

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет геоінформаційних систем і управління територіями
Кафедра геоінформатики і фотограмметрії

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО АТЕСТАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

на тему:

Геоінформаційний моніторинг обміління Шацьких озер за допомогою ДЗЗ

Волков Юрій Олегович

Київ – 2025 р.

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ
Факультет геоінформаційних систем і управління територіями
Кафедра геоінформатики і фотограмметрії

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ проф., д.т.н. Карпінський Ю.О.

« 3 » грудня 2025 року

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО АТЕСТАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

Геоінформаційний моніторинг обміління Шацьких озер за допомогою ДЗЗ

Виконав студент групи ГСТм-24
193 «Геодезія та землеустрій»
Геоінформаційні системи і технології
Волков Юрій Олегович
Керівник: Нестеренко О. В.
доцент, кандидат технічних наук
Ідентичність підтверджую

Київ 2025 р.

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

Факультет: Геоінформаційних систем та управління територіями

Кафедра: Геоінформатики і фотограмметрії

Освітній рівень: «магістр за ОПП»

Спеціальність: 193 «Геодезія та землеустрій»

Спеціалізація: Геоінформаційні системи і технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан факультету

_____доцент., к.т.н. Нестеренко О. В.

«3» грудня 2025 року

З А В Д А Н Н Я

**ДО ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

Волков Юрій Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Геоінформаційний моніторинг обміління Шацьких озер за допомогою ДЗЗ

затверджена наказом ректора КНУБА № 1844/22/25 від «31» жовтня 2025 року

2. Керівник роботи доцент, к. т. н. Нестеренко Олена Вікторівна

3. Строк подання студентом роботи до захисту: 4 грудня 2025 р.

4. Зміст пояснювальної записки за розділами:

Р. 1. Теоретичні та методичні основи геоінформаційного моніторингу гідрографічних об'єктів

Р. 2. Інформаційне забезпечення та середовище реалізації

Р. 3. Методика геоінформаційного моніторингу обміління озер

Р. 4. Практична реалізація та результати дослідження

5. Графічний матеріал за 4 розділом - лінійні графіки динаміки водної поверхні та криві тренду для Шацьких озер та тематичні карти.

6. Календарний план виконання роботи:

Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)
Розділ 1. Теоретичні та методичні основи геоінформаційного моніторингу гідрографічних об'єктів. Поняття обміління та фактори, що його зумовлюють. Роль дистанційного зондування в дослідженнях водних об'єктів. Геоінформаційні технології у водному моніторингу. Огляд існуючих методів визначення меж водойми. Проблеми точності та інтерпретації даних.	27.10.2025
Розділ 2. Інформаційне та технологічне забезпечення, середовище реалізації. Вибір середовища реалізації. Вихідні дані. Характеристика середовища Google Earth Engine. Підготовка вхідних даних.	10.11.2025
Розділ 3. Методика геоінформаційного моніторингу обміління озер. Концепція запропонованого підходу. Особливості обробки хмарності, сезонності, шумів. Розробка алгоритму реалізації в Google Earth Engine. Отримання кількісних показників обміління. Оцінка точності результатів та перевірка достовірності.	17.11.2025
Розділ 4. Практична реалізація та результати дослідження. Реалізація алгоритму моніторингу в середовищі Google Earth Engine. Результати геоінформаційного аналізу динаміки Шацьких озер. Інтерпретація результатів.	22.11.2025
Остаточне оформлення роботи	24.11.2025
Попередній захист роботи на кафедрі	04.12.2025
Направлення роботи на рецензування, перевірку на плагіат	08.12.2025
Захист	23.12.2025

7. Консультанти розділів атестаційної випускної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Перевірив	
		дата	підпис
Розділ 1.	Нестеренко О. В. , доцент, к.т.н.		
Розділ 2.	Нестеренко О. В. , доцент, к.т.н.		
Розділ 3.	Нестеренко О. В. , доцент, к.т.н.		
Розділ 4.			

8. Дата видачі завдання 13.10.2025 р.

Зав. кафедри _____ Карпінський Ю. О.
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник _____ Нестеренко О. В.
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Студент _____ Волков Ю. О.
 (підпис) (прізвище та ініціали)

РЕЗЮМЕ (summary) <i>До атестаційної випускної роботи студента:</i>		Волков Юрій Олегович	
<i>ЗВО</i>	Київський національний університет будівництва і архітектури		
<i>Тема</i>	Геоінформаційний моніторинг обміління Шацьких озер за допомогою ДЗЗ		
<i>Освітній ступінь</i>	Магістр за освітньо-професійною програмою навчання		
<i>Факультет</i>	Геоінформаційних систем та управління територіями		
<i>Кафедра</i>	Геоінформатики і фотограмметрії		
<i>Спеціальність</i>	G18 Геодезія і землеустрій		
<i>Спеціалізація</i>	Геоінформаційні системи та технології		
<i>Керівник</i>	Нестеренко Олена Вікторівна, к.т.н., доцент		
<i>Обсяг роботи:</i>	<i>Пояснювальна записка, стор.</i>	<i>Розділів</i>	<i>Графічних матеріалів</i>
	128	4	-
<i>Розділ 1</i>	Розглянуто сучасні наукові підходи до аналізу обміління озер та визначено основні природні й антропогенні чинники, що формують цей процес. Показано, що значний вплив на стан Шацьких озер має діяльність Хотиславського кар'єру, яка порушує регіональний водний баланс і прискорює зниження рівнів води. Проаналізовано можливості ДЗЗ і ГІС як ключових інструментів просторово-часового моніторингу водних об'єктів. Сформована теоретична основа яка є базою для подальших практичних досліджень динаміки обміління озер із використанням супутникових даних.		
<i>Розділ 2</i>	Запропоновано для геоінформаційного моніторингу обміління Шацьких озер використати хмарну платформу Google Earth Engine та розглянуло її основні характеристики. Визначено обсяг вихідних даних, та поетапну їх підготовку для залучення в методику.		
<i>Розділ 3</i>	Методика геоінформаційного моніторингу обміління Шацьких озер була реалізована на основі інтеграції довгострокових супутникових спостережень Landsat 4–8 із GEE, що забезпечила автоматизовану обробку великих часових колекцій даних та відтворювані результати. Було сформовано ключові етапи, які мають реалізуватися під практичної частини. Запропоновано методи проведення аналізу динаміки та тенденцій обміління, включаючи		

	виявлення аномальних років, та виконання тесту Манна–Кендалла та статистичні оцінки середньорічних змін, а результати запропоновано візуалізувати у вигляді тематичних карт і графіків.
<i>Розділ 4</i>	Реалізовано методику. Було обчислено індекс SWMI, сформовано водні маски, визначено площі озер, аномальні роки їх обміління та проведено статистичний аналіз динаміки за допомогою тесту Манна–Кендалла. Результати показали загальне зменшення площ озер приблизно на 8 %, причому дрібні озера, як Кримне та Соминець, зменшуються швидше, великі — більш стабільні (Світязь, Пулемецьке). За 37 років найбільше площі втратили озера Чорне Мале (68%) та Климівське (43%). Динаміка пояснюється поєднанням природних та антропогенних факторів, меліорація та розробка кар'єру. Результати було представлено у вигляді таблиць, тематичних карт і графіків, що дозволяє оцінювати просторово-часові зміни.
<i>Висновки по роботі:</i>	Проведено комплексний геоінформаційний моніторинг обміління Шацьких озер з використанням Landsat та платформи GEE. З використанням запропонованої методики, аналіз багаторічних спостережень показав зменшення площі більшості озер, особливо малих та середніх, таких як Кримне, Соминець, Перемут, Озерце, Чорне Мале, Климівське та повне висихання Герасимового, при цьому великі озера, як Світязь та Пулемецьке, залишалися відносно стабільними. Встановлено, що процеси обміління частково пов'язані з діяльністю Хотиславського кар'єру у Білорусі, який впливає на рівень ґрунтових вод прилеглих озер. Результати забезпечили кількісну та просторову оцінку динаміки обміління та можуть бути використані для управління Шацьким НПП і природоохоронних рішень.
<p>Ключові слова : ГІС, моніторинг озер, обміління озер, Шацький НПП, NDMI, MNDWI, BlueR, SWMI, Landsat, Google Earth, Engine, геінформаційний аналіз, тест Манна-Кендала</p> <p>Keywords: GIS, lake monitoring, lake shallowing, Shatskyi National Nature Park, NDMI, MNDWI, BlueR, SWMI, Landsat, Google Earth, Engine, geoinformation analysis, Mann-Kendall test</p>	

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 ТЕОРЕТИЧНІ ТА МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ГІДРОГРАФІЧНИХ ОБ’ЄКТІВ.....	12
1.1 Поняття обміління та фактори, що його зумовлюють.....	13
1.2 Роль дистанційного зондування в дослідженнях водних об’єктів.....	17
1.3 Геоінформаційні технології у водному моніторингу.....	21
1.4 Огляд існуючих методів визначення меж водойми.....	24
1.5 Проблеми точності та інтерпретації даних.....	26
2 ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА СЕРЕДОВИЩЕ РЕАЛІЗАЦІЇ.....	28
2.1 Вибір середовища реалізації.....	29
2.2 Вихідні дані.....	31
2.3 Характеристика середовища Google Earth Engine.....	34
2.4 Підготовка вхідних даних.....	40
3 МЕТОДИКА ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ОБМІЛІННЯ ОЗЕР.....	44
3.1 Концепція проєктуючого підходу.....	45
3.2 Особливості обробки хмарності, сезонності, шумів.....	47
3.3 Розробка алгоритму реалізації в Google Earth Engine.....	49
3.4 Отримання кількісних показників обміління.....	54
4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ.....	57
4.1 Реалізація алгоритму.....	58
4.2 Результати геоінформаційного аналізу.....	86
4.3 Інтерпретація результатів.....	114
ВИСНОВОК.....	119
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	123
ДОДАТКИ.....	129

ВСТУП

Сучасні кліматичні зміни та антропогенний вплив дедалі частіше призводять до трансформації природних водних екосистем, серед яких особливо вразливими є озера. Для України питання моніторингу стану озерної мережі набуває стратегічної важливості, оскільки багато водойм виконують екологічні, рекреаційні та соціально-економічні функції. Одним із найбільш показових є Шацьке поозер'я на території Шацького національного природного парку, де впродовж останніх десятиліть фіксується тенденція до зменшення площі водної поверхні та обміління окремих озер. З огляду на необхідність аналізу багаторічної динаміки, супутникові методи спостереження стають ключовим інструментом для виявлення, кількісної оцінки та прогнозу цих процесів.

Актуальність дослідження зумовлена потребою у створенні комплексної, автоматизованої та відтворюваної методики моніторингу озер на основі даних дистанційного зондування Землі. Google Earth Engine дає можливість використовувати багаторічні архіви супутникових зображень Landsat, інтегрувати спектральні індекси, застосовувати алгоритми обробки та отримувати точні оцінки змін площі водної поверхні. З огляду на швидкість деградації водних екосистем, вплив коливань опадів і рівня ґрунтових вод, а також необхідність науково обґрунтованого управління водними ресурсами, створення методики на основі GEE є не лише актуальним, але й критично важливим для екологічної та природоохоронної практики, так як парк належить до складу природно-заповідного фонду України, де встановлено особливий режим охорони [1].

Об'єкт дослідження - озера Шацького поозер'я.

Предмет дослідження - зміни площі водної поверхні озер у динаміці 1988–2025 рр., визначені на основі багаторічних супутникових спостережень.

Мета дослідження - розробити комплексну методику геоінформаційного моніторингу обміління озер із використанням інструментів Google Earth Engine та спектральних індексів, визначити кількісні характеристики змін площі водної поверхні й виявити просторово-часові закономірності обміління озер.

Методи дослідження включають спектральний аналіз супутникових зображень, побудову масок води на території Шацького національного парку, розрахунок загальних площ та окремо для кожного озера окремо, статистичний аналіз часових колекцій даних, трендовий тест Манна-Кендалла, а також тематичне картографічне моделювання.

Таким чином, дослідження поєднує сучасні інструменти дистанційного зондування, хмарні обчислення та геоінформаційний аналіз, що забезпечує можливість отримання об'єктивної та детальної картини обміління озер Шацького поозер'я протягом майже чотирьох десятиліть.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ТА МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ГІДРОГРАФІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

1.1 Поняття обміління та фактори, що його зумовлюють

Обміління (англ. lake infilling / shallowing) - сукупний процес зменшення водного об'єму й середньої глибини водойми внаслідок акумуляції донних відкладень, біологічного наростання прибережної та зануреної рослинності, а також тривалого зниження рівня води. Обміління може бути результатом поодиноких подій (потужні повені з перенесенням осадів) або довготривалих тенденцій (зміни у водному балансі, постійне надходження твердого стоку) [36].

Процеси, що складають обміління:

- ~ Надходження та акумуляція твердого стоку - ерозійні матеріали, змивні наноси (природний біоматеріал) та донний мул осідають у прибережній і центральній частинах водного басейну, поступово зменшуючи об'єм;
- ~ Біогенне накопичення (сапропелізація) - відмерла біомаса водоростей перетворюється на органічні донні відкладення (сапропель), які підвищують швидкість заповнення басейну та спричиняють зменшення водного дзеркала;
- ~ Розростання прибережної і зануреної рослинності - створює нагромадження осадів, сприяє локальному затриманню наносів і переведенню відкритої водної площі в прибережні болотисті;
- ~ Гідрологічне висихання (зниження рівня води) - зменшення припливу або посилене випаровування (кліматичні/антропогенні причини) скорочують об'єм, відкриваючи більше площ для осушених територій.

Таблиця 1.1. Класифікація факторів, що спричиняють обміління

Клас	Тип	Опис
Натуральні фактори	Геоморфологія та геологія басейну	крутизна схилів, розмір заплави, тип ґрунтів визначають швидкість ерозії та надходження наносів

Клас	Тип	Опис
	Природні кліматичні варіації	періоди проливних опадів або тривалі посухи змінюють баланс стоку/випаровування.
Кліматичні чинники	Підвищення температури й зміни режиму опадів	впливають на випаровування, льодовий режим (коротша криголамна фаза), гідрологію та продуктивність (швидше старіння системи).
Антропогенні чинники	Зміна землекористування і сільське господарство	вирубка лісів, розорювання, інтенсивна оранка підвищують ерозійний відтік і завантаження наносів.
	Неналежне управління стічними водами та надходження поживних речовин	призводять до евтрофікації, цвітіння водоростей та підвищеного біологічного осідання.
	Гідротехнічні роботи та регулювання стоку	дамби, канали, інженерні осушення змінюють стік і можуть зменшувати живлення водойми або навпаки - посилювати піднесений внесок наносів.
Внутрішні біогенні й донні процеси	Ресуспензія і біотурбація	діяльність риб і донних безхребетних переміщує осади, збільшуючи мобільність часток і змінюючи темпи осадонакопичення.
	Внутрішній перенос поживних речовин	звільнення фосфору з анаеробних донних

Клас	Тип	Опис
		відкладень може підживлювати нові хвилі евтрофікації і, як наслідок, накопичення біомаси.

Наслідки обміління:

- ~ Екологічні: втрата глибоководних гідрографічних об'єктів, зниження різноманіття, перехід до більш евтрофних/болотистих станів;
- ~ Соціально-економічні: зниження рекреаційної та рибогосподарської цінності, проблеми з водопостачанням.

Водний баланс озер складається з двох компонентів — приходу і розходу води [17].

Головними джерелами водного живлення озер виступають річкові притоки, площинний поверхневий стік водозбору, атмосферні опади над водним дзеркалом, підземні води.

Озерні води витрачаються на поверхневий стік через річки, що витікають з озера, підземний стік через пониження вбік рівня моря, випаровування з водної поверхні.

Рівень озерних вод залежить від балансу приходу та розходу води. Співвідношення між цими величинами призводять до сезонних, річних та багаторічних коливань, що впливають на характер більшості процесів, що відбуваються в озерах [4].

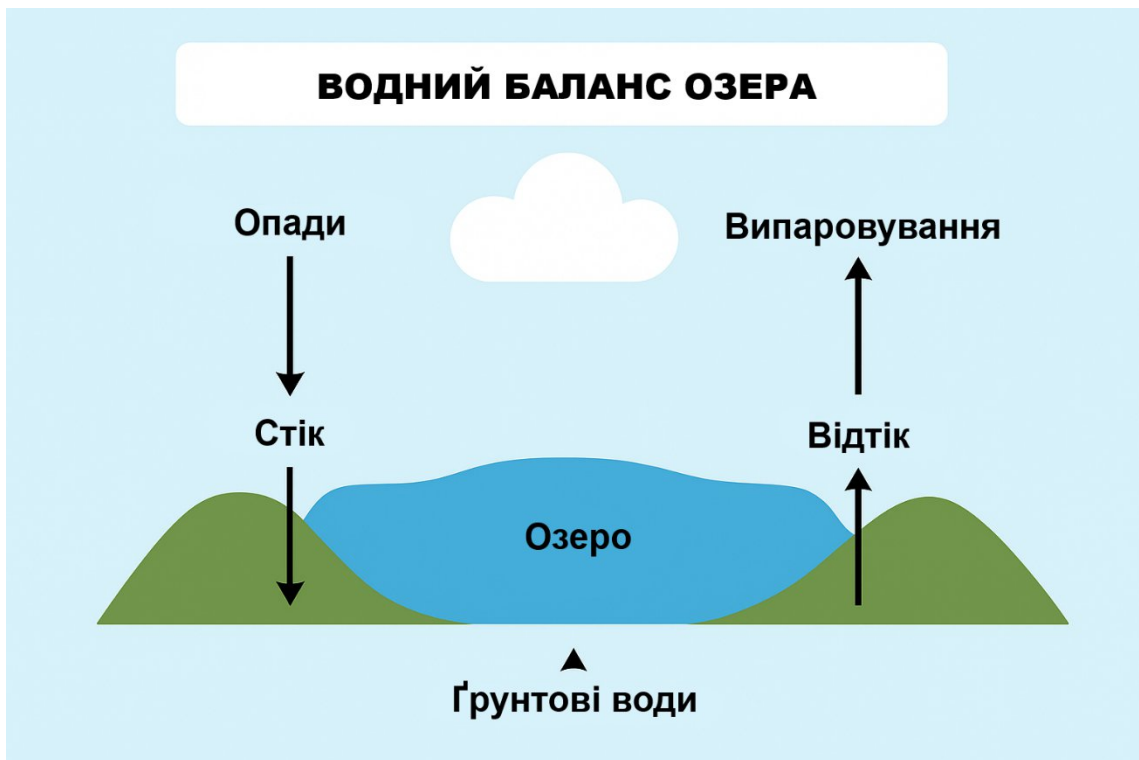


Рисунок 1.1. Схема водного балансу озера

Шацьке поозер'я являє собою зандрову рівнину в межах Поліської низовини. Центральна його частина характеризується поширенням озерних карстових улоговин, які утворилися у крейдових відкладах. Озера, що лежать серед болотних ландшафтів, утворилися внаслідок нагромадження алювію і підвищення рівня ґрунтових вод, за умов незначного похилу території й відсутності постійного стоку [19].

Береги Шацьких озер низькі, пологі, складені піщаним, піщано-гальковим і біогенним матеріалами; є заболочені ділянки. Дно вкрите переважно піщано-мулистими відкладами, торфовими й сапропелевими мулами. У 60—70-ті роки ХХ ст. на цій території інтенсивно проводилися осушувальні меліорації.



Рисунок 1.2. Шацьке поозер'я [12]

Розробка білоруського крейдяного родовища «Хотиславське» (активно з 2009 року), що знаходиться в 300 метрах від кордону з Волинською областю є чи не найголовнішим чинником обміління Шацьких озер. Видобуток піску та крейди створює величезний резервуар, куди може перейти вода, що наповнює акваторію групи Шацьких озер.

У 2019 році Комітетом з питань екологічної політики та природокористування проведено робочу нараду з питань причин, наслідків та рішень щодо обміління Шацьких озер, у результаті якого було створено робочу групу з вивчення цього питання.

1.2 Роль дистанційного зондування в дослідженнях водних об'єктів

Водні ресурси є однією з найважливіших складових природного середовища, від стану яких залежить життя людей, розвиток господарства та екологічна рівновага. Сучасні екологічні виклики - забруднення, евтрофікація, обміління водойм - потребують постійного та ефективного моніторингу. Традиційні методи спостереження часто є трудомісткими, дорогими та не завжди дають змогу

отримати оперативну інформацію. У цьому контексті все більшого значення набувають технології дистанційного зондування Землі, які забезпечують можливість проведення моніторингу стану водних об'єктів у масштабах регіону, країни або навіть планети камерально [7].

Дистанційне зондування Землі (далі - ДЗЗ) - це метод отримання інформації про природні об'єкти та явища без прямого контакту з ними, за допомогою супутників, літаків або безпілотників, оснащених спеціальними сенсорами [7]. Такі сенсори фіксують відбиття або випромінювання у різних діапазонах електромагнітного спектра (оптичному, інфрачервоному, мікрохвильовому), що дозволяє отримувати точні характеристики водного середовища [38].

Одним із головних напрямів використання ДЗЗ є моніторинг якості води. За допомогою супутникових знімків можна визначати концентрацію зважених речовин, наявність фітопланктону, хлорофілу, прозорість і колір води.

Для визначення параметрів стану водних об'єктів за даними ДЗЗ застосовують спектральні індекси, чутливі до особливостей взаємодії електромагнітного випромінювання з водою. В основі цих індексів лежить характерний спектральна ознака водойм: у видимому діапазоні чиста вода має низькі значення відбиття та сильне поглинання в червоній та синій зонах, тоді як у ближньому інфрачервоному (NIR) та особливо в короткохвильовому інфрачервоному (SWIR) діапазонах відбувається майже повне поглинання. Саме тому NIR та SWIR канали є ключовими для водних індексів (NDWI, MNDWI, AWEI), оскільки дозволяють ефективно відокремити водні поверхні від суші та оцінити ступінь їх обміління. Для наочності на рисунку 1.3 наведено узагальнену спектральну криву води, яка демонструє співвідношення поглинання та відбиття у різних діапазонах довжин хвиль.

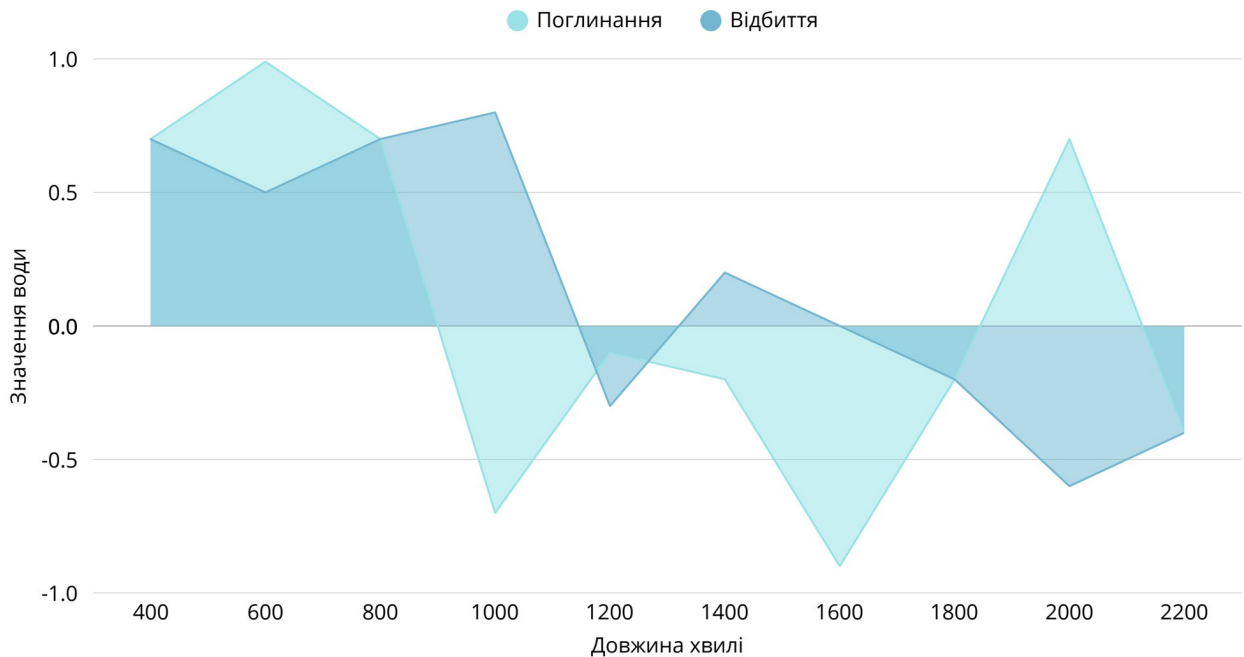


Рисунок 1.3 – Співвідношення поглинання та відбиття води в різних діапазонах довжин хвиль

Не менш важливою є роль ДЗЗ у спостереженні за просторовими змінами водних об'єктів. За супутниковими даними можливо аналізувати зміни берегової лінії, площу водного дзеркала, рівень води у річках, озерах, лиманах та інших гідрографічних та гідротехнічних водоймах [8]. ДЗЗ дозволяє оперативно виявляти процеси обміління, ерозії берегів або затоплення територій.

Дистанційне зондування також широко застосовується для моніторингу екологічного стану водойм. На супутникових знімках добре видно цвітіння води, забруднення нафтовими продуктами, промисловими стоками або біологічні нашарування [16]. Це дозволяє оцінювати масштаби екологічних проблем і планувати природоохоронні заходи.

Важливою перевагою супутникового моніторингу є його оперативність і регулярність. Дані супутників Sentinel, Landsat, MODIS та інших систем оновлюються з періодичністю від кількох днів до кількох тижнів [37]. Завдяки цьому можливо відстежувати сезонні зміни або наслідки надзвичайних подій - наприклад, паводків чи розливів шкідливих речовин.

Таблиця 1.2. Узагальнені характеристики супутникових місії

Параметр	Landsat (серія 1–9)	Sentinel-2 (A/B)	MODIS (Terra/Aqua)
Початок місії	<i>Landsat-1: 1972</i> (Landsat програмі понад 50 років)	<i>Sentinel-2A: 2015 Sentinel-2B: 2017</i>	<i>Terra MODIS: 1999 Aqua MODIS: 2002</i>
Просторова роздільність	15 м (панхроматичний) 30 м (мультиспектральні канали) 60–120 м (термальні канали)	10 м, 20 м, 60 м (залежно від спектрального каналу)	250 м (2 канали) 500 м (5 каналів) 1000 м (29 каналів)
Кількість спектральних каналів	залежить від платформи: Landsat-1–3: 4 канали Landsat-4/5 TM: 7 Landsat-7 ETM+: 8 Landsat-8/9 OLI+TIRS: 11	13 каналів	36 каналів
Періодичність зйомки (повторюваність)	16 діб (кожен апарат)	5 діб (двома апаратами; 10 діб одним)	1–2 доби (глобальне покриття двома апаратами)
Переваги	Великий обсяг даних (1972–2025), висока стабільність	Найкраща роздільність для безкоштовних даних, висока якість	Часта зйомка, глобальне покриття, великий набір спектральних каналів
Недоліки	16 діб — повільний повтор	Відсутність теплових каналів	Низька просторова роздільність

В Україні технології ДЗЗ уже активно використовуються. За допомогою супутникових даних здійснюється моніторинг рівня води у Дніпровських водосховищах, контролюється стан Чорного та Азовського морів, спостерігається динаміка озер Шацького національного парку [8]. Такі дослідження мають не лише наукове, а й практичне значення для управління водними ресурсами та запобігання екологічним катастрофам.

Дистанційне зондування Землі є потужним інструментом для дослідження та моніторингу водних об'єктів. Воно забезпечує можливість швидкого, точного та екологічно безпечного отримання інформації про стан водного середовища [7]. Завдяки поєднанню супутникових даних з наземними спостереженнями дослідники та екологи можуть ефективно оцінювати якість води, прогнозувати зміни рівня та виявляти небезпечні процеси. Використання технологій ДЗЗ сприяє раціональному управлінню водними ресурсами та охороні довкілля, що є надзвичайно актуальним у сучасних умовах кліматичних і антропогенних змін [8].

1.3 Геоінформаційні технології у водному моніторингу

Геоінформаційні системи (далі – ГІС) - це організований набір апаратури, програмного забезпечення, географічних даних і персоналу, які призначені для ефективного ведення, зберігання, поповнення інформації бази даних і візуалізації усіх видів географічно-прив'язаної інформації [5].

ГІС дозволяє інтегрувати дані різного походження - дистанційного зондування, спостережень на місцевості, гідрологічних та метеорологічних даних - у єдину геопросторову базу. Це забезпечує можливість аналізу динаміки водних об'єктів у часі, відстеження змін гідрологічного стану та екологічного стану водойм. Крім того, ГІС дає змогу створювати моделі змін, прогнозувати наслідки природних процесів та антропогенних впливів, а також оптимізувати управлінські рішення на основі просторових та статистичних даних.

Одним із ключових напрямів використання ГІС є створення баз даних водних ресурсів. Такі бази містять відомості про річкові басейни, водосховища, підземні води, гідротехнічні споруди, якість води та водний баланс. Завдяки просторовій прив'язці кожен об'єкт можна аналізувати у зв'язку з навколишнім середовищем - кліматом, рельєфом, землекористуванням тощо [25].

Крім того, ГІС дозволяють здійснювати екологічний моніторинг якості води. Поєднання супутникових даних із результатами лабораторних вимірювань дає змогу створювати карти розподілу хімічних забруднень, зон цвітіння води або

надмірної евтрофікації [2]. Такий підхід використовується для виявлення джерел забруднення та оцінки їх впливу на довкілля.

В останні роки активно розвивається напрям вебГІС і відкритих платформ моніторингу, які забезпечують вільний доступ до екологічних даних. Наприклад, український портал есо.gov.ua надає можливість переглядати інформацію про стан водних об'єктів, якість поверхневих вод, дані гідрологічних спостережень у зручному картографічному форматі [2]. На міжнародному рівні діють системи AquaMonitor, HydroSHEDS, Глобальне Surface Water Explorer, які надають аналітичні карти водного покриття та змін рівнів води у глобальному масштабі [31].

Застосування інструментів просторового аналізу дозволяє визначати побудувати охоронні зони, зони впливу навколо водойм, що дозволяє оцінити ступінь антропогенного або природного впливу. Застосування часових рядів показує тенденцію змін показників площі, рівня води або забруднення.

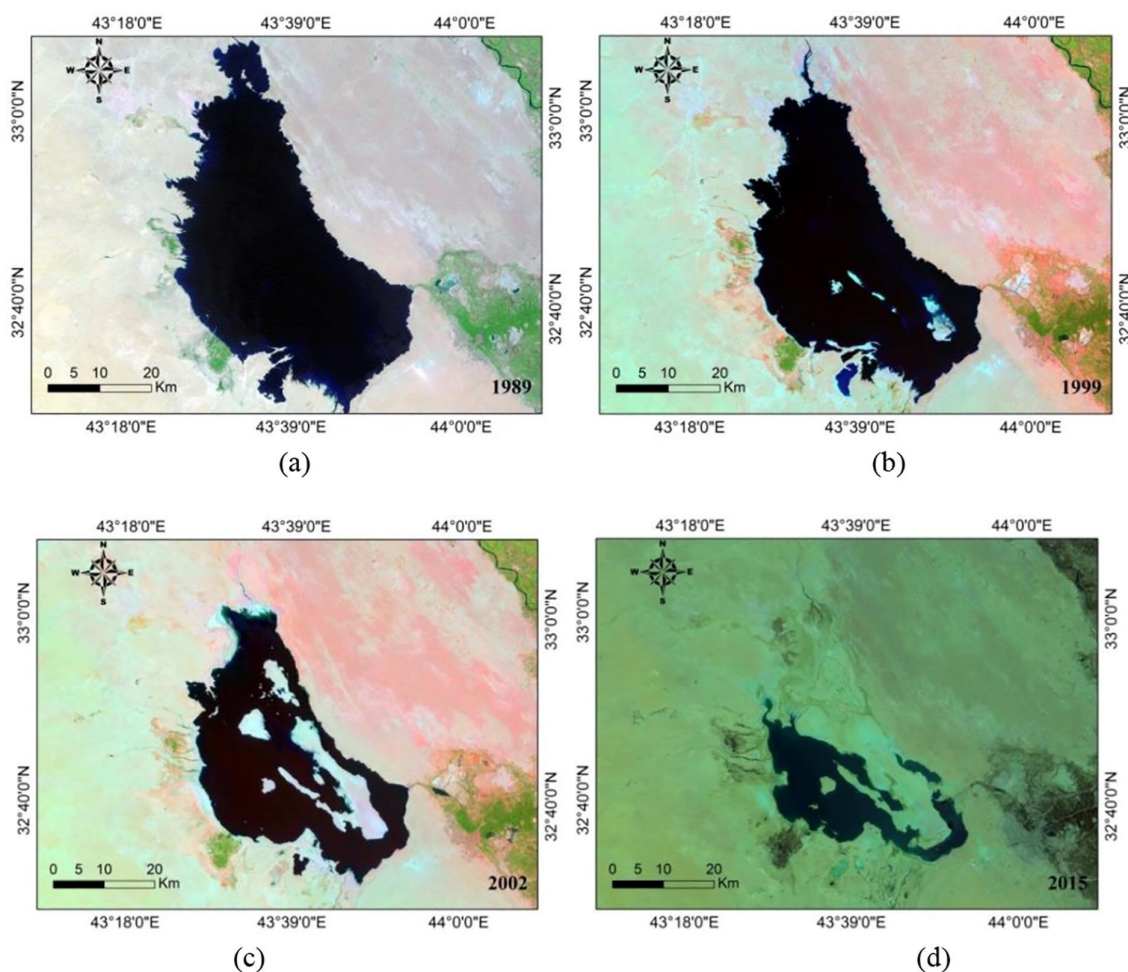


Рисунок 1.4. Осушення водойми на прикладі озера Al-Razzaza в Іраку [28]

Геоінформаційні технології є невід’ємною частиною сучасного водного моніторингу. Вони забезпечують просторову інтеграцію даних, дозволяють відстежувати зміни водних систем у часі та просторі, аналізувати причини забруднення і прогнозувати можливі наслідки. Розвиток ГІС в поєднанні з даними ДЗЗ дозволить зафіксувати тенденцію інтенсивного обміління Шацького поозер’я, що загрожує втратою важливих водних ресурсів, деградацією екосистем та зниженням рекреаційного потенціалу регіону. Відсутність системного моніторингу ускладнює оцінку масштабів проблеми та планування ефективних заходів. Застосування геоінформаційних технологій дозволить оперативно виявляти зміни, аналізувати причини й ухвалювати обґрунтовані управлінські рішення.

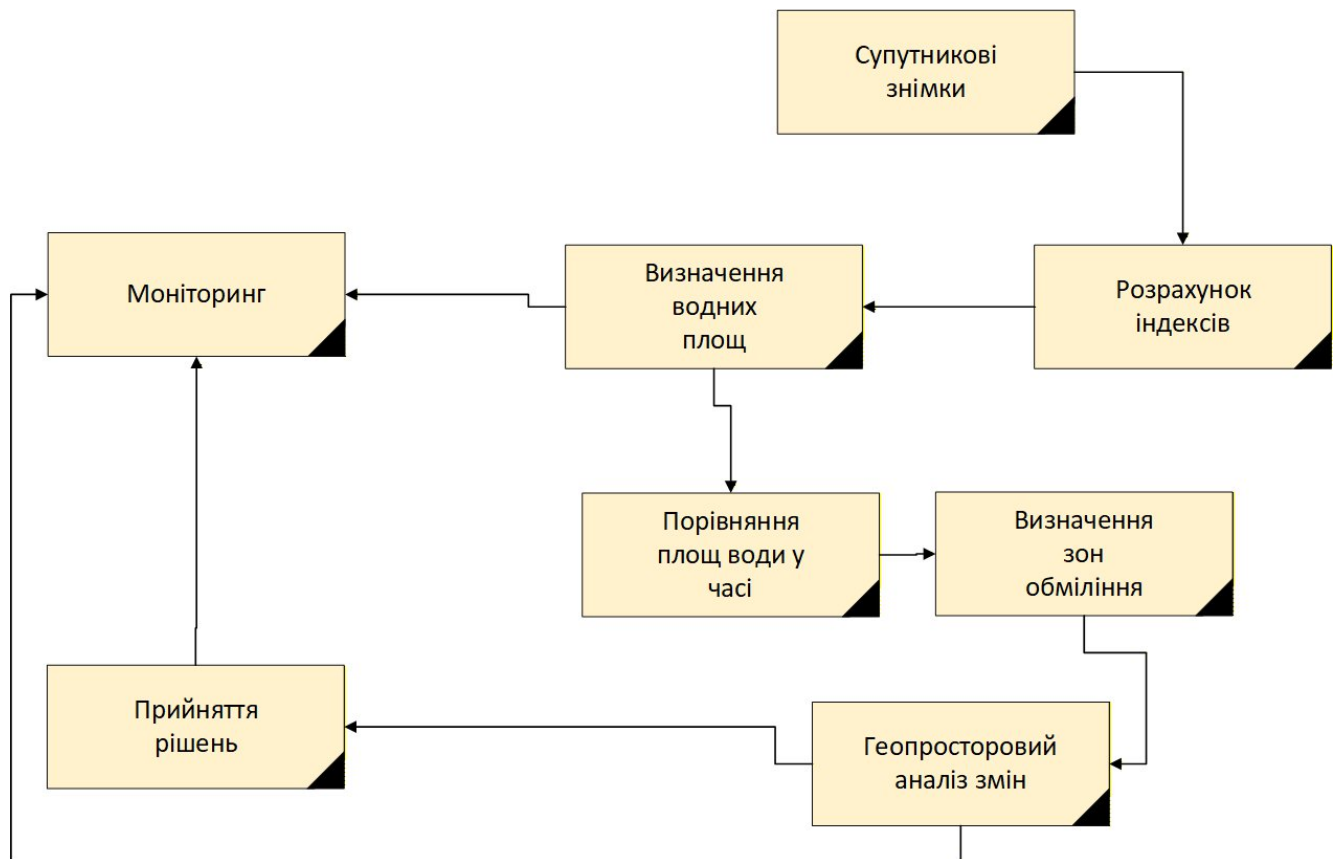


Рисунок 1.5. Функціональна модель ГІС моніторингу обміління Шацьких озер

1.4 Огляд існуючих методів визначення меж водойми

Існує кілька основних підходів до визначення меж водойм: традиційні польові, аерофотогеодезичні, супутникові та автоматизовані цифрові методи. Кожен з них має свої переваги та обмеження.

1.4.1 Польові методи

Традиційний підхід передбачає геодезичні вимірювання безпосередньо на місцевості. Для цього використовуються нівеліри, GPS-приймачі, ехолоти та інші прилади [6]. Під час зйомки фіксуються координати берегової лінії або лінії урізу води. Такий метод забезпечує високу точність, але є трудомістким, затратним за часом і практично непридатним для великих або важкодоступних водойм.

1.4.2 Аерофотогеодезичні методи

З розвитком авіаційної зйомки з'явилася можливість визначати межі водойм за аерофотознімками. Висока просторово-часова роздільність дозволяє детально фіксувати берегову лінію навіть у складних природних умовах [22]. Однак цей метод залежить від погодних умов і потребує спеціальної обробки даних - ортотрансформування та геоприв'язки знімків.

1.4.3 Методи дистанційного зондування Землі

Сучасні супутникові технології (Landsat, Sentinel, MODIS, PlanetScope тощо) дозволяють регулярно відстежувати динаміку водних меж у просторі та часі [14]. Для автоматизації процесу застосовують спектральні індекси води, наприклад:

- ~ NDWI (Normalized Difference Water Index),
- ~ MNDWI (Modified NDWI),
- ~ AWEI (Automated Water Extraction Index).

Ці індекси розраховуються з багатоспектральних супутникових зображень і дають змогу відокремити водну поверхню від суші, навіть за наявності рослинності або хмарності. Метод відзначається високою ефективністю та дозволяє створювати карти водного покриття з часовим рядом спостережень [29].

1.4.4 Цифрові та автоматизовані методи аналізу зображень

Завдяки розвитку ГІС і технологій машинного навчання з'явилися нові інструменти для автоматичного виділення меж водойм. Зокрема, застосовуються

класифікаційні алгоритми (наприклад, Random Forest, SVM, K-Means) та нейронні мережі (U-Net, DeepWaterMap), які навчаються на супутникових даних [27]. Вони здатні враховувати складні спектральні відмінності між водою, рослинністю та ґрунтами, що значно підвищує точність результатів.

1.4.5 Інтегровані методи

Найбільш надійні результати дає комбіноване використання різних джерел даних - поєднання супутникових зображень, цифрових моделей рельєфу, гідрологічних спостережень і даних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) [6; 32]. Такий підхід дозволяє враховувати сезонні коливання рівня води, затінення, відблиски та інші фактори, що ускладнюють інтерпретацію даних.

Вибір методу залежить від масштабу дослідження, типу водойми, доступності даних та необхідної точності.

Польові методи залишаються еталоном точності, але потребують значних ресурсів. Супутникові та ГІС-технології, навпаки, забезпечують оперативність і можливість моніторингу великих територій. Найбільш перспективним напрямом є поєднання методів дистанційного зондування, штучного інтелекту та геоінформаційного аналізу, що відкриває нові можливості для точного й динамічного визначення меж водойм у часі та просторі.

1.5 Проблеми точності та інтерпретації даних

Дані ДЗЗ формуються в результаті реєстрації відбитого або випроміненого сигналу від поверхні Землі, тому на них впливають численні фактори: атмосферні умови, кут зйомки, характеристики сенсора, стан поверхні тощо. Найпоширенішими є такі типи похибок:

- ~ Геометричні похибки - пов'язані з орбітою супутника, рухом платформи, спотворенням перспективи. Для їх усунення застосовують геометричну корекцію і геоприв'язку до координатної системи [34];
- ~ Радіометричні похибки - виникають через різницю в освітленості, хмарність або атмосферне розсіювання. Використовується атмосферна корекція для відновлення реальної відбивної здатності поверхні;

- ~ Спектральні похибки - пов'язані з обмеженнями спектральної чутливості сенсорів і накладанням сигналів від різних типів поверхонь (вода, рослинність, ґрунт).

Для моніторингу водойм ці похибки особливо критичні: зміна освітленості або каламутності води може суттєво вплинути на розрахунок спектральних водних індексів, що призводить до хибного визначення меж водойм або оцінки їх площі [29].

До основних інтерпретаційних проблем належать:

- ~ сплутування класів об'єктів - наприклад, вологий ґрунт або тінь від дерев можуть бути помилково визначені як вода;
- ~ відсутність сезонної корекції - весняне підтоплення може бути інтерпретоване як розширення водойми;
- ~ недостатня валідація результатів - автоматична класифікація без порівняння з польовими даними часто дає викривлені карти;
- ~ використання алгоритмів без урахування локальної специфіки (тип водойми, кольоровість води, замулення) [8].

Висока складність природних систем потребує контекстуальної інтерпретації - поєднання супутникових даних із польовими спостереженнями, гідрологічними вимірюваннями та експертною оцінкою.

Для мінімізації похибок і покращення інтерпретації в ГІС та ДЗЗ застосовуються такі підходи:

- ~ Геометрична і радіометрична корекція супутникових знімків;
- ~ Медіанні зображення (поєднання серій зображень для виключення випадкових ефектів);
- ~ Інтеграція різних джерел даних - супутникових, дронів, наземних;
- ~ Валідація результатів за допомогою контрольних точок і польових вимірювань;
- ~ Застосування машинного навчання для підвищення якості класифікації водних об'єктів [27].

Проблеми точності та інтерпретації даних є ключовим викликом для сучасних досліджень, що базуються на ГІС і дистанційному зондуванні Землі. Помилки на етапі збору, обробки або аналізу можуть призводити до суттєвих спотворень результатів моніторингу, зокрема при вивченні водних об'єктів.

Для забезпечення достовірності просторової інформації необхідно поєднувати технічні (корекція, калібрування), аналітичні (оцінка похибок, статистичні методи) та експертні (польова перевірка, контекстуальна інтерпретація) підходи.

2 ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА СЕРЕДОВИЩЕ РЕАЛІЗАЦІЇ

2.1 Вибір середовища реалізації

Для реалізації геоінформаційного моніторингу гідрографічних об'єктів необхідне інтегроване середовище, здатне забезпечити доступ до багаторічних архівів дистанційних даних, засоби їхньої обробки, аналітики та візуалізації результатів. Одним із найефективніших інструментів для таких завдань є Google Earth Engine (далі - GEE) — це онлайн-платформа для аналізу та обробки географічних даних, зокрема зображень супутників. Цей інструмент створено Google з метою забезпечити науковцям, дослідникам та розробникам засоби для вивчення і зрозуміння Землі на основі супутникових даних [14].

Earth Engine містить бібліотеку даних, яку можна використовувати для вивчення Землі та розв'язання різних проблем, пов'язаних з довкіллям, змінами клімату, аграрним виробництвом, лісовим господарством, географією, гідрологією та іншими галузями науки.

Таблиця 2.1 Порівняння середовищ оброблення даних дистанційного зондування для геоінформаційного моніторингу

Критерій порівняння	GEE	QGIS + SNAP	ArcGIS Pro	ENVI
Тип середовища	Хмарна платформа	Настільне ПЗ з локальною обробкою	Комерційне настільне ГІС-ПЗ	Комерційне настільне ПЗ для ДЗЗ
Джерела даних	Глобальний архів супутникових знімків (Landsat, Sentinel, MODIS тощо)	Зовнішнє підключення або ручне завантаження	ArcGIS Online, Living Atlas, локальні джерела	Локальні або підключені каталоги
Необхідність завантаження даних	Не потребує – обробка на сервері	Потрібно завантажувати на ПК	Частково (через хмару або локально)	Потрібно завантажувати на ПК
Продуктивність обчислень	Висока (серверна хмарна обробка Google)	Залежить від потужності ПК	Залежить від ліцензії та ПК	Залежить від потужності ПК

Критерій порівняння	GEE	QGIS + SNAP	ArcGIS Pro	ENVI
	Cloud)			
Підтримка мов програмування	JavaScript, Python API	Python, R, плагіни	Python (ArcPy), ModelBuilder	Python
Автоматизація процесів	Скрипти, алгоритмічне програмування	Плагіни, скрипти	Моделі, Python-скрипти	Скрипти
Атмосферна корекція та препроцесинг	Автоматичний (для основних колекцій)	Виконується вручну або через SNAP	Виконується вручну	Виконується вручну
Візуалізація результатів	Інтерактивні карти, графіки, експорт GeoTIFF	Карты, графіки	Карты, 3D-візуалізація	Візуалізація зображень
Доступність і ліцензування	Безкоштовно для науки й освіти	Відкрите програмне забезпечення	Платна ліцензія	Платна ліцензія
Придатність для моніторингу у часі	Висока (історичні колекції з 1980-х рр.)	Середня (потрібна ручна обробка)	Середня	Середня
Зручність для великих територій і довгих часових рядів	Висока	Низька	Середня	Низька
Інтеграція з ГІС-технологіями	Вбудована, експортування у GeoJSON, GeoTIFF	Повна (через QGIS)	Повна (власна екосистема)	Обмежена

GEE об'єднує величезний архів багатоспектральних зображень (Landsat, Sentinel, MODIS, PlanetScope тощо) та потужні обчислювальні ресурси Google Cloud, що дає змогу виконувати складні розрахунки без необхідності завантаження великих обсягів даних на локальний комп'ютер. Це суттєво зменшує час підготовки

даних і дає можливість працювати з історичними знімками для оцінювання динаміки водного дзеркала Шацьких озер за кілька десятиліть.

На відміну від традиційних настільних ГІС (ArcGIS Pro, QGIS, ENVI), де оброблення супутникових даних потребує значних обчислювальних ресурсів ПК та часу на завантаження сцен, GEE виконує аналітичні операції на серверній частині, забезпечуючи масштабованість і оперативність. Це особливо важливо при багаторічному моніторингу, коли обсяг вхідних даних сягає десятки гігабайтів.

Таким чином, середовище Google Earth Engine є оптимальним вибором для виконання геоінформаційного моніторингу обміління Шацьких озер, оскільки поєднує відкритість даних, високу продуктивність обробки, простоту реалізації алгоритмів дистанційного зондування та інтеграцію з ГІС-технологіями. Платформа забезпечує повний цикл аналізу — від доступу до супутникових архівів до формування просторових і часових моделей змін водних об'єктів.

2.2 Вихідні дані

Для реалізації геоінформаційного моніторингу обміління Шацьких озер у середовищі Google Earth Engine будуть використані супутникові дані середньої просторової роздільної здатності, що забезпечують достатню деталізацію водного дзеркала та тривалість часових рядів. Основним джерелом є архіви місій Landsat, які охоплюють період спостережень від початку 1980-х років до сьогодення, що дозволяє відтворити багаторічну динаміку змін площі та контурів водойм.

