инфра-М, 2013. - 352 с.

80. Бородакий, Ю.В. Информационные технологии. Методы, процессы, системы / Ю.В. Бородакий, Ю.Г. Лободинский. - М.: ГЛТ, 2004. - 456 с.

81. Акперов, И., Г. Информационные технологии в менеджменте: Уч. / И. Г. Акперов, А. В. Сметанин, И. А. Коноплева. - М.: Инфра-М, 2014. - 104 с.

82. Информационные технологии и вычислительные системы / Под ред. С.В. Емельянова. - М.: Ленанд, 2009. - 124 с.

83. Автоматизированные системы обработки информации и управления в экономике: Учебник / А. Б. Николаев, С. В. Алексахин, И. А. Кузнецов, В. Ю. Строганов; Под ред. А. Б. Николаева. -- М.: Издательский центр «Академия», 2013. -- 224 с.

84. Елисеева И. И. Практикум по эконометрике: учеб. пособие/ И. И. Елисеева – М.: Финансы и статистика, 2008.

85. Кремер Н. Ш. Математика для экономистов: от Арифметики до Эконометрики: учебно-справочное пособие / Н. Ш. Кремер, Б. А. Путко, И. М. Тришин ; ред. Н. Ш. Кремер. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Юрайт,2010.

86. Анфилатов В.С. Системный анализ в управлении / Анфилатов В.С., Емельянов А.А., Кукушкин А.А. / М.: Финансы и статистика, 2002. – 368 с.
87. Mizoguchi R. Task ontology: Ontology for building conceptual problem solving models / R. Mizoguchi, J. Vanwelkenhuysen, M. Ikeda // Towards very Large Knowledge Bases. Part. 1. Edited by Mars NJ.I. - IOS Press, 1995. - 314 p.
88. Башмаков А.И. Интеллектуальные информационные технологии: Учеб. пособие / А.И. Башмаков, И.А. Башмаков. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 304 с.
89. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем: Учеб. для вузов — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 2001. — 343 с.
90. Мирцхулава Ц.Е. Основы физики и механики эрозии русел. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 303 с.
91. The Information: A History, a Theory, a Flood (Hardcover) by James Gleick (shelved 7 times as information-technology) 2010.
92. Enterprise Architecture As Strategy: Creating a Foundation for Business Execution (Hardcover) by Jeanne W. Ross (shelved 4 times as information-technology) 2011/
93. Преображенский Ю.П. Формулировка и классификация задач оптимального управления производственными объектами Вестник Воронежского государственного технического университета 2010. Т. 6. № 5. С. 99-102.
94. Казанский В.Б. Статистическая физика и термодинамика. Задачи, основные понятия и положения. Метод. пособие. – Харьков: ХНУ, 2004. – 112 с.
95. Шмакова М.В. Теория и практика математического моделирования речных потоков. — СПб: Издательство Лема, 2013. — 142 с.].
96. Белопухов С.Л, Тютюнькова М.В., Сюняев Н.К., Химия окружающей среды: учебное пособие для ВУЗов, Москва ООО «Проспект» 2016, 240 с.
97. Лаломов А.В., Таболич С.Э. Механизмы формирования концентраций титан-цирко-ниевых минералов прибрежно-морских россыпей сублиторальной зоны // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2011. – Т. 153, кн. 4. – С. 232–242.
98. Корнеев, И.К. Информационные технологии в работе с документами: Учебник / И.К. Корнеев. - М.: Проспект, 2016. - 304 с.
99. Щербакова, Т.Ф. Вычислительная техника и информационные технологии: учебное пособие / Т.Ф. Щербакова. - М.: Academia, 2017. - 288 с.

100. Шмелева, А.Г. Информатика. Информационные технологии в профессиональной деятельности: Microsoft Word. Microsoft Excel: теория и применение для решения профессиональных задач / А.Г. Шмелева, А.И. Ладынин. - М.: Ленанд, 2018. - 304 с.
101. Бочаров Е. П. Интегрированные корпоративные системы. Принципы построения: лабораторный практикум на базе системы «Галактика» / Е. П. Бочаров, А. И. Колдина / М. : Финансы и статистика, 2005. – 286 с.
102. Автоматизированные информационные технологии в экономике: Учебник / М.И. Семенов, И.Т. Трубилин, В.И. Лойко, Т.П. Барановская; Под общ. ред. И.Т. Трубилина. – М: Финансы и статистика, 2000. – 416 с.
103. Коршунов А. И. Создание автоматизированных систем управления машиностроительными производствами на основе теории конструктивно-технологической сложности: автореф дис. д-ра техн. наук: 05.13.06. – Ижевский. гос. техн. ун-т. – Ижевск, 2008. – 43 с.
104. Системы управления предприятием (мировой рынок): [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.tadviser.ru/>.
105. Fishman, George S. Monte Carlo: concepts, algorithms, and applications. — Springer, 1996. — ISBN 0-387-94527-X.
106. Соболев И.М. Метод Монте-Карло. — М.: Наука, 1968. — 64 с. — (Популярные лекции по математике).
107. Бережная Е.В. Математические методы моделирования экономических систем: Учеб. Пособие / Е.В. Бережная, В.И. Бережной - М.: Финансы и статистика, 2006. — 432 с.
108. Яманин, А.И. Компьютерно-информационные технологии в двигателестроении / А.И. Яманин, Ю.В. Голубев и др. - М.: Машиностроение, 2005. - 480 с.
109. Дрозд, Н.И. Твердий сток і замулення водосховищ Текст. / Н.И. Дрозд // Пролопчш розрахунки для рі40К Украши. Кшв, 1962. – С. 209238.
110. Дрозд, Н.И. Заиление водоемов Текст. / Н.И. Дрозд // Ресурсы поверхностных вод СССР. Л., 1969. –Т.6, вып. 1. – С. 619–634.
111. Дроздов, К.А. Распространение овражной эрозии на территории центральных черноземных областей Текст. / К.А. Дроздов // Науч. зап. Воронеж. отд. Геогр. о-ва СССР. Воронеж, 1965. – С. 64–72.

112. Дроздов, К.А. Пруды и водохранилища ЦЧО как антропогенные ландшафтные комплексы (урочища и группы урочищ) Текст. / К.А. Дроздов // Науч. зап. Воронеж, отд. Геогр. о-ва СССР. Воронеж, 1974. – С. 36–46.
113. 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. – №12 (1184). – С. 112-118. – doi:10.20998/2413-4295.2016.12.16.
114. Семенов, А.Л. Современные информационные технологии и перевод / А.Л. Семенов. - М.: Academia, 2017. - 188 с.
115. Остроух, А.В. Интеллектуальные информационные системы и технологии: Монография / А.В. Остроух, А.Б. Николаев. - СПб.: Лань, 2019. - 308 с.
116. Тюрин, И.В. Вычислительная техника и информационные технологии / И.В. Тюрин. - РнД: Феникс, 2017. - 462 с.
117. Советов, Б.Я. Информационные технологии: теоретические основы: Учебное пособие / Б.Я. Советов, В.В. Цехановский. - СПб.: Лань, 2016. - 448 с.
118. Саак, А.Э. Информационные технологии управления: Учебник / А.Э. Саак. - СПб.: Питер, 2018. - 319 с.
119. Светлов, Н.М. Информационные технологии управл. проектами: Учебное пособие / Н.М. Светлов, Г.Н. Светлова. - М.: Инфра-М, 2018. - 192 с.
120. Емельянов, С.В. Информационные технологии и вычислительные системы / С.В. Емельянов. - М.: Ленанд, 2015. - 96 с.
121. Гаврилов, М.В. Информатика и информационные технологии: Учебник / М.В. Гаврилов, В.А. Климов. - Люберцы: Юрайт, 2016. - 383 с.
122. Гвоздева, В.А. Информатика, автоматизированные информационные технологии и системы: Учебник / В.А. Гвоздева. - М.: ИД ФОРУМ, НИЦ ИНФРА-М, 2013. - 544 с.
123. Павлов, С.В. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебное пособие / С.В. Павлов. – М.: ИЦ РИОР, ИНФРА-М.: 2010. – 186 с.
124. Павленко П. Н. Математическое моделирование процессов интеграции производственных данных / П. Н. Павленко, Б. С. Ахметов, В. В. Трейтяк // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – №2/3 (28). – С. 29-33.