Серія Landsat — це найтриваліша програма дистанційного зондування Землі, спільно реалізована NASA та Геологічною службою США (USGS). У межах дослідження особливе значення мають місії Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+ та Landsat 8 OLI/TIRS, а також новітня місія Landsat 9, запущена у 2021 році. Завдяки високому ступеню стандартизації між сенсорами Landsat можливо виконувати узгоджений міжчасовий аналіз, що є критично важливим для виявлення тенденцій зменшення площі водного дзеркала Шацьких озер. Просторова роздільна здатність більшості спектральних каналів становить 30 метрів, що забезпечує прийнятне розпізнавання контурів великих і середніх за розмірами водойм регіону.

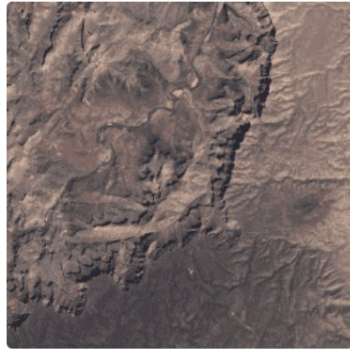
Вибір саме Landsat зумовлений його довготривалістю, стабільністю калібрування та оптимальним балансом між просторовою та часовою роздільністю. Середній період повторного знімання становить 16 днів. Це дозволяє мінімізувати вплив хмарності та отримати достатню кількість сцен для формування середніх композитів за сезон або рік.

Порівняно з іншими поширеними джерелами, такими як Sentinel-2 або MODIS, супутникові дані Landsat мають низку переваг у контексті дослідження багаторічних процесів. Дані Sentinel-2 характеризуються вищою просторовою роздільністю (10–20 м), проте їхній часовий діапазон починається лише з 2015 року, що обмежує можливість аналізу тривалих трендів обміління. Для оцінки короткотермінової динаміки Sentinel-2 є надзвичайно корисним доповненням, проте саме Landsat забезпечує історичну тривалість спостережень, яка є необхідною для побудови узагальнених часових рядів.

MODIS охоплює тривалий період (з 2000 року) та мають високу частоту спостережень (щоденно), однак їхня просторова роздільна здатність становить 250–500 м, що є недостатньою для детального аналізу невеликих озер Шацького поозер'я. MODIS більше підходить для глобального моніторингу великих водних систем або для розрахунку кліматичних індексів, ніж для локальних гідрографічних досліджень.

Таким чином, використання супутникових зображень серії Landsat забезпечує оптимальне поєднання часової тривалості, стабільності даних та просторової деталізації. Крім того, у платформі Google Earth Engine дані Landsat доступні у виправленому рівні відображення поверхні (Surface Reflectance), що враховує атмосферні впливи, завдяки чому відпадає потреба у додатковій атмосферній корекції. Це підвищує точність розрахунку водних індексів (NDWI, MNDWI) та достовірність оцінки площі водного дзеркала.

Для проведення дослідження було використано колекції Landsat 4, 5, 7 та 8 Level 2, Collection 2, Tier 1. Приклад опису однієї з колекцій наведено на рисунку 2.2.1.

**Dataset Availability**

1982-08-22T14:19:55 - 1993-06-24T14:26:23

Dataset Provider

[USGS](#)

Collection Snippet

```
ee.ImageCollection("LANDSAT/LT04/C02/T1_L2")
```

[See example](#)

Tags

cfmask cloud fmask
global landsat lasrc lst
lt04 reflectance sr tm
usgs

DESCRIPTION BANDS IMAGE PROPERTIES TERMS OF USE

This dataset contains atmospherically corrected surface reflectance and land surface temperature derived from the data produced by the Landsat TM sensor. These images contain 4 visible and near-infrared (VNIR) bands and 2 short-wave infrared (SWIR) bands processed to orthorectified surface reflectance, and one thermal infrared (TIR) band processed to orthorectified surface temperature. They also contain intermediate bands used in calculation of the ST products, as well as QA bands.

Landsat 4 and 5 SR products are created with the Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System (LEDAPS) algorithm (version 3.4.0). All Collection 2 ST products are created with a single-channel algorithm jointly created by the Rochester Institute of Technology (RIT) and National Aeronautics and Space Administration (NASA) Jet Propulsion Laboratory (JPL).

Strips of collected data are packaged into overlapping "scenes" covering approximately 170km x 183km using a [standardized reference grid](#).

Some assets have only SR data, in which case ST bands are present but empty. For assets with both ST and SR bands, 'PROCESSING_LEVEL' is set to 'L2SP'. For assets with only SR bands, 'PROCESSING_LEVEL' is set to 'L2SR'.

[Additional documentation and usage examples.](#)

Landsat Collection 2 files are publicly available in a [Google Cloud Storage bucket](#) on requester-pays basis. The files are indexed in a regularly updated BigQuery table for ease of analysis: [earth-engine-public-data.geo_index.landsat_c2_index](#).

CLOSE

Рисунок 2.2.1. Опис колекції зображень USGS Landsat 4 Level 2, Collection 2, Tier 1 у GEE

Для визначення контурів водних об'єктів планується використання спектральних індексів вологості, побудованих за комбінацією каналів Landsat (зокрема, зелений та інфрачервоний діапазони).

У дослідженні також буде взято контур Шацького національного природного парку (далі – Шацький НПП). Для дослідження будуть взяті лише ті озера які розташовані на території Шацького НПП. Векторний шар буде отримано шляхом експорту з OpenStreetMap.

Отже, вихідні дані дослідження формують цілісну багатокomпонентну структуру: супутникові архіви Landsat як основне джерело інформації про динаміку водного дзеркала та векторні дані для обмеження геопросторової обробки

результатів, що зменшить час опрацювання. Таке поєднання дозволяє забезпечити комплексний підхід до оцінки обміління Шацьких озер, що відповідає сучасним вимогам до геоінформаційного моніторингу гідрографічних систем.

2.3 Характеристика середовища Google Earth Engine

GEE – це хмарна платформа геопросторової обробки та аналізу даних моніторингу навколишнього середовища. Безкоштовна у використанні платформа GEE при умові створення облікового запису користувача надає доступ до петабайт даних дистанційного зондування та інших готових до використання продуктів за допомогою вебпрограми Explorer, швидкісних паралельних алгоритмів обробки та машинного навчання з використанням обчислювальної інфраструктури Google і бібліотеки додатків прикладного програмування (API) із середовищами розробки, які підтримують популярні мови кодування, такі як JavaScript та Python. Разом ці основні функції дозволяють користувачам відкривати, аналізувати та візуалізувати великі обсяги геопросторових даних, не потребуючи доступу до потужних комп'ютерів чи спеціалізованого обладнання [3, 26].

Однією із безумовних переваг GEE є виняткова швидкість обчислень і перетворення даних дистанційного зондування у великих масштабах, оскільки обробка проводиться на зовнішніх серверах Google. Платформа пропонує значну кількість наборів даних, які постійно оновлюються і доповнюються (рис. 2.3.1). Як вже зазначалося, доступ до всіх каталогів даних є безкоштовним, але потребує реєстрації і активації доступу до Google Earth Engine за допомогою дійсного облікового запису Google.



Рисунок 2.3.1 – Основні категорії наборів даних каталогу GEE

Загалом платформа GEE складається з наступних трьох складових:

- ~ провідник (GEE Explorer), який дозволяє переглядати дані спостережень, а також імпортувати власні дані, виконувати нескладні аналітичні операції авторизованим користувачам;
- ~ відео-каталоги просторово-часових даних (GEE Timelapse), що дозволяють переглянути, як змінювалась поверхня Землі протягом останніх 40 років;
- ~ редактор коду (GEE Code Editor), функції якого розроблені для того, щоб спростити та швидко виконувати складні геопросторові робочі процеси, і є доступними після безкоштовної реєстрації і створення акаунту розробника.

Інтерфейс редактора коду складається з таких основних функціональних елементів (рис. 2.3.2):

- 1) відображення карти для візуалізації наборів геопросторових даних;
- 2) редактор коду JavaScript;
- 3) менеджер шарів;
- 4) пошук даних або збережених скриптів;
- 5) менеджер скриптів на основі Git;
- 6) документація Application Programming Interface (API);
- 7) менеджер об'єктів;
- 8) інструменти для створення геометричних примітивів;
- 9) масштабування;
- 10) створення лінку (URL) для скрипта;
- 11) збереження;
- 12) компіляція;
- 13) диспетчер завдань;
- 14) вивід консолі;
- 15) запит на інтерактивну карту;
- 16) довідка;
- 17) зворотній зв'язок.

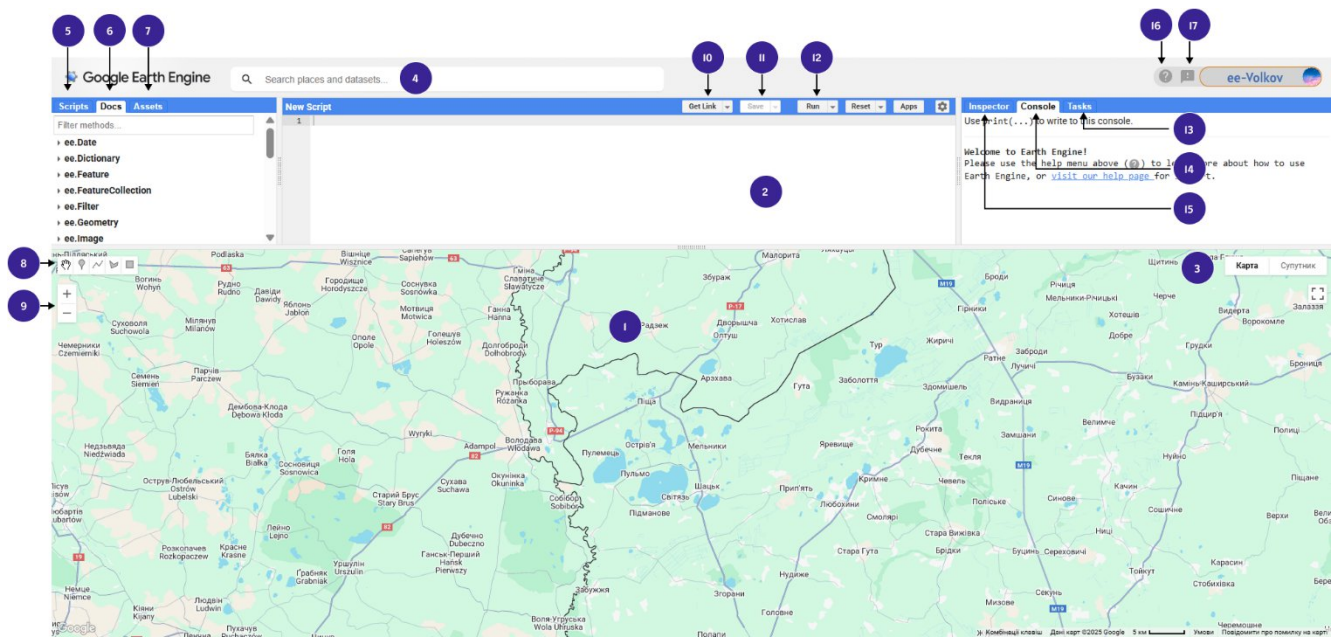


Рисунок 2.3.2 – Інтерфейс редактора коду GEE

Публічний каталог даних Earth Engine — це багатопетабайтна колекція широко використовуваних геопросторових наборів даних. Основна частина каталогу складається з зображень дистанційного зондування Землі, включаючи весь архів Landsat, а також повні архіви даних Sentinel-1 та Sentinel-2, але він також містить кліматичні прогнози, дані про ґрунтовий покрив та багато інших екологічних, геофізичних та соціально-економічних наборів даних (Таблиця 2.2). Каталог постійно оновлюється зі швидкістю майже 6000 сцен на день з активних місій, з типовою затримкою близько 24 годин з моменту отримання сцени. Користувачі можуть запитувати додавання нових наборів даних до публічного каталогу або завантажувати власні приватні дані через інтерфейс REST за допомогою інструментів на основі браузера або командного рядка та ділитися ними з іншими користувачами або групами за бажанням [22].

Таблиця 2.2. Часто використовувані колекції знімків у наборах даних GEE

Колекції	Роздільна здатність	Регулярність	Тривалість місій	Просторове покриття
Landsat				
Landsat 8 OLI/TIRS	30 m	16 днів	2013–Дотепер	Глобальне
Landsat 7 ETM +	30 m	16 днів	2000–Дотепер	Глобальне
Landsat 5 TM	30 m	16 днів	1984–2012	Глобальне
Landsat 4–8 surface reflectance	30 m	16 днів	1984–Дотепер	Глобальне
Sentinel				

Колекції	Роздільна здатність	Регулярність	Тривалість місій	Просторове покриття
Sentinel 1 A/B ground range detected	10 m	6 днів	2014–Дотепер	Глобальне
Sentinel 2A MSI	10/20 m	10 днів	2015–Дотепер	Глобальне
MODIS				
MOD08 atmosphere	1°	Щоденно	2000–Дотепер	Глобальне
MOD09 surface reflectance	500 m	1 днів/8 днів	2000–Дотепер	Глобальне
MOD10 snow cover	500 m	1 днів	2000–Дотепер	Глобальне
MOD11 temperature and emissivity	1000 m	1 днів/8 днів	2000–Дотепер	Глобальне
MCD12 Land cover	500 m	Щорічно	2000–Дотепер	Глобальне
MOD13 Vegetation indices	500/250 m	16 днів	2000–Дотепер	Глобальне
MOD14 Thermal anomalies & fire	1000 m	8 днів	2000–Дотепер	Глобальне
MCD15 Leaf area index/FPAR	500 m	4 днів	2000–Дотепер	Глобальне
MOD17 Gross primary productivity	500 m	8 днів	2000–Дотепер	Глобальне
MCD43 BRDF-adjusted reflectance	1000/500 m	8 днів/16 днів	2000–Дотепер	Глобальне
MOD44 veg. cover conversion	250 m	Щорічно	2000–Дотепер	Глобальне
MCD45 thermal anomalies and fire	500 m	30 днів	2000–Дотепер	Глобальне
ASTER				
L1 T radiance	15/30/90 m	1 днів	2000–Дотепер	Глобальне
Глобальне emissivity	100 m	Однаразово	2000–2010	Глобальне
Other imagery				
PROBA-V top of canopy reflectance	100/300 m	2 днів	2013–Дотепер	Глобальне
EO-1 hyperion hyperspectral radiance	30 m	По запиту	2001–Дотепер	Глобальне
DMSP-OLS nighttime lights	1 km	Щорічно	1992–2013	Глобальне
USDA NAIP aerial imagery	1 m	Піврічно-Щорічно	2003–2015	CONUS
Topography				
Shuttle Radar Topography Mission	30 m	Однаразово	2000	60°N–54°S
USGS National Elevation Dataset	10 m	Однаразово	Багаторазово	США
USGS GMTED2010	7.5"	Однаразово	Багаторазово	83°N–57°S
GTOPO30	30"	Однаразово	Багаторазово	Глобальне
ETOPO1	1'	Однаразово	Багаторазово	Глобальне
Landcover				
GlobCover	300 m	Без періоду	2009	90°N–65°S
USGS National	30 m	Без періоду	1992–2011	CONUS

Колекції	Роздільна здатність	Регулярність	Тривалість місій	Просторове покриття
Landcover Database				
UMD Глобальне forest change	30 m	Щорічно	2000–2014	80°N–57°S
JRC Глобальне surface water	30 m	Щомісячно	1984–2015	78°N–60°S
GLCF tree cover	30 m	5 років	2000–2010	Глобальне
USDA NASS cropland data layer	30 m	Щорічно	1997–2015	CONUS
Weather, precipitation & atmosphere				
Глобальне precipitation measurement	6'	3 години	2014–Дотепер	Глобальне
TRMM 3B42 precipitation	15'	3 години	1998–2015	50°N–50°S
CHIRPS precipitation	3'	5 днів	1981–Дотепер	50°N–50°S
NLDAS-2	7.5'	1 години	1979–Дотепер	Північна Америка
GLDAS-2	15'	3 години	1948–2010	Глобальне
NCEP reanalysis	2.5°	6 годин	1948–Дотепер	Глобальне
ORNL ДНІВМЕТ weather	1 km	Щорічно	1980–Дотепер	Північна Америка
GRIDMET	4 km	1 днів	1979–Дотепер	CONUS
NCEP Глобальне forecast system	15'	6 годин	2015– Дотепер	Глобальне
NCEP climate forecast system	12'	6 годин	1979–Дотепер	Глобальне
WorldClim	30"	12 зображень	1960–1990	Глобальне
NEX downscaled climate projections	1 km	1 днів	1950–2099	Північна Америка
Population				
WorldPop	100 m	5 років	2010-2015	85°N–60°S
GPWv4	30"	5 років	2000–2020	85°N–60°S

GEE використовує просту та дуже загальну модель даних, що базується на двовимірних растрових смугах з сіткою в легкому контейнері «зображення». Пікселі в окремій смузі повинні бути однорідними за типом даних, роздільною здатністю та проекцією. Однак зображення можуть містити будь-яку кількість смуг, і смуги в межах зображення не обов'язково повинні мати однакові типи даних або проекції. Кожне зображення також може мати пов'язані метадані ключ/значення, що містять таку інформацію, як місцезнаходження, час отримання та умови, за яких зображення було зібрано або оброблено.

Пов'язані зображення, такі як усі зображення, отримані одним датчиком, групуються разом і представлені як «колекції». Колекції забезпечують швидкі можливості фільтрації та сортування, що дозволяє користувачам легко шукати серед мільйонів окремих зображень, щоб вибрати дані, що відповідають певним просторовим, часовим або іншим критеріям [26].

Зображення, що надходять до GEE, попередньо обробляються для забезпечення швидкого та ефективного доступу. Спочатку зображення розрізаються на плитки в оригінальній проекції та роздільній здатності зображення та зберігаються в ефективній та реплікованій базі даних плиток. Розмір плитки 256×256 був обраний як практичний компроміс між завантаженням непотрібних даних та накладними витратами на виконання додаткових зчитувань. На відміну від традиційних систем «кубів даних», цей процес надходження даних зберігає інформацію: дані завжди зберігаються в оригінальній проекції, роздільній здатності та бітовій глибині, уникаючи погіршення якості даних, яке було б властиве повторній дискретизації всіх даних до фіксованої сітки, яка може підходити або не підходити для будь-якого конкретного застосування.

Крім того, для забезпечення швидкої візуалізації під час розробки алгоритму, для кожного зображення створюється піраміда плиток зі зменшеною роздільною здатністю, яка зберігається в базі даних плиток. Кожен рівень піраміди створюється шляхом зменшення роздільної здатності попереднього рівня вдвічі, доки все зображення не поміститься в одну плитку. Під час зменшення роздільної здатності діапазони з безперервними значеннями зазвичай усереднюються, тоді як діапазони з дискретними значеннями, такі як класифікаційні мітки, вибірково підбираються з використанням мінімальної, модальної, максимальної або фіксованої вибірки. Коли частина даних із зображення запитується для обчислення зі зменшеною роздільною здатністю, з бази даних плиток можливо отримати лише відповідні плитки з найбільш відповідного рівня піраміди. Таке зменшення масштабу за ступенем двох дозволяє мати дані, готові в різних масштабах, без значних

накладних витрат на зберігання, та відповідає поширеним моделям використання вебкартографування.

Google Earth Engine сьогодні динамічно розвивається: регулярно оновлює та поповнює базу даних, удосконалює алгоритми обробки й розширює набір доступних інструментів. Платформа стала ключовим елементом сучасної геоінформатики та сформувала новий стандарт хмарних геопросторових обчислень, стимулюючи інші компанії й організації до створення аналогічних рішень.

2.4 Підготовка вхідних даних

Для проведення геоінформаційного моніторингу обміління Шацьких озер у якості основного джерела даних було обрано супутникові знімки Landsat, доступні через платформу GEE. Однією з переваг використання GEE є наявність попередньо оброблених колекцій знімків, що включають маскування хмар та тіней, а також корекцію атмосферного впливу (Surface Reflectance), що дозволяє значно скоротити обсяг підготовчих робіт та підвищує точність подальшого аналізу.

Для формування єдиного часово-просторового набору даних було застосовано такі критерії відбору знімків:

1) Поріг хмарності. Рекомендовано обирати сцени з менш ніж 20% покриття хмарами, проте фактичний поріг буде коригуватися залежно від доступності даних для конкретного року. Таке обмеження забезпечує мінімальний вплив хмар на розрахунок площі водних об'єктів.

2) Сезонність. Для забезпечення порівнянності та мінімізації впливу сезонних коливань водного рівня знімки обираються за період липень–вересень. Це відповідає періоду максимальної водності Шацьких озер, коли льодові явища та весняне танення вже не впливають на розрахунки, а також зменшується ймовірність локальних паводкових коливань.

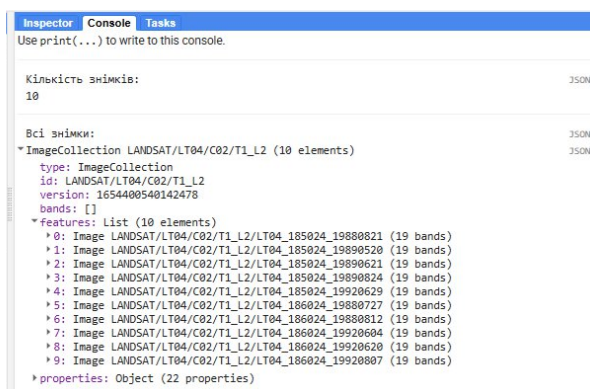
3) Формування сезонних композицій. Для кожного року формується медіанне зображення за вибраний сезон. Такий підхід дозволяє усереднити

залишкові хмари та тіні, забезпечує стабільну основу для подальшого розрахунку індексів та оцінки змін площі водойм.

4) Зона інтересу (ROI). Для аналізу обирається векторна геометрія Шацького національного природного парку, що охоплює всі озера. Окремі вектори озер не використовуються у вхідних даних, оскільки у ході реалізації буде сформовано полігональний шар озер 1988 року, його буде взято як початковий, у межах якого для наступних років буде визначатися площа водного дзеркала озер.

Для кінцевого формування бази супутникових даних перейдемо у редактор коду GEE (Code Editor). Початком моніторингу було обрано колекцію знімків супутника Landsat 4. При введенні у полі пошуку «Landsat 4» буде подано декілька різних колекцій для цього супутника, але для проведення дослідження обираємо - USGS Landsat 4 Level 2, Collection 2, Tier 1. Цей набір даних містить скориговані з урахуванням атмосфери дані про відбиття поверхні та температуру поверхні землі, отримані з даних, отриманих сенсором Landsat TM. Набір даних містить зображення за період з 22.08.1982 по 24.06.1993 роки.

Відобразимо наявні зображення за обраний сезонний період, поріг хмарності та знімки, що перетинаються у зоні інтересу. На рисунку 2.4.1 показано, що за заданими параметрами у колекції міститься 10 знімків.



```
Inspector Console Tasks
Use print(...) to write to this console.

Кількість знімків: 350N
10

Всі знімки: 350N
ImageCollection LANDSAT/LT04/C02/T1_L2 (10 elements) 350N
  type: ImageCollection
  id: LANDSAT/LT04/C02/T1_L2
  version: 1654400540142478
  bands: []
  *features: List (10 elements)
    * 0: Image LANDSAT/LT04/C02/T1_L2/LT04_185924_19880821 (19 bands)
    * 1: Image LANDSAT/LT04/C02/T1_L2/LT04_185924_19890520 (19 bands)
    * 2: Image LANDSAT/LT04/C02/T1_L2/LT04_185024_19890621 (19 bands)
    * 3: Image LANDSAT/LT04/C02/T1_L2/LT04_185024_19890824 (19 bands)
    * 4: Image LANDSAT/LT04/C02/T1_L2/LT04_185024_19920629 (19 bands)
    * 5: Image LANDSAT/LT04/C02/T1_L2/LT04_186024_19880727 (19 bands)
    * 6: Image LANDSAT/LT04/C02/T1_L2/LT04_186024_19880812 (19 bands)
    * 7: Image LANDSAT/LT04/C02/T1_L2/LT04_186024_19920604 (19 bands)
    * 8: Image LANDSAT/LT04/C02/T1_L2/LT04_186024_19920620 (19 bands)
    * 9: Image LANDSAT/LT04/C02/T1_L2/LT04_186024_19920807 (19 bands)
  *properties: Object (22 properties)
```

Рисунок 2.4.1 – Знімки з Landsat 4, що задовольняють обмеження

У переліку є 3 знімки за 1988 рік, оберемо їх для відображення «початкового» стану озер для моніторингу, зменшимо поріг хмарності до 5% та сформуємо з них медіанне зображення.

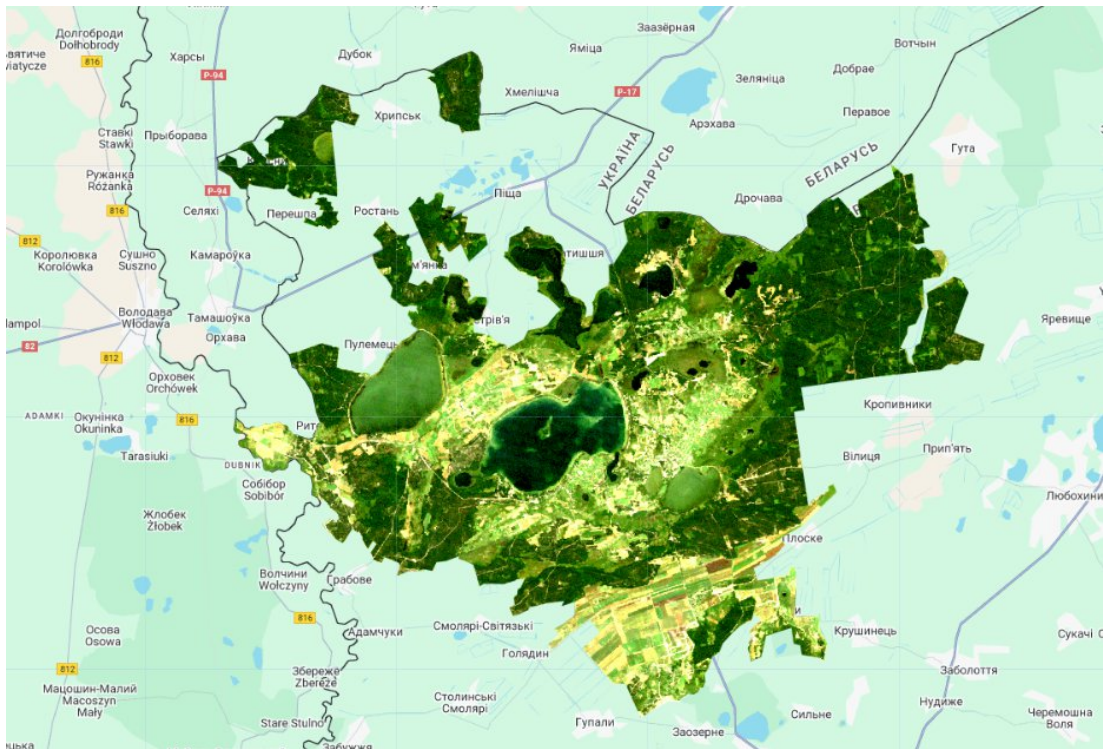


Рисунок 2.4.2 – Медіанне зображення Шецького НПП станом на 1988 рік

Оскільки дослідження передбачає аналіз динаміки змін водного дзеркала впродовж тривалого періоду, доцільним є використання знімків з інтервалом приблизно у п'ять років. Такий підхід дозволяє сформувати однорідні часові вибірки та простежити загальні тенденції обміління без надмірної залежності від річної мінливості гідрометеорологічних умов.

Для наступного етапу були використані дані супутника Landsat 5, який продовжив серію Landsat 4 і здійснював знімання у 1984–2013 роках. У GEE було обрано колекцію USGS Landsat 5 Level 2, Collection 2, Tier 1, що містить атмосферно скориговані показники відбиття поверхні. За встановленими критеріями (сезонність, поріг хмарності $\leq 5\%$, наявність покриття території Шецького НПП) було відібрано знімки за період 1994, 1996, 2007 та 2011 року. Із них, аналогічно до попереднього етапу, було сформовано медіанне зображення.

Наступним за хронологією стали дані Landsat 7, для якого у GEE використано колекцію USGS Landsat 7 Level 2, Collection 2, Tier 1. Попри відому проблему SLC-off, яка виникла весною 2003 року [35], для ранніх років місії (приблизно 1999–2002), що відповідають запланованій часовій вибірці, доступні повноцінні

зображення без структурних втрат. Після застосування фільтрів сезонності та хмарності було сформовано чергове репрезентативне медіанне зображення території дослідження за 2002 рік.

Для періоду з 2016 по 2025 рік застосовано дані супутника Landsat 8, який забезпечує значно вищу радіометричну якість та стабільність вимірювань. У GEE обрано колекцію USGS Landsat 8 Level 2, Collection 2, Tier 1. Із доступних сезонно відповідних та малохмарних знімків було сформовано медіанні зображення для 2016, 2021 та 2025 років, що відображає актуальний стан Шацьких озер.

Таким чином, було створено послідовний набір композитних супутникових зображень для ключових епох: 1988 (Landsat 4), 1994, 1996, 2007, 2011 (Landsat 5), 2002 (Landsat 7), та 2016, 2021, 2025 (Landsat 8). Така методика забезпечує однорідність даних, порівнюваність між різними супутниковими місяцями та надає змогу виконати комплексний геоінформаційний моніторинг обміління Шацьких озер протягом 37 років. Таким чином, сформований часово-просторовий набір даних забезпечує стандартизовану основу для подальшого моніторингу водного дзеркала озер, розрахунку індексів водності та обміління, з мінімальним впливом хмарних і сезонних факторів.

3 МЕТОДИКА ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ОБМІЛННЯ ОЗЕР

3.1 Концепція проєктуючого підходу

Концепція проєктуючого підходу до геоінформаційного моніторингу обміління Шацьких озер ґрунтується на інтеграції довгострокових супутникових спостережень серій Landsat 4-8 із можливостями хмарного середовища Google Earth Engine. Платформа дозволяє працювати з великими часовими рядами геопросторових даних, автоматизувати обробку супутникових знімків і отримувати відтворювані результати.

Основна ідея методики полягає у систематичному визначенні меж водної поверхні озер за багаторічний період, розрахунку їх площі та аналізі просторово-часової динаміки. Це дозволяє встановити ступінь та закономірності обміління та оцінити зміни водного дзеркала з високою точністю.

У межах запропонованого підходу процес моніторингу структурується у такі логічні етапи:

1. Формування багаторічного набору супутникових даних

Використовуються знімки Landsat 4-8, що охоплюють період від 1988 до сьогодення. Landsat застосовується як основне джерело для довгострокових трендів завдяки стабільності та наявному багаторічному архіву даних. Усі дані проходять попереднє фільтрування за датою зйомки, хмарністю та просторовим охопленням.

2. Автоматизована обробка та видалення перешкод

Знімки стандартизовано маскуються для усунення хмар, тіней і атмосферних явищ за допомогою QA-каналів. Для зменшення сезонних коливань аналіз проводиться у літньо-осінній період, коли водні рівні є найбільш стабільними.

3. Виділення меж водної поверхні за допомогою спектральних індексів

Для виділення води зазвичай використовуються класичні спектральні індекси – Таблиця 3.1.

Таблиця 3.1. Спектральні індекси для визначення води

Індекс	Призначення	Формула	Переваги
NDWI	Виділення води	$(\text{Green} - \text{NIR}) / (\text{Green} + \text{NIR})$	Стабільний для Landsat

Індекс	Призначення	Формула	Переваги
MNDWI	Вода у складних умовах	$(Green - SWIR1)/(Green + SWIR1)$	Краще відокремлює воду від вологого ґрунту
NDMI	Розрізнення води та вологого ґрунту	$(NIR - SWIR1)/(NIR + SWIR1)$	Зменшує помилки при виділенні
NDVI / EVI	Аналіз рослинності	$(NIR - Red)/(NIR + Red)$	Перевірка заболочення, заростання

У рамках даної атестаційної роботи запропоновано новий індекс SWMI (Shatsk Water Monitoring Index) для кращої диференціації мілководдя та вологих ґрунтів від відкритої води, з урахуванням місцевих умов Шацьких озер.

Формула SWMI для Landsat 4–8:

$$SWMI = 0.6 \times MNDWI + 0.3 (1 - |NDMI|) + 0.1 \times \left(2 \times \frac{Blue}{Blue + Red} - 1 \right) \quad (3.1)$$

Де:

- ~ MNDWI - основний індикатор води;
- ~ NDMI - відокремлює вологий ґрунт та заболочені зони;
- ~ $\frac{Blue}{Blue+Red}$ - враховує прозорість і мутність води.

SWMI доповнює класичні індекси, підвищуючи точність виділення водних площ та мілководдя.

4. Побудова щорічних та сезонних композитів

Для стабільності оцінки площі водної поверхні формується median composite. Це зменшує вплив хмарності, забезпечуючи однорідність даних.

5. Розрахунок площі водної поверхні

Виділені межі води аналізуються у растровому вигляді та трансформуються у векторні полігони. Для кожного року розраховується площа водного дзеркала через pixelArea() та reduceRegion() у GEE, формуючи часовий ряд змін площі.

6. Аналіз динаміки та трендів обміління

Часовий ряд площ аналізується статистично: оцінюється лінійний тренд, середньорічна зміна (%), виявляються аномальні періоди. Використовуються тест Манна–Кендалла для перевірки значущості трендів.

7. Просторово-часова візуалізація результатів

Результати відображаються у вигляді тематичних карт та графіків, демонструючи: зміни меж озер, динаміку площ водної поверхні та відхилення окремих років від середньостатистичного тренду.

3.2 Особливості обробки хмарності, сезонності, шумів

Коректність визначення площі водної поверхні та достовірність оцінки обміління значною мірою залежать від якості вихідних супутникових знімків. Дані дистанційного зондування можуть містити різноманітні явища: хмарність, атмосферні ефекти, тіні, сезонні коливання рівня води, спектральний шум та змішування пікселів на межі «вода–суходіл». Тому методика геоінформаційного моніторингу передбачає низку процедур, спрямованих на нормалізацію вихідних даних та усунення впливів, що можуть спричинити помилки в інтерпретації.

1. Обробка та маскування хмарності

Хмарність є одним із головних факторів, що обмежують аналіз знімків Landsat і Sentinel. У методиці застосовується багаторівневий підхід до маскування:

1.1. Маскування за QA-пікселями

Усі знімки Landsat 4–8 містять QA-канал (QA_PIXEL), який кодує класи пікселів: хмари, високі хмари, тіні, вода, сніг тощо [24]. Маскування виконується за допомогою бітових операцій згідно з офіційними таблицями якості USGS (Рисунок 3.1). Це забезпечує надійне автоматичне видалення:

- щільної хмарності,
- напівпрозорих хмар,
- тіней хмар,
- снігового покриву.

16-bit Landsat 8 QA Band - Read bits from RIGHT to LEFT ← starting with Bit 0																
BIT	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
DESCRIPTION	Cloud Confidence		Cirrus Confidence		Snow/Ice Confidence		Vegetation Confidence		Reserved for cloud shadow		Water Confidence		Reserved	Terrain Occlusion	Dropped Frame	Designated Fill

Рисунок 3.1. Приклад таблиці бітів Landsat 8 QA каналу (USGS) [23]

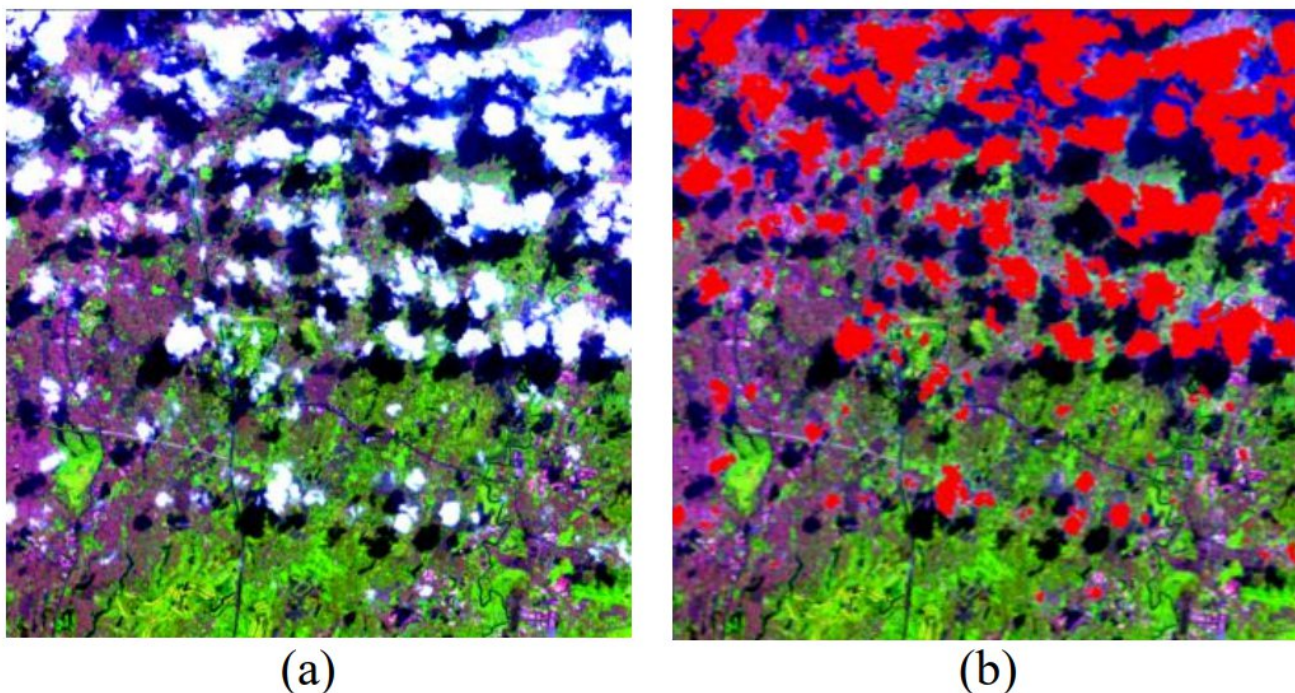


Рисунок 3.2. Приклад результату маскуванню хмар. Червоний колір позначає область хмарності [23]

1.2. Формування медіанного зображення як способу зменшення хмарності

Оскільки один знімок може бути частково закритий хмарами, застосовується побудова median composite, який обирає медіанне значення спектрального значення серед доступних очищених знімків. Такий композит фактично «усереднює» інформацію, повністю виключаючи хмарні пікселі. Приклад такого композиту за 1988 рік наведено на рисунку 2.4.2 раніше.

Це забезпечує стабільну основу для подальшого виділення води.

2. Облік сезонних коливань рівня води

Шацькі озера характеризуються природною сезонною мінливістю рівня води, що залежить від опадів, танення снігу, температурного режиму і випаровування. Для уникнення похибок, спричинених сезонністю, у методиці передбачено такі принципи:

2.1. Аналіз у межах репрезентативного періоду року.

Для дослідження обрано літньо-осінній сезон (липень–вересень), оскільки:

- відсутній льодовий покрив,
- рівень води стабілізується після весняних паводків,

- мінімізується вплив болота і підтопленої рослинності,
- значно менша сезонна атмосферна мінливість.

Це дозволяє отримати порівнювані результати між різними роками.

2.2. Формування сезонних композитів.

Для кожного року створюється сезонний композит, який включає тільки знімки за обраний період.

2.3. Уникнення сезонів коли рівень води нестабільний.

3. Змішування пікселів

Для невеликих водойм та вузьких берегових зон характерне змішування спектральних сигналів у межах одного пікселя Landsat (30 м). Це призводить до:

- завищення площ води,
- зміщення меж,
- появи «смужок» мілководдя як водних об'єктів.

Щоб зменшити цей ефект, застосовується:

- використання запропонованого індексу SWMI, який краще диференціює мілководдя,
- фільтрація дрібних об'єктів через мінімальну площу полігонів.

4. Оптимізація кількості знімків у часовому ряді

Щорічно доступна кількість якісних сцен може варіювати від 3–5 (для хмарних років) до 40–60. Тому використовуються:

- динамічні фільтри (filterDate, filterBounds, filterMetadata),
- автоматичний відбір найякісніших сцен за QA-даними.

5. Підвищення достовірності виділення води

Для контролю якості:

- виконується візуальна перевірка об'єктів зразкових сцен у різні роки;
- проводиться кореляція результатів між різними серіями Landsat (4–5–7–8).

3.3 Розробка алгоритму реалізації в Google Earth Engine

Розроблений алгоритм реалізує повний цикл геоінформаційної обробки супутникових знімків Landsat для визначення меж водної поверхні Шацьких озер,

обчислення їх площі та подальшого аналізу динаміки обміління. Методика спирається на принципи, сформульованих у підрозділах 3.1 та 3.2: формування одноманітних сезонних композитів, зменшення впливу хмарності, побудова індексів водності та застосування порогових підходів для виділення водних поверхонь.

Алгоритм виконується для кожного року окремо, що забезпечує придатність результатів для подальшої міжрічної порівняльної оцінки. Блок-схема алгоритму геоінформаційного моніторингу озер подана на рисунку 3.3.

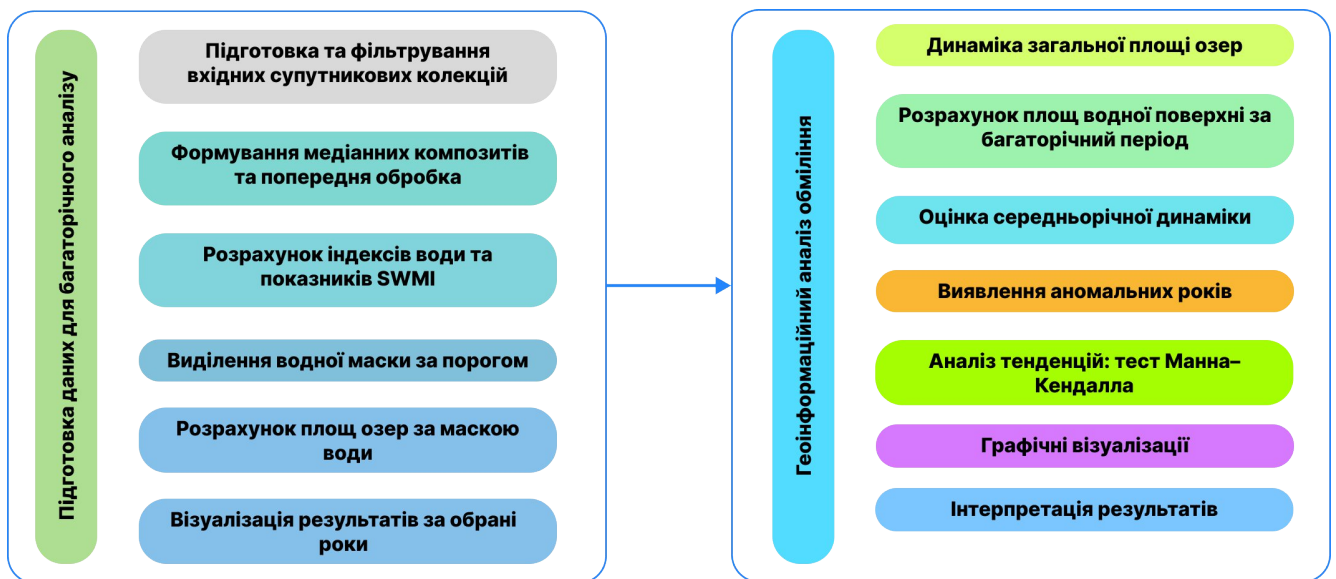


Рисунок 3.3. Блок-схема проведення алгоритму геоінформаційного моніторингу обміління озер

3.3.1 Підготовка та фільтрація вхідних супутникових колекцій

Першим кроком є формування Landsat-колекцій за фіксований сезон, що мінімізує сезонні коливання рівня води.

Фільтрація охоплює:

- просторове обмеження за ROI (полігон Шацького НПП),
- часовий інтервал сезону,
- вилучення хмар та тіней на основі бітових масок QA_PIXEL,
- додаткове обмеження за показником CLOUD_COVER.

Це забезпечує чистий набір пікселів для формування сезонного композиту.

Приклад частини коду:

```
var collection = ee.ImageCollection("LANDSAT/LT04/C02/T1_L2")
  .filterBounds(roi)
  .filterDate(startDate, endDate)
  .map(maskLandsat4)
  .filter(ee.Filter.lt('CLOUD_COVER', 5));
```

3.3.2 Формування медіанного композиту та попередня обробка

Для усунення одиничних аномальних значень формується медіанне сезонне зображення, яке репрезентує стан поверхні озер у даний рік. Це зменшує вплив:

- залишкової хмарності,
- шумів сенсора,
- зміщень від одиничних знімків.

Медіанне зображення далі використовується для обчислення індексів, що ідентифікують воду.

3.3.3 Розрахунок індексів води та показника SWMI

Оскільки Шацькі озера мають різну глибину, ступінь заростання та прозорість води, для уникнення хибних класифікацій використано запропонований індекс SWMI (Shatsk Water Monitoring Index). Він включає:

- MNDWI – індекс чутливий до водних поверхонь у присутності рослинності,
- NDMI – індекс, що реагує на ступінь зволоження та тіньові ділянки,
- Blue Ratio – індекс, що компенсує світлі піщані береги.

SWMI уніфікує інформацію трьох індексів, роблячи виділення меж озер стабільнішим.

Приклад скрипту із застосуванням індексу:

```
var swmi1988 = mndwi1988.multiply(0.6)
  .add(ndmi1988.abs().multiply(-0.3).add(0.3))
  .add(bluer1988.multiply(2).subtract(1).multiply(0.1))
  .rename('SWMI 1988');
```

3.3.4 Виділення водної маски за порогом

SWMI використовується для побудови маски води. Початковий поріг був встановлений експериментально (> 0.22), а в підрозділі 3.4 буде описано процес його калібрування та оцінки якості.

```
var waterMask1988 = composite1988.select('SWMI 1988').gt(0.22);
```

Отримана маска використовується для аналізу площ та перетворення растрових даних у векторні.

3.3.5 Розрахунок площ озер за маскою води

Площа визначається через множення маски на піксельну площу та сумування у межах кожного озера з векторного шару. Алгоритм повертає одночасно площу у м² та гектарів.

```
var lakesWater1988 = lakes1988.map(function(feature) {
  var areaWater = waterAreaImg.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.sum(),
    geometry: feature.geometry(),
    scale: 30
  }).get('area');

  return feature.set({
    'water_area_m2_1988': areaWater,
    'water_area_ha_1988': ee.Number(areaWater).divide(10000)
  });
});
```

3.3.6 Візуалізація результатів за рік

Для кожного року будується діаграма площ озер. Це дозволяє:

- побачити розмір водного дзеркала кожного озера,
- подальше включення значень у часову серію.

Приклад графіка:

```
var chart1988 = ui.Chart.feature.byFeature({
  features: lakesWater1988,
  xProperty: 'name',
  yProperties: ['water_area_ha_1988']
});
```

```

.setChartType('ColumnChart')
.setSeriesNames(['Площа води, га'])
.setOptions({
  title: 'Площа води в озерах (1988)',
  hAxis: {title: 'Озеро'},
  vAxis: {title: 'Площа води, га'},
  legend: {position: 'none'},
  colors: ['#00A2FF']
});

```

3.3.7 Розширення алгоритму на багаторічний моніторинг

Структура алгоритму, яка була продемонстрована для 1988 року, є універсальною. Для багаторічного аналізу:

- створюється цикл за роками від 1988 по 2025;
- для кожного року автоматично генерується:
 - ~ сезонний композит,
 - ~ SWMI,
 - ~ маска води,
 - ~ площі по кожному озеру;
 - ~ результати записуються у FeatureCollection;
 - ~ будується графік зміни площі у часі.

Розроблений алгоритм у Google Earth Engine забезпечує автоматизоване формування сезонних композитів, обчислення індексів, побудову водних масок та розрахунок площ водної поверхні для кожного озера. Єдина структурна схема обробки дозволяє повторювати процедуру для різних років і отримувати порівнювані результати.

Отримані значення площі є основою для подальшого багаторічного аналізу, адже саме їх сукупність дає можливість визначити тенденції обміління та оцінити динаміку змін Шацьких озер у часі.

Логічним завершенням алгоритму є інтеграція річних результатів, побудова часових графіків та аналіз багаторічних змін площі водної поверхні, що дозволить кількісно оцінити масштаби та характер обміління.

3.4 Отримання кількісних показників обміління

Після отримання річних значень площ водної поверхні для кожного озера відповідно до алгоритму, розробленого у підрозділі 3.3, наступним кроком є інтеграція цих результатів у результуючу таблицю площ кожного озера за багаторічний період. Цей етап дозволяє перейти від поодиноких вимірювань до повного багаторічного аналізу, що є основою для визначення ступеня та характеру обміління Шацьких озер.

1. Розрахунок площ водної поверхні за багаторічний період

Для кожного року в межах обраного досліджуваного інтервалу (1985–2025 рр.) формується узагальнена таблиця площ водного дзеркала, де значення площ нормалізуються до гектарів. Дані отримуються автоматизовано шляхом проходження циклу в GEE, що дозволяє створити однакові умови обробки для всіх років.

Таблиця 4.2.2.1 представляє площі водної поверхні озер за багаторічний період.

Ця таблиця є основою для подальших розрахунків.

2. Оцінка середньорічної динаміки

На основі багаторічного ряду площ обчислюється:

$$\Delta S_{\text{річн}} = \frac{S_t - S_{t-1}}{S_{t-1}} \times 100\% \quad (3.4)$$

де S_t – площа водної поверхні у році t .

Такий підхід дозволяє визначити середнє річне зменшення водного дзеркала у відсотках та виокремити періоди різкої зміни.

3. Виявлення аномальних років

Аномальними вважаються роки, у яких:

- ~ абсолютна зміна площі перевищує середньоквадратичне відхилення;
- ~ спостерігається локальний максимум/мінімум, не характерний для загального тренду;
- ~ значення пов'язані з одиничними гідрометеорологічними явищами.

У цій роботі розглянуто саме алгоритм з середньоквадратичним відхиленням. Таким чином, аномаліями будуть визначатися роки, у яких зміна площі була непропорційно різкою порівняно з топовими змінами озера. Такий підхід дозволяє автоматично виділити нестандартні коливання, що можуть бути пов'язані як з природними процесами (посухи, повені), так і з антропогенними впливами.

4. Аналіз тенденцій: тест Манна–Кендалла

Для кількісного визначення багаторічного тренду застосовуються статистичні критерії, як тест Манна-Кендалла, рекомендований для гідрологічних та кліматичних часових рядів:

Використовується для визначення значущості тренду:

- ~ S_0 : тренд відсутній;
- ~ S_1 : тренд існує (зміна у бік збільшення або зменшення).

Отримане p-value дозволяє оцінити, чи є багаторічні зміни статистично значущими на рівні $\alpha = 0.05$.

5. Графічні візуалізації

5.1. Динаміка зміни площ водної поверхні

Для кожного озера формується графік виду:

- вісь X – роки,
- вісь Y – площа водного дзеркала (га),
- шар кривої тренду – лінійна регресія.

Такі графіки дозволяють візуально визначити напрям і силу зміни водної поверхні.

5.2. Трендова діаграма

На графіку використовуються значення, що були обчислені під час тесту Манн-Канедалла. Графік має форму гістограми з від'ємними та додатними даними, де кожен демонструється:

- кожен стовпчик відповідає одному озеру;
- висота стовпчика відображає величину Z-статистики;
- нульова горизонтальна лінія дозволяє чітко відділити позитивні тренди від негативних.

5.3. Табличне представлення результатів

У підрозділі наводиться узагальнена таблиця 4.2.6.1 площа водної поверхні озера за 1988–2025 рр.

Таким чином, результат геоінформаційного моніторингу обміління Шацьких озер буде формувати кількісну оцінку обміління, інтегруючи набір річних спостережень у цілісну систему аналізу. Поєднання площ, трендів, статистичної значень та графічних моделей забезпечує комплексне уявлення про довготривалу динаміку водного дзеркала Шацьких озер та дозволяє зробити достовірні висновки щодо стану рівню обміління.

4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

4.1 Реалізація алгоритму

Для реалізації розробленого алгоритму у GEE були використані такі вихідні дані, додані у вкладку Імпорт (Assets):

- ~ Полігон ROI – межа Шацького національного природного парку.
Використовується для просторового обмеження аналізу.
- ~ Супутникові колекції Landsat – вибір колекцій:
 - USGS Landsat 4 Level 2, Collection 2, Tier 1;
 - USGS Landsat 5 Level 2, Collection 2, Tier 1;
 - USGS Landsat 7 Level 2, Collection 2, Tier 1;
 - USGS Landsat 8 Level 2, Collection 2, Tier 1.

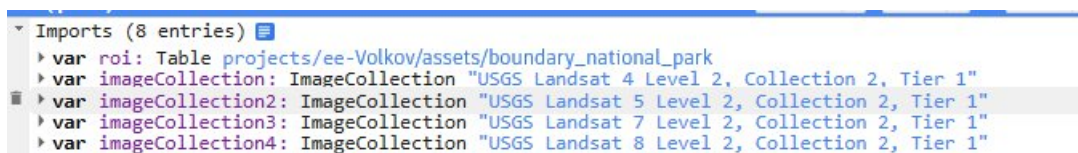


Рисунок 4.1.1. Вкладка Assets з імпортованим ROI та колекціями

4.1.1 Підготовка та фільтрування колекцій

Скрипт виконує фільтрацію супутникових знімків за критеріями початку і кінця відбору знімків за інтервалом сезону, показник хмарності та видалення хмар і тіней маскою :

```
var startYear = 1988; // рік початку
var endYear = 1988; // рік кінця
var startDate = startYear + '-07-01';
var endDate = endYear + '-09-30';
function maskLandsat4(imageCollection) {
  var qa = imageCollection.select('QA_PIXEL');
  var cloud = qa.bitwiseAnd(1 << 3).neq(0);
  var cloudShadow = qa.bitwiseAnd(1 << 4).neq(0);
  return
  imageCollection.updateMask(cloud.not()).updateMask(cloudShadow
  .not());
}
```

```
var collection = ee.ImageCollection("LANDSAT/LT04/C02/T1_L2")
  .filterBounds(roi)
  .filterDate(startDate, endDate)
  .map(maskLandsat4)
  .filter(ee.Filter.lt('CLOUD_COVER', 5));
print('Кількість знімків 1988:', collection.size());
print('Всі знімки 1988:', collection);
```

де просторове обмеження `roi`, часовий інтервал сезону (`filterDate(startDate, endDate)`), видалення хмар та тіней – функція `maskLandsatX(image)`, яка використовує бітові маски `QA_PIXEL4`, обмеження за показником `CLOUD_COVER` – `.filter(ee.Filter.lt('CLOUD_COVER', 5))`.

Функція `print` виводить результат фільтрування у значенні кількості знімків та колекцію відібраних знімків у вкладку Console.

Результат фільтрування відображено на рисунку 4.1.1.1.

```
Кількість знімків 1988:
1

Всі знімки 1988:
▶ ImageCollection LANDSAT/LT04/C02/T1_L2 (1 element)
```

Рисунок 4.1.1.1. Перегляд кількості знімків у консолі (`print('Кількість знімків 1988:', collection.size())`)

Як видно за введеними критеріями було відібрано лише один знімок у 1988 році. Застосувавши цей скрипт для інших років було отримано наступні результати:

- для 1994 було знайдено також 1 знімок,
- для 1996 – 2 знімки,
- для 2002 – 3 знімки,
- для 2007 – 1 знімок,
- для 2011 – 1 знімок,
- для 2016 – 3 знімки,
- для 2021 – 4 знімки,
- для 2025 – 5 знімків.

Для 2021 та 2025 років було змінено поріг хмарності, так як знімок не покривав повністю зону інтересу. Проте хмарність у межах ROI була відсутня, тому збільшення цього показника не вплине на результат дослідження.

4.1.2 Формування медіанного композиту

Для кожного року формується медіанне сезонне зображення, що зменшує вплив залишкової хмарності, шумів сенсора та аномалій окремих знімків.

Для відображення сформованого зображення використаємо функцію `Map.addLayer(об'єкт.вирізати(roi), візуальні_параметри, назва_шару)`.

```
var medianImage1988 = collection.median();
```

функція `.median()` формує медіанне зображення з відібраних знімків раніше при фільтруванні.

```
Map.addLayer(medianImage1988.clip(roi), imageVisParam, 'Median Image 1988');
```

Медіанні зображення для кожного з років відображено на рисунках 4.1.2.1-4.1.2.9.

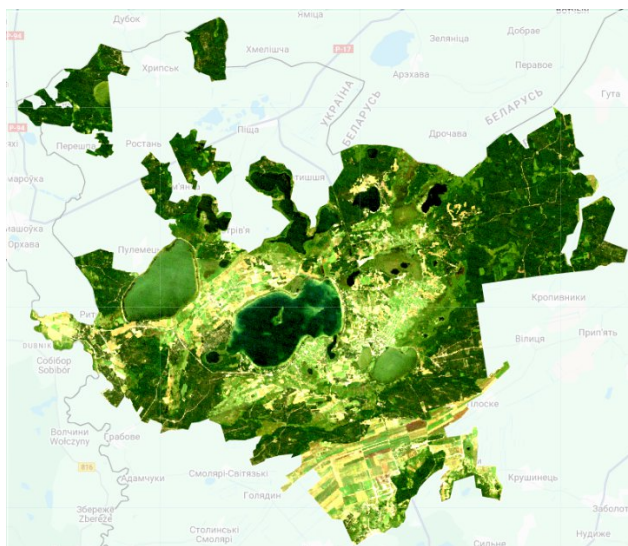


Рисунок 4.1.2.1. Медіанне зображення за 1988 рік



Рисунок 4.1.2.2. Медіанне зображення за 1994 рік

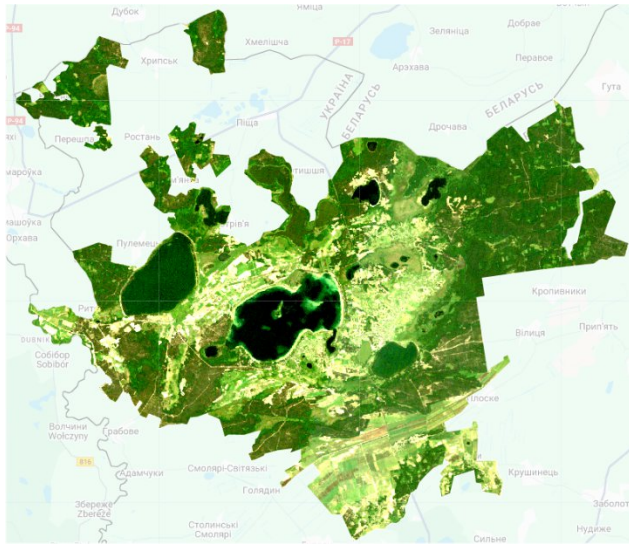


Рисунок 4.1.2.3. Медіанне зображення за 1996 рік

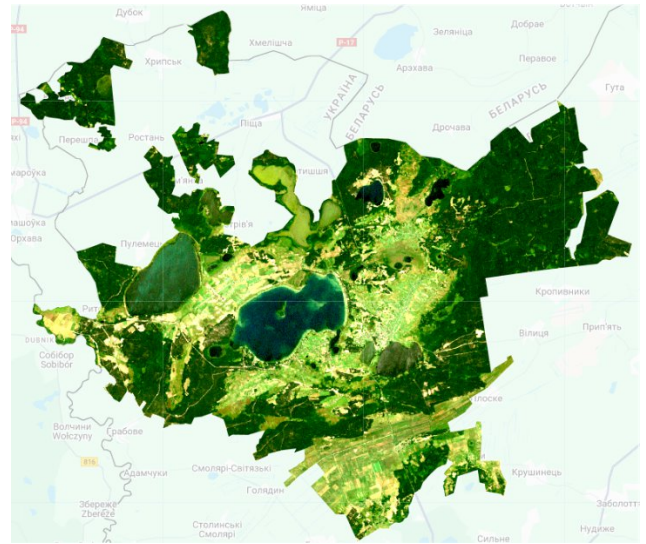


Рисунок 4.1.2.4. Медіанне зображення за 2002 рік

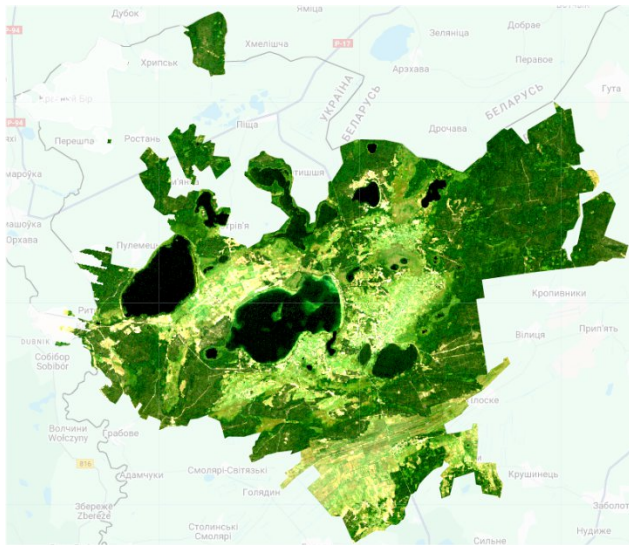


Рисунок 4.1.2.5. Медіанне зображення за 2007 рік

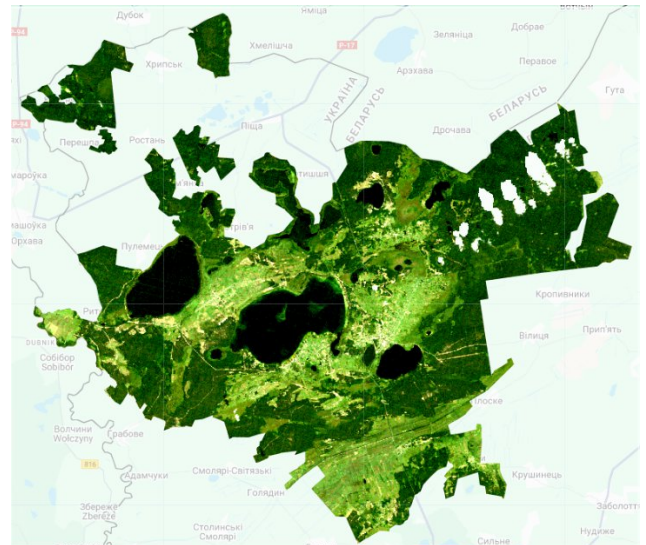


Рисунок 4.1.2.6. Медіанне зображення за 2011 рік

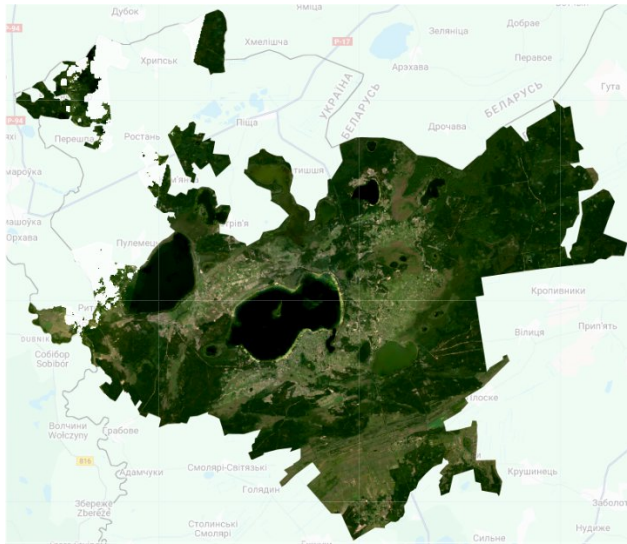


Рисунок 4.1.2.7. Медіанне зображення за 2016 рік

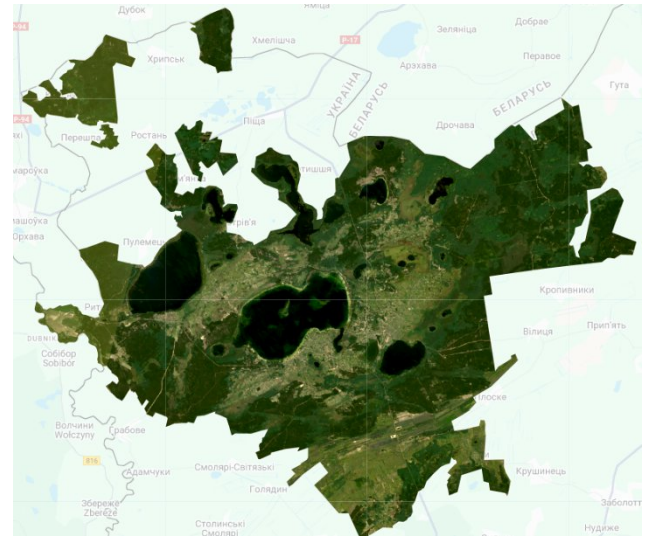


Рисунок 4.1.2.8. Медіанне зображення за 2021 рік

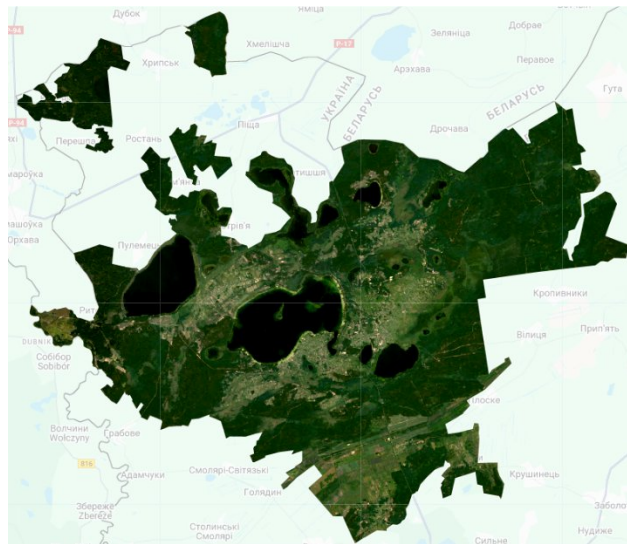


Рисунок 4.1.2.9. Медіанне зображення за 2025 рік

4.1.3 Розрахунок індексів води та запропонованого індексу SWMI

На даному етапі буде створено функцію `addSWMI` у межах якої буде обраховано індекси води, запропонований індекс SWMI. Ця функція буде повторюваною для кожного року.

```
function addSWMI (medianImage1988) {
```

Для обрахунку індексів створимо змінні каналів, які відповідають медіанному сезонному зображенню за обраний рік.

```
var b2_1988 = medianImage1988.select('SR_B1'); // Blue
```

```

var b3_1988 = medianImage1988.select('SR_B2'); // Green
var b4_1988 = medianImage1988.select('SR_B3'); // Red
var b5_1988 = medianImage1988.select('SR_B4'); // NIR
var b6_1988 = medianImage1988.select('SR_B5'); // SWIR1

```

Для визначення меж озер обчислюються ідекси:

~ MNDW – виділяє воду серед рослинності. Формула обрахунку [31]:

$$MNDWI = \frac{Green - SWIR1}{Green + SWIR1} \quad (4.1.3)$$

~ NDMI – оцінює зволоженість рослин і відокремити їх від водного дзеркала. Формула обрахунку [15]:

$$NDMI = \frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1} \quad (4.1.4)$$

~ Blue Ratio – створений індекс, який визначає світлі піщані береги та мілководдя. Формула обрахунку :

$$Bluer = \frac{Blue}{Blue - NIR} \quad (4.1.5)$$

```

var mndwi1988 =
b3_1988.subtract(b6_1988).divide(b3_1988.add(b6_1988)).rename('MNDWI
1988');
var ndmi1988 =
b5_1988.subtract(b6_1988).divide(b5_1988.add(b6_1988)).rename('NDMI
1988');
var bluer1988 =
b2_1988.divide(b2_1988.add(b4_1988)).rename('BlueRatio 1988');

```

Об'єднавши ідекси води визначаємо запропонований індекс SWMI (Shatsk Water Monitoring Index) – має комбіновану структуру для стабільного виділення води:

- ~ MNDWI має найбільшу вагу (0.6), так як найкраще виділяє гідрографічні об'єкти;
- ~ NDMI використовується для зменшення впливу тіней та заболочених ділянок ($0.3 * (1 - \text{abs}(\text{NDMI}))$);
- ~ Blue Ratio додає невелику корекцію (0.1) для світлих піщаних берегів та мілководдя.

Функція `rename()` задає назву нового шару для відображення на карті.

```

var swmi1988 = mndwi1988.multiply(0.6)
    .add(ndmi1988.abs().multiply(-0.3).add(0.3))
    .add(bluer1988.multiply(2).subtract(1).multiply(0.1))
    .rename('SWMI 1988');
return medianImage1988.addBands([mndwi1988, ndmi1988, bluer1988,
swmi1988]);
}

```

Завершує формування функції додавання індексів як нових каналів у медіанне зображення. Це дозволить в подальших розрахунках використовувати їх звертаючись до медіанного композиту.

```

return medianImage1988.addBands([mndwi1988, ndmi1988, bluer1988,
swmi1988]);
}

```

Для спрацювання всіх обрахунків та запису нових каналів створимо змінну `withIndex(year)`, яка буде медіанним композитом з доданими індексами, та викличемо функцію `addSWMI`.

```

var withIndex1988 = addSWMI(medianImage1988);

```

Сформуємо зображення медіанного композиту SWMI лише для території Шацького НПП.

```

var composite1988 = withIndex1988.clip(roi);

```

Виведемо зображення медіанного композиту SWMI за допомогою функції `Map.addLayer` та вкажемо назву шару `SWMI year`.

```

Map.addLayer(composite1988.select('SWMI 1988'), swmiVis, 'SWMI
1988');

```

На рисунках 4.1.3.1-4.1.3.9 відображено медіанні композити SWMI для дослідних років.

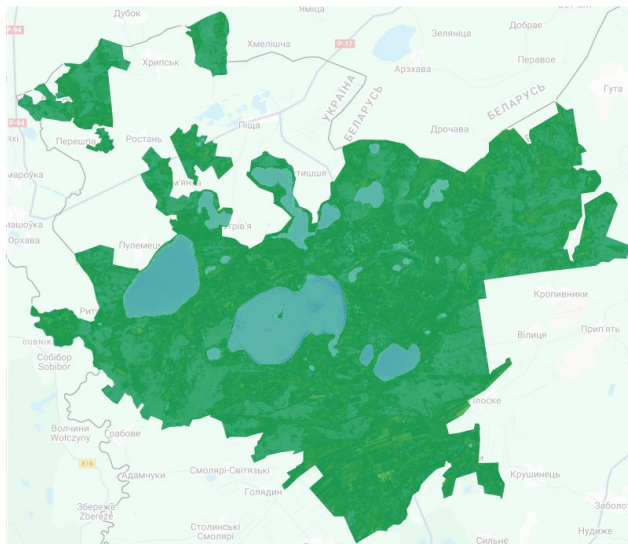


Рисунок 4.1.3.1. SWMI шар для 1988 року

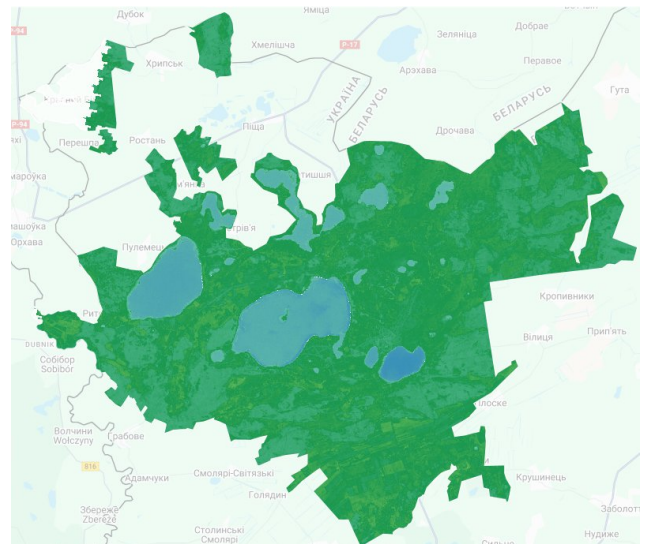


Рисунок 4.1.3.2. SWMI шар для 1994 року

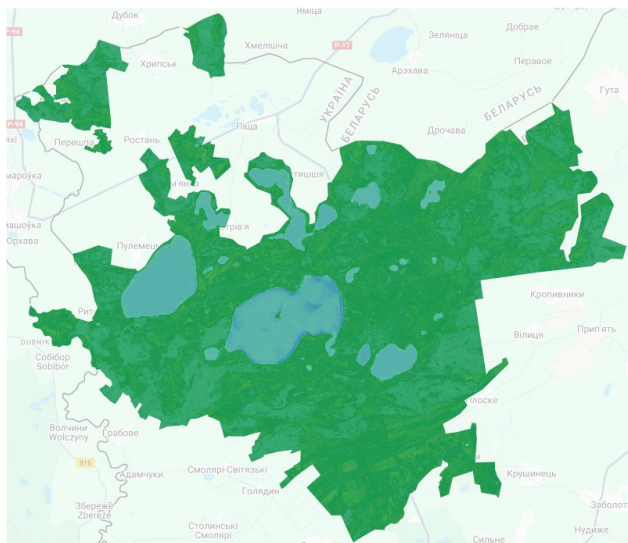


Рисунок 4.1.3.3. SWMI шар для 1996 року

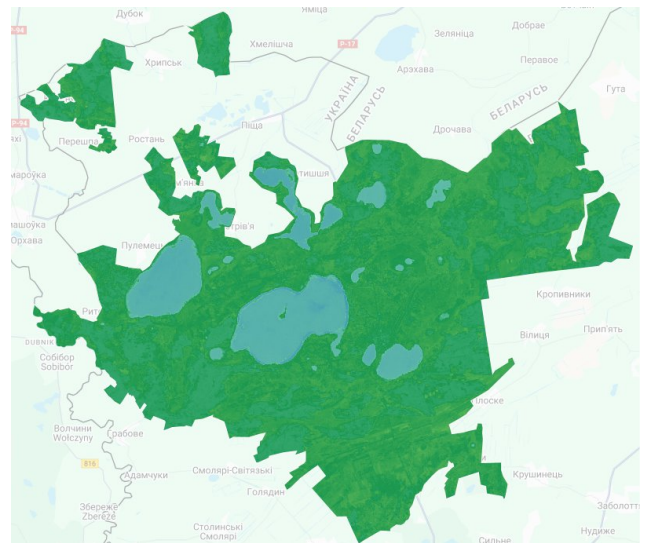


Рисунок 4.1.3.4. SWMI шар для 2002 року

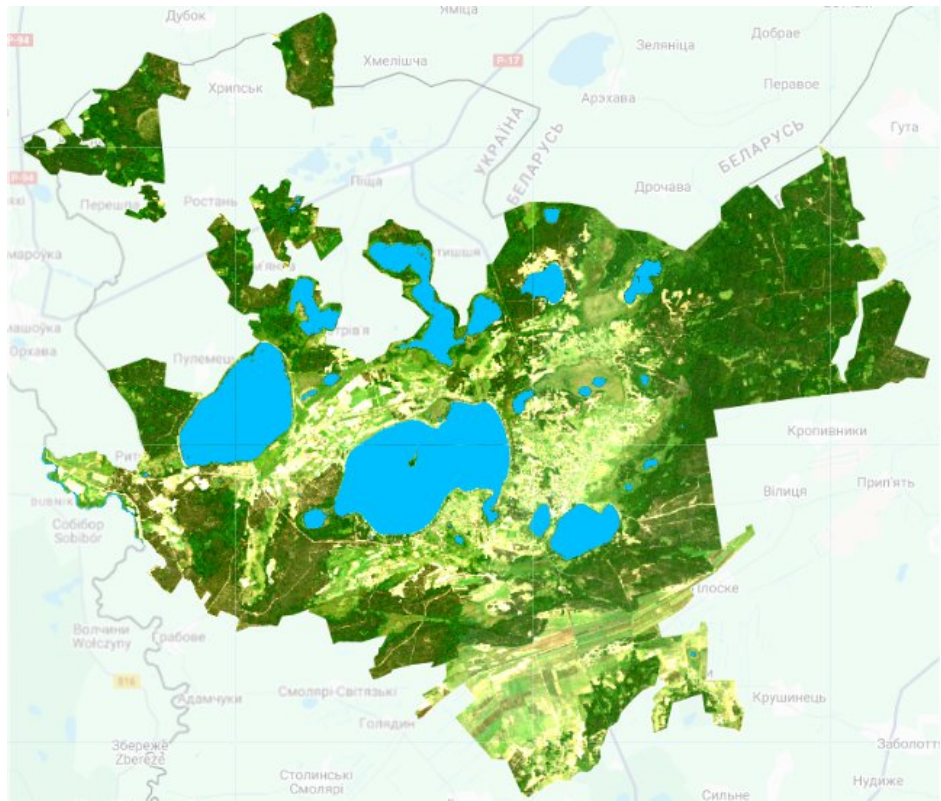


Рисунок 4.1.4.3. Маска води на 1996 рік

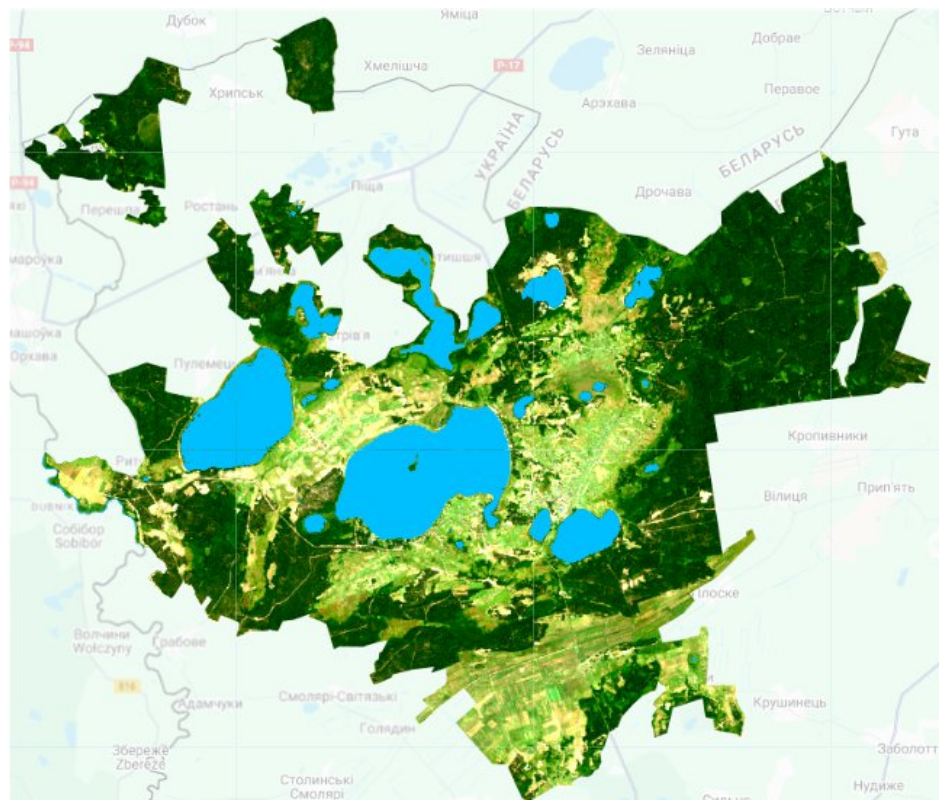


Рисунок 4.1.4.4. Маска води на 2002 рік

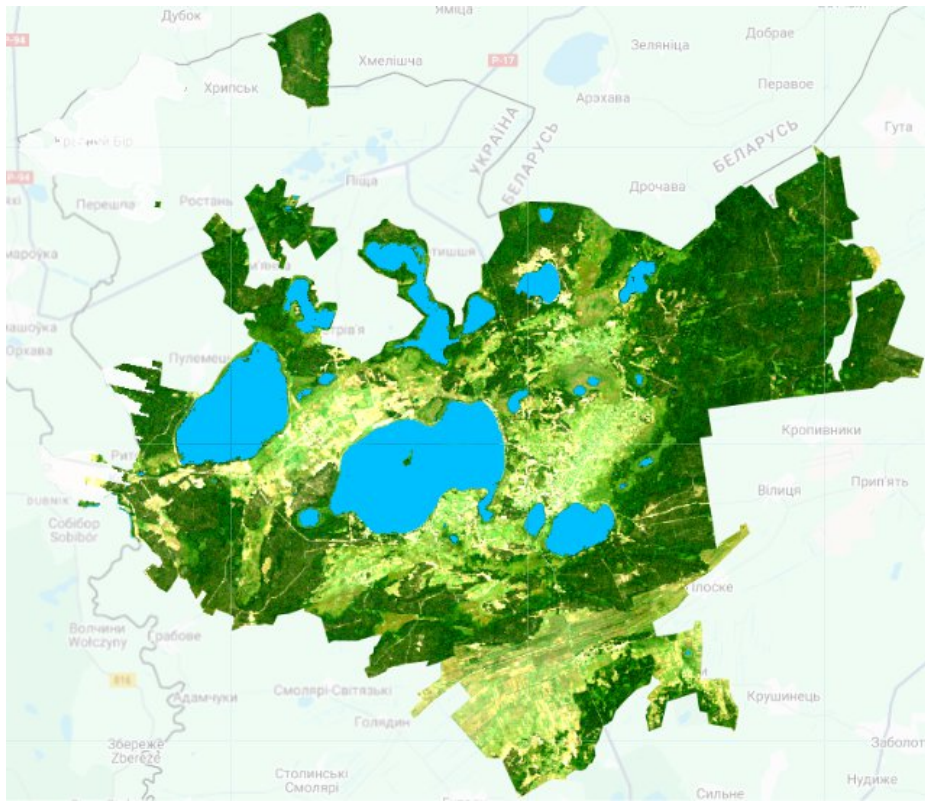


Рисунок 4.1.4.5. Маска води на 2007 рік

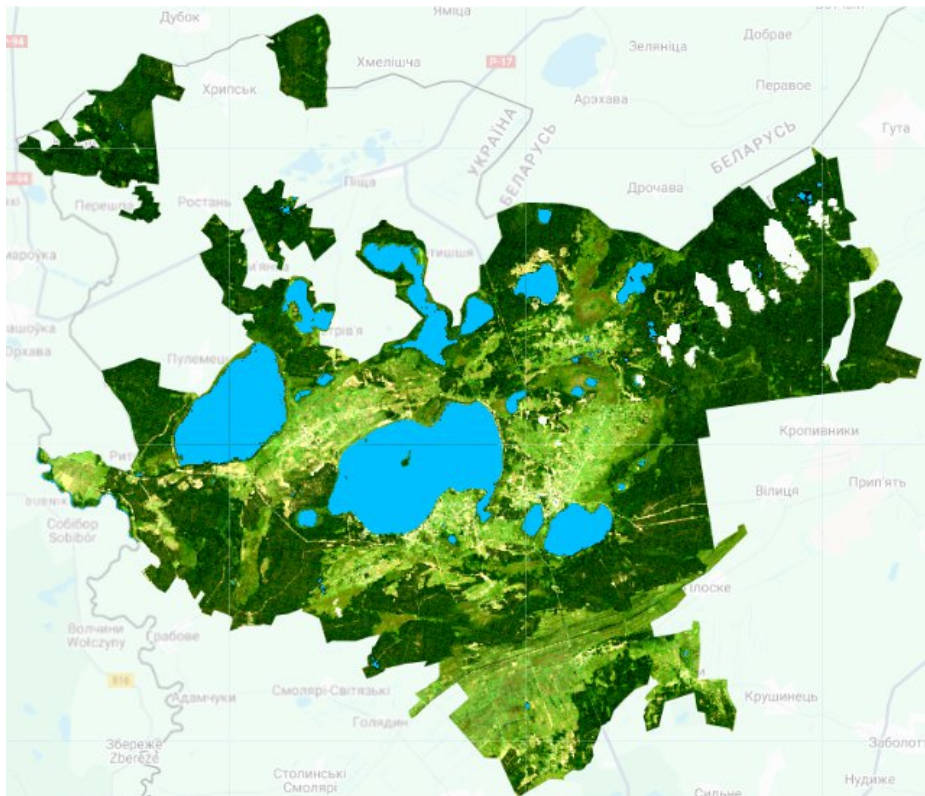


Рисунок 4.1.4.6. Маска води на 2011 рік

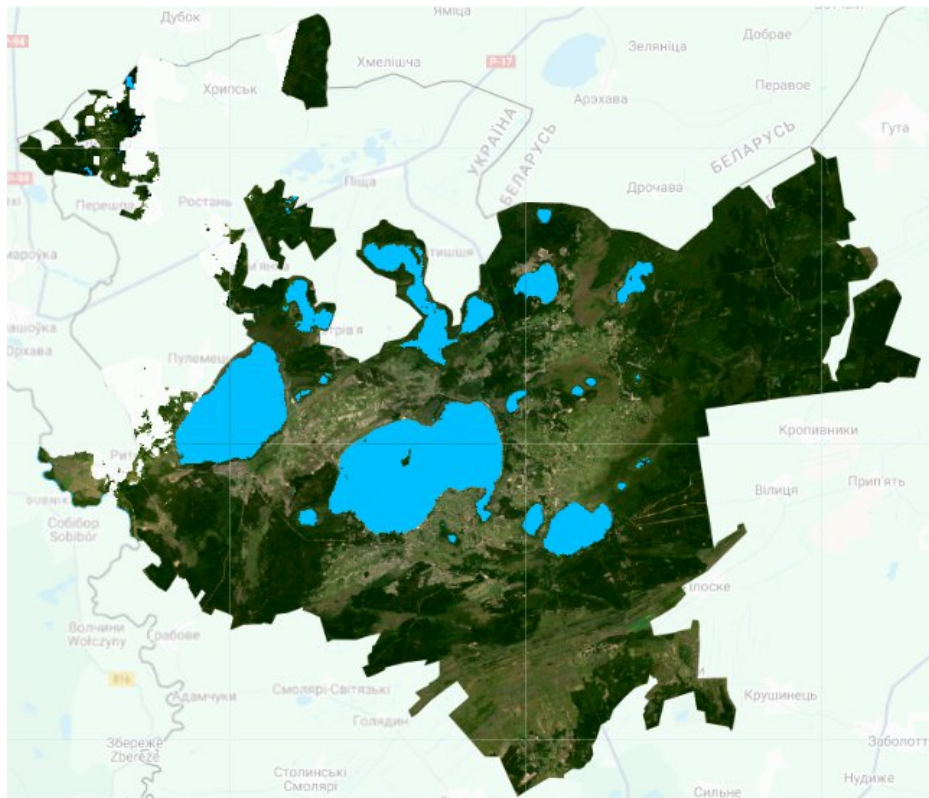


Рисунок 4.1.4.7. Маска води на 2016 рік

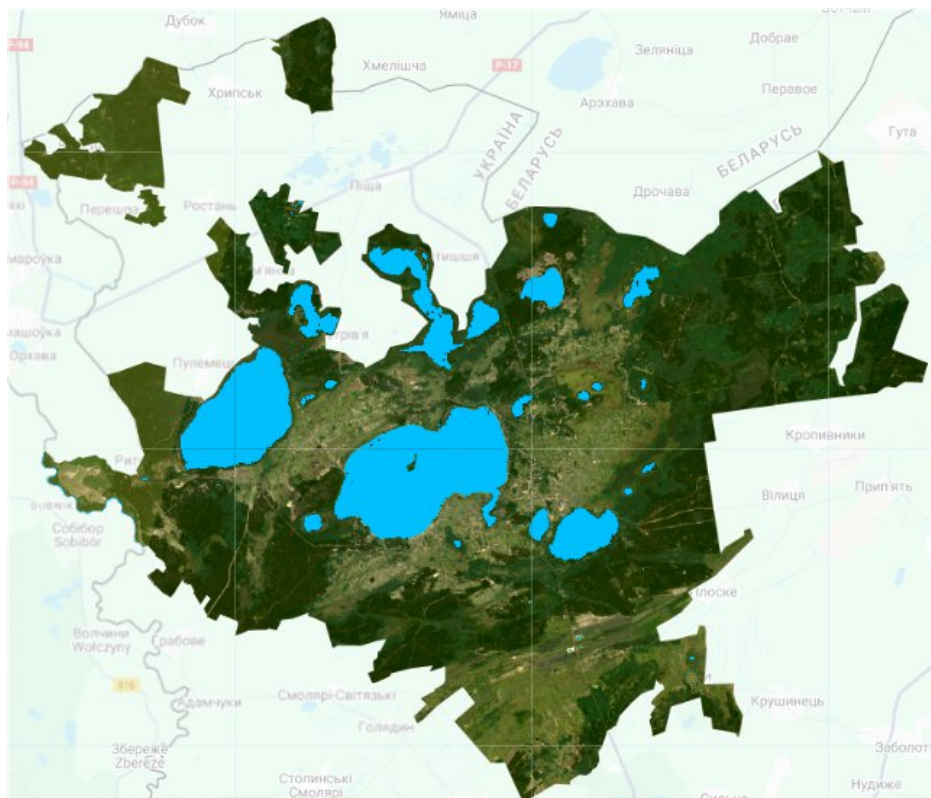


Рисунок 4.1.4.8. Маска води на 2021 рік

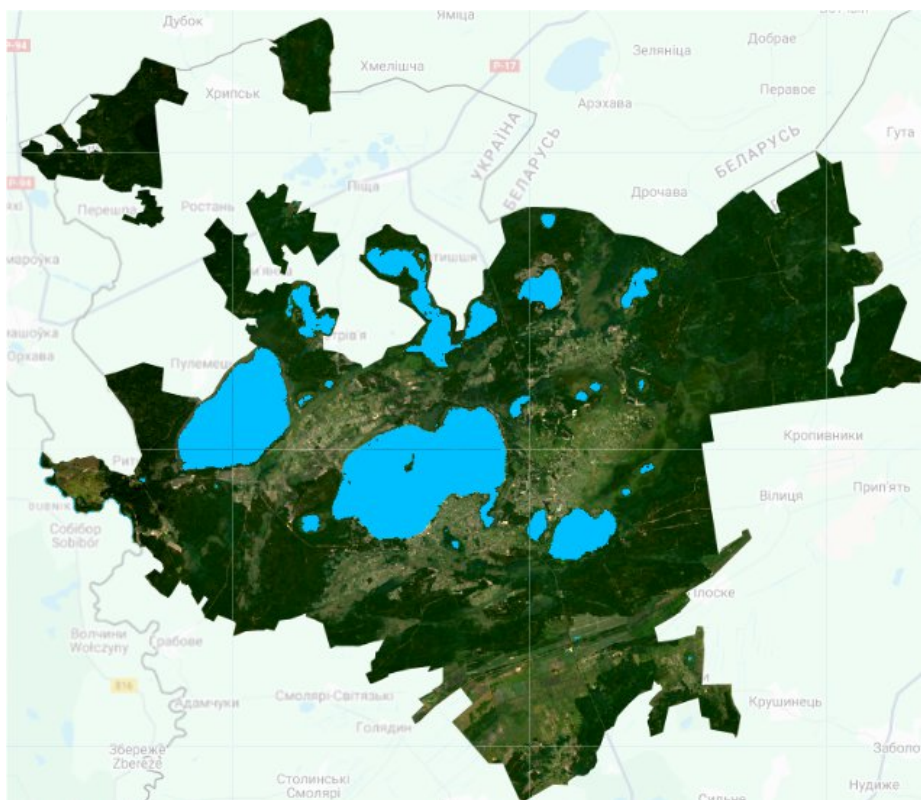


Рисунок 4.1.4.8. Маска води на 2025 рік

4.1.5 Розрахунок загальної площ озер за маскою води

Після отримання бінарної маски води (`waterMaskyear`), наступним кроком є розрахунок площі водних поверхонь у межах ROI. Це здійснюється шляхом використання сервісної функції GEE - `pixelArea()`, яка формує растровий шар, у якому значення кожного пікселя відповідають його площі у метрах квадратних. Відповідно до точність визначення залежить від роздільної здатності зображень. Для всіх обраних колекцій Landsat роздільна здатність 30 м.

```
var pixelArea1988 =
ee.Image.pixelArea().clip(roi).updateMask(waterMask1988);
```

де `.clip(roi)` – розрахунок буде проводитись лише в межах зони інтересу, тобто Шацького НПП;

`.updateMask(waterMask1988)` – оператор залишає лише ті пікселі які буди ідентифіковані як вода, інші вилучаються з подальшого аналізу.

Обчислення загальної площі води :

```
var areaSum1988 = pixelArea1988.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.sum(),
```

```
geometry: roi,  
scale: 30,  
maxPixels: 1e9  
});
```

де `reducer: ee.Reducer.sum()` – підсумовує площі всіх пікселів, що належать до водної поверхні;

`geometry: roi` – застосовує підсумування в межах зони дослідження;

`scale: 30` – задає просторову роздільну здатність, тут 30 м;

`maxPixels: 1e9` – дозволяє обробити великий масив даних без обмежень.

У результаті формується числове значення площі води за обраний рік у метрах квадратних. Значення буде виведено у вкладку Console після запуску скрипту.

```
print('Water area (m2) by SWMI mask 1988:', areaSum1988);
```

Значення площ було обраховано для всіх обраних років аналогічним скриптом. На рисунку 4.1.5.1 відображено вкладку Console зі значенням площ.



The screenshot shows a console window with the following output:

Year	Area (m2)
1988	61988619.63913214
1994	60424268.390018016
1996	60738813.840045996
2002	59942206.35310058
2007	58802058.48604281
2011	59054216.428809546
2016	57747367.09768495
2021	57228674.18320887
2025	56815482.02807258

Рисунок 4.1.5.1. Вкладка Console з відображенням загальної площі озер

4.1.6 Перетворення маски води 1988 року у вектор та його експорт

Для обчислення площі для кожного озера окремо виникає потреба створення опорного полігонального шару, який би містив всі контури озер які розташовані в межах Шацького НПП.

Для перетворення у вектор було обрано маску води саме 1988 року. Озера у 1988 році мають найбільший показник загальної площі, що був обчислений на попередньому етапі. Оскільки у наступні роки площа озер зменшується внаслідок процесів обміління, використання пізніших масок призвело б до втрати частини даних за їх межами. Таким чином, застосування маски 1988 року як опорної гарантує, що векторні межі залишаються однаковими для всіх періодів спостереження, а змінною величиною є лише площа води всередині цих полігонів.

Для перетворення растрової маски у векторний формат було застосовано функцію `.reduceToVectors()`. Ця функція аналізує пікселі маски, виділяє області води, та об'єднує їх у контурні полігони та створює векторний шар.

```
var waterVectors1988 = waterMask1988.reduceToVectors({
  geometry: roi,
  scale: 30,
  geometryType: 'polygon',
  eightConnected: false,
  labelProperty: 'water',
  maxPixels: 1e9
});
```

де `geometryType: 'polygon'` – визначає тип геометрії;

`eightConnected: false` – використовує сусідність, що запобігає штучному об'єднанню водних плям через діагональний контакт;

`labelProperty: 'water'` – призначає назву поля де будуть вказані бінарні значення маски води.

Результатом є `FeatureCollection`, де кожний полігон відповідає окремій ділянці водної поверхні, виділеній алгоритмом.

Для подальшого редагування, очищення та підготовки еталонного шару озер було здійснено експорт утворених полігонів у формат SHP. Ручне коригування вектору буде відбуватись у QGIS.

```
Export.table.toDrive({  
  collection: waterVectors1988,  
  description: 'waterVectors1988_export',  
  fileFormat: 'SHP',  
  folder: 'GEE_Exports'  
});
```

де `.table.toDrive` – визначає що таблиця даних буде експортована на Google Drive;

`collection: waterVectors1988` – вибір колекції для експорту;
`description: 'waterVectors1988_export'` – призначає підпис файлу у вкладці Tasks;

`fileFormat: 'SHP'` – призначає формат вектору;
`folder: 'GEE_Exports'` – вибір директорії на Google Drive куди буде експортовано вектор.

Після запуску скрипту необхідно перейти у вкладку Tasks та натиснути кнопку Run для початку експорту.

4.1.7 Підготовка еталонного шару озер у QGIS

Отриманий shapefile було завантажено у QGIS (рис. 4.1.7.1).

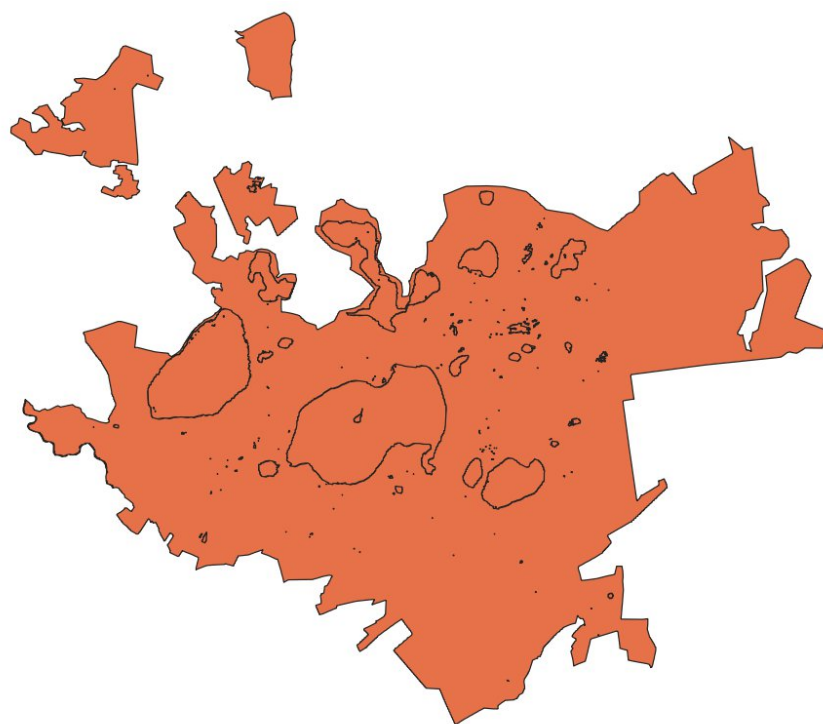


Рисунок 4.1.7.1. Векторні полігони водної поверхні 1988 року

Опираючись на список озер [18], що входять до Шацького НПП, було виконано фільтрацію полігонів за розташуванням та даними з OpenStreetMap для співставлення. Непотрібні полігони - дрібні заболочені ділянки або фрагменти, що не є озерами - були видалені.