125. A. Shapar, O. Skrypnyk, O. Taranenko, D. Dubovik. «Determination of bottom sediments intensity accumulation in samara gulf of dnierper reservoirs using geographic information systems (GIS)» / *Екологічна безпека* № 1/2015 (19), Кременчуг, 2015. – С. 33-36.
126. 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.
127. 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.
128. 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.

ДОДАТОК А

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати

Публікації у фахових виданнях України з технічних наук

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

Особистий внесок здобувача: розробка алгоритму інформаційної технології та використання власно розроблених програм ГІС систем для визначення замулення участку р. Дніпро.

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).

Особистий внесок здобувача: розробка зональних характеристик штучних водоймищ та їх розрахунок.

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. 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).

6. Дубовик, Д. Д. Экспериментальное определение донного рельефа на базе исследований нижнего участка р. Самара / Д. Д. Дубовик, Ю. И. 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).

Особистий внесок здобувача: за допомогою інформаційних технологій, ГІС-технологій, ДЗЗ проведено експериментальне визначення донного рельєфу.

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

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

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.

Наукові праці, які додатково відображають результати дисертаційної роботи

12. Дубовик Д.Д. Моделирование процессов заиления искусственных водохранилищ. Постановка задачи / VIII международная научно-практическая конференция «Проблемы природопользования, устойчивого развития и техногенной безопасности регионов». 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 міждисциплінарна конференція молодих вчених Шевченківська весна. Географія. Київ, 2-3 квітня 2015. 73-76 С.

15. Дубовик Д.Д. Расчёт заиливания 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 довкілля 2014» (28 квітня 2014 р., м. Дніпропетровськ) за темою «Розрахунок замулення каскаду Дніпровського водосховища за допомогою ГІС технологій»

ДОДАТОК Б

Перерахунок обсягів і маси намулу, утвореного в той же період, що і у водосховища - прототипу проводився за методикою враховує каламутність води у водосховищі. Використовувалися для розрахунку усереднені показники мутності по зонам водосховища і за часом. Коефіцієнти відмінності пропонується використовувати як показники точності оцінок. Оскільки їх значення лежать в діапазоні від нуля до одиниці (0 відповідає ідентичним відповідності порівнюваних водойм, а 1 - відповідає їх абсолютному розбіжності з досліджуваних властивостей), то можна припустити, що міра невідповідності характеризує точність (надійність) оцінки характеристик замулення ШВА на підставі характеристик ШВП.

Експериментальне визначення донного рельєфу засноване на визначенні фактичної кількості донних відкладень протягом одного року. Для цієї мети були проведені експериментальні дослідження нижньої ділянки р. Самара (між мостом на Ігрень і мостом на Придніпровськ). Дослідження проводилися з використанням плавзасобів, GPS трекера Gembird, ехолота (Garmin fenix 2), а також засобів забору води для визначення її каламутності та інших характеристик.

Для побудови маршруту руху при вимірах глибин і оцифровки глибин використовувалося вбудований додаток для Android - Андрозік. Дослідження проведені в 2015 і 2016 роках - два комплексних дослідження з інтервалом в один рік. Поряд з вимірами глибин виконувалися визначення каламутності води і швидкості осадження опадів. У першому і другому експериментальних дослідженнях вимірювання проводилися в одних і тих же точках акваторії, що дозволило визначити зміну глибин в цих точках через інтервал часу в один рік. Кожне польове дослідження супроводжувалося також виміром крапки репера для відстеження НПР. Було отримано понад 1400 точок глибин, дані були перенесені в ГІС платформу, в результаті були отримані модель рельєфу дна, площа і об'єм водосховища. Були проведені лабораторні дослідження проб води по ряду параметрів (розділ 3), найважливішим з яких для моделювання процесу ілообформування є «каламутність».

На основі експериментальних даних про глибини ШВП (Самарського водосховища), отриманих в результаті польових досліджень в 2015 (h1) і 2016 (h2)

років побудована регресійна модель з використанням всієї вибірки спостережень, яка має вигляд:

$$h_2 = a_0 + a_1 * h_1, \quad \text{Б1.1}$$

де a_0 - вільний член регресії, a_1 - коефіцієнт регресії.