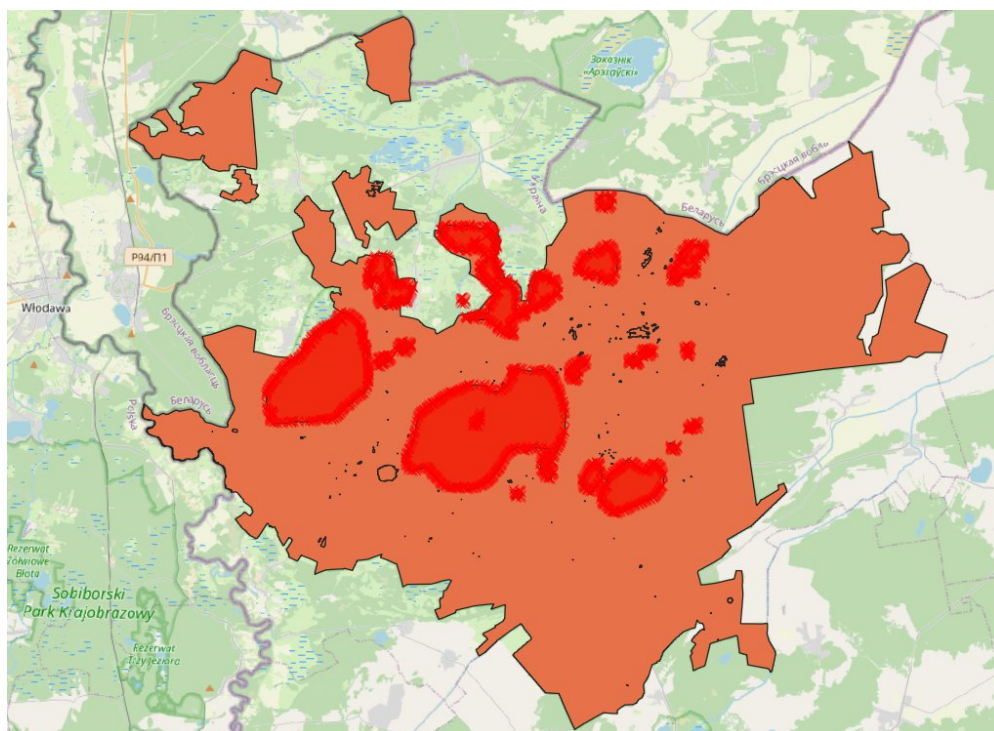


Рисунок 4.1.7.2. Вибірка полігонів, що відповідають озерам у Шацькому НПП

Додаємо атрибутивне поле name, тип даних Text (100). Заповнюємо назви озер відповідно до полігонів та даних OpenStreetMap та даних з джерела [18]. Зберігаємо оновлений векторний шар з назвою lakes1988.

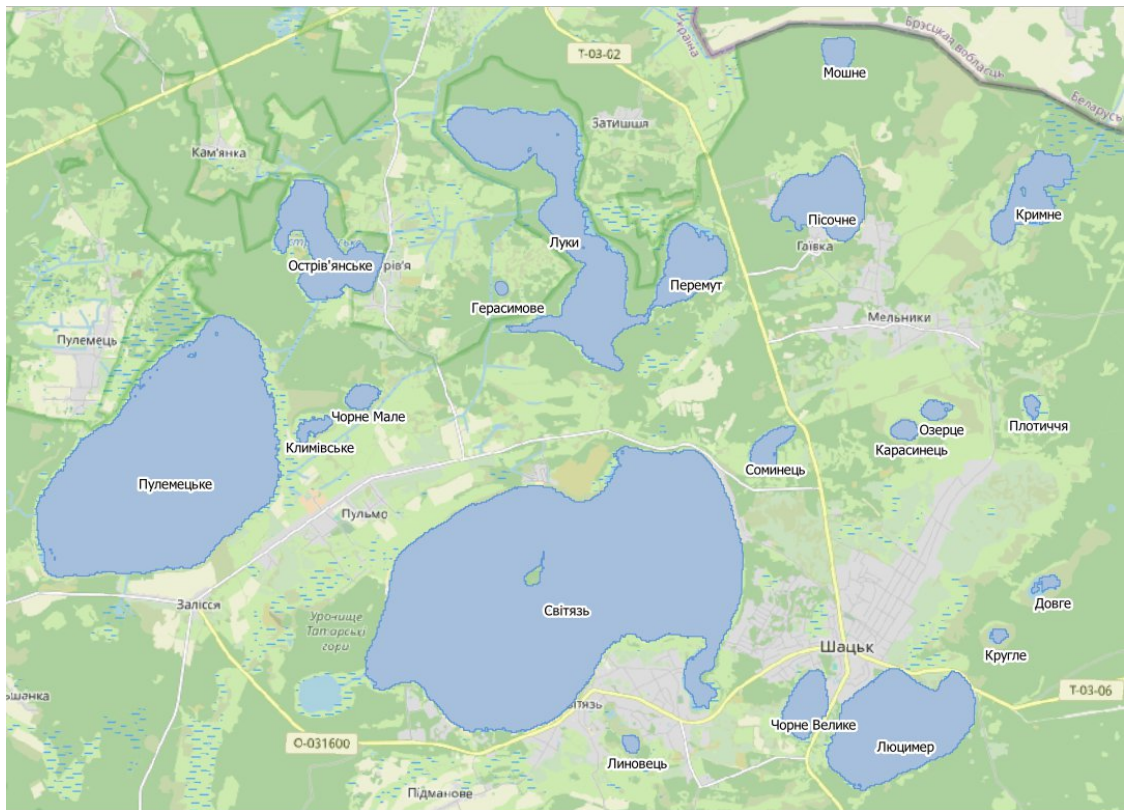


Рисунок 4.1.7.3. Опорний векторний шар Шацького поозер'я

Отриманий опорний векторний шар озер було завантажено до GEE як ресурс імпорту lakes1988, який надалі використовується для обчислення річних площ водної поверхні по кожному озеру окремо.



Рисунок 4.1.7.4. Завантажений опорний шар у проєкт в GEE

4.1.8 Розрахунок площ озер за маскою води

Для визначення фактичної площі водної поверхні в межах кожного озера у вибраному році необхідно виконати просторове перетинання полігонів озер із растровими масками води відповідно до року (`waterMaskyear`). Для цього використовується метод `reduceRegion()`, який дає змогу агрегувати значення за межами конкретного векторного об'єкта.

Полігони з `lakes1988` використовуються як незмінний векторний шаблон для обчислення водної площі у кожному з наступних років, що усуває вплив зміни берегової лінії на точність статистичного аналізу.

Розрахунок площі водної поверхні для кожного озера відбувається шляхом підсумовування значень пікселів маски води.

Нижче наведений фрагмент коду відповідає процедурі розрахунку площі води в межах кожного озера за 1988 рік.

```
var waterAreaImg = ee.Image.pixelArea()  
    .updateMask(waterMask1988);  
  
var lakesWater1988 = lakes1988.map(function(feature) {  
    var areaWater = waterAreaImg.reduceRegion({  
        reducer: ee.Reducer.sum(),  
        geometry: feature.geometry(),  
        scale: 30,  
        maxPixels: 1e9  
    }).get('area');  
    return feature.set({  
        'water_area_m2_1988': areaWater,  
        'water_area_ha_1988': ee.Number(areaWater).divide(10000)  
    });  
});
```

де `ee.Reducer.sum()` – обраховує суму площі всіх пікселів води;

`.get('area')` – передає результат обчислень площі в один канал з назвою `area` в метрах квадратних;

`feature.set({...})` – додає нові атрибути до об'єкта `feature`, такі як площа в метрах квадратних - `water_area_m2_1988`, та площа в гектарах - `water_area_ha_1988`.

Такий розрахунок площі буде поетапно застосовано для всіх інших років, що було взято у дослідження. Після запуску скрипту у вкладці Console буде відображено результат формування FeatureCollection зі значеннями площі для кожного з озер по обраному року (рис. 4.1.8.1 – 4.1.8.2).

```

Water area inside each lake (1988):
▼ FeatureCollection projects/ee-Volkov/assets/waterVectors1988_export (19 elements, 6 columns)
  type: FeatureCollection
  id: projects/ee-Volkov/assets/assets/waterVectors1988_export
  version: 1764111030158630
  ▶ columns: Object (6 properties)
  ▼ features: List (20 elements)
    ▶ 0: Feature 00000000000000000012 (Polygon, 4 properties)
    ▶ 1: Feature 0000000000000000000d (Polygon, 5 properties)
    ▶ 2: Feature 00000000000000000006 (Polygon, 5 properties)
    ▶ 3: Feature 0000000000000000000e (Polygon, 5 properties)
    ▶ 4: Feature 00000000000000000010 (Polygon, 5 properties)
    ▶ 5: Feature 0000000000000000000b (Polygon, 5 properties)
    ▶ 6: Feature 0000000000000000000c (Polygon, 5 properties)
    ▶ 7: Feature 00000000000000000002 (Polygon, 5 properties)
    ▶ 8: Feature 00000000000000000003 (Polygon, 5 properties)
    ▶ 9: Feature 00000000000000000013 (Polygon, 5 properties)
    ▶ 10: Feature 00000000000000000007 (Polygon, 5 properties)
    ▶ 11: Feature 00000000000000000008 (Polygon, 5 properties)
    ▶ 12: Feature 0000000000000000000f (Polygon, 5 properties)
    ▶ 13: Feature 00000000000000000009 (Polygon, 5 properties)
    ▶ 14: Feature 00000000000000000001 (Polygon, 5 properties)
    ▶ 15: Feature 0000000000000000000a (Polygon, 5 properties)
    ▶ 16: Feature 00000000000000000004 (Polygon, 5 properties)
    ▶ 17: Feature 00000000000000000011 (Polygon, 5 properties)
    ▶ 18: Feature 00000000000000000000 (Polygon, 5 properties)
    ▶ 19: Feature 00000000000000000005 (Polygon, 5 properties)
  ▶ properties: Object (1 property)

```

Рисунок 4.1.8.1. Вкладка Console з відображенням колекції зі значеннями площі для кожного з озер за 1988 рік

```

▶ 4: Feature 00000000000000000010 (Polygon, 5 properties)
▼ 5: Feature 0000000000000000000b (Polygon, 5 properties)
  type: Feature
  id: 0000000000000000000b
  ▶ geometry: Polygon, 45 vertices
  ▼ properties: Object (5 properties)
    area: 155330
    name: Карасинець
    water: 1
    water_area_ha_1988: 15.530839621294808
    water_area_m2_1988: 155308.39621294808
▶ 6: Feature 0000000000000000000c (Polygon, 5 properties)

```

Рисунок 4.1.8.2. Значення площі озера Карасинець на 1988 рік

4.1.9 Візуалізація результатів за рік

Для візуального сприйняття обрахованих результатів площ озер було сформовано гістограми. Такі діаграми формуються для кожного року окремо, проте за аналогічним алгоритмом що описаний нижче.

```

var chart1988 = ui.Chart.feature.byFeature({
  features: lakesWater1988,
  xProperty: 'name',
  yProperties: ['water_area_ha_1988']
})

```

де `ui.Chart.feature.byFeature()` – метод , який будує діаграму на основі `FeatureCollection`, де кожен `Feature` містить значення, яке потрібно відобразити;

`features: lakesWater1988` – колекція озер із даними для діаграми;

`xProperty: 'name'` – значення по осі абцис;

`yProperties: ['water_area_ha_1988']` – значення по осі ординат.

Задання типу діаграми та підписів:

```
.setChartType('ColumnChart')
.setSeriesNames(['Площа води, га'])
.setOptions({
  title: 'Площа води в озерах (1988)',
  hAxis: {title: 'Озеро'},
  vAxis: {title: 'Площа води, га'},
  legend: {position: 'none'},
  colors: ['#00A2FF']
});
```

де `.setChartType('ColumnChart')` – задається тип стовпчикової діаграми (гістограми);

`.setSeriesNames(['Площа води, га'])` – назва серії;

`.setOptions` – задання візуальних параметрів ;

`title: 'Площа води в озерах (1988)'` - заголовок діаграми;

`hAxis: {title: 'Озеро'}`- назва вісі абцис;

`vAxis: {title: 'Площа води, га'}` - назва вісі ординат;

`legend: {position: 'none'}` - легенда прихована;

`colors: ['#00A2FF']` – задання кольору стовпчиків.

Для відображення діаграми у вкладці `Console` використовуємо функцію `print()`.

```
print(chart1988);
```

Виведення діаграми відбувається після запуску скрипту.

Діаграми для обраних років у рамках роботи відображено на рисунках 4.1.9.1-4.1.9.2.

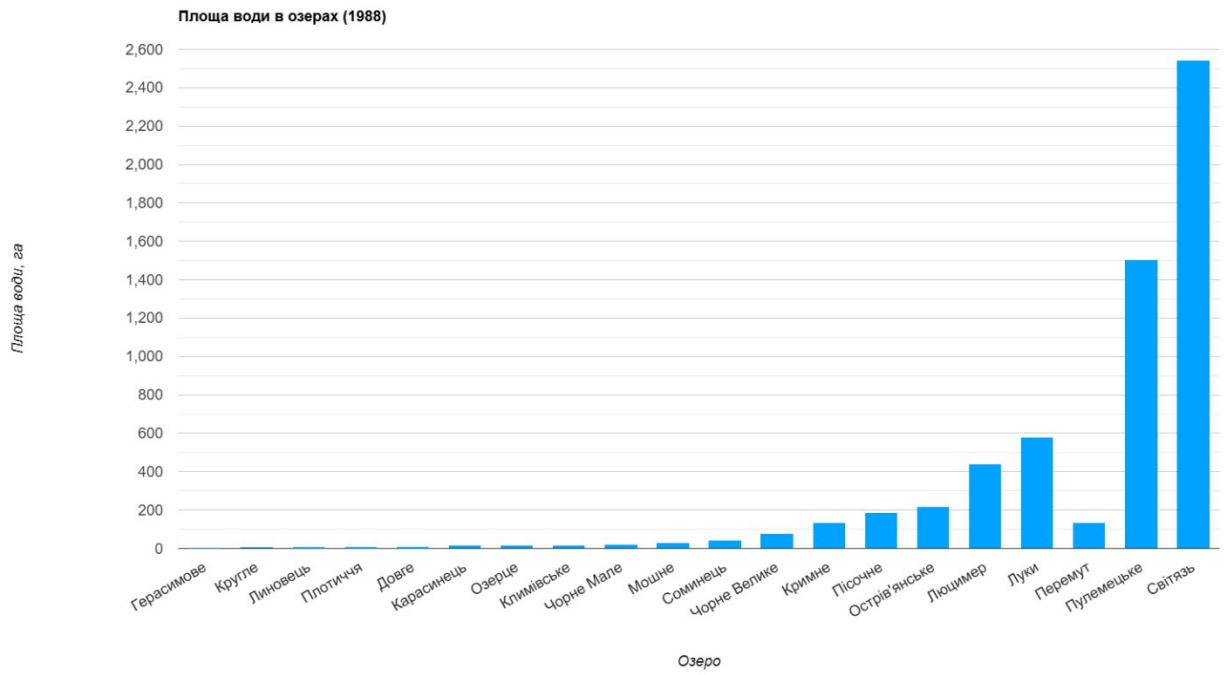


Рисунок 4.1.9.1. Гістограма площ озер Шацького НПП за 1988 рік

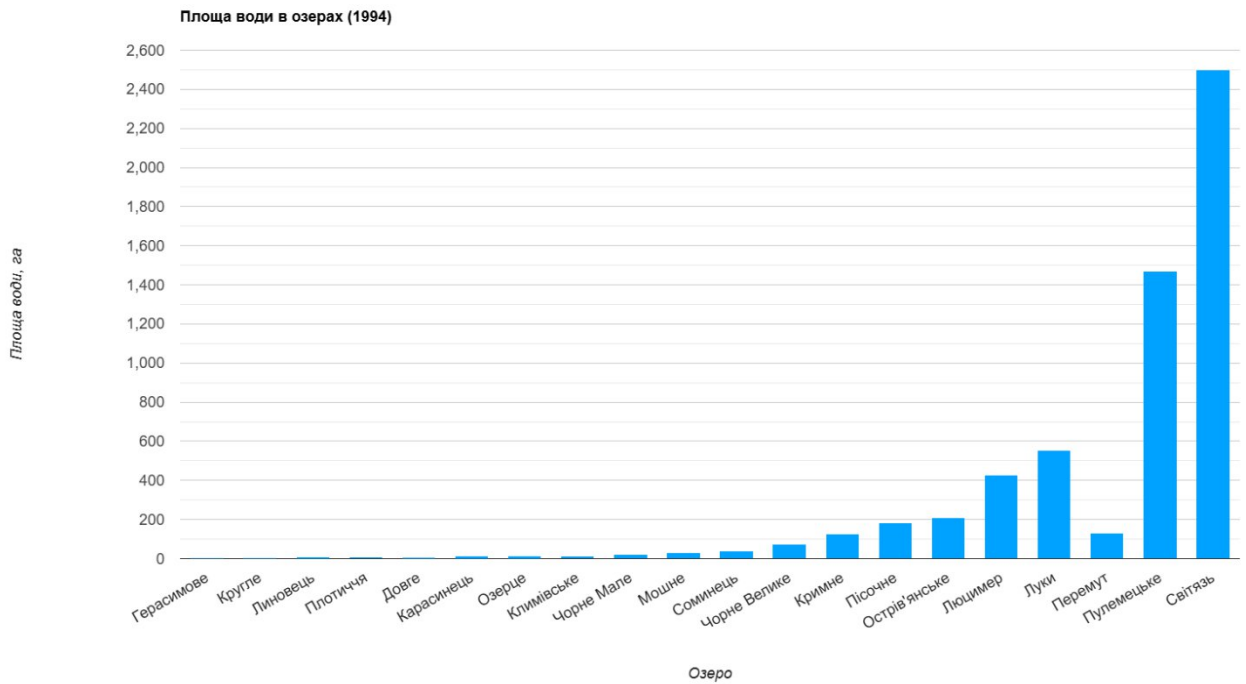


Рисунок 4.1.9.2. Гістограма площ озер Шацького НПП за 1994 рік

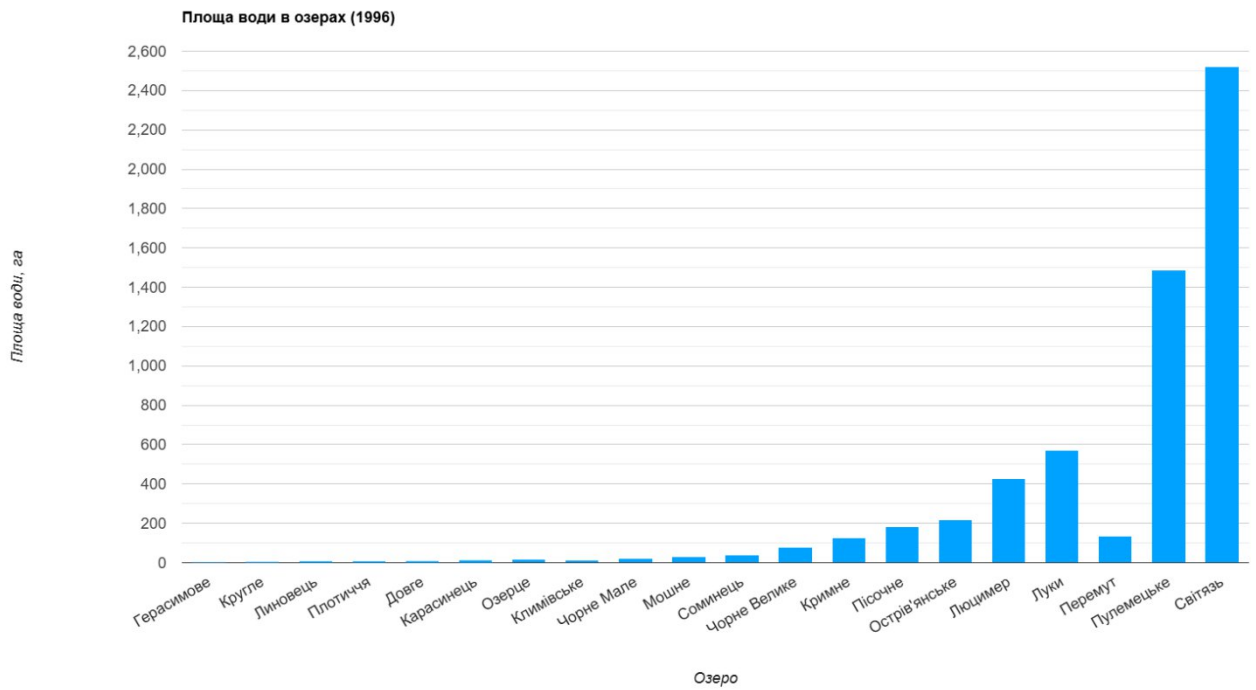


Рисунок 4.1.9.3. Гістограма площ озер Шацького НПП за 1996 рік

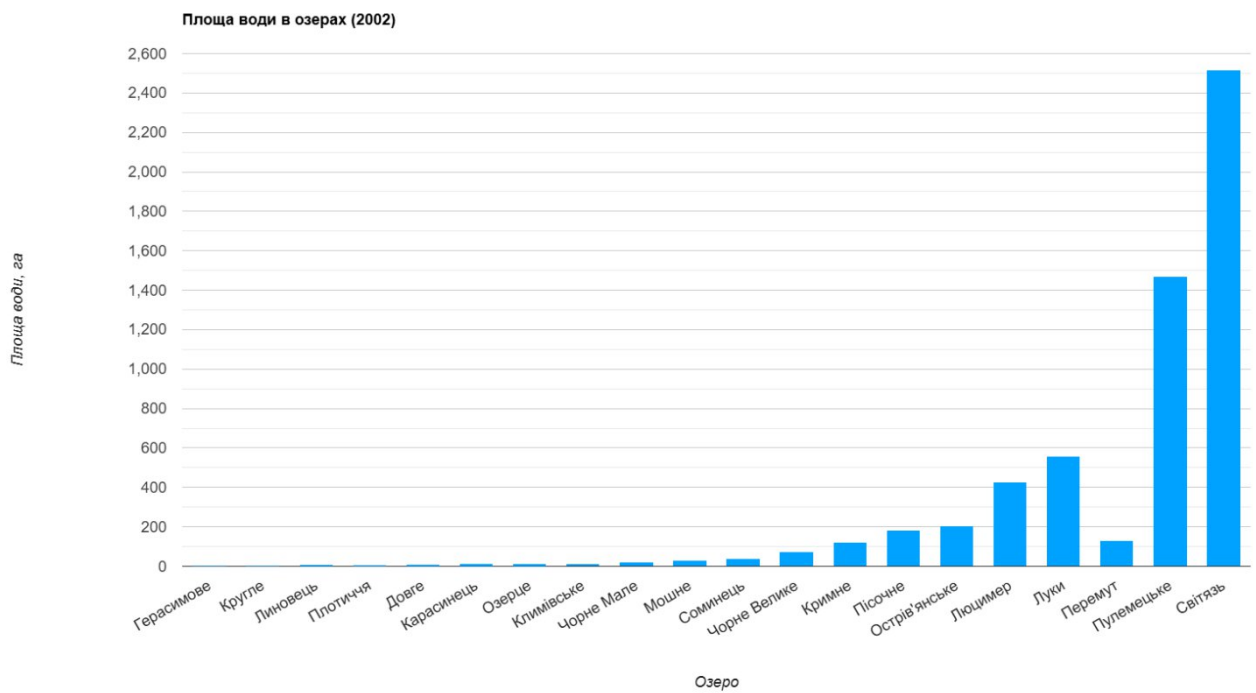


Рисунок 4.1.9.4. Гістограма площ озер Шацького НПП за 2002 рік

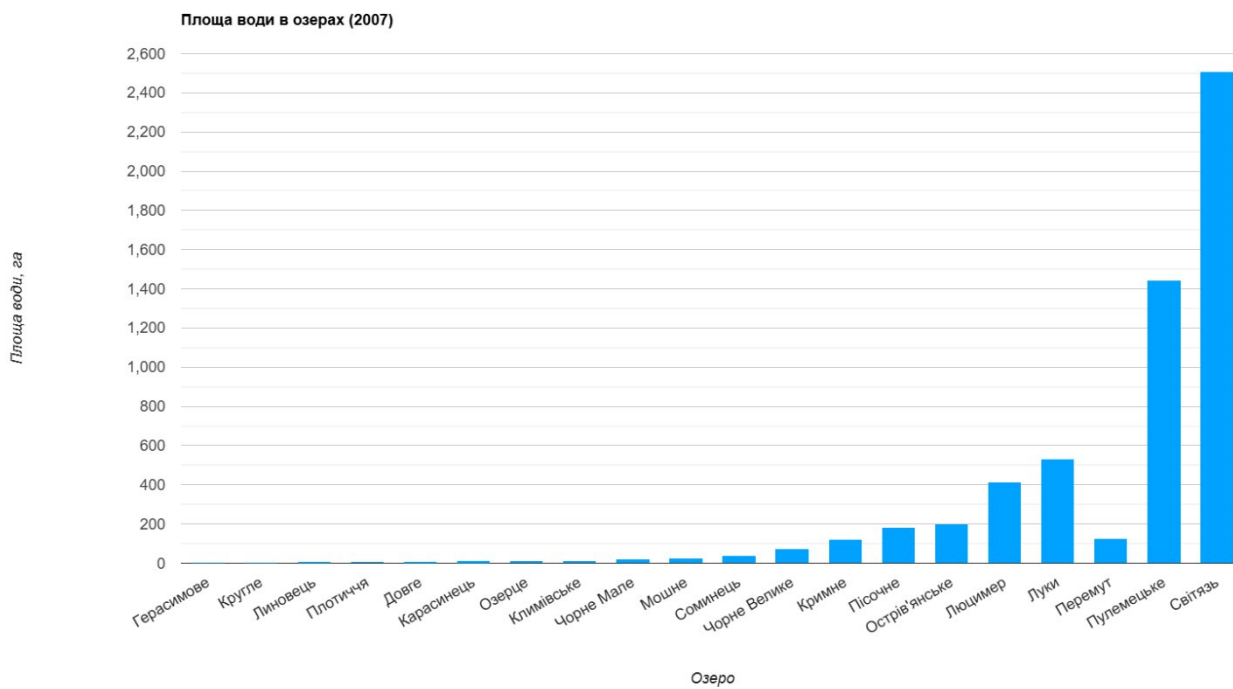


Рисунок 4.1.9.5. Гістограма площ озер Шацького НПП за 2007 рік

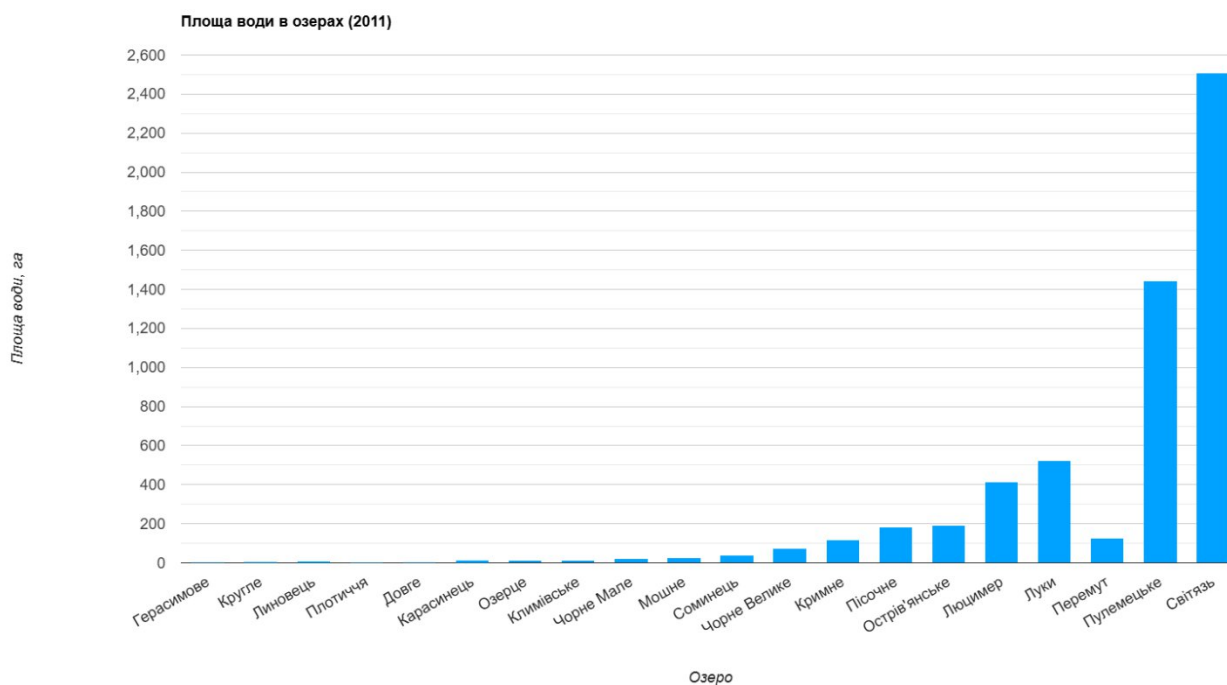


Рисунок 4.1.9.6. Гістограма площ озер Шацького НПП за 2011 рік

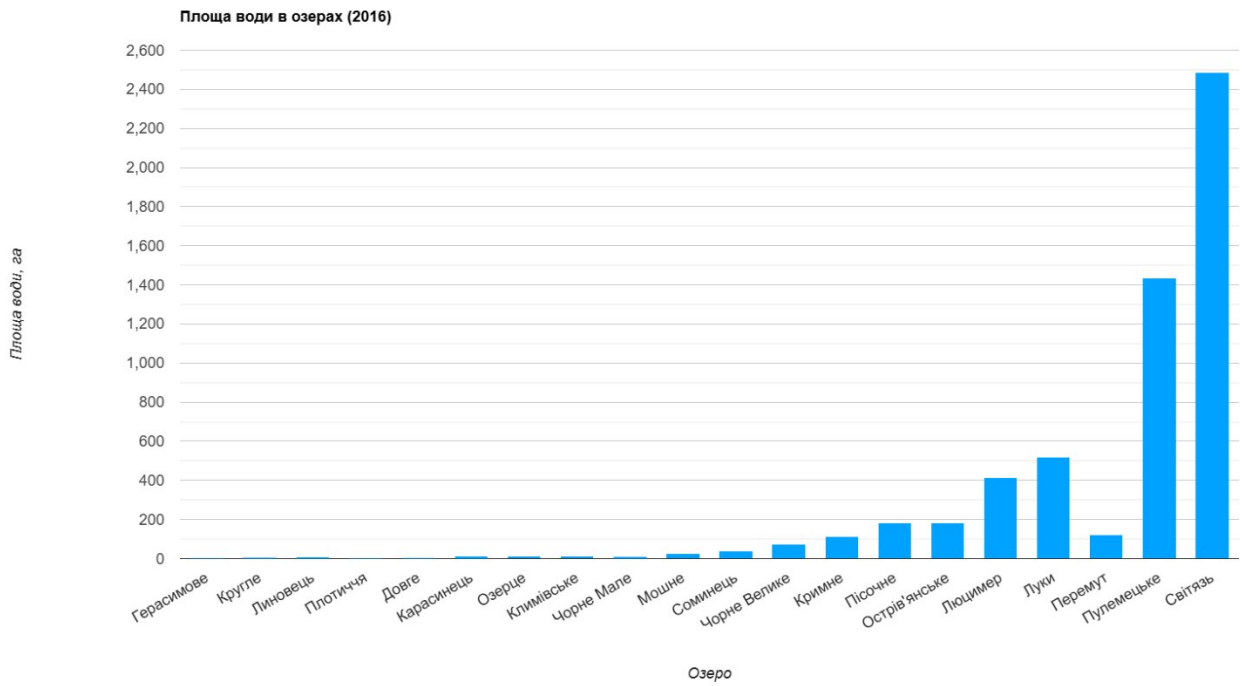


Рисунок 4.1.9.7. Гістограма площ озер Шацького НПП за 2016 рік

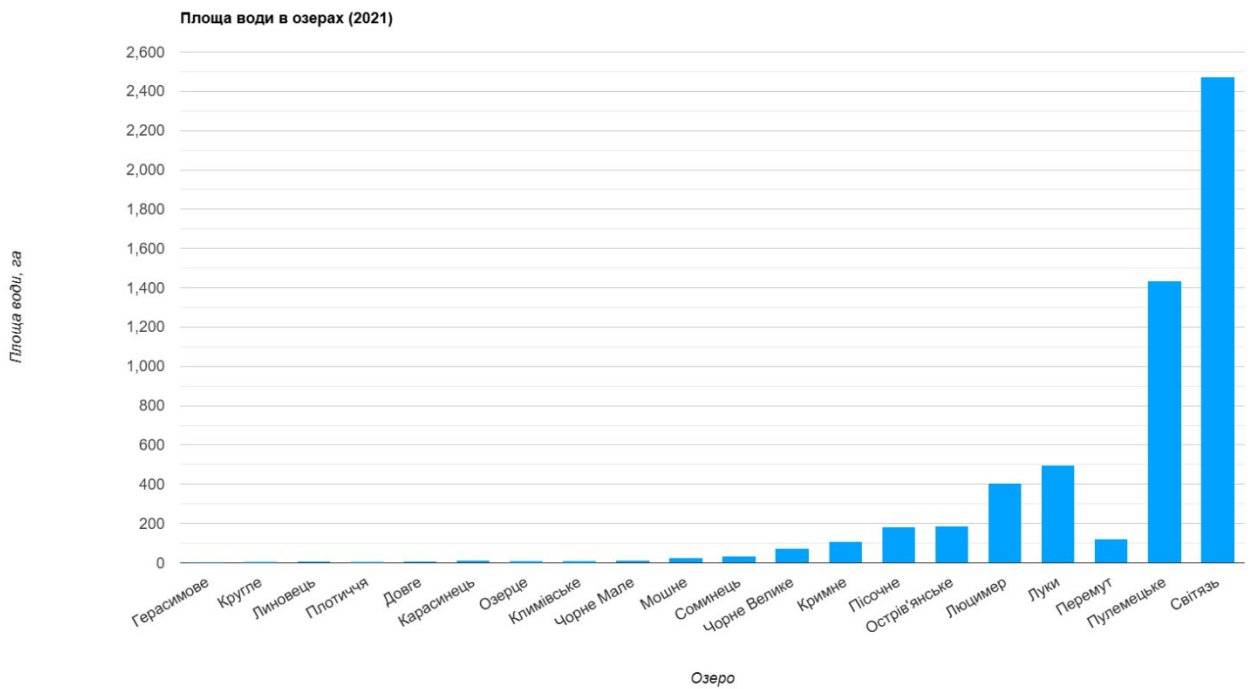


Рисунок 4.1.9.8. Гістограма площ озер Шацького НПП за 2021 рік

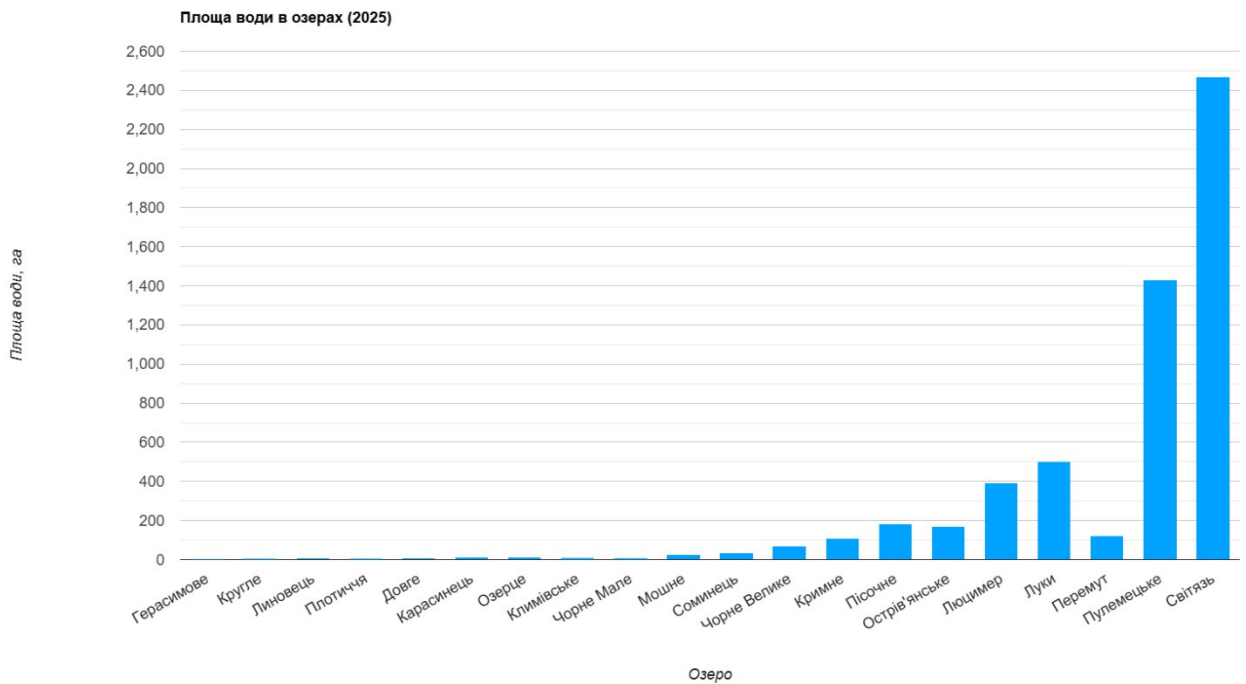


Рисунок 4.1.9.9. Гістограма площ озер Шацького НПП за 2025 рік

На території озера Герасимове з 1988 року і до 2025 року площ води було не зафіксовано. Можна встановити, що озеро висохло і за 37 років жодного разу не показало позитивної динаміки. На рисунку 4.1.9.10 відображено поточний стан озера з даних Google Satellite та Apple Satellite, що також візуалізує відсутність води та велику кількість рослинності. Для більш достовірного висновку необхідно дослідити водоем польовими методами.



Рисунок 4.1.9.10. Озеро Герасимове на Google Satellite (справа) та Apple Satellite (зліва)

Для всіх інших озер необхідно провести геоінформаційний аналіз для багаторічного моніторингу та отримання кількісних показників обміління.

4.2 Результати геоінформаційного аналізу

4.2.1 Динаміка загальної площі озер

Площу водної поверхні Шацьких озер було визначено у підрозділі 4.1.5 шляхом формування сезонного композиту, обчислення індексу SWMI, побудови маски води та подальшого сумування площі водних пікселів. Отримані значення площі за всі роки моніторингу було зведено у часову серію, що дозволяє оцінити загальну динаміку обміління.

На рисунку 4.1.5.2 подано лінійну діаграму динаміки загальної площі озер відповідно до року.



Рисунок 4.2.1.1. Динаміка площі водної поверхні Шацьких озер у 1988-2025 рр.

Отримані результати демонструють стійку тенденцію до зменшення загальної площі водної поверхні на території Шацького НПП протягом 1988–2025 рр. Початкове значення у 1988 році становило 61,99 км², тоді як у 2025 році площа скоротилася до 56,82 км². Загальна втрата за 37 років складає приблизно 5,17 км² (близько 8,3 % від початкової площі).

4.2.2 Розрахунок площ водної поверхні за багаторічний період

Для подальшого аналізу просторово-часової динаміки площ окремих озер необхідно об'єднати значення площі водної поверхні, визначені для кожного року,

у єдину багаторічну структуру даних. У підрозділі 4.1.8 було отримано окремі `FeatureCollection` для кожного року (`lakesWater1988`, `lakesWater1994`, ..., `lakesWater2025`), які містять площі води для кожного озера. Узагальним ці результати у таблицю, де для кожного озера будуть зібрані всі значення площ за роками.

```
var allYears = lakesWater1988.map(function(feature) {
  var name = feature.get('name');
  var y1994 = lakesWater1994.filter(ee.Filter.eq('name',
name)).first();
  var y1996 = lakesWater1996.filter(ee.Filter.eq('name',
name)).first();
  var y2002 = lakesWater2002.filter(ee.Filter.eq('name',
name)).first();
  var y2007 = lakesWater2007.filter(ee.Filter.eq('name',
name)).first();
  var y2011 = lakesWater2011.filter(ee.Filter.eq('name',
name)).first();
  var y2016 = lakesWater2016.filter(ee.Filter.eq('name',
name)).first();
  var y2021 = lakesWater2021.filter(ee.Filter.eq('name',
name)).first();
  var y2025 = lakesWater2025.filter(ee.Filter.eq('name',
name)).first();
  return feature.set({
    'water_ha_1988': feature.get('water_area_ha_1988'),
    'water_ha_1994': y1994.get('water_area_ha_1994'),
    'water_ha_1996': y1996.get('water_area_ha_1996'),
    'water_ha_2002': y2002.get('water_area_ha_2002'),
    'water_ha_2007': y2007.get('water_area_ha_2007'),
    'water_ha_2011': y2011.get('water_area_ha_2011'),
    'water_ha_2016': y2016.get('water_area_ha_2016'),
    'water_ha_2021': y2021.get('water_area_ha_2021'),
    'water_ha_2025': y2025.get('water_area_ha_2025')
  });
});
```

```
});
```

де `lakesWater1988.map(function(feature) { ... })` – вибір стартової колекції для внесення даних з інших років. Створення внутрішньої функції для етапу внесення даних;

```
var name = feature.get('name'); - назва озера є унікальним ідентифікатором для зшивання даних площі інших років;
```

```
var y1994 = lakesWater1994.filter(ee.Filter.eq('name', name)).first();
```

- з таблиці 1994 року відбирається значення тільки першого того озера, назва якого відповідає назві озера з 1988 року. Далі відповідно така само операція для інших років;

```
return feature.set({  
  'water_ha_1988': feature.get('water_area_ha_1988'),  
  'water_ha_1994': y1994.get('water_area_ha_1994'),  
  ...  
});
```

- до колекції додається новий перелік атрибутів, що містять площі в гектарах для кожного року.

Результати будуть сформовані у таблицю з багаторічною статистикою значень площі кожного озера, яка буде основною для подальшого геоінформаційного аналізу.

Оператор `print` забезпечує виведення таблиці у вкладку `Console`:

```
print('Таблиця площі води всіх озер (га) за роками до 2025:',  
allYears);
```

```

Таблиця площі води всіх озер (га) за роками до 2025:
*FeatureCollection projects/ee-Volkov/assets/lakes1988 (20 elements, 15 columns)
  type: FeatureCollection
  id: projects/ee-Volkov/assets/lakes1988
  version: 1764111030158630
  columns: Object (15 properties)
  features: List (20 elements)
    *0: Feature 00000000000000000012 (Polygon, 13 properties)
    *1: Feature 0000000000000000000d (Polygon, 14 properties)
      type: Feature
      id: 0000000000000000000d
      geometry: Polygon, 27 vertices
      properties: Object (14 properties)
        area: 65659
        name: Кпырне
        water: 1
        water_area_ha_1988: 6.564137098771637
        water_area_m2_1988: 65641.37098771636
        water_ha_1988: 6.564137098771637
        water_ha_1994: 3.030186886919807
        water_ha_1996: 4.769446913918887
        water_ha_2002: 0
        water_ha_2007: 2.917945039589078
        water_ha_2011: 5.330854244767731
        water_ha_2016: 5.836145611404718
        water_ha_2021: 5.780245421118642
        water_ha_2025: 5.780245421118642
    *2: Feature 00000000000000000006 (Polygon, 14 properties)
      type: Feature
      id: 00000000000000000006
      geometry: Polygon, 21 vertices
      properties: Object (14 properties)
        area: 88144
        name: Линовець
        water: 1
        water_area_ha_1988: 8.81084484442019
        water_area_m2_1988: 88108.4484442019
        water_ha_1988: 8.81084484442019
        water_ha_1994: 8.475091097364238
        water_ha_1996: 8.811285181047028
        water_ha_2002: 8.531233034620097
        water_ha_2007: 8.250526644239239
        water_ha_2011: 8.5310201006003
        water_ha_2016: 8.250527633008769
        water_ha_2021: 7.577702133023131
        water_ha_2025: 7.68998567184149
    *3: Feature 0000000000000000000e (Polygon, 14 properties)
    *4: Feature 00000000000000000010 (Polygon, 14 properties)
    *5: Feature 0000000000000000000b (Polygon, 14 properties)
    *6: Feature 0000000000000000000c (Polygon, 14 properties)
    *7: Feature 00000000000000000002 (Polygon, 14 properties)

```

JSON
JSON

Рисунок 4.2.2.1 – Фрагмент результуючої таблиці багаторічних площ озер
Експортуємо таблицю у форматі CVS (значення розділені комами).

```

Export.table.toDrive({
  collection: allYears,
  description: 'WaterArea_Lakes_1988_2025',
  fileFormat: 'CSV'
});

```

Таблицю буде завантажено на Google Drive. Результуюча таблиця 4.2.2.1
відображена нижче.

Таблиця 4.2.2.1. Площі водної поверхні озер за багаторічний період

Рік / Назва	1988	1994	1996	2002	2007	2011	2016	2021	2025
Світязь	2541,79	2501,73	2523,20	2518,28	2510,54	2509,57	2487,71	2472,78	2469,87
Пулемецьке	1505,39	1470,54	1487,69	1470,09	1442,73	1443,40	1435,33	1434,04	1432,92
Луки	578,02	554,01	571,14	558,21	534,39	522,19	517,88	499,42	500,76
Перемут	136,53	130,11	134,36	129,05	124,46	125,73	121,48	121,28	121,78
Люцимер	438,81	428,27	428,55	425,52	413,51	416,20	412,33	405,98	394,37
Острів'янське	219,54	209,91	217,58	206,88	198,82	192,20	181,45	188,17	171,53
Пісочне	187,96	181,81	185,39	185,00	183,15	185,39	182,65	182,64	181,36

Рік / Назва	1988	1994	1996	2002	2007	2011	2016	2021	2025
Кримне	134,11	125,66	128,57	123,59	120,96	118,55	114,01	110,93	109,25
Чорне Велике	77,96	75,16	76,62	76,28	74,37	74,15	72,52	73,20	69,72
Соминець	42,22	40,71	41,44	40,66	39,98	39,59	37,96	37,07	36,56
Мошне	32,64	29,17	29,68	29,34	26,99	26,43	25,14	24,53	24,19
Чорне Мале	22,87	21,08	22,32	21,42	21,31	19,91	10,88	12,78	8,52
Климівське	18,22	10,99	12,00	13,52	13,01	12,84	10,99	10,71	10,37
Озерце	15,92	14,86	15,36	14,13	13,18	12,34	10,99	10,43	11,21
Карасинець	15,53	14,64	14,92	14,75	14,41	14,86	13,96	13,18	13,57
Довге	9,87	5,83	9,65	9,53	8,52	2,69	3,87	7,29	8,08
Плотиччя	9,08	8,07	8,63	5,89	7,91	1,96	2,19	5,94	6,28
Линовець	8,81	8,48	8,81	8,53	8,25	8,53	8,25	7,58	7,69
Кругле	6,56	3,03	4,77	0,00	2,92	5,33	5,84	5,78	5,78
Герасимове	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Водної поверхні озера Герасимове не виявлено. Показники площ інших озер показують тенденцію обміління.

4.2.3 Оцінка середньорічної динаміки

Для поглибленого аналізу багаторічних змін водного дзеркала було здійснено обчислення річних відсоткових змін площі озер між сусідніми етапами спостережень. Розрахунок виконувався відповідно до формули 3.4.

```
var addAnnualChange = function(feature) {
  var years = [1988, 1994, 1996, 2002, 2007, 2011, 2016, 2021,
2025];
  var updated = feature;
  for (var i = 1; i < years.length; i++) {
    var prevYear = years[i-1];
    var currYear = years[i];
    var prevArea = ee.Number(feature.get('water_ha_' + prevYear));
    var currArea = ee.Number(feature.get('water_ha_' + currYear));
    var delta = currArea.subtract(prevArea)
      .divide(prevArea)
      .multiply(100);
```

```

    updated = updated.set('delta_' + prevYear + '_' + currYear,
delta);
}
return updated;
};

```

де `addAnnualChange` – таблиця з даними про відсоткову зміну площі за попередній рік;

```

var years = [1988, 1994, 1996, 2002, 2007, 2011, 2016, 2021,
2025];

```

- масив даних з усіх років, що забезпечує можливого циклічного проходження по послідовності спостережень;

```

var updated = feature;

```

- у поточний об'єкт дає можливість доповнювати атрибутами, які буде створено у процесі циклу;

```

for

```

– початок циклу, де у `prevYear` – береться номер попереднього року, `currYear` – номер поточного року, `prevArea` – отримується площа у попередньому році; `currArea` – площа у поточному році; `delta` – обчислюється значення зміни площі з попереднім роком у відсотках за формулою 3.4., `updated` – створюються атрибути за назвами 'delta_preYear_currYear' куди буде записано значення delta;

```

return updated;

```

- до таблиці додається новий перелік атрибутів, що містять значення delta.

Спрацювання циклу для всіх років відбувається у змінну `lakeWithDelta`. Значення зміни у відсотковому відношенні площі з попереднім роком буде записано у таблицю.

```

var lakesWithDelta = allYears.map(addAnnualChange);

```

Оператор `print` забезпечує виведення таблиці оцінки середньорічної динаміки у вкладку `Console`:

```

print('Таблиця з річними змінами (%)', lakesWithDelta);

```

```

Таблиця з річними змінами (%)
▼ FeatureCollection projects/ee-Volkov/assets/lakes1988 (20 elements, 23 columns)
  type: FeatureCollection
  id: projects/ee-Volkov/assets/lakes1988
  version: 1764111030158630
  ▶ columns: Object (23 properties)
  ▼ features: List (20 elements)
    ▶ 0: Feature 00000000000000000012 (Polygon, 21 properties)
    ▶ 1: Feature 0000000000000000000d (Polygon, 22 properties)
    ▶ 2: Feature 00000000000000000006 (Polygon, 22 properties)
    ▼ 3: Feature 0000000000000000000e (Polygon, 22 properties)
      type: Feature
      id: 0000000000000000000e
      ▶ geometry: Polygon, 43 vertices
      ▼ properties: Object (22 properties)
        area: 90834
        delta_1988_1994: -11.098552234935703
        delta_1994_1996: 6.951838505481006
        delta_1996_2002: -31.81933143759067
        delta_2002_2007: 34.304742291926665
        delta_2007_2011: -75.17265117852885
        delta_2011_2016: 11.390630417283226
        delta_2016_2021: 171.82184747794344
        delta_2021_2025: 5.66075871598796
        name: Плотиччя
        water: 1
        water_area_ha_1988: 9.079911183962356
        water_area_m2_1988: 90799.11183962355
        water_ha_1988: 9.079911183962356
        water_ha_1994: 8.072172498324525
        water_ha_1996: 8.633336894291897
        water_ha_2002: 5.886266813773362
        water_ha_2007: 7.905535474853516
        water_ha_2011: 1.9627348685470283
        water_ha_2016: 2.18630274349437
        water_ha_2021: 5.9428485088273595
        water_ha_2025: 6.279258823768765
    ▼ 4: Feature 00000000000000000010 (Polygon, 22 properties)
      type: Feature
      id: 00000000000000000010
      ▶ geometry: Polygon, 43 vertices
      ▼ properties: Object (22 properties)
        area: 98750
        delta_1988_1994: -40.8879806992687
        delta_1994_1996: 65.38250274632588
        delta_1996_2002: -1.1588415838567296
        delta_2002_2007: -10.586740520520058
        delta_2007_2011: -68.44957500065803
        delta_2011_2016: 43.8692175057421
        delta_2016_2021: 88.39892456144321
        delta_2021_2025: 10.78479973558402
        name: Довге

```

JSON
JSON

Рисунок 4.2.3.1 – Фрагмент результуючої таблиці середньорічної динаміки
Експортуємо таблицю у форматі CVS (значення розділені комами).

```

Export.table.toDrive({
  collection: lakesWithDelta,
  description: 'WaterArea_Lakes_1988_2025_AnnualChange',
  fileFormat: 'CSV'
});

```

Таблицю буде завантажено на Google Drive. Результуюча таблиця 4.2.3.1 відображена нижче.

Таблиця 4.2.3.1. Середньорічні динаміка озер

Назва/ Значення %	d_1988 _1994,	d_1994 _1996	d_1996 _2002	d_2002 _2007	d_2007 _2011	d_2011 _2016	d_2016 _2021	d_2021 _2025
Світязь	-1,6	0,9	-0,2	-0,3	0,0	-0,9	-0,6	-0,1
Пулемецьке	-2,3	1,2	-1,2	-1,9	0,0	-0,6	-0,1	-0,1
Луки	-4,2	3,1	-2,3	-4,3	-2,3	-0,8	-3,6	0,3
Перемут	-4,7	3,3	-4,0	-3,6	1,0	-3,4	-0,2	0,4

Назва/ Значення %	d_1988 _1994,	d_1994 _1996	d_1996 _2002	d_2002 _2007	d_2007 _2011	d_2011 _2016	d_2016 _2021	d_2021 _2025
Люцимер	-2,4	0,1	-0,7	-2,8	0,7	-0,9	-1,5	-2,9
Острів'янське	-4,4	3,7	-4,9	-3,9	-3,3	-5,6	3,7	-8,8
Пісочне	-3,3	2,0	-0,2	-1,0	1,2	-1,5	0,0	-0,7
Кримне	-6,3	2,3	-3,9	-2,1	-2,0	-3,8	-2,7	-1,5
Чорне Велике	-3,6	1,9	-0,4	-2,5	-0,3	-2,2	0,9	-4,8
Соминець	-3,6	1,8	-1,9	-1,7	-1,0	-4,1	-2,4	-1,4
Мошне	-10,6	1,7	-1,1	-8,0	-2,1	-4,9	-2,4	-1,4
Чорне Мале	-7,8	5,9	-4,0	-0,5	-6,6	-45,4	17,5	-33,3
Климівське	-39,7	9,2	12,6	-3,7	-1,3	-14,4	-2,6	-3,1
Озерце	-6,7	3,4	-8,0	-6,7	-6,4	-10,9	-5,1	7,5
Карасинець	-5,8	1,9	-1,1	-2,3	3,1	-6,0	-5,6	3,0
Довге	-40,9	65,4	-1,2	-10,6	-68,4	43,9	88,4	10,8
Плотиччя	-11,1	7,0	-31,8	34,3	-75,2	11,4	171,8	5,7
Линовець	-3,8	4,0	-3,2	-3,3	3,4	-3,3	-8,2	1,5
Кругле	-53,8	57,4	-100,0	0,0	82,7	9,5	-1,0	0,0
Герасимове	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Більшість озер демонструють стабільне або коливальне зменшення площі води:

- ~ Поступове зниження де значення у межах $-1...-5\%$ на інтервал характерні для Світязя, Пулемецького, Пісочного, Чорного Великого, Климівського, Линівця;
- ~ сильніші зниження ($-5...-15\%$) характерні для: Озерця, Карасинця, Мошного, Кримного;
- ~ аномальні коливання спостерігаються для невеликих та мілких озер: Кругле, Чорне Мале, Довге, Плотиччя.

Відновлення площі у межах $+5\%$ фіксуються у більшості озер у 1996 та 2011 роках. Це може бути пов'язано з:

- локальними коливаннями рівня ґрунтових вод;
- збільшенням кількості опадів.

Розробка Хотиславського кар'єру почалась у 1991 році. Як видно різниця площі водного дзеркала у всіх озер з 1988 по 1994 рік впала щонайменше 1,6 % та найбільшої втрати зазнало озеро Кругле.

4.2.4 Виявлення аномальних років

Для аналізу нестабільності динаміки площ водного дзеркала було виконано окремий обрахунок аномальних років для кожного озера.

Аномальним вважався той рік, у якому відносна зміна площі води перевищувала середньоквадратичне відхилення (`stdDev`) для всієї часової серії конкретного озера. Такий метод дозволяє виявити роки з нетиповим скороченням або різким відновленням площі водойм.

```
var years = ee.List([1988, 1994, 1996, 2002, 2007, 2011, 2016,
2021, 2025]); - визначення років, що беруть участь в аналізі;
var lakesWithDeltas = allYears.map(function(f) {
  var areas = years.map(function(y) {
    var key = ee.String('water_ha_').cat(ee.Number(y).format());
    return f.getNumber(key);
  });
```

де для кожного озера з колекції `allYears` створюється список `areas`, в який послідовно записуються всі площі за всі роки, ключем виступає змінна `key`, де основою є префікс `"water_ha_"` до нього додається рік. `Return` – додає в список отриманні значення площі у елемент `f`, який є локальною колекцією даних у функції;

```
areas = ee.List(areas).removeAll([null]); - removeAll дозволяє
видалити значення null, якщо відсутні дані за певний рік.
```

Це дозволяє працювати лише з повними даними. Для кожного озера визначається кількість наявних вимірювань, яка записується у властивість `values_count`. Якщо кількість значень менша ніж 2, аномалії не розраховуються (недостатня статистична база).

Розрахунок зміни площі та статистичних критеріїв

Для кожного озера обчислюється:

- `deltas` — вектор відносних змін площі між послідовними роками;
- `delta_mean` — середнє значення цих змін;
- `delta_stdDev` — середньоквадратичне відхилення, що характеризує природну нестабільності площі водойми.

Середньоквадратичне відхилення обрано як базовий критерій стабільності, оскільки воно дозволяє відділити нормальні міжрічні коливання від істотних відхилень.

Виявлення аномалій

Аномальними позначаються ті роки, де величина відносної зміни:

$$|\Delta_i - \Delta_{mean} > \Delta_{stdDev}| \quad (4.2.4)$$

Тобто рік вважається аномальним, якщо зміна площі озера виходить за межі одного середньоквадратичного відхилення.

У результатах роки кодуються у вигляді масиву з 0 та 1:

[1, 0, 0, 1, 0, ...], де 1 означає аномалію.

```
var count = areas.length();
```

```
f = f.set('values_count', count); - зберігає кількість використаних
```

значень (років);

```
var condition = ee.Algorithms.If(
  ee.Number(count).lt(2),
  f.set('deltas', ee.List([])).set('delta_mean',
0).set('delta_stdDev', 0).set('delta_anomalies', ee.List([])),
```

- задається параметр, що обрахунок значення дельти буде виконано лише при наявності принаймні 2 значень, якщо даних виявлено недостатньо повертається значення `f`;

```
(function() {
  var idx = ee.List.sequence(1,
ee.Number(areas.length()).subtract(1));
  var deltas = idx.map(function(i) {
    i = ee.Number(i);
    var prev = ee.Number(areas.get(i.subtract(1)));
    var curr = ee.Number(areas.get(i));
```

- розрахунок дельт (відносна зміна в % між послідовними роками);

```

return ee.Algorithms.If(
  prev.eq(0),
  ee.Number(0),
  curr.subtract(prev).divide(prev).multiply(100)
);
});
deltas = ee.List(deltas);

```

- повертає значення за умови, якщо `prev = 0`, повертати значення дельт як 0, щоб уникнути ділення на 0;

```

var mean = ee.Number(deltas.reduce(ee.Reducer.mean()));
var stdDev =
ee.Number(deltas.reduce(ee.Reducer.stdDev()));

```

- обчислення середніх значень дельт та середньоквадратичного відхилення;

```

stdDev = ee.Algorithms.If(ee.Algorithms.IsEqual(stdDev,
null), 0, stdDev);
stdDev = ee.Number(stdDev);

```

- якщо значення середньоквадратичного відхилення буде `null`, змінюємо одразу значення на 0;

```

var anomalies = deltas.map(function(d) {
  d = ee.Number(d);
  return d.abs().gt(stdDev);
});

```

- розрахунок аномалій за формулою 4.2.4;

```

return f.set({
  'deltas': deltas,
  'delta_mean': mean,
  'delta_stdDev': stdDev,
  'delta_anomalies': anomalies
});
}) ()

```

```
);
```

- записує колекцію даних з використанням полів змінної `f`, та додає нові поля зі значеннями дельти у % значенні, середнє значення дельт, середньоквадратичне відхилення та значення аномалії;

```
return ee.Feature(condition);
```

```
});
```

- повертає лише ті значення, що дотримуються умови наявності принаймні 2 значень.

Оператор `print` забезпечує виведення колекції даних з дельтами та аномаліями у вкладку Console:

```
print('FeatureCollection з дельтами та аномаліями',  
lakesWithDeltas);
```

```
FeatureCollection з дельтами та аномаліями                                     JSON
▼ FeatureCollection projects/ee-Volkov/assets/lakes1988 (20 elements, 20 columns)  JSON
  type: FeatureCollection
  id: projects/ee-Volkov/assets/lakes1988
  version: 1764111030158630
  columns: Object (20 properties)
  features: List (20 elements)
    ▶ 0: Feature 00000000000000000012 (Polygon, 18 properties)
    ▼ 1: Feature 0000000000000000000d (Polygon, 19 properties)
      type: Feature
      id: 0000000000000000000d
      geometry: Polygon, 27 vertices
      properties: Object (19 properties)
        area: 65659
        delta_anomalies: [1,1,1,0,1,0,0,0]
          0: 1
          1: 1
          2: 1
          3: 0
          4: 1
          5: 0
          6: 0
          7: 0
        delta_mean: -0.6533243912831356
        delta_stdDev: 53.756719714469966
        deltas: List (8 elements)
          name: Кругле
          values_count: 9
          water: 1
          water_area_ha_1988: 6.564137098771637
          water_area_m2_1988: 65641.37098771636
          water_ha_1988: 6.564137098771637
          water_ha_1994: 3.030186886919807
          water_ha_1996: 4.769446913918887
          water_ha_2002: 0
          water_ha_2007: 2.917945039589078
          water_ha_2011: 5.330854244767731
          water_ha_2016: 5.836145611404718
          water_ha_2021: 5.780245421118642
          water_ha_2025: 5.780245421118642
```

Рисунок 4.2.4.1 – Фрагмент колекції даних з дельтами та аномаліями

Сформуємо таблицю з відображенням значень дельт та аномалій для кожної дельти між поточним роком та попереднім.

```
var AnomalyTable = lakesWithDeltas.map(function(f) {  
  return f.set({
```

```

    deltas_str: ee.List(f.get('deltas')).join(', '),
    anomalies_str: ee.List(f.get('delta_anomalies')).join(', ')
  });
});

```

- де `lakesWithDeltas` використовується за основу даних, які будуть формуватися в таблицю;
- `return` доповнює таблицю новими полями `delta_str` (відсоткові відношення між попередніми роками) та `anomalies_str` (булеві позначки аномалій для кожної дельти).

Оператор `print` забезпечує виведення таблиці дельт та аномалій у форматі CVS у вкладку Console:

```
print('У форматі CSV-рядків:', AnomalyTable);
```

```

У форматі CSV-рядків:
▼ FeatureCollection projects/ee-Volkov/assets/lakes1988 (20 elements, 22 columns)
  type: FeatureCollection
  id: projects/ee-Volkov/assets/lakes1988
  version: 1764111030158630
  columns: Object (22 properties)
  features: List (20 elements)
    ▶ 0: Feature 00000000000000000012 (Polygon, 20 properties)
    ▼ 1: Feature 0000000000000000000d (Polygon, 21 properties)
      type: Feature
      id: 0000000000000000000d
      geometry: Polygon, 27 vertices
      properties: Object (21 properties)
        anomalies_str: 1, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0
        area: 65659
        delta_anomalies: [1,1,1,0,1,0,0,0]
        delta_mean: -0.6533243912831356
        delta_stdDev: 53.756719714469966
        deltas: List (8 elements)
        deltas_str: -53.837239513372545, 57.397780793878425, -100.0, 0, 82.6920717299889, 9.47861906246891, -0.957827203...
        name: Кругле
        values_count: 9
        water: 1
        water_area_ha_1988: 6.564137098771637
        water_area_m2_1988: 65641.37098771636
        water_ha_1988: 6.564137098771637
        water_ha_1994: 3.030186886919807
        water_ha_1996: 4.769446913918887
        water_ha_2002: 0
        water_ha_2007: 2.917945039589078
        water_ha_2011: 5.330854244767731
        water_ha_2016: 5.836145611404718
        water_ha_2021: 5.780245421118642
        water_ha_2025: 5.780245421118642
    ▶ 2: Feature 00000000000000000006 (Polygon, 21 properties)

```

Рисунок 4.2.4.2. Представлення полів дельт та аномалій у форматі рядків перед експортом

Експортуємо таблицю у форматі CVS (значення розділені комами).

```

Export.table.toDrive({
  collection: AnomalyTable,
  description: 'LakeAreaDeltas_table',
  fileFormat: 'CSV'
});

```

Таблицю буде завантажено на Google Drive. Аномалії відображено у таблиці 4.2.4.1, де червоним подано поля де спостерігалась аномальне значення зниження площі, зеленим – аномалія відсутня.

Таблиця 4.2.4.1. Аномальні роки

Назва/ Значення аномалій	d_1988 _1994,	d_1994 _1996	d_1996 _2002	d_2002 _2007	d_2007 _2011	d_2011 _2016	d_2016 _2021	d_2021 _2025
Світязь	Red	Red	Green	Green	Green	Red	Green	Green
Пулемецьке	Red	Red	Red	Red	Green	Green	Green	Green
Луки	Red	Red	Green	Red	Green	Green	Red	Green
Перемут	Red	Red	Red	Red	Green	Red	Green	Green
Люцимер	Red	Green	Green	Red	Green	Green	Red	Red
Острів'янське	Red	Green	Red	Green	Green	Red	Green	Red
Пісочне	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Кримне	Red	Red	Red	Green	Green	Red	Red	Green
Чорне Велике	Red	Green	Green	Red	Green	Red	Green	Red
Соминець	Red	Red	Red	Green	Green	Red	Red	Green
Мошне	Red	Green	Green	Red	Green	Red	Green	Green
Чорне Мале	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Green	Red
Климівське	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Озерце	Red	Green	Red	Red	Red	Red	Green	Red
Карасинець	Red	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Green
Довге	Green	Red	Green	Green	Red	Green	Red	Green
Плотиччя	Green	Green	Green	Green	Red	Green	Red	Green
Линовець	Green	Red	Green	Green	Green	Green	Red	Green
Кругле	Red	Red	Red	Green	Red	Green	Green	Green
Герасимове	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green

Найбільш нестабільними значення є для дельти з 1988 по 1994 рік, у 14 озер з 20 спостерігається аномальне зменшення площі, а також для дельт з 1994 по 1996

та з 2011 по 2016 роки, тут у половини озер спостерігаються аномальні коливання площі.

Найбільш стабільні озера є Світязь (2), Линовець (2), Плотиччя (2), Чорне Мале (2), Пісочне (2), Довге (3), Карасинець (3) та Мошне (3).

Найбільші аномалії спостерігаються у озер Соминець (5), Кримне (5), Перемут (5), Озерце (6).

Отже, хоч і великі озера й втрачають площу (наприклад, Світязь та Пулемецьке), але тенденція обміління є плавною у своїх значеннях. Мілкі та невеликі озера, як Кругле, Озерце, Перемут, Кримне, демонструють найбільшу чутливість до зміни гідрологічних умов і можуть бути індикаторами короточасних кліматичних або антропогенних впливів. Озерце відноситься до озер реліктового походження, що за тенденцією часто інтенсивно заростають та перетворюються на болота. Дно таких озер замулене, а береги заторфовані [20].

4.2.5 Аналіз тенденцій: тест Манна–Кендалла

Для визначення наявності довгострокових тенденцій у часових рядах площ озер застосовано непараметричний тест Манна–Кендалла. Тест дозволяє оцінити як напрям, так і статистичну значущість тренду. Методика розрахунку описана у підрозділі 3.4.

```
function mannKendall(valuesList) {
```

- внутрішня функція для реалізації тест Манна-Кендалла для площ озер;

```
valuesList = ee.List(valuesList);
```

- перевіряє, що вхідний ряд значень представлений у форматі `ee.List`;

```
var n = ee.Number(valuesList.length());
```

- кількість спостережень у ряді;

```
var emptyResult = ee.Dictionary({
```

```
  S: ee.Number(0),
```

```
  varS: ee.Number(0),
```

```
  Z: ee.Number(0),
```

```
  pValue: ee.Number(1)
```

```
});
```

- створюється порожній результат, якщо даних недостатньо;

```
return ee.Algorithms.If(
    n.lt(2),
```

`emptyResult`, - якщо у ряді менше 2 значень, то результат повертається

одразу порожнім, якщо більше – далі продовжує працювати функція :

```
ee.Dictionary(
    (function() {
        var idxList = ee.List.sequence(0, n.subtract(1));
        var S = ee.Number(
            idxList.iterate(function(i, acc) {
                i = ee.Number(i);

                var inner = ee.List.sequence(i.add(1),
n.subtract(1));
                var innerSum = ee.Number(inner.iterate(function(j,
acc2) {
                    j = ee.Number(j);
                    var diff =
ee.Number(valuesList.get(j)).subtract(ee.Number(valuesList.get(i)));
                    var sgn =
diff.gt(0).multiply(1).add(diff.lt(0).multiply(-1));
                    return ee.Number(acc2).add(ee.Number(sgn));
                }, 0));
                return ee.Number(acc).add(innerSum);
            }, 0)
        );
```

- код проходить циклом по всіх парах значень у ряді, якщо значення пізнішого року більше – додає +1, якщо менше – додає -1, якщо однакове – додає 0. І таким чином обчислюється значення змінної S – сумарна кількість тенденцій змін, якщо значення більше 0, значення зростають, якщо менше – зменшуються, якщо 0 – тренд відсутній.

```
var varS =
n.multiply(n.subtract(1)).multiply(n.multiply(2).add(5)).divide(18);
```

- формула розрахунку дисперсії Манна-Кендалла [30];

```

var Z = ee.Algorithms.If(
  S.gt(0),
  S.subtract(1).divide(varS.sqrt()),
  ee.Algorithms.If(
    S.lt(0),
    S.add(1).divide(varS.sqrt()),
    ee.Number(0)
  )
);
Z = ee.Number(Z);
var absZ = Z.abs();

```

- значення змінної Z вказує наскільки «сильний» тренд, якщо значення S більше 0 – тренд зростаючий, якщо менше – спадаючий, якщо 0 – тренд відсутній.

```

var p =
ee.Number(1).subtract( absZ.divide(ee.Number(2).sqrt()).erf() );
p = ee.Number(p).max(0).min(1);

```

- p -value використовується для оцінки статистичної значущості тренду на рівні $\alpha = 0.05$:

$p < 0.05 \rightarrow$ тренд значущий;

$p \geq 0.05 \rightarrow$ тренд може бути випадковістю.

```

return {
  S: S,
  varS: varS,
  Z: Z,
  pValue: p
};
}) ()
)
);
}

```

- основний блок повертає значення S – напрям змін, $\text{var}S$ – дисперсія S , Z – стандартизована статистика, $p\text{-value}$ – значущість тренду.

Далі буде сформовано таблицю результатів обчислення тренду за тестом Манна-Кендалла для кожного озера.

```
var resultsTable = allYears.map(function(f) {
```

- результуюча таблиця, де взята початкова колекція озер, для кожного з яких виконується обчислення тесту МК;

```
  f = ee.Feature(f);
  var areas = years.map(function(y) {
    var key = ee.String('water_ha_').cat(ee.Number(y).format());
    return f.get(key);
  });
```

- формування списку площ озера за всі роки, що відповідають ключам 'water_ha_...'

```
  areas =
ee.List(areas).removeAll([null]).map(function(x) { return
ee.Number(x); });
```

- чищення ряду від пропущених значень та приведення до числового формату;

```
  var mk = ee.Dictionary(mannKendall(areas));
```

- застосування функції МК до очищеного ряду, результат зберігається у словнику (dictionary);

```
  var Z = ee.Number(mk.get('Z'));
```

- тримання значення Z для визначення напрямку тренду;

```
  var trend = ee.Algorithms.If(Z.gt(0), 'increasing',
    ee.Algorithms.If(Z.lt(0), 'decreasing',
'no_trend'));
```

- визначення напрямку: increasing – зростання площі, decreasing – зменшення площі, no_trend – відсутність вираженого тренду;

```
  return f.set({
    'MK_S': mk.get('S'),
```

```

'MK_varS': mk.get('varS'),
'MK_Z': mk.get('Z'),
'MK_pValue': mk.get('pValue'),
'MK_trend': trend,
'used_points': areas.length()
});
});

```

- додавання нових властивостей у результуючу таблицю `resultsTable`.

Оператор `print` забезпечує виведення результуючої таблиці зі значенням тренду у вкладку Concole:

```
print('Results Table (Mann-Kendall per lake):', resultsTable);
```

```

Results Table (Mann-Kendall per lake):
▼ FeatureCollection projects/ee-Volkov/assets/lakes1988 (20 elements, 21 columns)
  type: FeatureCollection
  id: projects/ee-Volkov/assets/lakes1988
  version: 1764111030158630
  columns: Object (21 properties)
  features: List (20 elements)
    ▶ 0: Feature 00000000000000000012 (Polygon, 19 properties)
    ▼ 1: Feature 0000000000000000000d (Polygon, 20 properties)
      type: Feature
      id: 0000000000000000000d
      geometry: Polygon, 27 vertices
      properties: Object (20 properties)
        MK_S: 7
        MK_Z: 0.6255432421712244
        MK_pValue: 0.5316145768816123
        MK_trend: increasing
        MK_varS: 92
        area: 65659
        name: Кпырле
        used_points: 9
        water: 1
        water_area_ha_1988: 6.564137098771637
        water_area_m_1988: 65641.37098771636
        water_ha_1988: 6.564137098771637
        water_ha_1994: 3.030186886919807
        water_ha_1996: 4.769446913918887
        water_ha_2002: 0
        water_ha_2007: 2.917945039589078
        water_ha_2011: 5.330854244767731
        water_ha_2016: 5.836145611404718
        water_ha_2021: 5.780245421118642
        water_ha_2025: 5.780245421118642
    ▶ 2: Feature 00000000000000000006 (Polygon, 20 properties)

```

Рисунок 4.2.5.1. Фрагмент результуючої таблиці з даними тесту Манна-Кендалла

Відфільтруємо озера зі статисно значущим трендом $p < 0.05$ та виведемо таку таблицю у вкладку Concole.

```

var significant = resultsTable.filter(ee.Filter.lt('MK_pValue',
0.05));
print('Озера зі статистично значущим трендом (p < 0.05):',
significant);

```

```

Озера зі статистично значущим трендом (p < 0.05):
FeatureCollection projects/ee-Volkov/assets/Lakes1988 (15 elements, 21 columns)
  type: FeatureCollection
  id: projects/ee-Volkov/assets/Lakes1988
  version: 1764111030158630
  columns: Object (21 properties)
  features: List (15 elements)
    0: Feature 00000000000000000006 (Polygon, 20 properties)
    1: Feature 0000000000000000000b (Polygon, 20 properties)
    2: Feature 0000000000000000000c (Polygon, 20 properties)
    3: Feature 00000000000000000002 (Polygon, 20 properties)
    4: Feature 00000000000000000003 (Polygon, 20 properties)
    5: Feature 00000000000000000013 (Polygon, 20 properties)
    6: Feature 00000000000000000007 (Polygon, 20 properties)
    7: Feature 00000000000000000008 (Polygon, 20 properties)
    8: Feature 0000000000000000000f (Polygon, 20 properties)
    9: Feature 00000000000000000001 (Polygon, 20 properties)
    10: Feature 0000000000000000000a (Polygon, 20 properties)
    11: Feature 00000000000000000004 (Polygon, 20 properties)
    12: Feature 00000000000000000011 (Polygon, 20 properties)
    13: Feature 00000000000000000000 (Polygon, 20 properties)
    14: Feature 00000000000000000005 (Polygon, 20 properties)
  properties: Object (1 property)

```

Рисунок 4.2.5.2. Фрагмент результуючої таблиці з даними тесту Манна-Кендалла, лише з озерами що мають статистично значущий тренд

Як видно з результатами фільтрування, статистично значущий тренд присутній лише у 15 озерах з 20.

Експортуємо результуючу таблицю у форматі CVS (значення розділені комами) з відображенням лише обраних даних.

```

Export.table.toDrive({
  collection:
resultsTable.select(['name', 'used_points', 'MK_S', 'MK_varS', 'MK_Z', 'M
K_pValue', 'MK_trend']),
  description: 'MannKendall_By_Lake',
  fileType: 'CSV'
});

```

Таблицю буде завантажено на Google Drive. Аномалії відображено у таблиці 4.2.5.1.

Таблиця 4.2.5.1. Статистичний тренд за тестом МК

Назва	К-ть взятих років	MK_S	MK_varS	MK_Z	MK_pValue	MK_trend
Кримне	9	-34,0	92,0	-3,4405	0,00058	decreasing
Соминець	9	-34,0	92,0	-3,4405	0,00058	decreasing
Герасимове	9	0	92,0	0	1,00000	no trend
Кругле	9	7,0	92,0	0,6255	0,53161	increasing
Довге	9	-14,0	92,0	-1,3553	0,17531	decreasing
Плотичця	9	-16,0	92,0	-1,5639	0,11785	decreasing
Пісочне	9	-18,0	92,0	-1,7724	0,07633	decreasing

Климівське	9	-22,0	92,0	-2,1894	0,02857	decreasing
Линовець	9	-22,0	92,0	-2,1894	0,02857	decreasing
Карасинець	9	-24,0	92,0	-2,3979	0,01649	decreasing
Перемут	9	-28,0	92,0	-2,8149	0,00488	decreasing
Світязь	9	-28,0	92,0	-2,8149	0,00488	decreasing
Чорне Мале	9	-28,0	92,0	-2,8149	0,00488	decreasing
Луки	9	-30,0	92,0	-3,0235	0,00250	decreasing
Озерце	9	-30,0	92,0	-3,0235	0,00250	decreasing
Чорне Велике	9	-30,0	92,0	-3,0235	0,00250	decreasing
Люцимер	9	-32,0	92,0	-3,2320	0,00123	decreasing
Мошне	9	-32,0	92,0	-3,2320	0,00123	decreasing
Острів'янське	9	-32,0	92,0	-3,2320	0,00123	decreasing
Пулемецьке	9	-32,0	92,0	-3,2320	0,00123	decreasing

За результатами розрахунків встановлено, що переважна більшість озер демонструє статистично значиме зменшення площі. Показник S для таких озер має від'ємне значення, а відповідний Z -статистичний критерій є меншим за нуль і характеризується низькими p -value ($p < 0.05$), що свідчить про істотність тренду.

До цієї групи озер із чітко вираженим спадним трендом належать:

Світязь, Чорне Мале, Чорне Велике, Люцимер, Луки, Озерце, Карасинець, Перемут, Пулемецьке, Острів'янське, Мошне, Линовець, Климівське, Плотиччя, Пісочне, Довге та інші.

Значення Z для них знаходиться в межах від -2.19 до -3.44 , що відповідає високому рівню статистичної довіри (p від 0.028 до 0.00058). Найбільш інтенсивні спадні тенденції спостерігаються в озерах Кримне та Соминець, для яких коефіцієнт S становить -34 , а рівень значущості $p \approx 0.0006$.

Лише одне озеро — Кругле — показує слабкий позитивний тренд ($S = 7$, $Z = 0.63$), проте значення $p = 0.53$ свідчить про те, що така тенденція статистично незначуща. Тому зростання площі Круглого не може розглядатися як підтверджений довгостроковий процес.

Таким чином, загальна картина динаміки вказує на домінування стійкого та статистично значимого зменшення площі більшості озер. Це узгоджується зі зменшенням водності у регіоні протягом останніх десятиліть у зв'язку з розбудовою Хотиславського кар'єру у Білорусі [10].

4.2.6 Графічні візуалізації

Динаміка зміни площ водної поверхні

Для кожного озера було сформовано лінійний графік виду:

- вісь X – роки,
- вісь Y – площа водного дзеркала (га),
- шар кривої тренду – лінійна регресія.

Такі графіки дозволяють візуально визначити напрям і силу зміни водної поверхні.

```
function chartLake(lakeFeature) {  
  var lakeName = lakeFeature.get('name');
```

- створення функції для побудови графіків та змінної яка буде включати в собі назви озер;

```
var areas = ee.List([  
  lakeFeature.get('water_ha_1988'),  
  lakeFeature.get('water_ha_1994'),  
  lakeFeature.get('water_ha_1996'),  
  lakeFeature.get('water_ha_2002'),  
  lakeFeature.get('water_ha_2007'),  
  lakeFeature.get('water_ha_2011'),  
  lakeFeature.get('water_ha_2016'),  
  lakeFeature.get('water_ha_2021'),  
  lakeFeature.get('water_ha_2025')  
]);
```

- отримуємо площі для всіх років;

```
areas = areas.map(function(a) { return  
ee.Algorithms.If(ee.Algorithms.IsEqual(a, null), 0, a); });
```

- якщо значення будуть набувають `null`, то замінюємо такі на 0;

```
var years = ee.List([1988, 1994, 1996, 2002, 2007, 2011, 2016,  
2021, 2025]);
```

- список років, дані який було взято до аналізу;

```
var chartData = ee.FeatureCollection(  
  years.zip(areas).map(function(yrArea) {
```

```

        yrArea = ee.List(yrArea);
        return ee.Feature(null, {
            year: yrArea.get(0),
            area: yrArea.get(1)
        });
    })
);

```

- створюємо колекцію даних для графіка;

```

var trend = chartData.reduceColumns({
    reducer: ee.Reducer.linearFit(),
    selectors: ['year', 'area']
});
var slope = trend.get('scale');
var intercept = trend.get('offset');

```

- лінійна регресія для тренду;

```

var trendLine = chartData.map(function(f) {
    var year = ee.Number(f.get('year'));
    var predicted =
ee.Number(slope).multiply(year).add(ee.Number(intercept));
    return ee.Feature(null, {
        year: year,
        trend: predicted
    });
});

```

- трендова лінія, де по вісі абцис будуть роки, а по ординат значення `predicted`, що відображає прогноз напрямку та силу тренду;

```

var chart = ui.Chart.feature.byFeature(chartData, 'year',
'area')
    .setSeriesNames(['Фактична площа'])
    .setOptions({
        title: 'Динаміка площі водної поверхні: '+
lakeName.getInfo(),
        hAxis: {title: 'Рік'},

```

```

    vAxis: {title: 'Площа (га)'},
    lineWidth: 2,
    pointSize: 4
  });

```

- графік динаміки зміни площ водної поверхні із заданням заголовку графіку, вісі X та Y, та інші візуальні параметри для візуалізації;

```

var trendChart = ui.Chart.feature.byFeature(trendLine, 'year',
'trend')
  .setSeriesNames(['Тренд'])
  .setOptions({
    title: 'Крива тренду для озера: '+ lakeName.getInfo(),
    lineWidth: 2,
    pointSize: 0,
    colors: ['red']
  });

```

- динаміки трендової лінії із заданням заголовку графіку, вісі X та Y, та інші візуальні параметри для візуалізації;

```

print(chart);
print(trendChart);
}

```

- виводимо обидва графіки в консоль;

```

allYears.toList(allYears.size()).evaluate(function(list) {
  list.forEach(function(lakeDict) {
    var lakeFeature = ee.Feature(lakeDict);
    chartLake(lakeFeature);
  });
});

```

- виклик функції для побудови графіків.

Після виклику функції графіки відображаються у вкладці Console. Лінійні графіки динаміки водної поверхні та криві тренду для кожного з озер відображено у додатку Б.

Трендова діаграма

На графіку використовуються значення, що були обчислені під час тесту Манн-Канедалла. Графік має форму гістограми з від'ємними та додатними даними, де кожен демонструється:

- кожен стовпчик відповідає одному озеру;
- висота стовпчика відображає величину Z -статистики;
- нульова горизонтальна лінія дозволяє чітко відділити позитивні тренди від негативних.

```
var barChart = ui.Chart.feature.byFeature({
  features: resultsTable,
  xProperty: 'name',
  yProperties: ['MK_Z']
})
.setChartType('ColumnChart')
.setOptions({
  title: 'Mann-Kendall Z-Statistic по озерах',
  legend: { position: 'none' },
  hAxis: {
    title: 'Озеро',
    slantedText: true,
    slantedTextAngle: 45
  },
  vAxis: {
    title: 'Z-значення (трендовість)',
    baseline: 0
  },
  colors: ['#1f77b4'],
  bar: { groupWidth: '70%' }
});
```

- дані будуть взяті з результуючої таблиці `resultsTable`, що було сформовано вкінці підрозділу 4.2.5. За віссю X – назви озер, а за Y – значення 'MK_Z';

```

print(barChart); - вивід графіка;
var barChartP = ui.Chart.feature.byFeature({
  features: resultsTable,
  xProperty: 'name',
  yProperties: ['MK_pValue']
})
.setChartType('ColumnChart')
.setOptions({
  title: 'Mann-Kendall pValue по озерах',
  legend: { position: 'none' },
  hAxis: { title: 'Озеро', slantedText: true, slantedTextAngle:
45 },
  vAxis: { title: 'p-value (0-1)' },
  colors: ['#d62728']
});

```

- дані будуть взяті з результуючої таблиці `resultsTable` , що було сформовано вкінці підрозділу 4.2.5. За віссю X – назви озер, а за Y – значення 'MK_pValue';

`print(barChartP);` - вивід графіка.

У вкладці Console буде виведено 2 графіки, один зі значеннями `MK_Z` або ж `MK_pValue`.

Графіки відображено на рисунках 4.2.5.21 та 4.2.5.22.

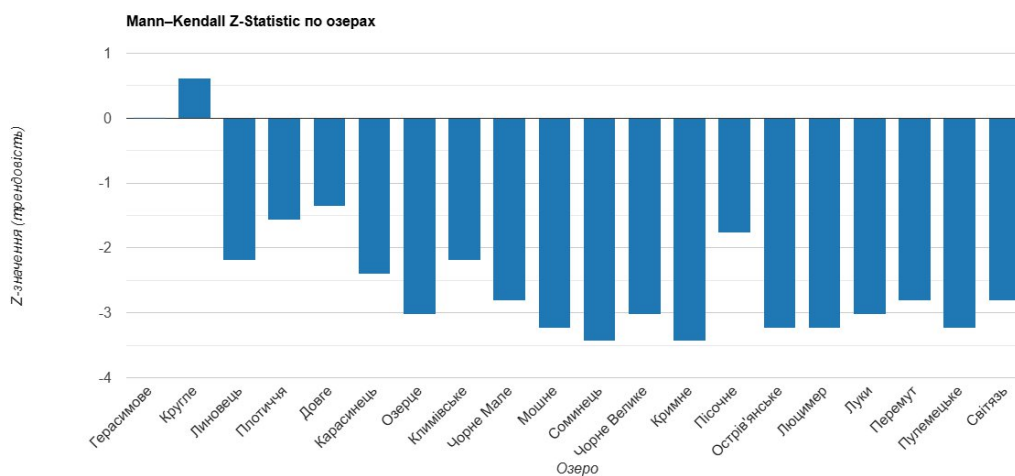


Рисунок 4.2.5.21. Трендові характеристики динаміки площ відної поверхні (MK_Z)

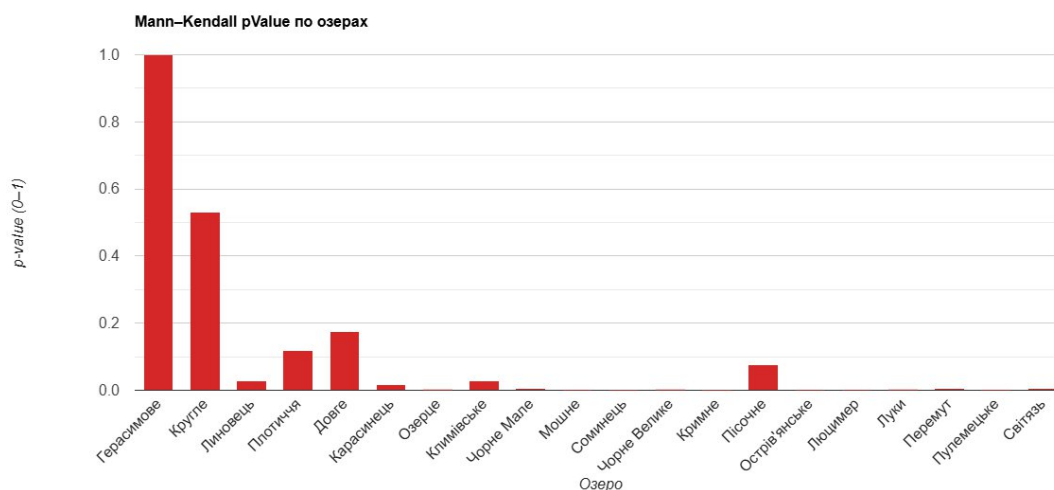


Рисунок 4.2.5.22. Трендові характеристики динаміки площ відної поверхні (МК_pValue)

На першій діаграмі переважна більшість озер демонструє негативні значення Z , що вказує на спадний тренд площі водного дзеркала протягом досліджуваного періоду. Найбільші від'ємні значення Z отримано для таких водойм:

- Кримне
- Пісочне
- Соминське
- Чорне Велике
- Луки

Це свідчить про те, що саме ці озера зазнали найбільш інтенсивного скорочення площі, а тенденція є стабільною та чітко вираженою. Для озер Герасимове та Крупе Z -значення є додатними та наближеними до нуля, що вказує на відсутність суттєвої зміни або на слабкий зростаючий тренд, який не є статистично впевненим.

Таким чином, за статистикою Z можна зробити висновок, що деградація водного дзеркала носить регіональний характер, але її інтенсивність суттєво різниться між окремими озерами.

Друга діаграма демонструє p -value тесту Манна–Кендалла, що дозволяє оцінити, чи є знайдені тренди статистично значущими.

Для переважної частини озер $p\text{-value} < 0.05$, а для багатьох — наближається до нуля, що вказує на високу статистичну значущість виявлених негативних трендів.

Лише кілька озер, зокрема Герасимове, Крупе та Липовець, мають високі значення $p\text{-value}$ (0.5–1.0). Це означає, що зміни їхніх площ не підтверджуються статистично, і тренд вважається відсутнім або випадковим.

Озера зі значенням $p\text{-value} < 0.01$ (наприклад, Кримне, Чорне Мале, Соминське, Пісочне) демонструють особливо сильну достовірність отриманих тенденцій зменшення площі.

Отримані результати підтверджують важливість подальшого моніторингу обміління та необхідність врахування інтенсивності кліматичних та антропогенних факторів, що впливають на стан водних об'єктів регіону.

Таким чином, результат геоінформаційного моніторингу обміління Шацьких озер буде формувати кількісну оцінку обміління, інтегруючи набір річних спостережень у цілісну систему аналізу. Поєднання площ, трендів, статистичної значень та графічних моделей забезпечує комплексне уявлення про довготривалу динаміку водного дзеркала Шацьких озер та дозволяє зробити достовірні висновки щодо стану рівню обміління.

Табличне представлення результатів

У таблиці 4.2.6.1 наведена узагальнена статистична інформація про зміни площі озер за 37 років, тобто з 1988 по 2025 роки.

Таблиця 4.2.6.1. Площа водної поверхні озера за 1988–2025 рр.

Назва	S 1988	S 2025	$\Delta 1988_{2025}$	$\Delta\%$	MIN	MAX
Світязь	2541,79	2469,87	71,92	2,8	2469,87	2541,79
Пулемецьке	1505,39	1432,92	72,47	4,8	1432,92	1505,39
Луки	578,02	500,76	77,26	13,4	499,42 ₂₀₂₁	578,02
Перемут	136,53	121,78	14,75	10,8	121,28 ₂₀₂₁	136,53
Люцимер	438,81	394,37	44,44	10,1	394,37	438,81
Острів'янське	219,54	171,53	48,01	21,9	171,53	219,54
Пісочне	187,96	181,36	6,6	3,5	181,36	187,96

Назва	S 1988	S 2025	Δ 1988_2025	Δ %	MIN	MAX
Кримне	134,11	109,25	24,86	18,5	109,25	134,11
Чорне Велике	77,96	69,72	8,24	10,6	69,72	77,96
Соминець	42,22	36,56	5,66	13,4	36,56	42,22
Мошне	32,64	24,19	8,45	25,9	24,19	32,64
Чорне Мале	22,87	8,52	14,35	62,7	8,52	22,87
Климівське	18,22	10,37	7,85	43,1	10,37	18,22
Озерце	15,92	11,21	4,71	29,6	10,43 ₂₀₂₁	15,92
Карасинець	15,53	13,57	1,96	12,6	13,18 ₂₀₂₁	15,53
Довге	9,87	8,08	1,79	18,1	2,69 ₂₀₁₁	9,87
Плотиччя	9,08	6,28	2,8	30,8	1,96 ₂₀₁₁	9,08
Линовець	8,81	7,69	1,12	12,7	7,58 ₂₀₂₁	8,81
Кругле	6,56	5,78	0,78	11,9	0,00 ₂₀₀₂	6,56
Герасимове	0	0	-	-	0	0

За 37 років найбільше в площі втратило озеро Чорне Мале майже 68 %, також високий показник у Климівського озера – 43%. У 8 озер з 20 мінімальне значення було раніше ніж 2025 рік, тобто площа таких озер залежить від кліматичних умов більше ніж у інших. Більшість таких озер малі за площею та глибиною. Максимальне значення значення площі у всіх озер за період дослідження було у 1988 році.

4.3 Інтерпретація результатів

У межах проведеного геоінформаційного аналізу встановлено кількісні та просторові зміни у стані водної поверхні озер Шацького поозер'я за період 1988–2025 рр. Отримані результати дозволяють визначити загальні тенденції обміління, оцінити динаміку для кожного окремого озера та проаналізувати можливі природні й антропогенні чинники, що впливають на ці процеси.

4.3.1 Узагальнення результатів

За побудованими часовими колекціями даних площі водного дзеркала виявлено стійку тенденцію до зниження загальної площі озер Шацького НПП. У 1988 році площа водної поверхні становила 61,99 км², а у 2025 році — 56,82 км².

Це свідчить про зменшення водного дзеркала на 5,17 км², або приблизно 8,3 % від початкової площі.

Динаміка окремих озер також демонструє зміни різної інтенсивності. До найбільш стабільних за зменшенням площі належать великі озера (Світязь, Пулемецьке, Пісочне), які втрачають воду поступово й рівномірно. Натомість середні та малі озера виявляють більш виражене скорочення площ, а в окремих випадках — повне зникнення водного дзеркала.

Найбільші втрати площі води спостерігаються у таких озер:

- Світязь: зменшення на 71,92 га з 1988 до 2025 р.;
- Пулемецьке: зменшення на 72,47 га;
- Луки: зменшення на 77,26 га;
- Острів'янське: зменшення на 48,01 га;
- Кримне: зменшення на 24,86 га.

Найбільші зміни відносної інтенсивності обміління зафіксовано для дрібних озер. Наприклад:

- Чорне Мале втратило понад 60 % водного дзеркала;
- Климівське зменшилося майже у 1,7 рази;
- Довге та Плотиччя проявили різкі коливання площ з періодами критичного зменшення.

Особливий випадок становить озеро Герасимове, площа якого в усі роки спостереження дорівнює нулю, що підтверджується також сучасними супутниковими знімками. Це свідчить про фактичне зникнення водойми, проте необхідно здійснити польове дослідження для остаточного фіксування.

4.3.2 Причини змін водної поверхні

Виявлені тенденції мають багатофакторний характер і формуються внаслідок поєднання природних і антропогенних чинників.

Кліматичні та гідрологічні чинники

- У регіоні, так і в країні, простежуються періоди чергування вологих і сухих кліматичних циклів, які впливають на рівень опадів і гідрологічний баланс озер.
- Довготривала тенденція до зменшення кількості ефективних опадів у літньо-осінній період призводить до зниження надходження води у безстічні та слабопроточні озера.
- Підвищення температури повітря у літні місяці посилює випаровування з поверхні води, що особливо впливає на мілкі водойми.

Антропогенний вплив

- Значний вплив на водний режим регіону чинить меліоративна система, що була створена у другій половині ХХ століття. Мережа каналів (Копайвський та ін.) знижує природний рівень ґрунтових вод [9, 21].
- Рекреаційне навантаження на окремі озера (передусім Світязь та Пісочне) стимулює зміну берегової зони, ущільнення ґрунтів і локальні зміни водного балансу.
- Розбудова Хотиславського кар'єру. На даний момент активна розробка продовжується, але достовірна глибина кар'єру невідома. Проектна глибина становила 70 м, що більше ніж глибина озера Світязь, що впливатиме на рівень ґрунтових вод на території Шацького поозер'я [11, 13].

Морфометрія озер

Неглибокі та малі за площею озера є більш вразливими до навіть незначних змін кліматичних умов. Вони мають менший обсяг, швидше нагріваються, швидше втрачають воду через випаровування та значно залежні від рівня підземних вод.

Озера мають різні походження, деякі належать до реліктового походження, що за тенденцією часто інтенсивно заростають та перетворюються на болота. Дно таких озер замулене, а береги заторфовані [20].