З урахуванням розрахованих значень коефіцієнтів моделі за результатами вимірювань глибин Самарського водосховища 2015 і 2016 років ця модель представлена у вигляді:

$$h_2(2016) = 0.01717 + 0.99423 * h_1(2015) \quad \text{Б1.2}$$

Середньоквадратичне відхилення моделі одно 0.0202.

Аналіз залишків моделі (відхилення спостережуваних значень глибини в 2016 р від модельних значень) показав, що точність наближення моделі до спостережуваних значень залежить від діапазону глибин. Аналіз залишків дозволив визначити межі діапазонів глибин (табл. Б1.1), в яких значення залишків однорідні. Це дозволило підвищити точність набору регресійних моделей для сформованих діапазонів.

Таблиця Б1.1 Діапазони глибин для побудови моделей регресії

Номер діапазону	Мінімальне значення	Максимальне значення	Число спостережень *
1	1,60	2,95	45
2	2,96	6,85	410
3	6,95	9,25	261
4	9,26	10,62	170
5	10,63	16,81	339
6	17,18	25,0	211
7	25,10	28,5	9

Для визначення оцінки зміни глибин ШВ протягом досліджуваного періоду розглянуті середні значення різниці глибин (глибина-2015 - глибина 2016) за спостереженнями семи діапазонів глибин.

Таблиця Б1.2. Різниці глибин 2015-2016 років за діапазонами

Номер діапазону	Середнє значення різниці глибин, м	Середньоквадратичне відхилення, м	Число спостережень*
1	0.00023	0.0001	45
2	0.00206	0.0012	410
3	0.03910	0.0076	261
4	0.05852	0.0049	170
5	0.04300	0.0098	339
6	0.11508	0.0078	211
7	0.10370	0.0003	9
Вся вибірка	0.04258	0.0378	1456

Таким чином, максимальні значення величини річних відкладень в Самарському водосховищі отримані на глибинах понад 17 м і склали значення в діапазоні від 10,370 см до 11,508 см. Середнє значення для всього діапазону глибин склало 4,258 см.

ДОДАТОК В

Програмне забезпечення

Б1. Використане програмне забезпечення.

Geostatistical Analyst, Інтерполяція даних вимірювань глибин при побудові ЦМР.

ГІС-модуль GRASS. Визначення середньої потужності донних відкладень

GeostatisticalAnalyst. Розрахунок бічних проекцій рельєфу.

Surfer 7.0 «Golden Software Inc.». Побудова растрових моделей за даними ДЗЗ.

Global mapper DrDepth 4.0.10. Побудова рельєфу поверхні.

ArcGIS, Hydrology. Моделювання рельєфу дна.

MODEL_DN. Розрахунок динаміки наносів.

MODEL_MM. Морфометрична модель.

MODEL_VM. Балансові моделі.

MODEL_S. Модель седиментації.

MODEL_ORG Модель органічної компоненти осаду.

GlobalMapper, Spatial Analyst гідрологічних характеристик.

Б2. Розроблене програмне забезпечення.

MODEL_K Розрахунок критеріїв аналогії.

MODEL_E Розрахунок вагових коефіцієнтів.

MODEL_MN Розрахунок матриці міри розбіжності.

MODEL_OZ Розрахунок методики розрахунку замулення ШВ - аналога.

Модель перерахунку характеристик ШВП в ШВА.

ДОДАТОК Г

Програмне забезпечення (ілюстрації та код програмного забезпечення)

Розроблене програмне забезпечення на мові JavaScript може зберігатися на локальному диску та на сервері.













 favicon.ico	948 Б	Изображение значка Windows
 index.html	637 Б	HTML document
 main.js	60 КБ	Скрипт JavaScript
 main.js.map	49 КБ	Документ
 polyfills.js	153 КБ	Скрипт JavaScript
 polyfills.js.map	172 КБ	Документ
 runtime.js	6 КБ	Скрипт JavaScript
 runtime.js.map	6 КБ	Документ
 styles.js	507 КБ	Скрипт JavaScript
 styles.js.map	651 КБ	Документ
 vendor.js	3,4 МБ	Скрипт JavaScript
 vendor.js.map	3,5 МБ	Документ

Рисунок Г.1. Картотека програмного забезпечення.