4.3.3 Наслідки обміління

Зміни водної поверхні мають прямий і опосередкований вплив на природні та соціально-економічні умови регіону.

Екологічні наслідки

Зменшення площі озер призводить до деградації прибережних екосистем, зникнення характерних біотопів та змін у фітопланктоні й іхтіофауні.

Мілководдя сприяє процесам евтрофікації, активізації макрофітів, замуленню та зниженню якості води.

Зникнення дрібних озер (наприклад, Герасимового) призводить до втрати локальних природних комплексів та біорізноманіття.

Соціально-економічні наслідки

Обміління найбільших озер знижує рекреаційну привабливість регіону та впливає на туристичний сектор.

Погіршення гідрологічної ситуації сприяє загрозі інших екологічних проблем, таких як зниження рівня ґрунтових вод і деградація прилеглих лісових масивів.

4.3.4 Візуалізація просторових змін на тематичних картах

Для візуальної інтерпретації отриманих результатів було створено дві тематичні карти, які відображають просторовий характер обміління та дозволяють оцінити інтенсивність змін для кожного озера.

Карта обміління Шацьких озер з 1988 по 2025 роки

Перша карта демонструє безпосередню просторову різницю між контурами озер у 1988 та 2025 роках.

Ділянки, де водна поверхня зменшилася, чітко візуалізуються у вигляді смуг або плям відступу, що дозволяє оцінити напрями обміління.

Тематична карта відображена у додатку В.

Карта відсоткового зменшення площі водної поверхні (1988–2025)

Для кожного озера було розраховано відносне зменшення площі водної поверхні за 37-річний період. На основі цих показників сформовано тематичну карту з використанням градації кольорів.

Озеро Герасимове, яке повністю втратило водну поверхню, позначене нейтральним сірим кольором, що підкреслює його статус зниклої водойми.

Тематична карта відображена у додатку Г .

ВИСНОВОК

У ході виконання роботи було проведено комплексне дослідження багаторічної динаміки водної поверхні озер Шацького поозер'я із застосуванням супутникових даних Landsat та інструментів хмарної платформи Google Earth Engine. Результати, отримані під час практичної реалізації методики, дозволили сформувати кількісну й просторову картину обміління водойм протягом 1988–2025 рр., оцінити інтенсивність змін, порівняти реакцію різних типів озер, а також визначити озера, де процеси обміління є найбільш критичними.

Основним результатом дослідження стало створення цілісної методики геоінформаційного моніторингу, яка включає формування сезонних медіанних композитів, обчислення спектральних індексів (MNDWI, NDMI, Blue Ratio) та інтегрального індексу SWMI, що забезпечив найбільш стабільне виділення меж води в умовах різної хмарності, зміни водності, наявності рослинності та тіней. Стандартизована процедура виявлення водної маски та розрахунку площі дала можливість отримати узгоджені результати для всіх років і таким чином провести порівняльний аналіз у просторі та часі.

На основі побудованих часових рядів площ водної поверхні було встановлено, що більшість озер Шацького поозер'я зазнали істотного зменшення площі протягом останніх 37 років. Особливо це характерно для малих та середніх озер, що мають слабку гідравлічну зв'язаність, залежать від атмосферних опадів та рівня ґрунтових вод. Отримані значення відсоткового зменшення площ водної поверхні показали, що інтенсивність обміління значно варіює між озерами: деякі водойми втратили понад 60% початкової площі, тоді як для низки озер зміни були помірними або незначними.

Тематична карта різниць площ між 1988 та 2025 роками відобразила, що зменшення водної поверхні відбувалося не лише за рахунок відступання берегових ліній, але й через фрагментацію водойм, появу або збільшення островів у озерах та збільшення рослинності.

Водночас частина озер, особливо ті, що мають більшу глибину чи краще живляться ґрунтовими водами, продемонстрували стабільніші показники й менш

виражений тренд до обміління. Це підкреслює неоднорідність гідрологічної системи Шацького поозер'я та її чутливість до локальних чинників. Зокрема, озеро Герасимове, відповідно до результатів 1988 та 2025 року, практично висохло, що підтверджено й масками за обидва роки, що потребує додаткового польового дослідження на місці.

Під час аналізу аномальних років було встановлено, що найбільші негативні відхилення від середньоквадратичного відхололення площі припадають на дельту років 1988-1994, коли зафіксовано аномальні значення у 14 озер з 20. Загальна тенденція у більшості є поступово спадною, а у озер, таких як Соминець, Кримне, Перемут та Озерце є більш різкими.

Застосування тесту Манна–Кендалла дозволило кількісно підтвердити наявність статистично значущого низхідного тренду для більшості озер. Значення трендових коефіцієнтів засвідчили різну швидкість змін: для більшості озер темпи обміління були помірними, тоді як для озер Кримне та Соминець - суттєвими та прискореними. Наявність статистично значущого тренду свідчить про те, що процеси обміління мають системний характер і не є випадковими річними коливаннями. Озеро Кругле єдине яке показало слабкий позитивний тренд, проте значення свідчать про те, що така тенденція є незначуща, та не може розглядатися як підтверджений результат довгострокового процесу.

Побудовані діаграми зміни площі в часі також дозволили виявити періоди стабілізації, прискореної деградації та тимчасових коливань. Характерною рисою більшості озер є нерівномірність динаміки: періоди стрімкого зменшення змінювалися фазами відносної стабільності, що свідчить про складну взаємодію кліматичних факторів та режиму ґрунтових вод.

Одним із ключових чинників, що потенційно впливають на гідрологічний баланс Шацького поозер'я, є діяльність Хотиславського кар'єру у Білорусі, розташованого безпосередньо на відстані близько 2–3 км від державного кордону та всього 8–10 км від найближчих озер української частини Полісся. Кар'єр інтенсивно розробляється з початку 2010-х років, що супроводжується системним

зниженням рівня ґрунтових вод на прилеглий території, про що свідчать численні гідрогеологічні висновки українських фахівців [11].

Карта відсоткового зменшення площі водної поверхні показала чіткі просторові закономірності: найбільше втратили водойми з невеликою площею та мілководною структурою, тоді як великі озера продемонстрували стійкіші характеристики. Карта порівняння водних масок 1988 і 2025 років дозволила наочно показати реальні масштаби скорочення водного дзеркала, що є важливим інструментом для подальшого управління територією, планування природоохоронних заходів.

Запропонована методика геоінформаційного моніторингу є ефективною та придатною для довготривалих досліджень стану озерних систем. Вона забезпечує можливість відтвореного аналізу на основі відкритих супутникових даних, дозволяє оцінювати тенденції обміління водойм так і їх збільшення, своєчасно виявляти критичні зміни та формувати наукові рекомендації щодо збереження озерних екосистем.

Отримані результати мають практичну цінність для управління Шацького природного національного парку, природоохоронних установ, регіональних органів управління, гідрологів та екологів, оскільки дозволяють оперативно аналізувати стан озер та ухвалювати рішення, спрямовані на мінімізацію негативних наслідків обміління.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Положення «Про Шацький національний природний парк» Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів №258 від 19.04.2021 р. Режим доступу: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/ukr214048.pdf>
2. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Національна система моніторингу водних ресурсів [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://eco.gov.ua>
3. Аналіз можливостей і досвіду використання платформи google earth engine для вирішення задач моніторингу довкілля / Давибіда, Л. І. // Ecological Safety and Balanced Use of Resources – 2022 - №2(24), 75–86. Режим доступу: <https://surl.li/iwrqcz>
4. Геоінформаційні системи в екологічних дослідженнях / Биков В. Ю., Мазур І. І. // К.: Наук. думка, 2020.
5. Геоінформаційні технології в екології : Навчальний посібник / Пітак І.В., Негадайлов А.А., Масікевич Ю.Г., Пляцук Л.Д., Шапорев В.П., Моїсеєв В.Ф.// Чернівці - 2012.– 273с. Режим доступу: https://geology.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2020/04/Ekologichna-heoinformatyka_literatura-dlia-lektsiy.pdf
6. Методи геодезичних вимірювань у моніторингу водойм / Ємельянов А. С., Холодняк О. І.// Харків: ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2020.
7. Основи дистанційного зондування Землі/ Єфімов В. В.// К.: Либідь, 2021.
8. Супутниковий моніторинг природних ресурсів України / Ємельянов А. С., Холодняк О. І. // Харків: ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2020.
9. 37. Для комплексного обстеження причин обміління Світіязя залучать проектну організацію / Віта Шепеля // Район Шацьк - 17.01.2020 р. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://shatsk.rayon.in.ua/news/211286-dlia-kompleksnogo-obstezhennia-prichin-obmilinnia-svitiazia-zaluchat-proektnu-organizatsiiu>

10. Цих територій могло б не бути: Шацькі озера та що їм загрожує під час війни / Губарева, В.// 2024 – Рубрика. Режим доступу: <https://rubryka.com/article/shatskyj-natsionalnyj-pryrodnyj-park/>
11. Чи справді в обмілінні Світязя винен Хотиславський кар'єр / Віта Шепеля// Район Шацьк - 04.08.2019 р. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://shatsk.rayon.in.ua/news/168720-chi-spravdi-v-obmilinni-svitiazia-vinen-hotislavskii-karer>
12. Кришталево чиста вода та ліс. Чому варто відпочити на Шацьких озерах у 2025 році / Крутякова, Т. // Телеграф - 2025. Режим доступу: <https://news.telegraf.com.ua/ukr/obshhestvo/2025-05-03/5907649-kristalno-chistaya-voda-i-les-pochemu-stoit-otdokhnut-na-shatskikh-ozerakh-v-2025-godu-foto>
13. Білорусь нищить Шацькі озера: гордість Волині йде під землю /Волинські Новини – 2025. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.volynnews.com/news/extreme/bilorus_nyshchyt_shatski_ozera_hordist_volyni_yde_pid_zemlyu_video/
14. Вебплатформи з відкритим доступом для студентів, викладачів і науковців / Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://nung.edu.ua/department/veb-platformy-z-vidkrytym-dostupom-dlya-studentiv-i-vmkladachiv>
15. Вегетаційні індекси в сільському господарстві: NDVI, NDRE, MSAVI, NDMI - WEAGRO. WEAGRO./ Богдан, К. – 2025. Режим доступу: <https://weagro.ua/blog/vegetaczijni-indeksy-v-silskomu-gospodarstvi-ndvi-ndre-msavi-ndmi/>
16. Відпочинок на Шацьких озерах: Туристичне Спорядження // Alp.com.ua. – 2025. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://alp.com.ua/vidpochynok-na-shatskykh-ozerakh-blog/?srsltid=AfmBOoo0K6NLA1KXtVtSXRGOdu_OhScWH_BbmzYv4LZWCL1JMyuG4o05

17. Озеро. Вікімедія – 2025. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%B7%D0%B5%D1%80%D0%BE>
18. Список озер, які входять в Шацький Національний Природний Парк - 2023. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://svityaz.org.ua/ozera/119-ozera-shackogo-rayonu.html>
19. Шацькі озера. Вікімедія – 2025. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A8%D0%B0%D1%86%D1%8C%D0%BA%D1%96_%D0%BE%D0%B7%D0%B5%D1%80%D0%B0
20. Шацькі озера // ВУЕ – 2024. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://vue.gov.ua/%D0%A8%D0%B0%D1%86%D1%8C%D0%BA%D1%96_%D0%BE%D0%B7%D0%B5%D1%80%D0%B0
21. 36. Шацькі озера міліють через застарілі меліоративні системи// Конкурент – 2024. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://konkurent.ua/publication/69680/shatski-ozera-miliut-cherez-zastarili-meliorativni-sistemi/>
22. Aerial Photography and Remote Sensing for Hydrology / Rango A. // Springer, 2021.
23. Cloud and cloud shadow masking using multi-temporal cloud masking algorithm in tropical environmental / D.S. Candra, S. Phinn, P. Scarth // Remote Sensing Research Center, School of Geography, Planning and Environmental Management, University of Queensland, Brisbane, Australia. National Institute of Aeronautics and Space of Indonesia (LAPAN), Jakarta, Indonesia July, 2016. Режим доступу: : <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLI-B2/95/2016/isprs-archives-XLI-B2-95-2016.pdf>
24. Cloud masking testing using band QA, Fmask, and MCM methods using Landsat 8 satellite imagery in the first quarter of 2020 / Rassarandi, F. D., & Adliani, R. // AIP Conference Proceedings – 2023 - 2665, 030024. Режим доступу: <https://doi.org/10.1063/5.0127396>

25. Geographic Information Systems and Science / Longley P., Goodchild M., Maguire D., Rhind D. / Wiley, 2021.
26. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone / Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R. // Remote Sens. Environ. – 2017. – № 202. – 18– 27.
27. High-resolution mapping of Глобальне surface water and its long-term changes. / Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A. // Nature - 2016.
28. Monitoring and evaluation Al-Razzaza lake changes in Iraq using GIS and remote sensing technology / Jumaah, H. J., Ameen, M. H., Mohamed, G. H., & Ajaj, Q. M.// The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science – 2022- №25(1), 313–321. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2022.01.013>
29. The use of the NDWI in the delineation of open water feature / McFeeters S. K. // International Journal of Remote Sensing - 1996.
30. Design trend Mann-Kendall. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://vsp.pnnl.gov/help/vsample/design_trend_mann_kendall.htm
31. European Space Agency. Hydrology and Water Resources with GIS and Remote Sensing [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.esa.int>
32. European Space Agency. Sentinel-2 User Handbook: Water Monitoring Applications [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.esa.int>
33. Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) / Space4Water Portal. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.space4water.org/taxonomy/term/1246>
34. NASA Earth Observatory. Remote Sensing Data Processing and Accuracy Issues [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://earthobservatory.nasa.gov>
35. Landsat 7// Вікімедіа - 2013. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://uk.wikipedia.org/wiki/Landsat_7
36. Recent Sedimentation Rates of Shallow Lakes in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2073-4441/9/8/617>

37. Copernicus Open Access Hub [Электронный ресурс]. Режим доступа:
<https://scihub.copernicus.eu>

38. NASA Earth Observatory [Электронный ресурс]. Режим доступа:
<https://earthobservatory.nasa.gov>

ДОДАТКИ

Додаток А. Скрипт методики проведення геоінформаційного моніторингу обміління Шацьких озер

```
Map.centerObject(roi, 10);
Map.addLayer(roi, {color: 'white'}, 'Shatskyi NPP');
Map.addLayer(geometry111, {color: 'white'}, 'background');

//PIK 1988
var startYear = 1988;
var endYear = 1988;
var startDate = startYear + '-07-01';
var endDate = endYear + '-09-30';

function maskLandsat4(imageCollection) {
  var qa = imageCollection.select('QA_PIXEL');
  var cloud = qa.bitwiseAnd(1 << 3).neq(0);
  var cloudShadow = qa.bitwiseAnd(1 << 4).neq(0);
  return imageCollection.updateMask(cloud.not()).updateMask(cloudShadow.not());
}

var collection = ee.ImageCollection("LANDSAT/LT04/C02/T1_L2")
  .filterBounds(roi)
  .filterDate(startDate, endDate)
  .map(maskLandsat4)
  .filter(ee.Filter.lt('CLOUD_COVER', 5));

print('Кількість знімків 1988:', collection.size());
print('Всі знімки 1988:', collection);

var medianImage1988 = collection.median();
Map.addLayer(medianImage1988.clip(roi), imageVisParam, 'Median Image 1988');

function addSWMI(medianImage1988) {
  var b2_1988 = medianImage1988.select('SR_B1');
  var b3_1988 = medianImage1988.select('SR_B2');
  var b4_1988 = medianImage1988.select('SR_B3');
  var b5_1988 = medianImage1988.select('SR_B4');
  var b6_1988 = medianImage1988.select('SR_B5');
  var mndwi1988 = b3_1988.subtract(b6_1988).divide(b3_1988.add(b6_1988)).rename('MNDWI 1988');
  var ndmi1988 = b5_1988.subtract(b6_1988).divide(b5_1988.add(b6_1988)).rename('NDMI 1988');
  var bluer1988 = b2_1988.divide(b2_1988.add(b4_1988)).rename('BlueRatio 1988');
  var swmi1988 = mndwi1988.multiply(0.6)
    .add(ndmi1988.abs().multiply(-0.3).add(0.3))
    .add(bluer1988.multiply(2).subtract(1).multiply(0.1))
    .rename('SWMI 1988');
  return medianImage1988.addBands([mndwi1988, ndmi1988, bluer1988, swmi1988]);
}

var withIndex1988 = addSWMI(medianImage1988);
var composite1988 = withIndex1988.clip(roi);
var swmiVis = {
  min: -1,
  max: 1,
  palette: [
    '7f0000',
    'b30000',
    'd7301f',
    'f46d43',
    'fdae61',
    'fee08b',
    'd9ef8b',
    '91cf60',
    '1a9850',
    '66c2a5',
    '3288bd',
    '08519c',
    '08306b',
    '062147',
    'black'
  ]
};
Map.addLayer(composite1988.select('SWMI 1988'), swmiVis, 'SWMI 1988');

var waterMask1988 = composite1988.select('SWMI 1988').gt(0.22);
Map.addLayer(
```

```

    waterMask1988.updateMask(waterMask1988),
    {palette: ['#00BFFF']},
    'SWMI water mask 1988'
  );

var pixelArea1988 = ee.Image.pixelArea().clip(roi).updateMask(waterMask1988);
var areaSum1988 = pixelArea1988.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.sum(),
  geometry: roi,
  scale: 30,
  maxPixels: 1e9
});
print('Water area (m2) by SWMI mask 1988:', areaSum1988);

var waterVectors1988 = waterMask1988.reduceToVectors({
  geometry: roi,
  scale: 30,
  geometryType: 'polygon',
  eightConnected: false,
  labelProperty: 'water',
  maxPixels: 1e9
});

print('Properties of waterVectors:', waterVectors1988.first());

Export.table.toDrive({
  collection: waterVectors1988,
  description: 'waterVectors1988_export',
  fileFormat: 'SHP',
  folder: 'GEE_Exports'
});

Export.image.toDrive({
  image: waterMask1988.rename('water_mask_1988'),
  description: 'water_mask_1988_export',
  folder: 'GEE_exports',
  fileNamePrefix: 'water_mask_1988',
  region: roi,
  scale: 30,
  maxPixels: 1e13
});

var waterAreaImg = ee.Image.pixelArea()
  .updateMask(waterMask1988);
var lakesWater1988 = lakes1988.map(function(feature) {
  var areaWater = waterAreaImg.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.sum(),
    geometry: feature.geometry(),
    scale: 30,
    maxPixels: 1e9
  }).get('area');
  return feature.set({
    'water_area_m2_1988': areaWater,
    'water_area_ha_1988': ee.Number(areaWater).divide(10000)
  });
});

print('Water area inside each lake (1988):', lakesWater1988);

var chart1988 = ui.Chart.feature.byFeature({
  features: lakesWater1988,
  xProperty: 'name',
  yProperties: ['water_area_ha_1988']
})
.setChartType('ColumnChart')
.setSeriesNames(['Площа води, га'])
.setOptions({
  title: 'Площа води в озерах (1988)',
  hAxis: {title: 'Озеро'},
  vAxis: {title: 'Площа води, га'},
  legend: {position: 'none'},
  colors: ['#00A2FF']
});

print(chart1988);

//PIK 1994
var startYear1994 = 1994;
var endYear1994 = 1994;

```

```

var startDate1994 = startYear1994 + '-07-01';
var endDate1994 = endYear1994 + '-09-30';

function maskLandsat5(imageCollection2) {
  var qa5 = imageCollection2.select('QA_PIXEL');
  var cloud5 = qa5.bitwiseAnd(1 << 3).neq(0);
  var cloudShadow5 = qa5.bitwiseAnd(1 << 4).neq(0);
  return imageCollection2.updateMask(cloud5.not()).updateMask(cloudShadow5.not());
}
var collection1994 = ee.ImageCollection("LANDSAT/LT05/C02/T1_L2")
  .filterBounds(roi)
  .filterDate(startDate1994, endDate1994)
  .map(maskLandsat5)
  .filter(ee.Filter.lt('CLOUD_COVER', 5));

print('Кількість знімків 1994:', collection1994.size());
print('Всі знімки 1994:', collection1994);

var medianImage1994 = collection1994.median();
Map.addLayer(medianImage1994.clip(roi), imageVisParam, 'Median Image 1994');

function addSWMI1994(medianImage1994) {
  var b2_1994 = medianImage1994.select('SR_B1');
  var b3_1994 = medianImage1994.select('SR_B2');
  var b4_1994 = medianImage1994.select('SR_B3');
  var b5_1994 = medianImage1994.select('SR_B4');
  var b6_1994 = medianImage1994.select('SR_B5');
  var mndwi1994 = b3_1994.subtract(b6_1994).divide(b3_1994.add(b6_1994)).rename('MNDWI 1994');
  var ndmi1994 = b5_1994.subtract(b6_1994).divide(b5_1994.add(b6_1994)).rename('NDMI 1994');
  var bluer1994 = b2_1994.divide(b2_1994.add(b4_1994)).rename('BlueRatio 1994');
  var swmi1994 = mndwi1994.multiply(0.6)
    .add(ndmi1994.abs().multiply(-0.3).add(0.3))
    .add(bluer1994.multiply(2).subtract(1).multiply(0.1))
    .rename('SWMI 1994');
  return medianImage1994.addBands([mndwi1994, ndmi1994, bluer1994, swmi1994]);
}
var withIndex1994 = addSWMI1994(medianImage1994);

var composite1994 = withIndex1994.clip(roi);
Map.addLayer(composite1994.select('SWMI 1994'), swmiVis, 'SWMI 1994');

var waterMask1994 = composite1994.select('SWMI 1994').gt(0.22);
Map.addLayer(
  waterMask1994.updateMask(waterMask1994),
  {palette: ['#00BFFF']},
  'SWMI water mask 1994'
);

var pixelArea1994 = ee.Image.pixelArea().clip(roi).updateMask(waterMask1994);
var areaSum1994 = pixelArea1994.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.sum(),
  geometry: roi,
  scale: 30,
  maxPixels: 1e9
});
print('Water area (m2) by SWMI mask 1994:', areaSum1994);

var waterAreaImg1994 = ee.Image.pixelArea()
  .updateMask(waterMask1994);

var lakesWater1994 = lakes1988.map(function(feature) {
  var areaWater1994 = waterAreaImg1994.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.sum(),
    geometry: feature.geometry(),
    scale: 30,
    maxPixels: 1e9
  }).get('area');
  return feature.set({
    'water_area_m2_1994': areaWater1994,
    'water_area_ha_1994': ee.Number(areaWater1994).divide(10000)
  });
});

print('Water area inside each lake (1994):', lakesWater1994);
var chart1994 = ui.Chart.feature.byFeature({
  features: lakesWater1994,
  xProperty: 'name',
  yProperties: ['water_area_ha_1994']
});

```

```

}))
.setChartType('ColumnChart')
.setSeriesNames(['Площа води, га'])
.setOptions({
  title: 'Площа води в озерах (1994)',
  hAxis: {title: 'Озеро'},
  vAxis: {title: 'Площа води, га'},
  legend: {position: 'none'},
  colors: ['#00A2FF']
});

print(chart1994);

//PIK 1996
var startYear1996 = 1996;
var endYear1996 = 1996;
var startDate1996 = startYear1996 + '-06-01';
var endDate1996 = endYear1996 + '-09-30';
function maskLandsat5(imageCollection2) {
  var qa5 = imageCollection2.select('QA_PIXEL');
  var cloud5 = qa5.bitwiseAnd(1 << 3).neq(0);
  var cloudShadow5 = qa5.bitwiseAnd(1 << 4).neq(0);
  return imageCollection2.updateMask(cloud5.not()).updateMask(cloudShadow5.not());
}
var collection1996 = ee.ImageCollection("LANDSAT/LT05/C02/T1_L2")
  .filterBounds(roi)
  .filterDate(startDate1996, endDate1996)
  .map(maskLandsat5)
  .filter(ee.Filter.lt('CLOUD_COVER', 5))
  .map(maskLandsat5);
print('Кількість знімків 1996:', collection1996.size());
print('Всі знімки: 1996', collection1996);

var medianImage1996 = collection1996.median();
Map.addLayer(medianImage1996.clip(roi), imageVisParam, 'Median Image 1996');

function addSWMI1996(medianImage1996) {
  var b2_1996 = medianImage1996.select('SR_B1');
  var b3_1996 = medianImage1996.select('SR_B2');
  var b4_1996 = medianImage1996.select('SR_B3');
  var b5_1996 = medianImage1996.select('SR_B4');
  var b6_1996 = medianImage1996.select('SR_B5');
  var mndwi1996 = b3_1996.subtract(b6_1996).divide(b3_1996.add(b6_1996)).rename('MNDWI 1996');
  var ndmi1996 = b5_1996.subtract(b6_1996).divide(b5_1996.add(b6_1996)).rename('NDMI 1996');
  var bluer1996 = b2_1996.divide(b2_1996.add(b4_1996)).rename('BlueRatio 1996');
  var swmi1996 = mndwi1996.multiply(0.6)
    .add(ndmi1996.abs().multiply(-0.3).add(0.3))
    .add(bluer1996.multiply(2).subtract(1).multiply(0.1))
    .rename('SWMI 1996');
  return medianImage1996.addBands([mndwi1996, ndmi1996, bluer1996, swmi1996]);
}
var withIndex1996 = addSWMI1996(medianImage1996);

var composite1996 = withIndex1996.clip(roi);
Map.addLayer(composite1996.select('SWMI 1996'), swmiVis, 'SWMI 1996');

var waterMask1996 = composite1996.select('SWMI 1996').gt(0.22);
Map.addLayer(
  waterMask1996.updateMask(waterMask1996),
  {palette: ['#00BFFF']},
  'SWMI water mask 1996'
);

var pixelArea1996 = ee.Image.pixelArea().clip(roi).updateMask(waterMask1996);
var areaSum1996 = pixelArea1996.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.sum(),
  geometry: roi,
  scale: 30,
  maxPixels: 1e9
});
print('Water area (m2) by SWMI mask 1996:', areaSum1996);

var waterAreaImg1996 = ee.Image.pixelArea()
  .updateMask(waterMask1996);
var lakesWater1996 = lakes1988.map(function(feature) {
  var areaWater1996 = waterAreaImg1996.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.sum(),
    geometry: feature.geometry(),
  });
});

```

```

    scale: 30,
    maxPixels: 1e9
  }).get('area');
  return feature.set({
    'water_area_m2_1996': areaWater1996,
    'water_area_ha_1996': ee.Number(areaWater1996).divide(10000)
  });
});

print('Water area inside each lake (1996):', lakesWater1996);

var chart1996 = ui.Chart.feature.byFeature({
  features: lakesWater1996,
  xProperty: 'name',
  yProperties: ['water_area_ha_1996']
})
.setChartType('ColumnChart')
.setSeriesNames(['Площа води, га'])
.setOptions({
  title: 'Площа води в озерах (1996)',
  hAxis: {title: 'Озеро'},
  vAxis: {title: 'Площа води, га'},
  legend: {position: 'none'},
  colors: ['#00A2FF']
});
print(chart1996);

//PIK 2002
var startYear2002 = 2002;
var endYear2002 = 2002;
var startDate2002 = startYear2002 + '-07-01';
var endDate2002 = endYear2002 + '-07-30';
function maskLandsat7(imageCollection3) {
  var qa2002 = imageCollection3.select('QA_PIXEL');
  var cloud2002 = qa2002.bitwiseAnd(1 << 3).neq(0);
  var cloudShadow2002 = qa2002.bitwiseAnd(1 << 4).neq(0);
  var masked2002 = imageCollection3.updateMask(cloud2002.not()).updateMask(cloudShadow2002.not());
  return masked2002;
}
var collection2002 = ee.ImageCollection("LANDSAT/LE07/C02/T1_L2")
  .filterBounds(roi)
  .filterDate(startDate2002, endDate2002)
  .filter(ee.Filter.lt('CLOUD_COVER', 5))
  .map(maskLandsat7);
print('Кількість знімків 2002:', collection2002.size());
print('Всі знімки: 2002', collection2002);

var medianImage2002 = collection2002.median();
Map.addLayer(medianImage2002.clip(roi), imageVisParam, 'Median Image 2002');

function addSWMI2002(medianImage2002) {
  var b2_2002 = medianImage2002.select('SR_B1');
  var b3_2002 = medianImage2002.select('SR_B2');
  var b4_2002 = medianImage2002.select('SR_B3');
  var b5_2002 = medianImage2002.select('SR_B4');
  var b6_2002 = medianImage2002.select('SR_B5');
  var mndwi2002 = b3_2002.subtract(b6_2002).divide(b3_2002.add(b6_2002)).rename('MNDWI 2002');
  var ndmi2002 = b5_2002.subtract(b6_2002).divide(b5_2002.add(b6_2002)).rename('NDMI 2002');
  var bluer2002 = b2_2002.divide(b2_2002.add(b4_2002)).rename('BlueRatio 2002');
  var swmi2002 = mndwi2002.multiply(0.6)
    .add(ndmi2002.abs()).multiply(-0.3).add(0.3)
    .add(bluer2002.multiply(2).subtract(1).multiply(0.1))
    .rename('SWMI 2002');
  return medianImage2002.addBands([mndwi2002, ndmi2002, bluer2002, swmi2002]);
}
var withIndex2002 = addSWMI2002(medianImage2002);

var composite2002 = withIndex2002.clip(roi);
Map.addLayer(composite2002.select('SWMI 2002'), swmiVis, 'SWMI 2002');

var waterMask2002 = composite2002.select('SWMI 2002').gt(0.21);
Map.addLayer(
  waterMask2002.updateMask(waterMask2002),
  {palette: ['#00BFFF']},
  'SWMI water mask 2002'
);
var pixelArea2002 = ee.Image.pixelArea().clip(roi).updateMask(waterMask2002);

```

```

var areaSum2002 = pixelArea2002.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.sum(),
  geometry: roi,
  scale: 30,
  maxPixels: 1e9
});
print('Water area (m2) by SWMI mask 2002:', areaSum2002);
var waterAreaImg2002 = ee.Image.pixelArea()
  .updateMask(waterMask2002);
var lakesWater2002 = lakes1988.map(function(feature) {
  var areaWater2002 = waterAreaImg2002.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.sum(),
    geometry: feature.geometry(),
    scale: 30,
    maxPixels: 1e9
  }).get('area');
  return feature.set({
    'water_area_m2_2002': areaWater2002,
    'water_area_ha_2002': ee.Number(areaWater2002).divide(10000)
  });
});
print('Water area inside each lake (2002):', lakesWater2002);

var chart2002 = ui.Chart.feature.byFeature({
  features: lakesWater2002,
  xProperty: 'name',
  yProperties: ['water_area_ha_2002']
})
.setChartType('ColumnChart')
.setSeriesNames(['Площа води, га'])
.setOptions({
  title: 'Площа води в озерах (2002)',
  hAxis: {title: 'Озеро'},
  vAxis: {title: 'Площа води, га'},
  legend: {position: 'none'},
  colors: ['#00A2FF']
});
print(chart2002);

// PIK 2007

var startYear2007 = 2007;
var endYear2007 = 2007;
var startDate2007 = startYear2007 + '-07-01';
var endDate2007 = endYear2007 + '-09-30';
var collection2007 = ee.ImageCollection("LANDSAT/LT05/C02/T1_L2")
  .filterBounds(roi)
  .filterDate(startDate2007, endDate2007)
  .map(maskLandsat5)
  .filter(ee.Filter.lt('CLOUD_COVER', 5))
  .map(maskLandsat5);
print('Кількість знімків 2007:', collection2007.size());
print('Всі знімки: 2007', collection2007);

var medianImage2007 = collection2007.median();
Map.addLayer(medianImage2007.clip(roi), imageVisParam, 'Median Image 2007');

function addSWMI2007(medianImage2007) {
  var b2_2007 = medianImage2007.select('SR_B1');
  var b3_2007 = medianImage2007.select('SR_B2');
  var b4_2007 = medianImage2007.select('SR_B3');
  var b5_2007 = medianImage2007.select('SR_B4');
  var b6_2007 = medianImage2007.select('SR_B5');
  var mndwi2007 = b3_2007.subtract(b6_2007).divide(b3_2007.add(b6_2007)).rename('MNDWI 2007');
  var ndmi2007 = b5_2007.subtract(b6_2007).divide(b5_2007.add(b6_2007)).rename('NDMI 2007');
  var bluer2007 = b2_2007.divide(b2_2007.add(b4_2007)).rename('BlueRatio 2007');
  var swmi2007 = mndwi2007.multiply(0.6)
    .add(ndmi2007.abs().multiply(-0.3).add(0.3))
    .add(bluer2007.multiply(2).subtract(1).multiply(0.1))
    .rename('SWMI 2007');
  return medianImage2007.addBands([mndwi2007, ndmi2007, bluer2007, swmi2007]);
}

var withIndex2007 = addSWMI2007(medianImage2007);

var composite2007 = withIndex2007.clip(roi);
Map.addLayer(composite2007.select('SWMI 2007'), swmiVis, 'SWMI 2007');

```

```

var waterMask2007 = composite2007.select('SWMI 2007').gt(0.22);
Map.addLayer(
  waterMask2007.updateMask(waterMask2007),
  {palette: ['#00BFFF']},
  'SWMI water mask 2007'
);
var pixelArea2007 = ee.Image.pixelArea().clip(roi).updateMask(waterMask2007);
var areaSum2007 = pixelArea2007.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.sum(),
  geometry: roi,
  scale: 30,
  maxPixels: 1e9
});
print('Water area (m2) by SWMI mask 2007:', areaSum2007);
var waterAreaImg2007 = ee.Image.pixelArea()
  .updateMask(waterMask2007);
var lakesWater2007 = lakes1988.map(function(feature) {
  var areaWater2007 = waterAreaImg2007.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.sum(),
    geometry: feature.geometry(),
    scale: 30,
    maxPixels: 1e9
  }).get('area');
  return feature.set({
    'water_area_m2_2007': areaWater2007,
    'water_area_ha_2007': ee.Number(areaWater2007).divide(10000)
  });
});
print('Water area inside each lake (2007):', lakesWater2007);

var chart2007 = ui.Chart.feature.byFeature({
  features: lakesWater2007,
  xProperty: 'name',
  yProperties: ['water_area_ha_2007']
})
.setChartType('ColumnChart')
.setSeriesNames(['Площа води, га'])
.setOptions({
  title: 'Площа води в озерах (2007)',
  hAxis: {title: 'Озеро'},
  vAxis: {title: 'Площа води, га'},
  legend: {position: 'none'},
  colors: ['#00A2FF']
});
print(chart2007);

// PIK 2011

var startYear2011 = 2011;
var endYear2011 = 2011;
var startDate2011 = startYear2011 + '-07-01';
var endDate2011 = endYear2011 + '-09-30';

var collection2011 = ee.ImageCollection("LANDSAT/LT05/C02/T1_L2")
  .filterBounds(roi)
  .filterDate(startDate2011, endDate2011)
  .filter(ee.Filter.lt('CLOUD_COVER', 5))
  .map(maskLandsat5);
print('Кількість знімків 2011:', collection2011.size());
print('Всі знімки: 2011', collection2011);

var medianImage2011 = collection2011 .median();
Map.addLayer(medianImage2011 .clip(roi), imageVisParam, 'Median Image 2011');

function addSWMI2011(medianImage2011) {
  var b2_2011 = medianImage2011.select('SR_B1');
  var b3_2011 = medianImage2011.select('SR_B2');
  var b4_2011 = medianImage2011.select('SR_B3');
  var b5_2011 = medianImage2011.select('SR_B4');
  var b6_2011 = medianImage2011.select('SR_B5');
  var mndwi2011 = b3_2011.subtract(b6_2011).divide(b3_2011.add(b6_2011)).rename('MNDWI 2011');
  var ndmi2011 = b5_2011.subtract(b6_2011).divide(b5_2011.add(b6_2011)).rename('NDMI 2011');
  var bluer2011 = b2_2011.divide(b2_2011.add(b4_2011)).rename('BlueRatio 2011');
  var swmi2011 = mndwi2011.multiply(0.6)
    .add(ndmi2011.abs().multiply(-0.3).add(0.3))
    .add(bluer2011.multiply(2).subtract(1).multiply(0.1))
}

```

```

        .rename('SWMI 2011');
    return medianImage2011.addBands([mndwi2011, ndmi2011, bluer2011, swmi2011]);
}

var withIndex2011 = addSWMI2011(medianImage2011);
var composite2011 = withIndex2011.clip(roi);
Map.addLayer(composite2011.select('SWMI 2011'), swmiVis, 'SWMI 2011');
var waterMask2011 = composite2011.select('SWMI 2011').gt(0.23);
Map.addLayer(
    waterMask2011.updateMask(waterMask2011),
    {palette: ['#00BFFF']},
    'SWMI water mask 2011'
);
var pixelArea2011 = ee.Image.pixelArea().clip(roi).updateMask(waterMask2011);
var areaSum2011 = pixelArea2011.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.sum(),
    geometry: roi,
    scale: 30,
    maxPixels: 1e9
});
print('Water area (m2) by SWMI mask 2011:', areaSum2011);

var waterAreaImg2011 = ee.Image.pixelArea()
    .updateMask(waterMask2011);
var lakesWater2011 = lakes1988.map(function(feature) {
    var areaWater2011 = waterAreaImg2011.reduceRegion({
        reducer: ee.Reducer.sum(),
        geometry: feature.geometry(),
        scale: 30,
        maxPixels: 1e9
    }).get('area');
    return feature.set({
        'water_area_m2_2011': areaWater2011,
        'water_area_ha_2011': ee.Number(areaWater2011).divide(10000)
    });
});

print('Water area inside each lake (2011):', lakesWater2011);
var chart2011 = ui.Chart.feature.byFeature({
    features: lakesWater2011,
    xProperty: 'name',
    yProperties: ['water_area_ha_2011']
})
.setChartType('ColumnChart')
.setSeriesNames(['Площа води, га'])
.setOptions({
    title: 'Площа води в озерах (2011)',
    hAxis: {title: 'Озеро'},
    vAxis: {title: 'Площа води, га'},
    legend: {position: 'none'},
    colors: ['#00A2FF']
});

print(chart2011);

// PIK 2016

var startYear2016 = 2016;
var endYear2016 = 2016;
var startDate2016 = startYear2016 + '-07-01';
var endDate2016 = endYear2016 + '-09-30';
function maskLandsat8(imageCollection4) {
    var qa8 = imageCollection4.select('QA_PIXEL');
    var cloud8 = qa8.bitwiseAnd(1 << 3).neq(0);
    var cloudShadow8 = qa8.bitwiseAnd(1 << 4).neq(0);
    return imageCollection4.updateMask(cloud8.not())
        .updateMask(cloudShadow8.not());
}
var collection2016 = ee.ImageCollection("LANDSAT/LC08/C02/T1_L2")
    .filterBounds(roi)
    .filterDate(startDate2016, endDate2016)
    .map(maskLandsat8)
    .filter(ee.Filter.lt('CLOUD_COVER', 5));
print('Кількість знімків 2016:', collection2016.size());
print('Всі знімки: 2016', collection2016);

var medianImage2016 = collection2016.median();
Map.addLayer(medianImage2016.clip(roi), imageVisParam2, 'Median Image 2016');

```

```

function addSWMI2016(medianImage2016) {
  var b2_2016 = medianImage2016.select('SR_B2');
  var b3_2016 = medianImage2016.select('SR_B3');
  var b4_2016 = medianImage2016.select('SR_B4');
  var b5_2016 = medianImage2016.select('SR_B5');
  var b6_2016 = medianImage2016.select('SR_B6');
  var mndwi2016 = b3_2016.subtract(b6_2016).divide(b3_2016.add(b6_2016)).rename('MNDWI 2016');
  var ndmi2016 = b5_2016.subtract(b6_2016).divide(b5_2016.add(b6_2016)).rename('NDMI 2016');
  var bluer2016 = b2_2016.divide(b2_2016.add(b4_2016)).rename('BlueRatio 2016');
  var swmi2016 = mndwi2016.multiply(0.6)
    .add(ndmi2016.abs().multiply(-0.3).add(0.3))
    .add(bluer2016.multiply(2).subtract(1).multiply(0.1))
    .rename('SWMI 2016');
  return medianImage2016.addBands([mndwi2016, ndmi2016, bluer2016, swmi2016]);
}
var withIndex2016 = addSWMI2016(medianImage2016);
var composite2016 = withIndex2016.clip(roi);
Map.addLayer(composite2016.select('SWMI 2016'), swmiVis, 'SWMI 2016');
var waterMask2016 = composite2016.select('SWMI 2016').gt(0.23);
Map.addLayer(
  waterMask2016.updateMask(waterMask2016),
  {palette: ['#00BFFF']},
  'SWMI water mask 2016'
);

var pixelArea2016 = ee.Image.pixelArea().clip(roi).updateMask(waterMask2016);
var areaSum2016 = pixelArea2016.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.sum(),
  geometry: roi,
  scale: 30,
  maxPixels: 1e9
});
print('Water area (m2) by SWMI mask 2016:', areaSum2016);

var waterAreaImg2016 = ee.Image.pixelArea()
  .updateMask(waterMask2016);
var lakesWater2016 = lakes1988.map(function(feature) {
  var areaWater2016 = waterAreaImg2016.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.sum(),
    geometry: feature.geometry(),
    scale: 30,
    maxPixels: 1e9
  }).get('area');
  return feature.set({
    'water_area_m2_2016': areaWater2016,
    'water_area_ha_2016': ee.Number(areaWater2016).divide(10000)
  });
});
print('Water area inside each lake (2016):', lakesWater2016);

var chart2016 = ui.Chart.feature.byFeature({
  features: lakesWater2016,
  xProperty: 'name',
  yProperties: ['water_area_ha_2016']
})
.setChartType('ColumnChart')
.setSeriesNames(['Площа води, га'])
.setOptions({
  title: 'Площа води в озерах (2016)',
  hAxis: {title: 'Озеро'},
  vAxis: {title: 'Площа води, га'},
  legend: {position: 'none'},
  colors: ['#00A2FF']
});
print(chart2016);

// PIK 2021

var startYear2021 = 2021;
var endYear2021 = 2021;
var startDate2021 = startYear2021 + '-05-01';
var endDate2021 = endYear2021 + '-09-30';
var collection2021 = ee.ImageCollection("LANDSAT/LC08/C02/T1_L2")
  .filterBounds(roi)
  .filterDate(startDate2021, endDate2021)
  .filter(ee.Filter.lt('CLOUD_COVER', 10))
  .map(maskLandsat8);
print('Кількість знімків 2021:', collection2021.size());

```

```

print('Всі знімки: 2021', collection2021);

var medianImage2021 = collection2021.median();
Map.addLayer(medianImage2021.clip(roi), imageVisParam2, 'Median Image 2021');

function addSWMI2021(medianImage2021) {
  var b2_2021 = medianImage2021.select('SR_B2');
  var b3_2021 = medianImage2021.select('SR_B3');
  var b4_2021 = medianImage2021.select('SR_B4');
  var b5_2021 = medianImage2021.select('SR_B5');
  var b6_2021 = medianImage2021.select('SR_B6');
  var mndwi2021 = b3_2021.subtract(b6_2021).divide(b3_2021.add(b6_2021)).rename('MNDWI 2021');
  var ndmi2021 = b5_2021.subtract(b6_2021).divide(b5_2021.add(b6_2021)).rename('NDMI 2021');
  var bluer2021 = b2_2021.divide(b2_2021.add(b4_2021)).rename('BlueRatio 2021');
  var swmi2021 = mndwi2021.multiply(0.6)
    .add(ndmi2021.abs().multiply(-0.3).add(0.3))
    .add(bluer2021.multiply(2).subtract(1).multiply(0.1))
    .rename('SWMI 2021');
  return medianImage2021.addBands([mndwi2021, ndmi2021, bluer2021, swmi2021]);
}
var withIndex2021 = addSWMI2021(medianImage2021);

var composite2021 = withIndex2021.clip(roi);
Map.addLayer(composite2021.select('SWMI 2021'), swmiVis, 'SWMI 2021');

var waterMask2021 = composite2021.select('SWMI 2021').gt(0.23);
Map.addLayer(
  waterMask2021.updateMask(waterMask2021),
  {palette: ['#00BFFF']},
  'SWMI water mask 2021'
);

var pixelArea2021 = ee.Image.pixelArea().clip(roi).updateMask(waterMask2021);
var areaSum2021 = pixelArea2021.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.sum(),
  geometry: roi,
  scale: 30,
  maxPixels: 1e9
});
print('Water area (m2) by SWMI mask 2021:', areaSum2021);

var waterAreaImg2021 = ee.Image.pixelArea()
  .updateMask(waterMask2021);
var lakesWater2021 = lakes1988.map(function(feature) {
  var areaWater2021 = waterAreaImg2021.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.sum(),
    geometry: feature.geometry(),
    scale: 30,
    maxPixels: 1e9
  }).get('area');
  return feature.set({
    'water_area_m2_2021': areaWater2021,
    'water_area_ha_2021': ee.Number(areaWater2021).divide(10000)
  });
});
print('Water area inside each lake (2021):', lakesWater2021);

Діаграма площі озер за 2021 рік (м²)
var chart2021 = ui.Chart.feature.byFeature({
  features: lakesWater2021,
  xProperty: 'name',
  yProperties: ['water_area_ha_2021']
})
.setChartType('ColumnChart')
.setSeriesNames(['Площа води, га'])
.setOptions({
  title: 'Площа води в озерах (2021)',
  hAxis: {title: 'Озеро'},
  vAxis: {title: 'Площа води, га'},
  legend: {position: 'none'},
  colors: ['#00A2FF']
});

print(chart2021);

// ПІК 2025
var startYear2025 = 2025;

```

```

var endYear2025 = 2025;
var startDate2025 = startYear2025 + '-05-01';
var endDate2025 = endYear2025 + '-09-30';
var collection2025 = ee.ImageCollection("LANDSAT/LC08/C02/T1_L2")
  .filterBounds(roi)
  .filterDate(startDate2025, endDate2025)
  .filter(ee.Filter.lt('CLOUD_COVER', 40))
  .map(maskLandsat8);
print('Кількість знімків 2025:', collection2025.size());
print('Всі знімки: 2025', collection2025);
var medianImage2025 = collection2025.median();
Map.addLayer(medianImage2025.clip(roi), imageVisParam2, 'Median Image 2025');

function addSWMI2025(medianImage2025) {
  var b2_2025 = medianImage2025.select('SR_B2');
  var b3_2025 = medianImage2025.select('SR_B3');
  var b4_2025 = medianImage2025.select('SR_B4');
  var b5_2025 = medianImage2025.select('SR_B5');
  var b6_2025 = medianImage2025.select('SR_B6');
  var mndwi_2025 = b3_2025.subtract(b6_2025).divide(b3_2025.add(b6_2025)).rename('MNDWI_2025');
  var ndmi_2025 = b5_2025.subtract(b6_2025).divide(b5_2025.add(b6_2025)).rename('NDMI_2025');
  var bluer_2025 = b2_2025.divide(b2_2025.add(b4_2025)).rename('BlueRatio_2025');
  var swmi_2025 = mndwi_2025.multiply(0.6)
    .add(ndmi_2025.abs().multiply(-0.3).add(0.3))
    .add(bluer_2025.multiply(2).subtract(1).multiply(0.1))
    .rename('SWMI 2025');
  return medianImage2025.addBands([mndwi_2025, ndmi_2025, bluer_2025, swmi_2025]);
}

var withIndex2025 = addSWMI2025(medianImage2025);
var composite2025 = withIndex2025.clip(roi);
Map.addLayer(composite2025.select('SWMI 2025'), swmiVis, 'SWMI 2025');

var waterMask2025 = composite2025.select('SWMI 2025').gt(0.23);
Map.addLayer(
  waterMask2025.updateMask(waterMask2025),
  {palette: ['blue']},
  'SWMI water mask 2025'
);

var pixelArea2025 = ee.Image.pixelArea().clip(roi).updateMask(waterMask2025);
var areaSum2025 = pixelArea2025.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.sum(),
  geometry: roi,
  scale: 30,
  maxPixels: 1e9
});
print('Water area (m2) by SWMI mask 2025:', areaSum2025);
var waterAreaImg2025 = ee.Image.pixelArea()
  .updateMask(waterMask2025);
var lakesWater2025 = lakes1988.map(function(feature) {
  var areaWater2025 = waterAreaImg2025.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.sum(),
    geometry: feature.geometry(),
    scale: 30,
    maxPixels: 1e9
  }).get('area');
  return feature.set({
    'water_area_m2_2025': areaWater2025,
    'water_area_ha_2025': ee.Number(areaWater2025).divide(10000)
  });
});

print('Water area inside each lake (2025):', lakesWater2025);

var chart2025 = ui.Chart.feature.byFeature({
  features: lakesWater2025,
  xProperty: 'name',
  yProperties: ['water_area_ha_2025']
})
.setChartType('ColumnChart')
.setSeriesNames(['Площа води, га'])
.setOptions({
  title: 'Площа води в озерах (2025)',
  hAxis: {title: 'Озеро'},
  vAxis: {title: 'Площа води, га'},
  legend: {position: 'none'},
  colors: ['#00A2FF']
});

```

```

});

print(chart2025);

var waterVectors2025 = waterMask2025.reduceToVectors({
  geometry: roi,
  scale: 30,
  geometryType: 'polygon',
  eightConnected: false,
  labelProperty: 'water',
  maxPixels: 1e9
});

print('Properties of waterVectors:', waterVectors1988.first());

Export.table.toDrive({
  collection: waterVectors2025,
  description: 'waterVectors2025_export',
  fileFormat: 'SHP',
  folder: 'GEE_Exports'
});

Export.image.toDrive({
  image: waterMask2025.rename('water_mask_2025'),
  description: 'water_mask_2025_export',
  folder: 'GEE_exports',
  fileNamePrefix: 'water_mask_2025',
  region: roi,
  scale: 30,
  maxPixels: 1e13
});

// -----
// ГЕОІНФОРМАЦІЙНИЙ АНАЛІЗ
// -----
var allYears = lakesWater1988.map(function(feature) {
  var name = feature.get('name');
  var y1994 = lakesWater1994.filter(ee.Filter.eq('name', name)).first();
  var y1996 = lakesWater1996.filter(ee.Filter.eq('name', name)).first();
  var y2002 = lakesWater2002.filter(ee.Filter.eq('name', name)).first();
  var y2007 = lakesWater2007.filter(ee.Filter.eq('name', name)).first();
  var y2011 = lakesWater2011.filter(ee.Filter.eq('name', name)).first();
  var y2016 = lakesWater2016.filter(ee.Filter.eq('name', name)).first();
  var y2021 = lakesWater2021.filter(ee.Filter.eq('name', name)).first();
  var y2025 = lakesWater2025.filter(ee.Filter.eq('name', name)).first();
  return feature.set({
    'water_ha_1988': feature.get('water_area_ha_1988'),
    'water_ha_1994': y1994.get('water_area_ha_1994'),
    'water_ha_1996': y1996.get('water_area_ha_1996'),
    'water_ha_2002': y2002.get('water_area_ha_2002'),
    'water_ha_2007': y2007.get('water_area_ha_2007'),
    'water_ha_2011': y2011.get('water_area_ha_2011'),
    'water_ha_2016': y2016.get('water_area_ha_2016'),
    'water_ha_2021': y2021.get('water_area_ha_2021'),
    'water_ha_2025': y2025.get('water_area_ha_2025')
  });
});

print('Таблиця площі води всіх озер (га) за роками до 2025:', allYears);

Export.table.toDrive({
  collection: allYears,
  description: 'WaterArea_Lakes_1988_2025',
  fileFormat: 'CSV'
});

var addAnnualChange = function(feature) {
  var years = [1988, 1994, 1996, 2002, 2007, 2011, 2016, 2021, 2025];
  var updated = feature;
  for (var i = 1; i < years.length; i++) {
    var prevYear = years[i-1];
    var currYear = years[i];
    var prevArea = ee.Number(feature.get('water_ha_' + prevYear));
    var currArea = ee.Number(feature.get('water_ha_' + currYear));

    //  $\Delta S_{\text{пiчн}} = (S_t - S_{(t-1)}) / S_{(t-1)} * 100$ 
    var delta = currArea.subtract(prevArea)

```

```

                .divide(prevArea)
                .multiply(100);

        updated = updated.set('delta_' + prevYear + '_' + currYear, delta);
    }
    return updated;
};

var lakesWithDelta = allYears.map(addAnnualChange);

print('Таблиця з річними змінами (%)', lakesWithDelta);

Export.table.toDrive({
    collection: lakesWithDelta,
    description: 'WaterArea_Lakes_1988_2025_AnnualChange',
    fileFormat: 'CSV'
});

// -----
// Аномальні роки
//-----

var years = ee.List([1988, 1994, 1996, 2002, 2007, 2011, 2016, 2021, 2025]);

var lakesWithDeltas = allYears.map(function(f) {

    var areas = years.map(function(y) {
        var key = ee.String('water_ha_').cat(ee.Number(y).format());
        return f.getNumber(key);
    });

    areas = ee.List(areas).removeAll([null]);

    var count = areas.length();
    f = f.set('values_count', count);

    var condition = ee.Algorithms.If(
        ee.Number(count).lt(2),
        f.set('deltas', ee.List([])).set('delta_mean', 0).set('delta_stdDev', 0).set('delta_anomalies',
        ee.List([])),
        (function() {
            var idx = ee.List.sequence(1, ee.Number(areas.length()).subtract(1));
            var deltas = idx.map(function(i) {
                i = ee.Number(i);
                var prev = ee.Number(areas.get(i.subtract(1)));
                var curr = ee.Number(areas.get(i));
                return ee.Algorithms.If(
                    prev.eq(0),
                    ee.Number(0),
                    curr.subtract(prev).divide(prev).multiply(100)
                );
            });

            deltas = ee.List(deltas);

            var mean = ee.Number(deltas.reduce(ee.Reducer.mean()));
            var stdDev = ee.Number(deltas.reduce(ee.Reducer.stdDev()));
            stdDev = ee.Algorithms.If(ee.Algorithms.IsEqual(stdDev, null), 0, stdDev);
            stdDev = ee.Number(stdDev);
            var anomalies = deltas.map(function(d) {
                d = ee.Number(d);
                return d.abs().gt(stdDev);
            });
            return f.set({
                'deltas': deltas,
                'delta_mean': mean,
                'delta_stdDev': stdDev,
                'delta_anomalies': anomalies
            });
        })()
    );

    return ee.Feature(condition);
});

print('FeatureCollection з дельтами та аномаліями', lakesWithDeltas);

var AnomalyTable = lakesWithDeltas.map(function(f) {

```

```

return f.set({
  deltas_str: ee.List(f.get('deltas')).join(', '),
  anomalies_str: ee.List(f.get('delta_anomalies')).join(', ')
});
});

print('У форматі CSV-рядків:', AnomalyTable);

Export.table.toDrive({
  collection: AnomalyTable,
  description: 'LakeAreaDeltas_table',
  fileFormat: 'CSV'
});

// -----
// Тест Манна-Кендалла
// -----
function mannKendall(valuesList) {
  valuesList = ee.List(valuesList);
  var n = ee.Number(valuesList.length());
  var emptyResult = ee.Dictionary({
    S: ee.Number(0),
    varS: ee.Number(0),
    Z: ee.Number(0),
    pValue: ee.Number(1)
  });
  return ee.Algorithms.If(
    n.lt(2),
    emptyResult,
    ee.Dictionary(
      (function() {
        var idxList = ee.List.sequence(0, n.subtract(1));
        var S = ee.Number(
          idxList.iterate(function(i, acc) {
            i = ee.Number(i);
            var inner = ee.List.sequence(i.add(1), n.subtract(1));
            var innerSum = ee.Number(inner.iterate(function(j, acc2) {
              j = ee.Number(j);
              var diff = ee.Number(valuesList.get(j)).subtract(ee.Number(valuesList.get(i)));
              var sgn = diff.gt(0).multiply(1).add(diff.lt(0).multiply(-1));
              return ee.Number(acc2).add(ee.Number(sgn));
            }, 0));
            return ee.Number(acc).add(innerSum);
          }, 0)
        );
        var varS = n.multiply(n.subtract(1)).multiply(n.multiply(2).add(5)).divide(18);
        var Z = ee.Algorithms.If(
          S.gt(0),
          S.subtract(1).divide(varS.sqrt()),
          ee.Algorithms.If(
            S.lt(0),
            S.add(1).divide(varS.sqrt()),
            ee.Number(0)
          )
        );
        Z = ee.Number(Z);
        var absZ = Z.abs();
        var p = ee.Number(1).subtract(absZ.divide(ee.Number(2).sqrt()).erf());
        p = ee.Number(p).max(0).min(1);
        return {
          S: S,
          varS: varS,
          Z: Z,
          pValue: p
        };
      })()
    )
  );
}

var resultsTable = allYears.map(function(f) {
  f = ee.Feature(f);
  var areas = years.map(function(y) {
    var key = ee.String('water_ha_').cat(ee.Number(y).format());
    return f.get(key);
  });
  areas = ee.List(areas).removeAll([null]).map(function(x) { return ee.Number(x); });
});

```

```

var mk = ee.Dictionary(mannKendall(areas));
var Z = ee.Number(mk.get('Z'));
var trend = ee.Algorithms.If(Z.gt(0), 'increasing',
    ee.Algorithms.If(Z.lt(0), 'decreasing', 'no_trend'));
return f.set({
  'MK_S': mk.get('S'),
  'MK_varS': mk.get('varS'),
  'MK_Z': mk.get('Z'),
  'MK_pValue': mk.get('pValue'),
  'MK_trend': trend,
  'used_points': areas.length()
});
});
print('Results Table (Mann-Kendall per lake):', resultsTable);
var significant = resultsTable.filter(ee.Filter.lt('MK_pValue', 0.05));
print('Озера зі статистично значущим трендом (p < 0.05):', significant);
Export.table.toDrive({
  collection:
resultsTable.select(['name', 'used_points', 'MK_S', 'MK_varS', 'MK_Z', 'MK_pValue', 'MK_trend']),
  description: 'MannKendall_By_Lake',
  fileFormat: 'CSV'
});
// Графічні візуалізації
function chartLake(lakeFeature) {
  var lakeName = lakeFeature.get('name');
  var areas = ee.List([
    lakeFeature.get('water_ha_1988'),
    lakeFeature.get('water_ha_1994'),
    lakeFeature.get('water_ha_1996'),
    lakeFeature.get('water_ha_2002'),
    lakeFeature.get('water_ha_2007'),
    lakeFeature.get('water_ha_2011'),
    lakeFeature.get('water_ha_2016'),
    lakeFeature.get('water_ha_2021'),
    lakeFeature.get('water_ha_2025')
  ]);
  areas = areas.map(function(a) { return ee.Algorithms.If(ee.Algorithms.IsEqual(a, null), 0, a); });
  var years = ee.List([1988, 1994, 1996, 2002, 2007, 2011, 2016, 2021, 2025]);
  var chartData = ee.FeatureCollection(
    years.zip(areas).map(function(yrArea) {
      yrArea = ee.List(yrArea);
      return ee.Feature(null, {
        year: yrArea.get(0),
        area: yrArea.get(1)
      });
    })
  );
  var trend = chartData.reduceColumns({
    reducer: ee.Reducer.linearFit(),
    selectors: ['year', 'area']
  });
  var slope = trend.get('scale');
  var intercept = trend.get('offset');
  var trendLine = chartData.map(function(f) {
    var year = ee.Number(f.get('year'));
    var predicted = ee.Number(slope).multiply(year).add(ee.Number(intercept));
    return ee.Feature(null, {
      year: year,
      trend: predicted
    });
  });
  var chart = ui.Chart.feature.byFeature(chartData, 'year', 'area')
    .setSeriesNames(['Фактична площа'])
    .setOptions({
      title: 'Динаміка площі водної поверхні: '+ lakeName.getInfo(),
      hAxis: {title: 'Рік'},
      vAxis: {title: 'Площа (га)'},
      lineWidth: 2,
      pointSize: 4
    });
  var trendChart = ui.Chart.feature.byFeature(trendLine, 'year', 'trend')
    .setSeriesNames(['Тренд'])
    .setOptions({
      title: 'Крива тренду для озера: '+ lakeName.getInfo(),
      lineWidth: 2,
      pointSize: 0,
      colors: ['red']
    });
};

```

```

    print(chart);
    print(trendChart);
}

allYears.toList(allYears.size()).evaluate(function(list){
    list.forEach(function(lakeDict){
        var lakeFeature = ee.Feature(lakeDict);
        chartLake(lakeFeature);
    });
});

var barChart = ui.Chart.feature.byFeature({
    features: resultsTable,
    xProperty: 'name',
    yProperties: ['MK_Z']
})
.setChartType('ColumnChart')
.setOptions({
    title: 'Mann-Kendall Z-Statistic по озерах',
    legend: { position: 'none' },
    hAxis: {
        title: 'Озеро',
        slantedText: true,
        slantedTextAngle: 45
    },
    vAxis: {
        title: 'Z-значення (трендовість)',
        baseline: 0
    },
    colors: ['#1f77b4'],
    bar: { groupWidth: '70%' }
});
print(barChart);

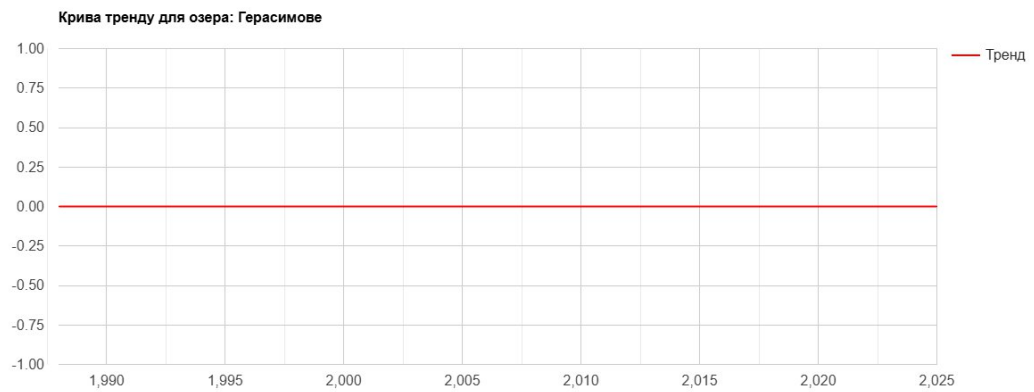
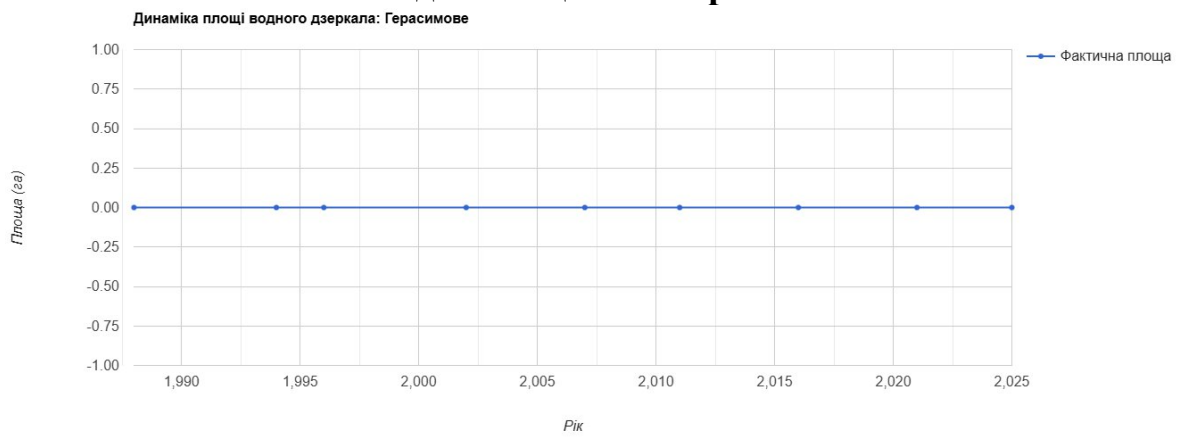
var barChartP = ui.Chart.feature.byFeature({
    features: resultsTable,
    xProperty: 'name',
    yProperties: ['MK_pValue']
})
.setChartType('ColumnChart')
.setOptions({
    title: 'Mann-Kendall pValue по озерах',
    legend: { position: 'none' },
    hAxis: { title: 'Озеро', slantedText: true, slantedTextAngle: 45 },
    vAxis: { title: 'p-value (0-1)' },
    colors: ['#d62728']
});
print(barChartP);

var createLakeTable = function(feature) {
    var lakeName = feature.get('name');
    var areas = years.map(function(y) {
        return ee.Number(ee.Algorithms.If(feature.get('water_ha_' + y), feature.get('water_ha_' + y), 0));
    });
    var deltas = ee.List.sequence(1, years.size().subtract(1)).map(function(i) {
        var prev = ee.Number(areas.get(ee.Number(i).subtract(1)));
        var curr = ee.Number(areas.get(i));
        var deltaHa = curr.subtract(prev);
        var deltaPerc = ee.Algorithms.If(prev.neq(0), deltaHa.divide(prev).multiply(100), null);
        return ee.Dictionary({deltaHa: deltaHa, deltaPerc: deltaPerc});
    });
    var maxArea = areas.reduce(ee.Reducer.max());
    var minArea = areas.reduce(ee.Reducer.min());
    var maxIndex = areas.map(function(a){ return ee.Number(a).eq(maxArea); }).indexOf(1);
    var minIndex = areas.map(function(a){ return ee.Number(a).eq(minArea); }).indexOf(1);
    var yearMax = years.get(maxIndex);
    var yearMin = years.get(minIndex);
    var tableFeatures = ee.List.sequence(0, years.size().subtract(1)).map(function(i) {
        var deltaDict = ee.Dictionary(ee.Algorithms.If(ee.Number(i).eq(0),
            ee.Dictionary({deltaHa: null, deltaPerc: null}),
            deltas.get(ee.Number(i).subtract(1))
        ));
        return ee.Feature(null, {
            lake: lakeName,
            year: years.get(i),
            area_ha: areas.get(i),
            delta_ha: deltaDict.get('deltaHa'),
            delta_perc: deltaDict.get('deltaPerc'),
        });
    });
};

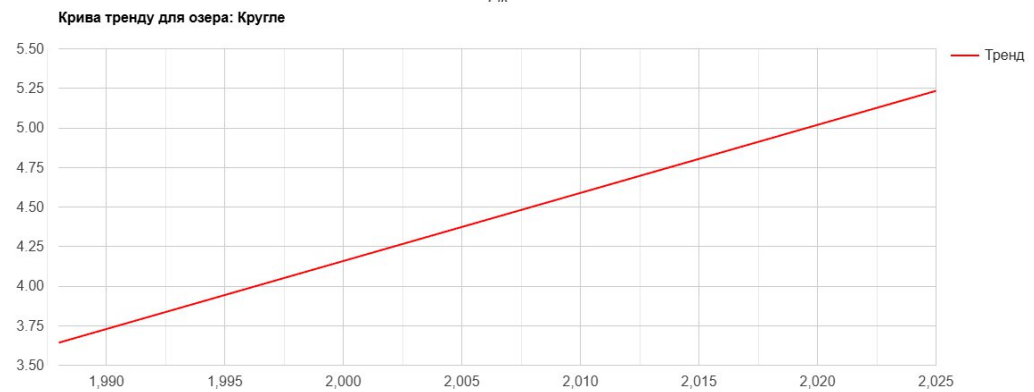
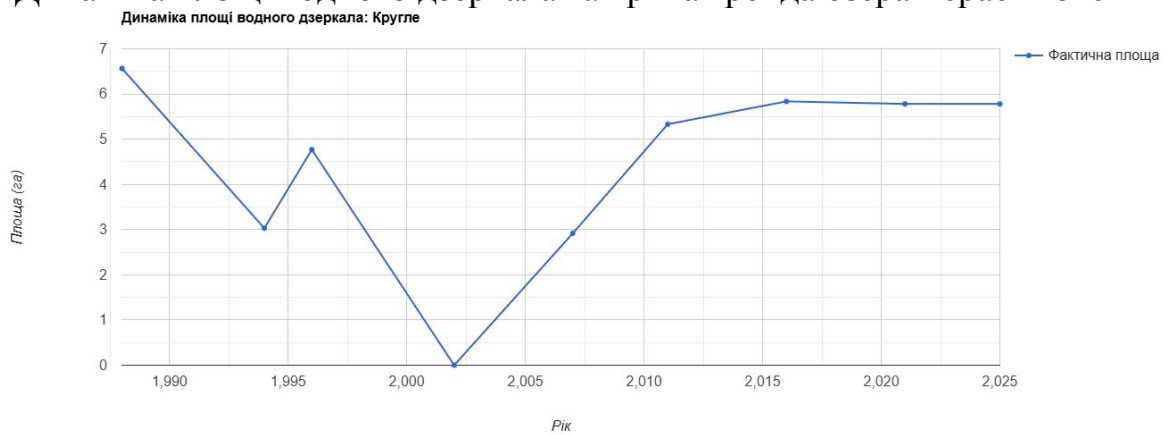
```

```
        max_area_year: yearMax,  
        min_area_year: yearMin  
    });  
});  
return ee.FeatureCollection(tableFeatures);  
};  
var allTables = allYears.map(createLakeTable).flatten();  
print('Таблиця площ та дельт для всіх озер', allTables);  
  
Export.table.toDrive({  
  collection: allTables,  
  description: 'Lakes_Area_Deltas',  
  folder: 'GEE_Exports',  
  fileFormat: 'CSV'  
});
```

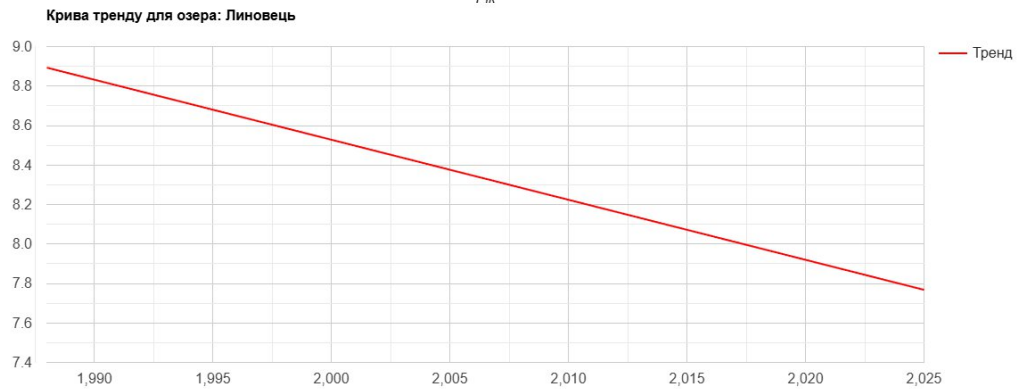
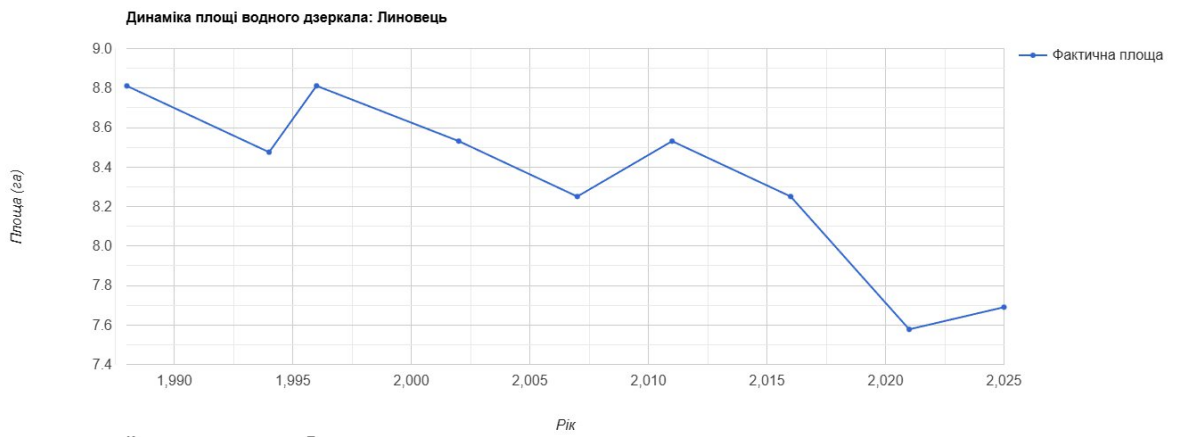
Додаток Б. Лінійні графіки динаміки водної поверхні та криві тренду для Шацьких озер



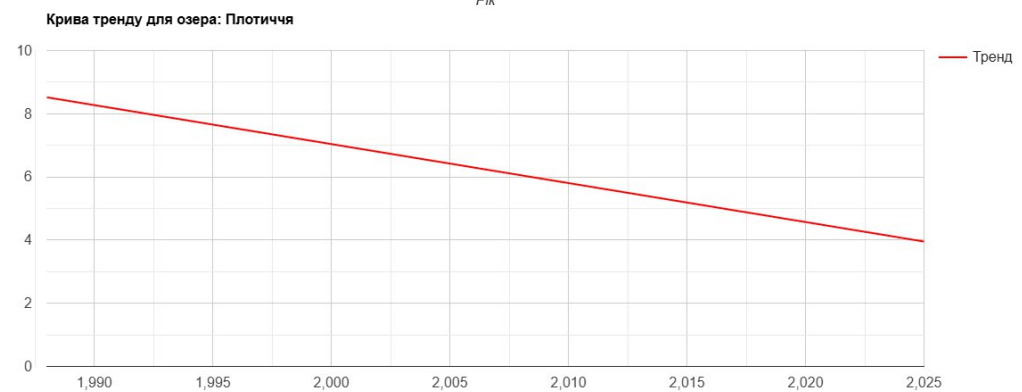
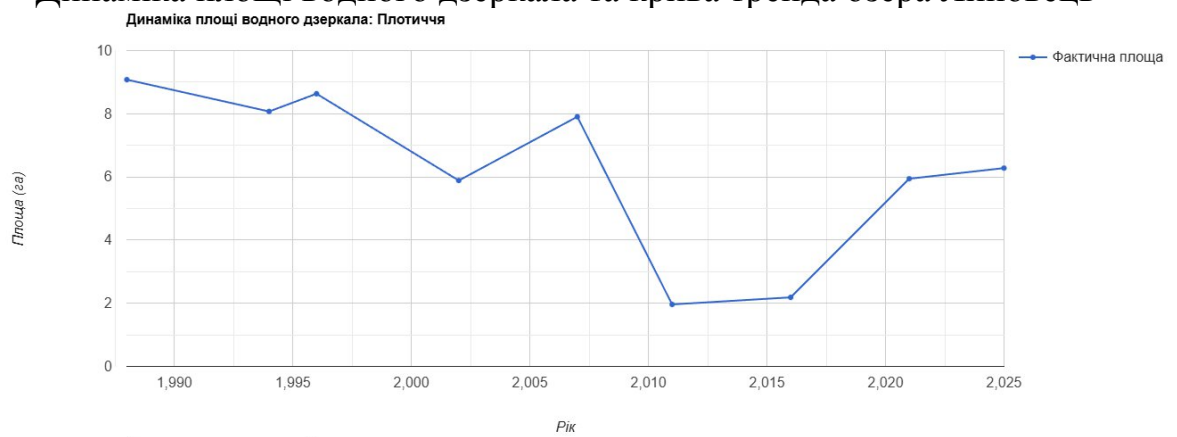
Динаміка площі водного дзеркала та крива тренда озера Герасимове



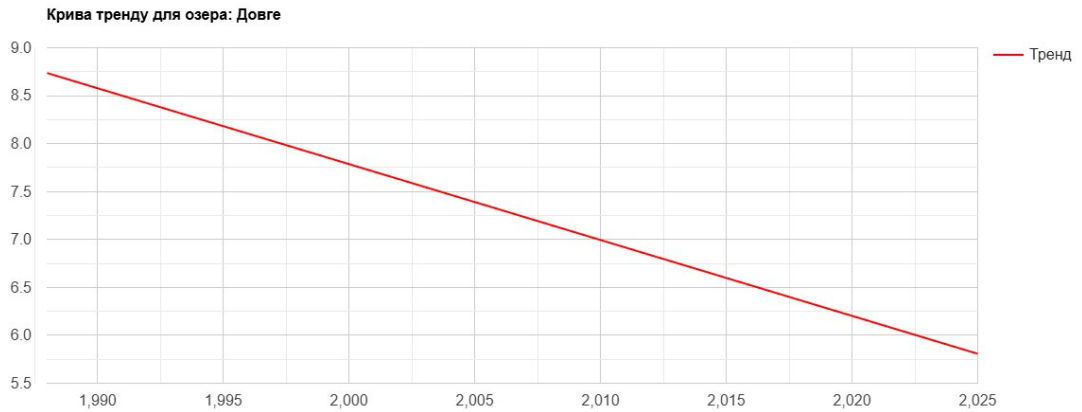
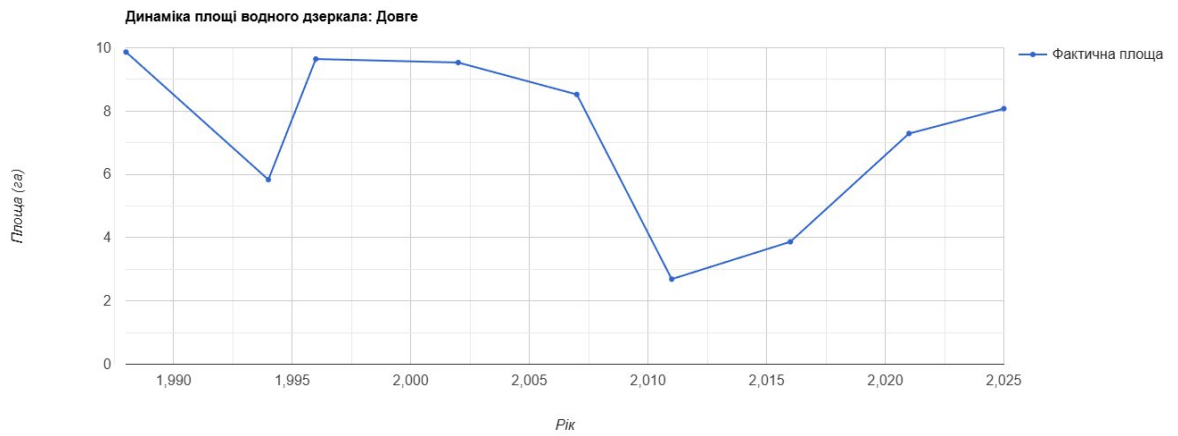
Динаміка площі водного дзеркала та крива тренда озера Кругле



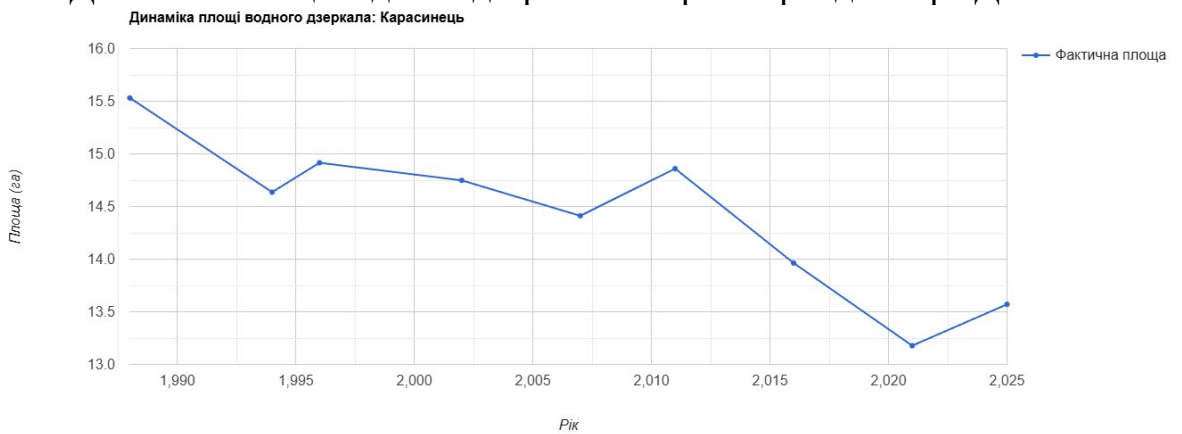
Динаміка площі водного дзеркала та крива тренда озера Линовець



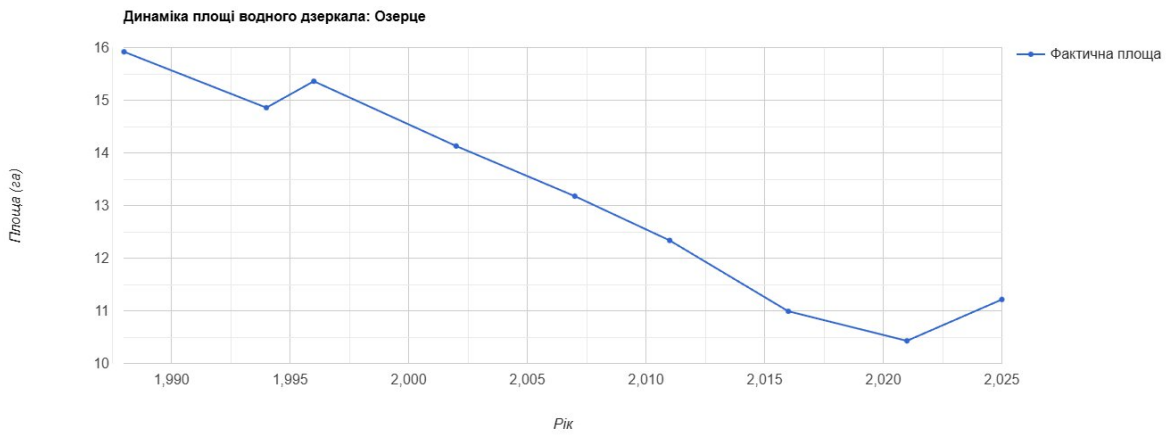
Динаміка площі водного дзеркала та крива тренда озера Плотиччя



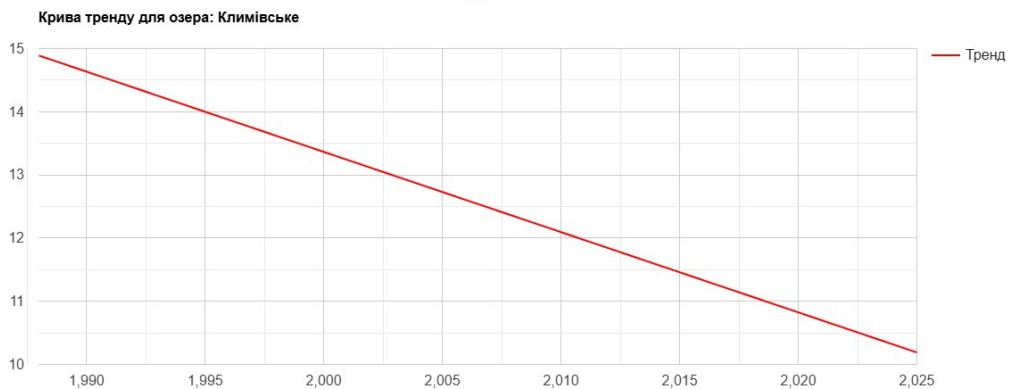
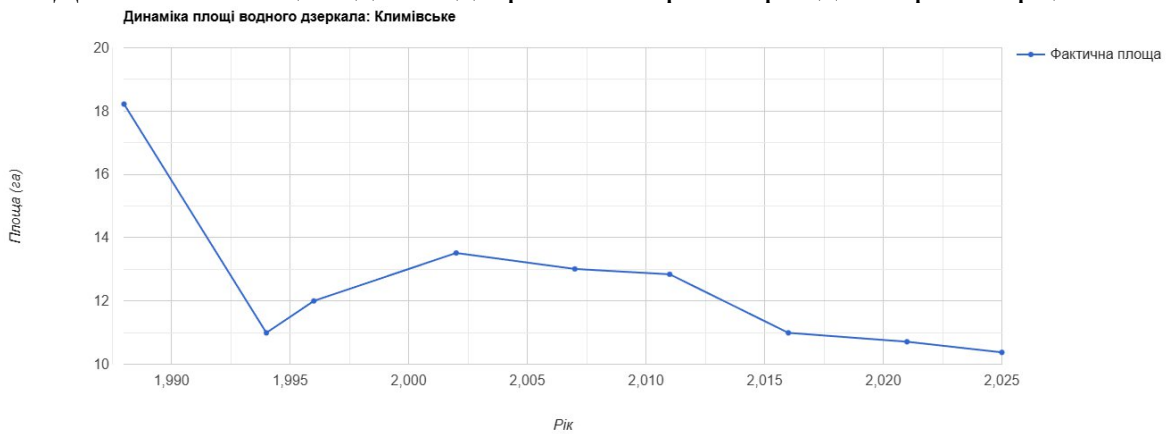
Динаміка площі водного дзеркала та крива тренда озера Довге



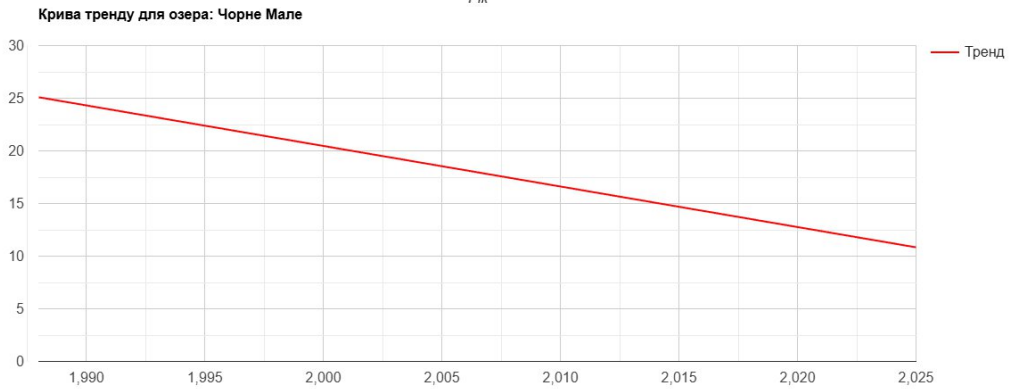
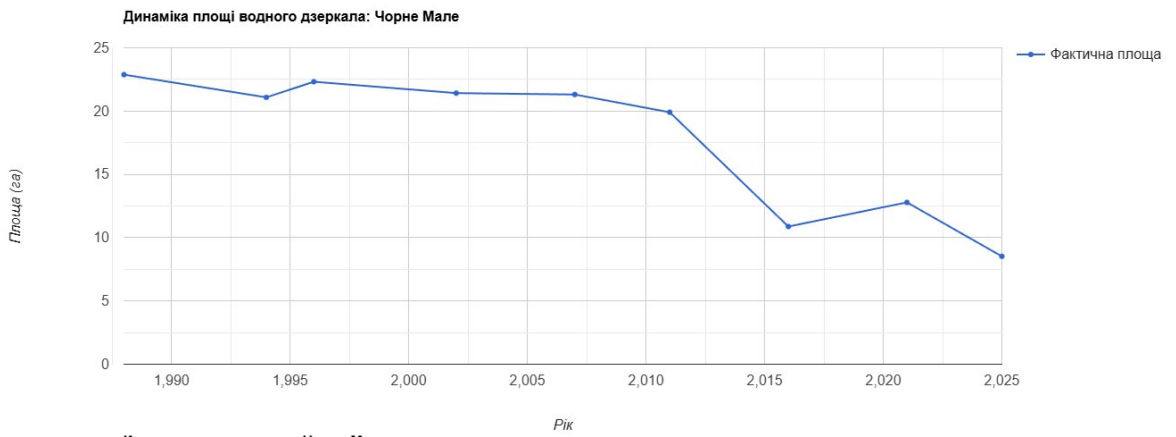
Динаміка площі водного дзеркала та крива тренда озера Карасинець



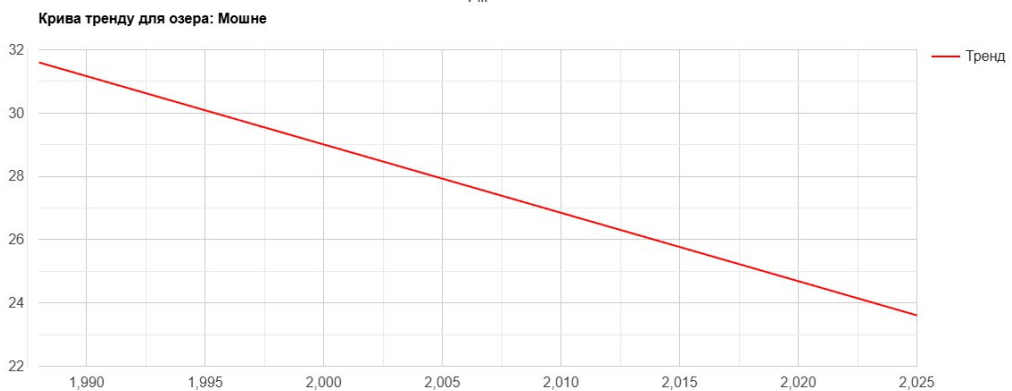
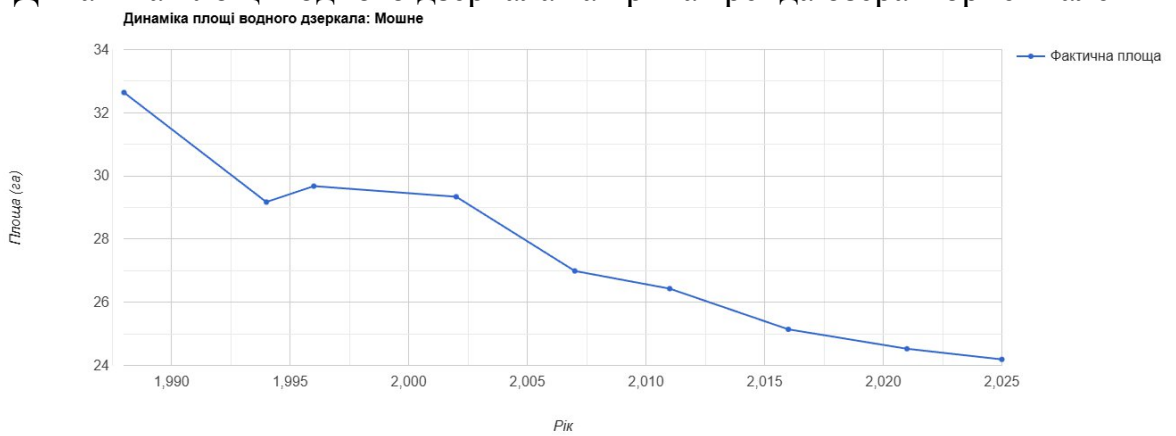
Динаміка площі водного дзеркала та крива тренда озера Озерце



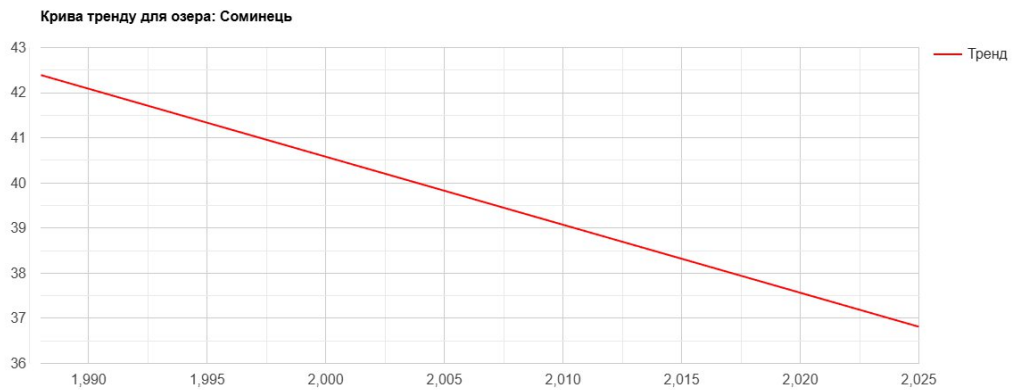
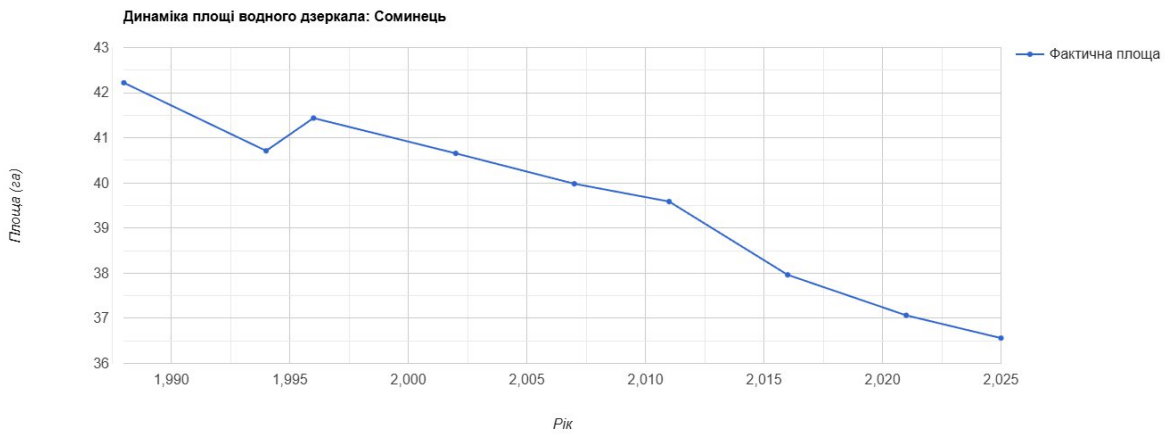
Динаміка площі водного дзеркала та крива тренда озера Климівське



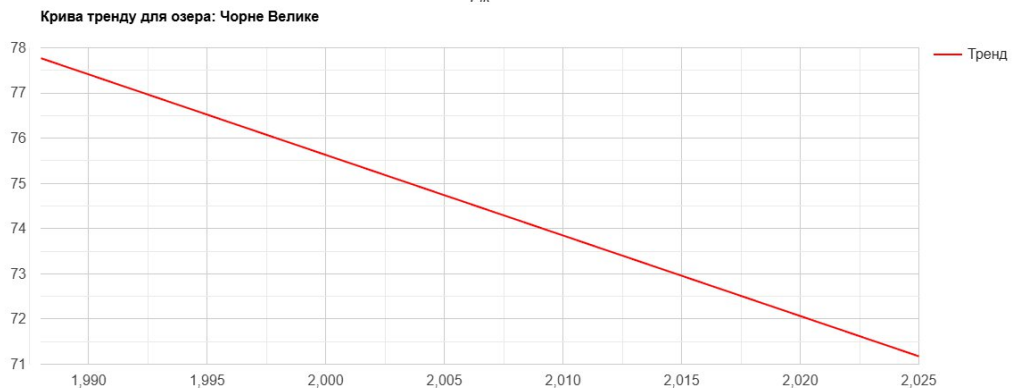
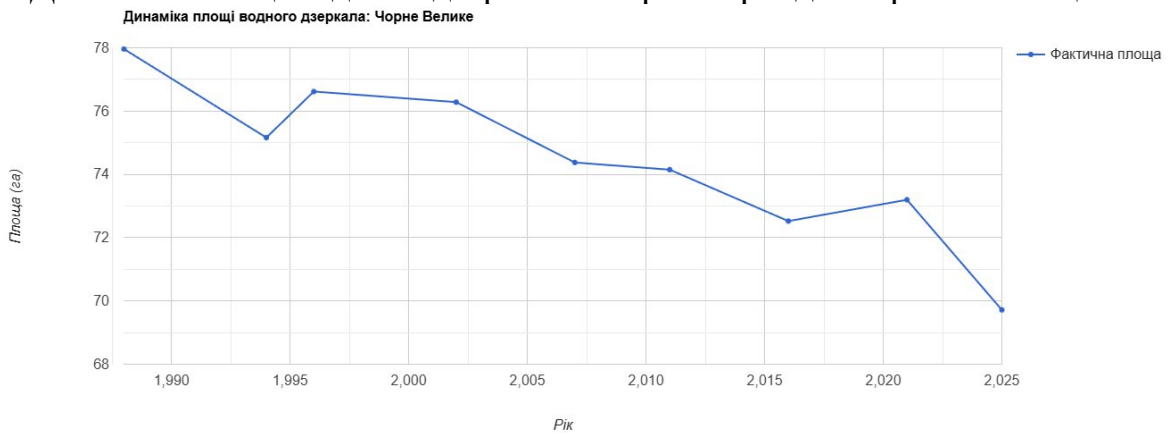
Динаміка площі водного дзеркала та крива тренда озера Чорне Мале