Для зручності роботи оператора с програмним забезпеченням введення та відображення інформації відбувається в браузері.

Параметри	ШВП	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆
n	1	82.5	337.5	65	457.5	61.25	93.25
K _{mi}	1	0.32	0.26	0.31	0.27	0.38	0.25
W*10 ⁵ , м ³	2.4	63.80	211.50	47.67	299.51	55.53	55.95
W*10 ⁵ , т	3.84	102.08	338.40	76.27	479.22	88.85	89.52

Рисунок Г.2. Таблиця вихідних даних для перерахунку оцінок замулення

Для введення чи корегування даних необхідно навести курсор на будь-яку клітинку та ввести дані.

Редагування значення ✕

n – ШВП

1

Зберегти

Рисунок Г.3. Редагування даних

При зміні будь-якого значення відбувається перерахунок даних за алгоритмом представленим в Розділі 5.

K_{ij}	ШВП	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
K_{11}							
K_{12}							
K_{13}							
K_{14}							
K_{15}							
K_{22}							
K_{23}							
K_{51}							

Рисунок Г.3. Розрахунок критеріїв аналогії

Критерії аналогії	\mathcal{E}_1	\mathcal{E}_2	\mathcal{E}_3	\mathcal{E}_4	\mathcal{E}_5	\mathcal{E}_{ij}
K_{11}						
K_{12}						
K_{13}						
K_{14}						
K_{15}						
K_{16}						
K_{21}						
K_{22}						
K_{23}						
K_{31}						
K_{51}						

Рисунок Г.4. Розрахунок вагових коефіцієнтів

Параметри	ШВП	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
M_{Aic}							

Рисунок Г.5. Середні значення коефіцієнта відносної каламутності

	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆
A ₁						
A ₂						
A ₃						
A ₄						
A ₅						
A ₆						

Рисунок Г.6. Розрахунок матриці міри розбіжності

Параметри	ШВП	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆
W _{Ai} *10 ⁵ , м ³	2.4	1684.32	18559.13	960.55	36996.97	1292.46	1304.33
W _{Ai} *10 ⁵ , т	3.84	2694.91	29694.60	1536.84	59195.65	2067.98	2086.93

Рисунок Г.7. Об'єми та маси намулу в водосховищах-аналогах

Програмний код знаходиться за посиланням: <https://github.com/code-zhdanovvlad/reservoir-calculations>

ДОДАТОК Д
Акт про впровадження



ДСНС УКРАЇНИ
ГОЛОВНЕ УПРАВЛІННЯ ДЕРЖАВНОЇ СЛУЖБИ УКРАЇНИ З
НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ У ДНІПРОПЕТРОВСЬКІЙ ОБЛАСТІ
(ГУ ДСНС України у Дніпропетровській області)

Дніпровське міське управління

вул. Панікахи, 23, м. Дніпро, 49041,

тел./факс: (056)749-25-09, тел.767-18-23, e-mail: 8dprz@dp.dsns.gov.ua

12. 11. 2019 № 7521/02-19

на № _____ від _____

Акт про впровадження

Цим підтверджуємо, що результати дисертаційного дослідження Дубовика Дениса Дмитровича на тему «Інформаційні технології оцінки замулення штучних водосховищ» мають актуальність та становлять практичний інтерес і були використані при розробці концепції та методологічних аспектів щодо відстеження техногенної безпеки м. Дніпро.

Виконані дослідження дозволяють раціонально підійти до оцінки екологічного стану водосховищ Дніпровського каскаду щодо розрахунку темпів їх замулення.

Інформаційна модель замулення та відповідне програмне забезпечення впроваджені в якості розрахункового модуля в інформаційно-пошукову і експертну систему обробки інформації для прийняття рішень в Дніпровському міському управлінні ДСНС України у Дніпропетровській області.

Алгоритм розробки інформаційної системи замулювання великих водосховищ використано у процесі підготовки технічного завдання на розробку, побудову та впровадження автоматизованої системи технічного діагностування стану безпеки територій, що входять в коло відповідальності Дніпровського міського управління ДСНС України у Дніпропетровській області.

Т.в.о начальника

С.О. Старостенко

12211211