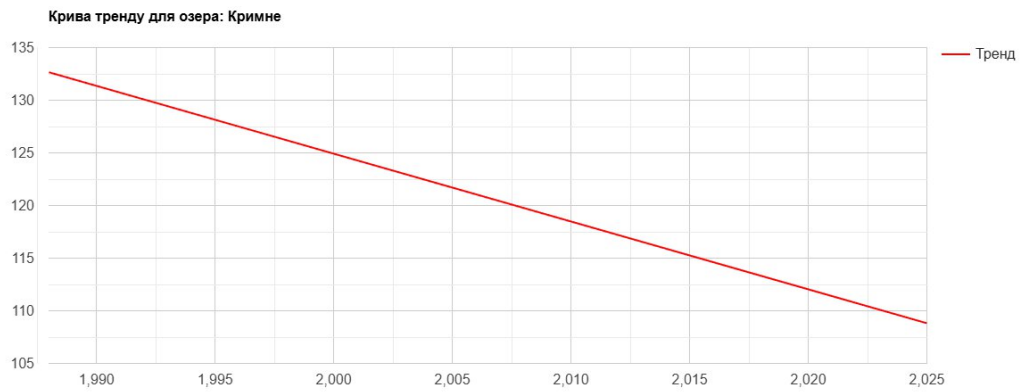
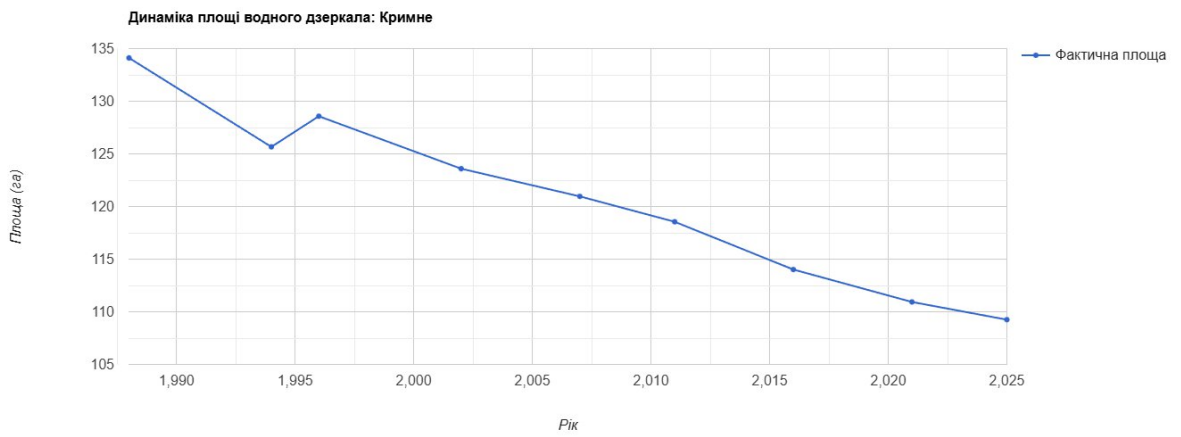
Динаміка площі водного дзеркала та крива тренда озера Мошне



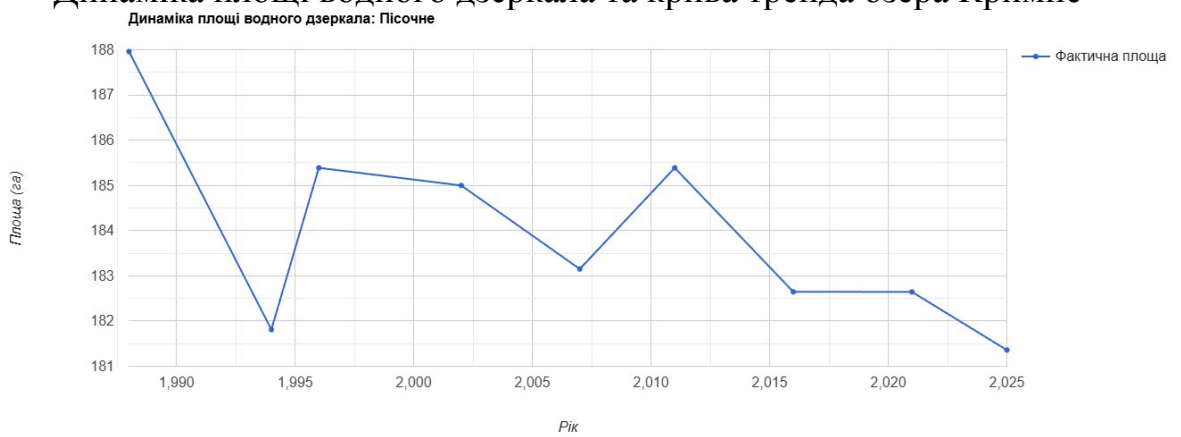
Динаміка площі водного дзеркала та крива тренда озера Соминець



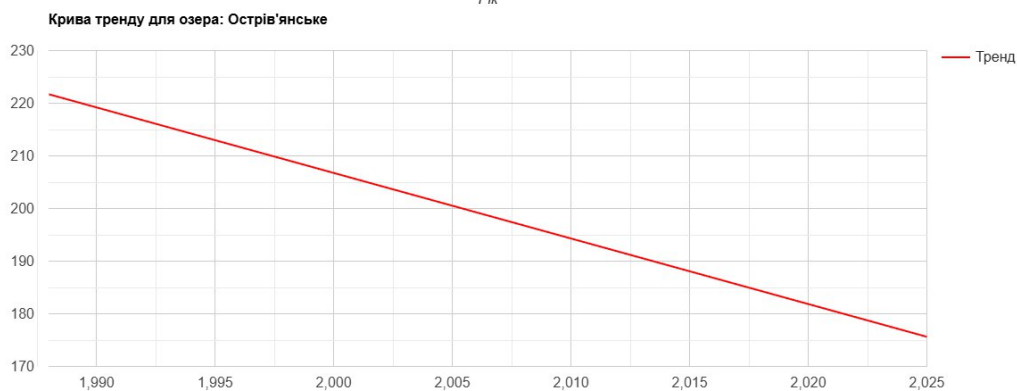
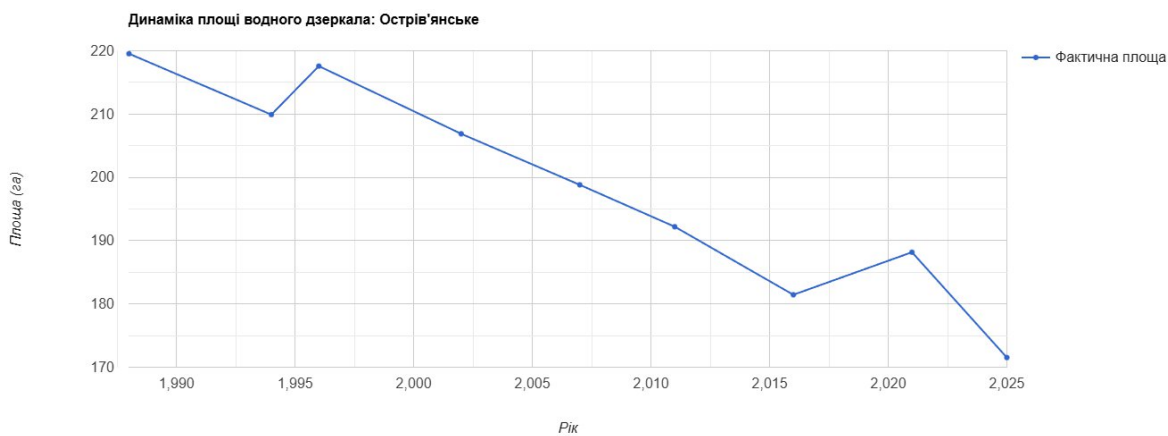
Динаміка площі водного дзеркала та крива тренда озера Чорне Велике



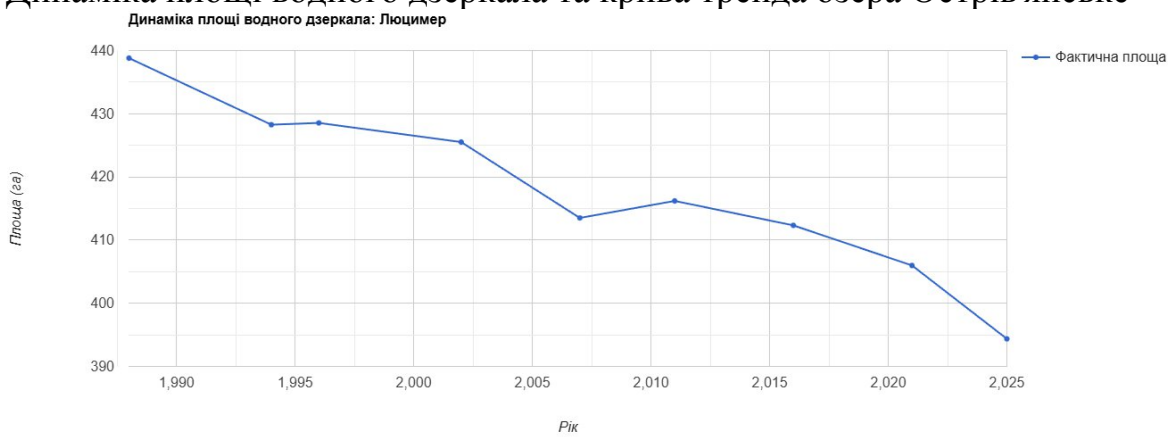
Динаміка площі водного дзеркала та крива тренда озера Кримне



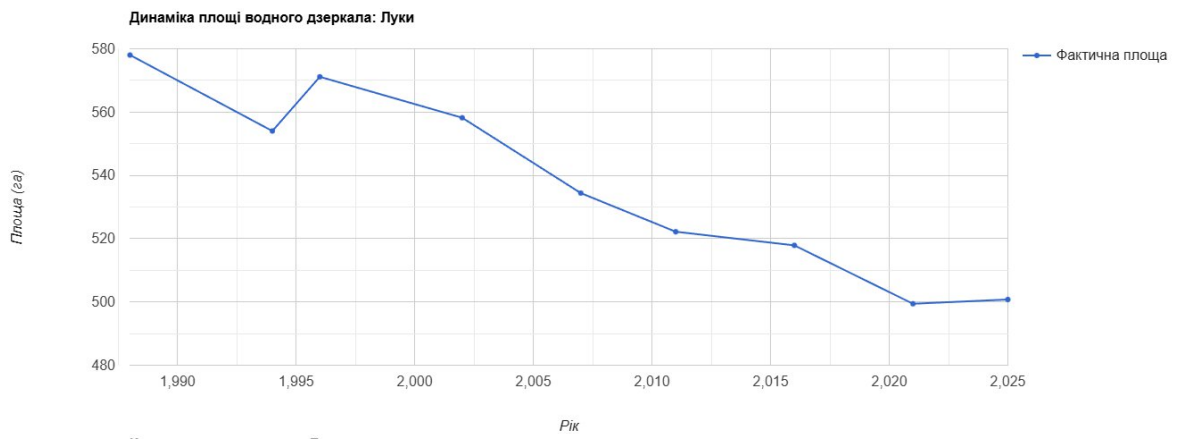
Динаміка площі водного дзеркала та крива тренда озера Пісочне



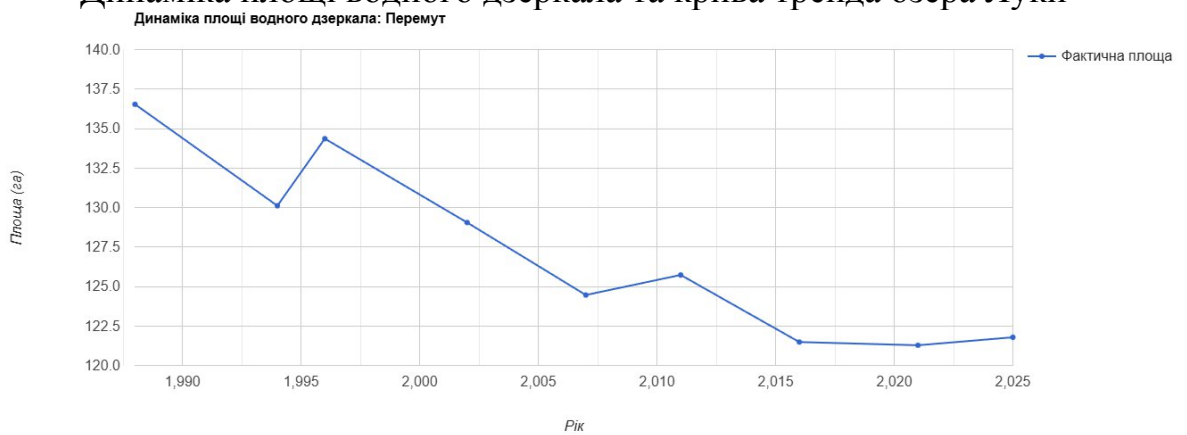
Динаміка площі водного дзеркала та крива тренда озера Острів'янське



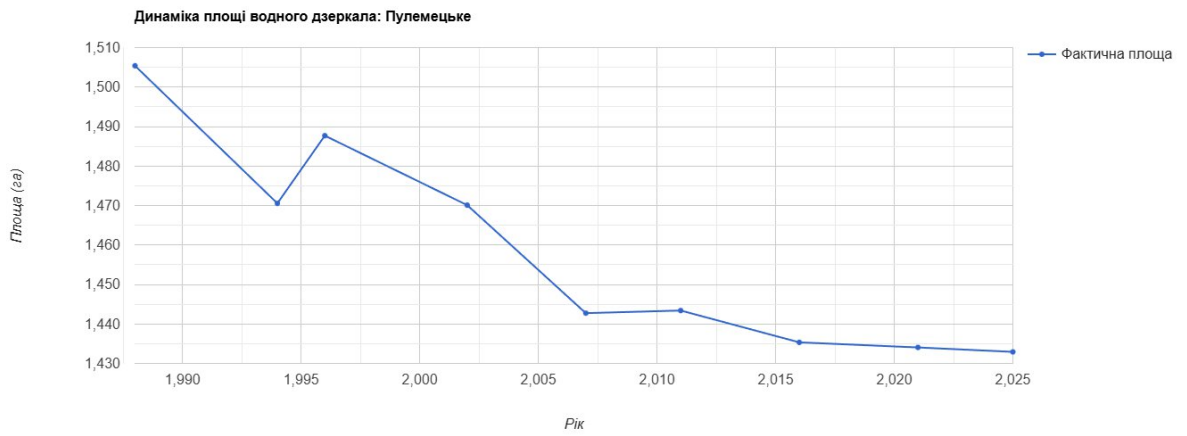
Динаміка площі водного дзеркала та крива тренда озера Люцимер



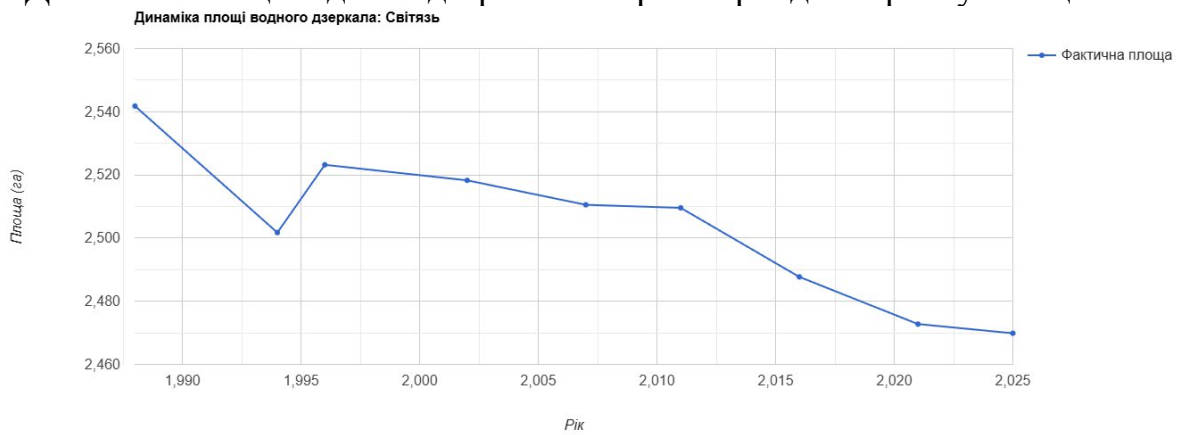
Динаміка площі водного дзеркала та крива тренда озера Луки



Динаміка площі водного дзеркала та крива тренда озера Перемут



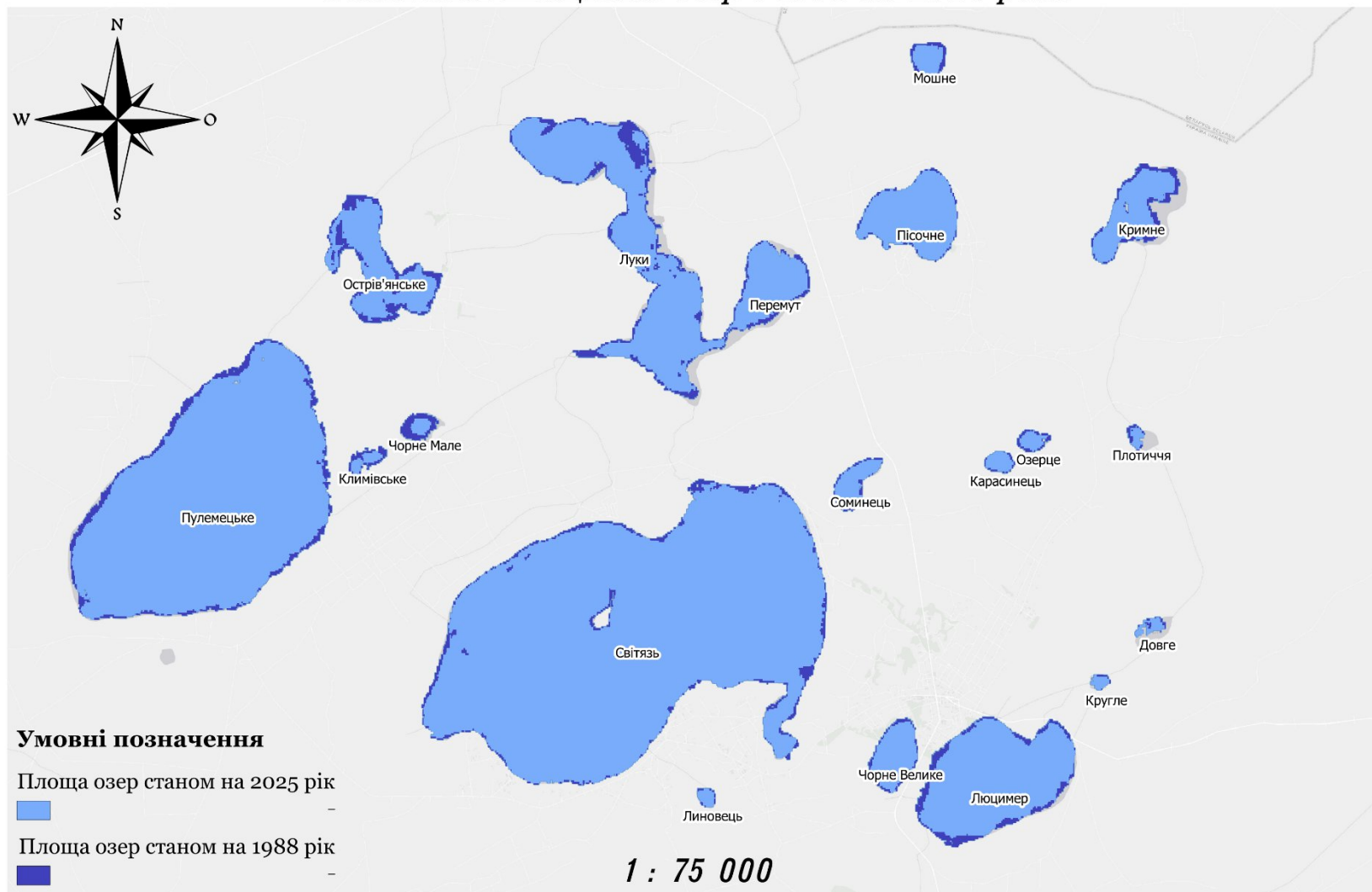
Динаміка площі водного дзеркала та крива тренда озера Пулемецьке



Динаміка площі водного дзеркала та крива тренда озера Світязь

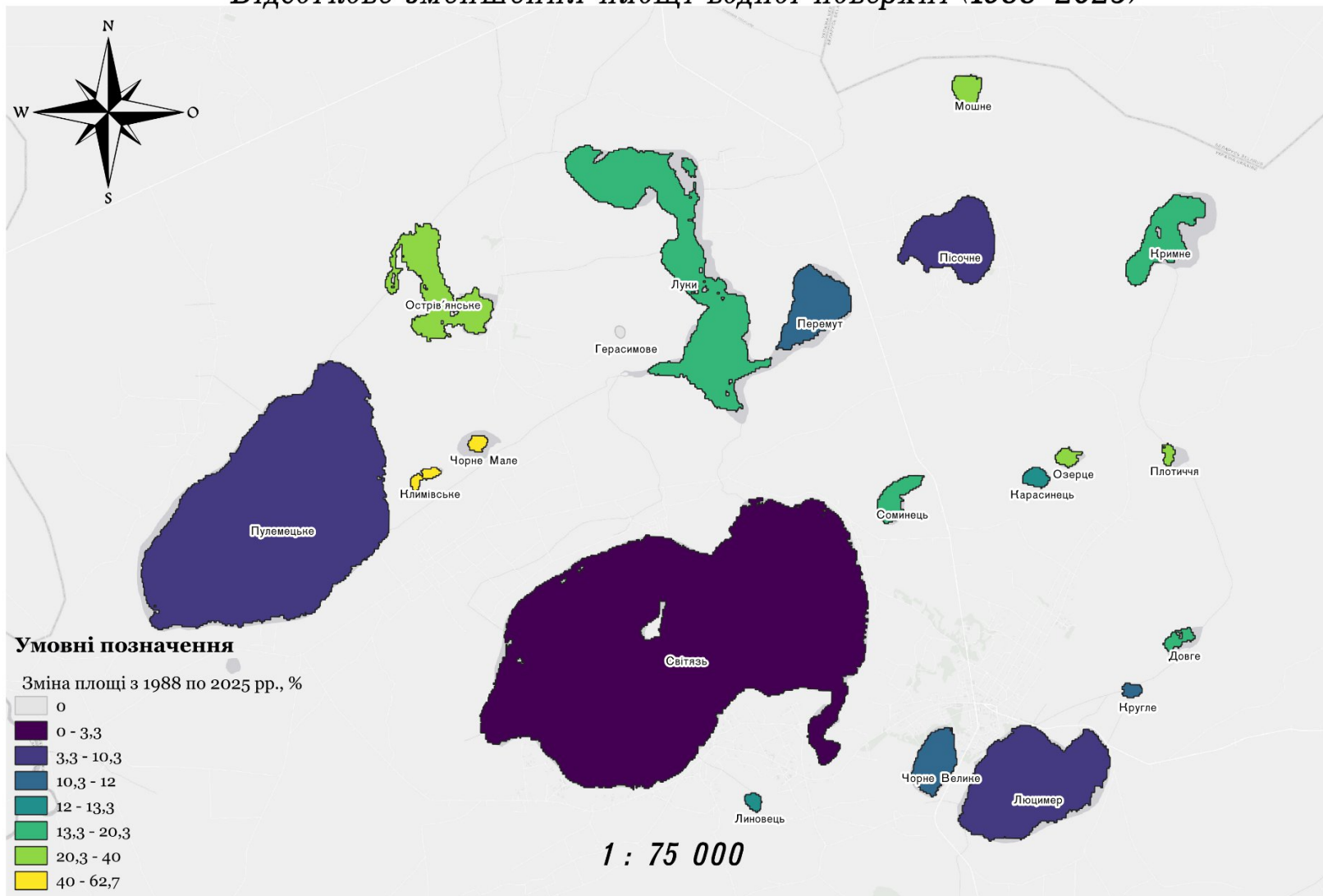
Додаток В. Карта обміління Шацьких озер з 1988 по 2025 роки

Обміління Шацьких озер з 1988 по 2025 роки



Додаток Г. Карта відсоткового зменшення площі водної поверхні (1988–2025)

Відсоткове зменшення площі водної поверхні (1988–2025)



Додаток Д. Графічні матеріали



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ
Кафедра геоінформатики і фотограмметрії



Геоінформаційний моніторинг обміління Шацьких озер за допомогою ДЗЗ

**Виконав: студент ГСТм-24
Юрій ВОЛКОВ**

**Керівник : доцент, к. т. н.
Олена НЕСТЕРЕНКО**

Київ 2025 р.

Постанова проблеми

Невизначений список
Шацьких озер

Обміління озер – актуальна
регіональна проблема

Шацькі озера зазнають
природного та
антропогенного впливу

Хотиславський кар'єр
порушує водний баланс

Хотиславський кар'єр
Проектна глибина – 70 м



Глибина Світязя –
58,4 м

Вихідні дані

Супутникові знімки Landsat 4 - 8 (1988 -2025)

Межа Шацького національного природного парку

Середовище розробки

Хмарна платформа Google Earth Engine

Метод визначення води

Спектральний індекс SWMI,
що поєднує відомі водні
індекси

Блок-схема проведення алгоритму геоінформаційного моніторингу обміління озер

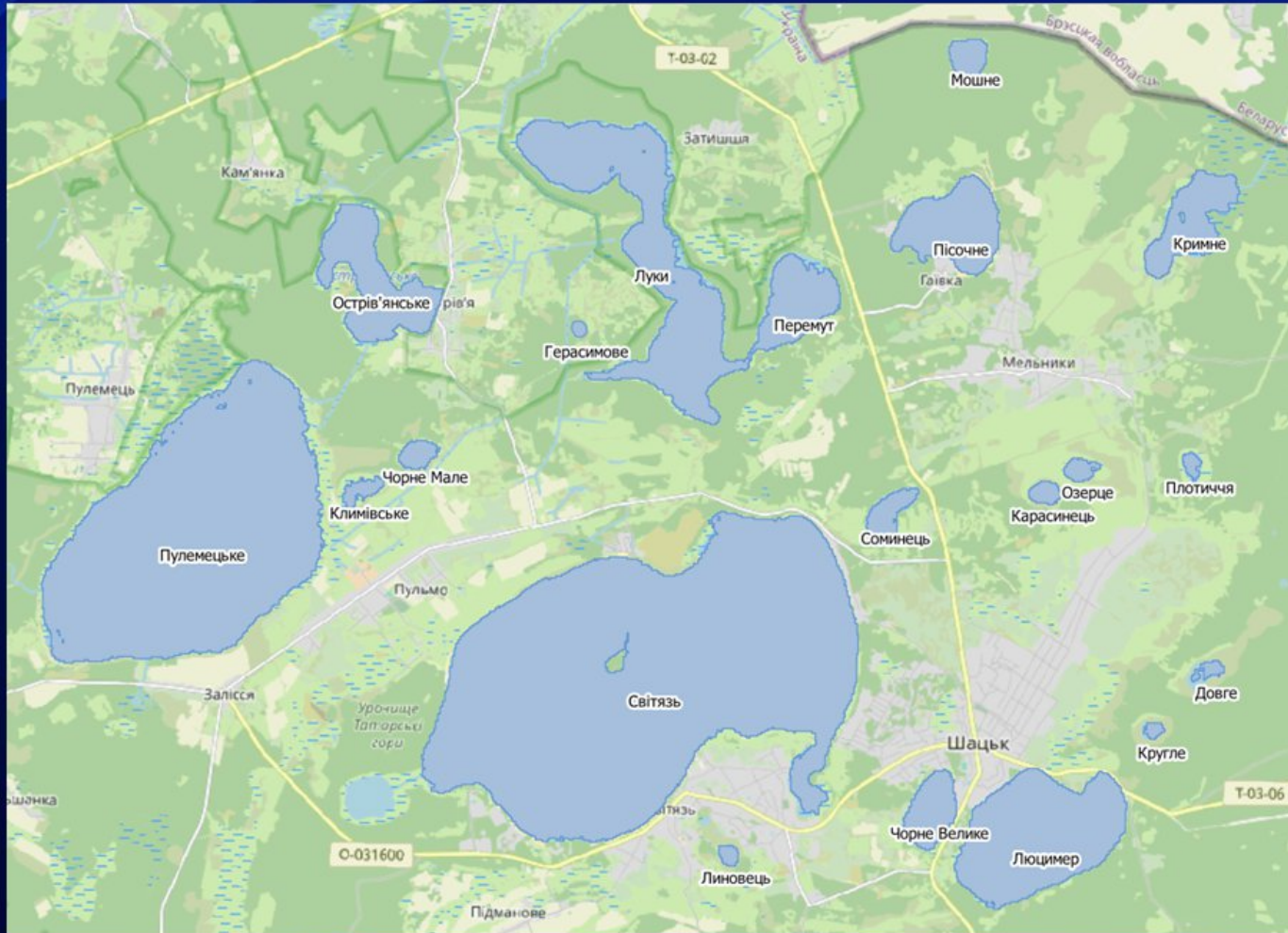


Результати

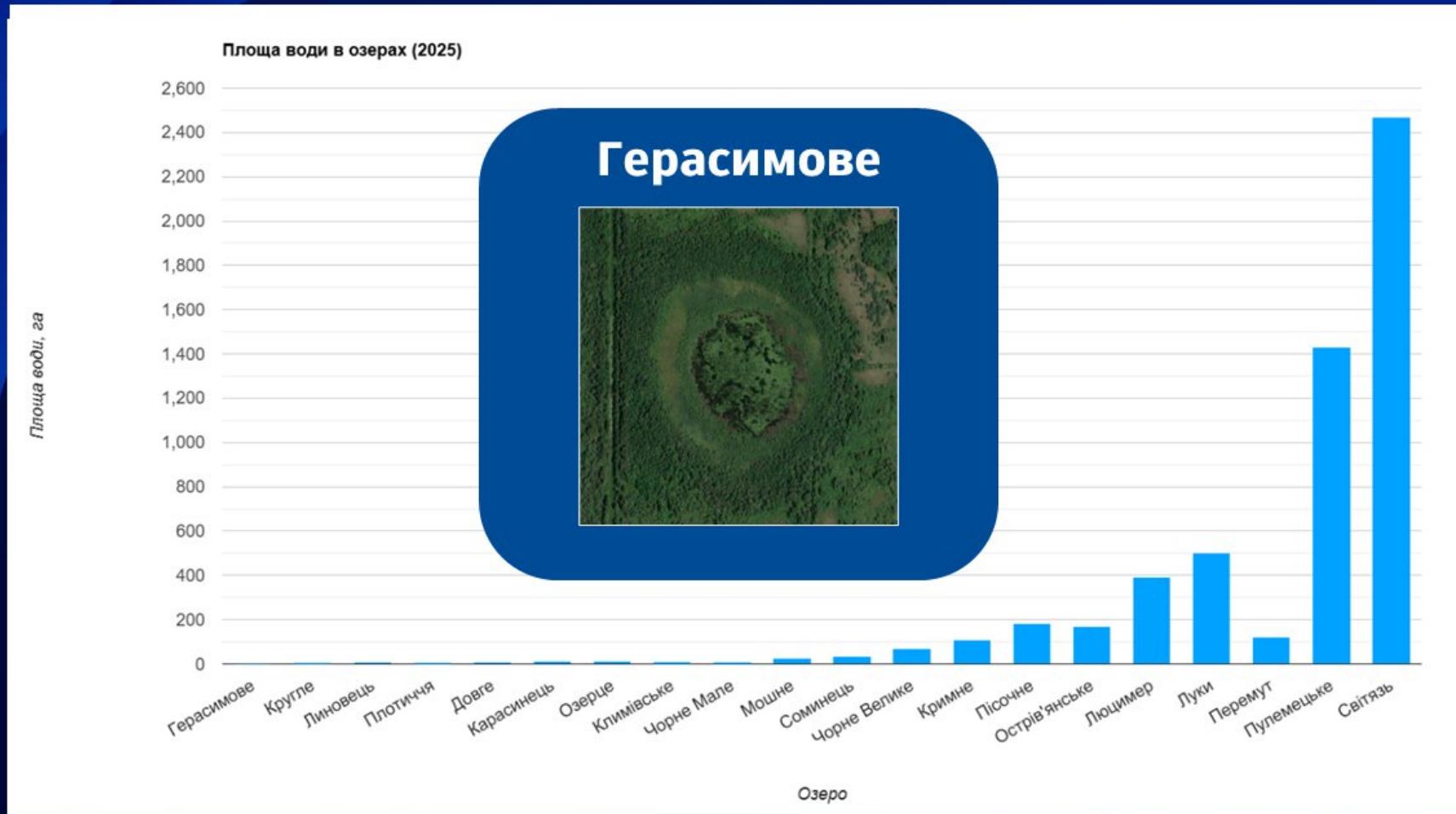
Сформовано 9 медіанних зображень
Проведено розрахунок індексу SWMI
Виділено маски води для всіх років дослідження
Розрахунок загальної площі озер за маскою води



Еталонний шар озер



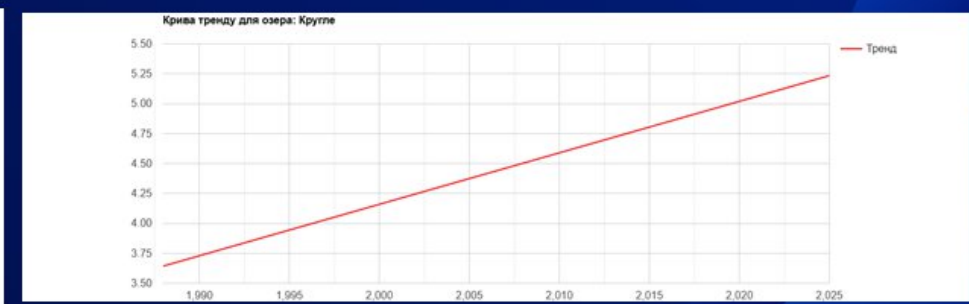
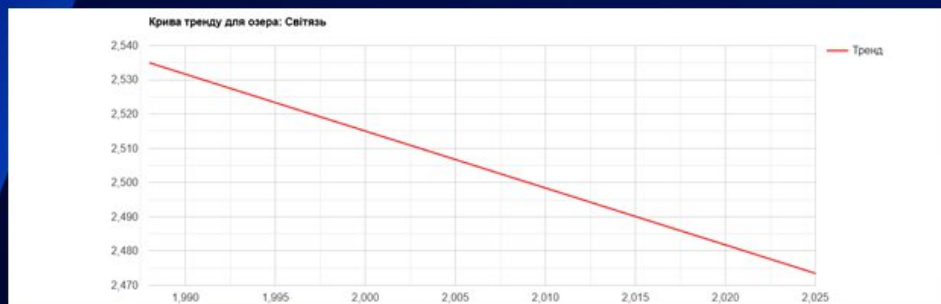
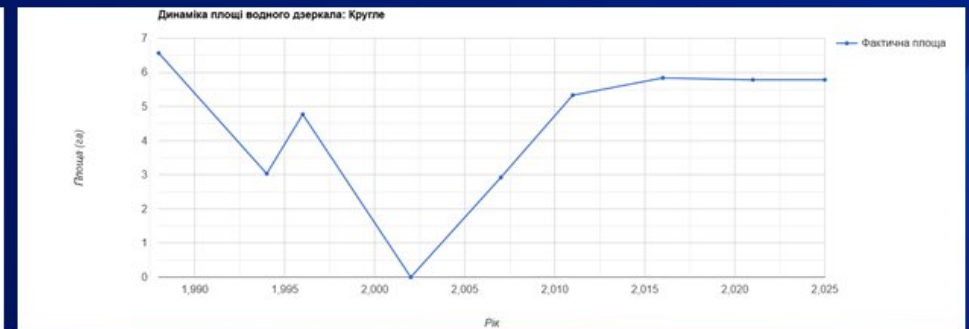
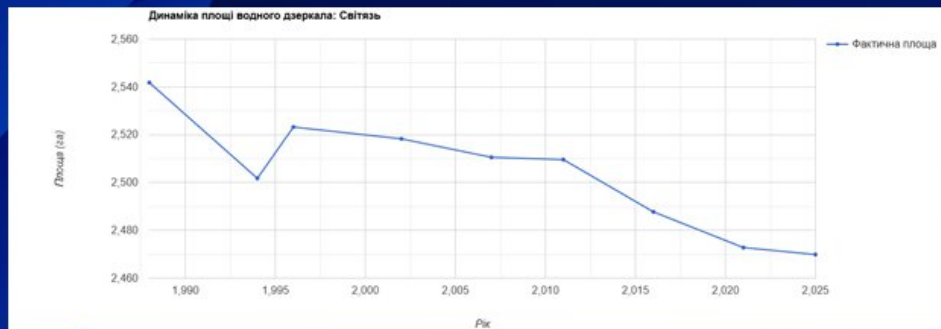
Площа озер



Графічні візуалізації

Світязь

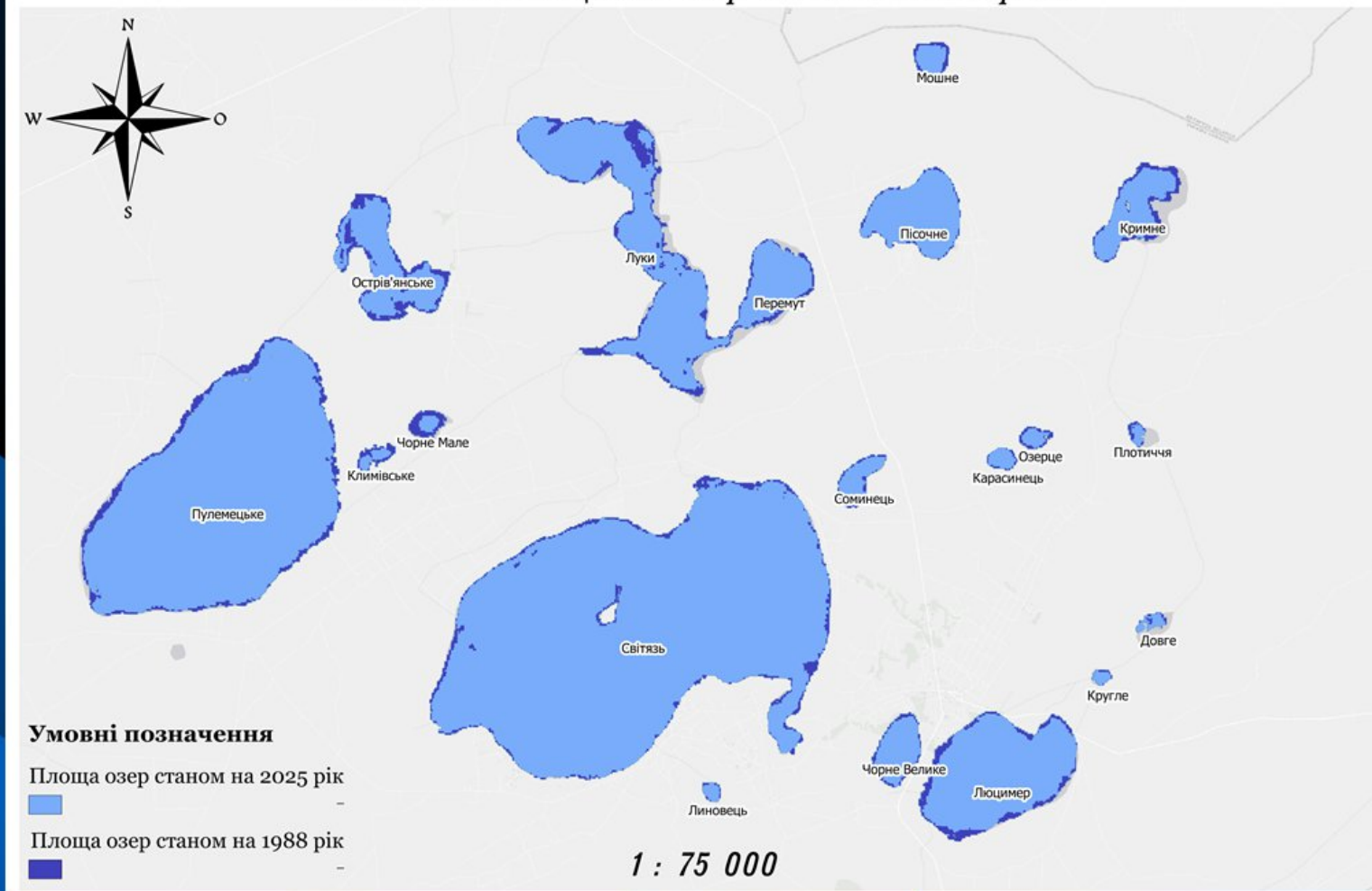
Кругле



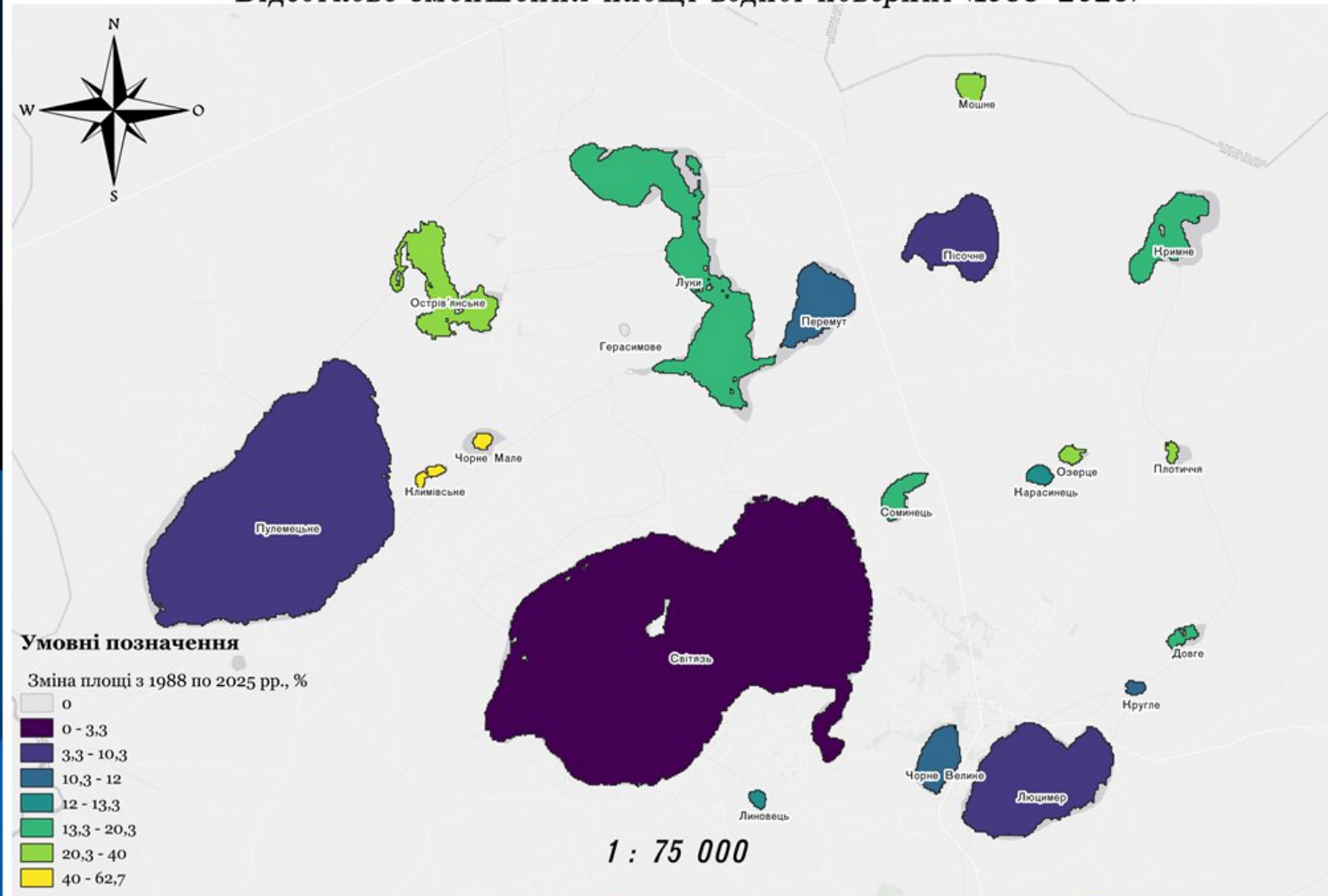
Втрата в площі за 37 років – 2,8 %

Втрата в площі за 37 років – 11,9 %

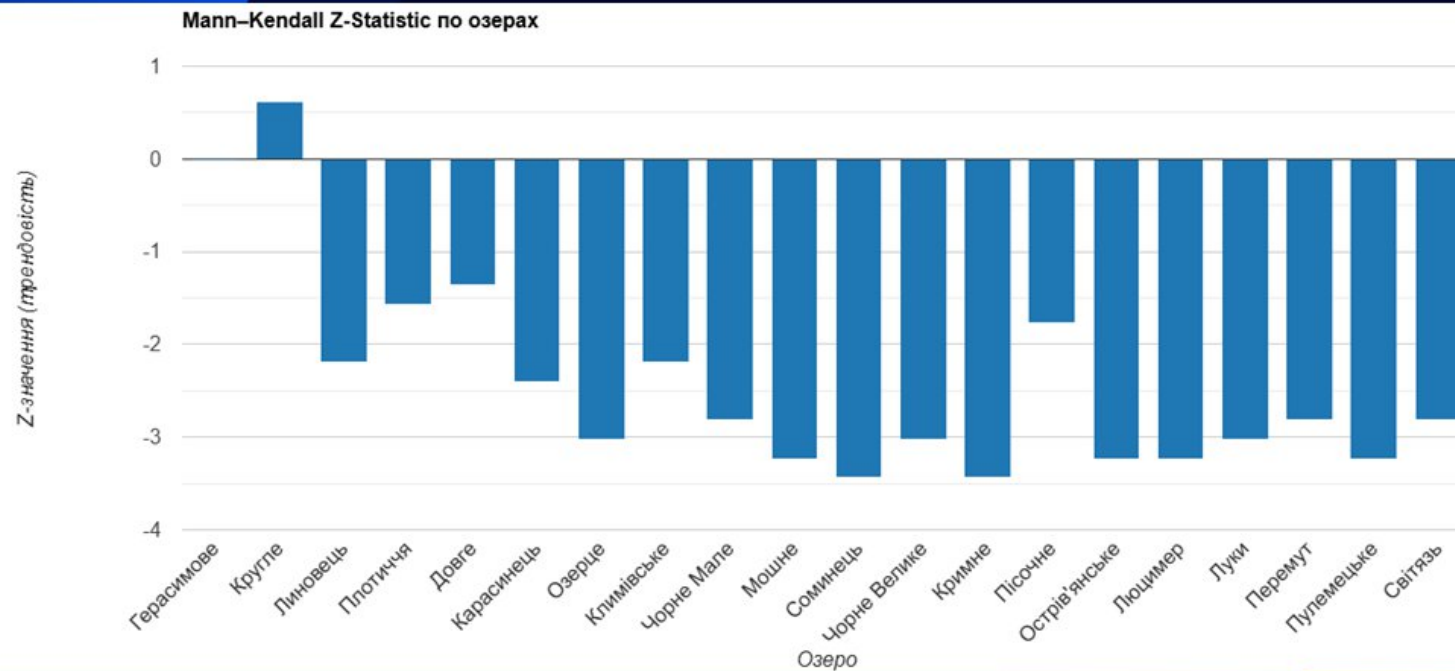
Обміління Шацьких озер з 1988 по 2025 роки



Відсоткове зменшення площі водної поверхні (1988–2025)



Статистичний аналіз



Висновки

- Виконано розробку методики геоінформаційного моніторингу обміління озер
- Визначено площі водних поверхонь спектральним індексом SWMI
- Зменшення водного дзеркала за 37 років становить 5,17 км² або 8,3 %
- Стабільні озера – Світязь, Пулемецьке, Пісочне
- Найбільші зміни – Чорне Мале втрата понад 60 % площі, Климівське 43%
- Герасимове висохло повністю
- Початок втрати площі співпадає з початком діяльності Хотиславського кар'єру

Назва	S 1988	S 2025	Δ1988_2025	Δ%	MIN	MAX
Світязь	2541,79	2469,87	71,92	2,8	2469,87	2541,79
Пулемецьке	1505,39	1432,92	72,47	4,8	1432,92	1505,39
Луки	578,02	500,76	77,26	13,4	499,42 ₂₀₂₁	578,02
Перемут	136,53	121,78	14,75	10,8	121,28 ₂₀₂₁	136,53
Люцимер	438,81	394,37	44,44	10,1	394,37	438,81
Острів'янське	219,54	171,53	48,01	21,9	171,53	219,54
Пісочне	187,96	181,36	6,6	3,5	181,36	187,96
Кримне	134,11	109,25	24,86	18,5	109,25	134,11
Чорне Велике	77,96	69,72	8,24	10,6	69,72	77,96
Соминець	42,22	36,56	5,66	13,4	36,56	42,22
Мошне	32,64	24,19	8,45	25,9	24,19	32,64
Чорне Мале	22,87	8,52	14,35	62,7	8,52	22,87
Климівське	18,22	10,37	7,85	43,1	10,37	18,22
Озерце	15,92	11,21	4,71	29,6	10,43 ₂₀₂₁	15,92
Карасинець	15,53	13,57	1,96	12,6	13,18 ₂₀₂₁	15,53
Довге	9,87	8,08	1,79	18,1	2,69 ₂₀₁₁	9,87
Плотиччя	9,08	6,28	2,8	30,8	1,96 ₂₀₁₁	9,08
Линовець	8,81	7,69	1,12	12,7	7,58 ₂₀₂₁	8,81
Кругле	6,56	5,78	0,78	11,9	0,00 ₂₀₀₂	6,56
Герасимове	0	0	-	-	0	0

Дякую за увагу!

13