

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА  
ГЕОГРАФІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА ФІЗИЧНОЇ ГЕОГРАФІЇ ТА ГЕОЕКОЛОГІЇ**

На правах рукопису

УДК: 504.57.04

**ГЕОІНФОРМАЦІЙНЕ КАРТОГРАФУВАННЯ ТА МОНІТОРИНГ  
ВОДНИХ ГЕОЕКОСИСТЕМ МІСТА КИЇВ  
GEOINFORMATION MAPPING AND MONITORING OF AQUATIC  
GEOECOSYSTEMS IN KYIV**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Галузь знань 10 – Природничі науки

Спеціальність 106 – Географія

Освітня програма Транскордонне екологічне співробітництво

Кваліфікаційна робота бакалавра  
студентки четвертого курсу  
*Барбари Вероніки Олександрівни*

Науковий керівник:  
доцент кафедри фізичної географії та геоекології, кандидат географічних  
наук, доцент  
*Гавриленко Олена Петрівна*

**Київ – 2025**

## ЗМІСТ

<b>Вступ</b> .....	3
<b>1 Теоретичні та методологічні аспекти геоінформаційного картографування та моніторингу водних геоекосистем міста Київ</b> .....	6
1.1 Ландшафтно-екологічний підхід до визначення поняття водної геоекосистеми.....	6
1.2 Аналіз попередніх досліджень водних геоекосистем міста Київ .....	9
<b>2 Методика геоінформаційного картографування та моніторингу водних геоекосистем</b> .....	19
2.1 Основні кроки методики геоінформаційного картографування та моніторингу водних геоекосистем міста Києва.....	19
2.2 Геоінформаційне картографування водних геоекосистем.....	23
2.3 Моніторинг стану водних геоекосистем через розрахунок евтрофікації водойм через спектральні індекси.....	26
2.4 Індекси NDCI та NDTI, відібрані на основі проведеного аналізу для моніторингу стану водних геоекосистем міста Київ.....	29
<b>3 ГІС-система водних геоекосистем міста Київ</b> .....	44
3.1 Геопросторовий блок даних загальних характеристик водних геоекосистем міста Києва .....	44
3.2 Геопросторовий блок даних стану евтрофікації водних геоекосистем міста Києва.....	62
<b>Висновки</b> .....	69
<b>Використані джерела</b> .....	70

## ВСТУП

У сучасних умовах стрімкого розвитку урбанізованих територій та антропогенного тиску на довкілля значно зростає потреба у впровадженні новітніх наукових підходів до моніторингу та управління природними геосистемами. Особливої актуальності набувають питання вивчення, збереження та ефективного картографічного відображення водних геоекосистем, які виступають ключовими регуляторами екологічної рівноваги в межах міських агломерацій. Місто Київ, як столиця України та один із найбільших мегаполісів Центрально-Східної Європи, характеризується складною системою водних об'єктів, до складу якої входять річки, озера, струмки, заплави, заболочені ділянки та техногенні водойми. Усі ці компоненти формують специфічну екологічну структуру, функціонування якої залежить від низки природних, техногенних і соціально-економічних чинників.

**Актуальність дослідження** зумовлена необхідністю комплексного, інтегрованого підходу до аналізу стану та динаміки водних геоекосистем Києва з використанням сучасних інструментів геоінформаційного моделювання. В умовах глобальної зміни клімату, урбанізаційного тиску, зростання інтенсивності забудови та деградації природних ландшафтів, застосування геоінформаційних систем (ГІС) дозволяє не лише забезпечити візуалізацію просторових характеристик геоекосистем, але й створити умови для постійного екологічного моніторингу, прогнозування негативних тенденцій і прийняття обґрунтованих управлінських рішень. Таким чином, ГІС-технології виступають критично важливим інструментом не тільки в картографії, але й у сфері екологічної безпеки та просторового планування.

**Наукова новизна** дослідження полягає в обґрунтуванні авторського підходу до класифікації водних геоекосистем на основі поєднання класичних геоекологічних принципів і можливостей цифрового геопросторового аналізу. Крім того, в роботі вперше здійснюється систематизоване геоінформаційне картографування водної структури Києва із залученням супутникових даних

високої роздільної здатності, матеріалів польових досліджень та архівних екологічних спостережень. Застосування багаторівневої моделі моніторингу дозволяє виявити тенденції змін якості водних ресурсів, змін берегової лінії, фітомаси, антропогенного навантаження, що формує фундамент для побудови адаптивних стратегій збереження та відновлення природного середовища столиці.

**Метою дослідження** є розробка комплексної моделі геоінформаційного картографування та моніторингу водних геоекосистем міста Києва, яка дозволяє ефективно і в режимі реального часу відображати екологічний стан водних об'єктів, прогнозувати їхній розвиток у динаміці, формувати екологічно орієнтовані управлінські рішення та сприяти підвищенню просторової обізнаності у сфері урбаністичної екології.

Для досягнення зазначеної мети в роботі поставлено наступні наукові **завдання**:

- ✓ здійснити теоретичний аналіз поняття «водна геоекосистема» в контексті урбанізованого середовища;
- ✓ проаналізувати попередні дослідження водних геоекосистем міста Києва;
- ✓ розробити та обґрунтувати методіку геоінформаційного картографування та моніторингу водних геоекосистем міста Києва;
- ✓ здійснити моніторинг динаміки водних геоекосистем за допомогою супутникових знімків PlanetScore, індексів NDWI, NDCI, NDTI та власних спостережень;
- ✓ створення геоінформаційної бази даних та картосхем водних геоекосистем міста Києва;
- ✓ створення ГІС-системи водних геоекосистем міста Києва.

**Об'єктом дослідження** є водні геоекосистеми міста Києва, як складні природно-антропогенні утворення, що формуються в умовах урбанізованого простору та характеризуються специфічною морфологічною, гідрологічною та екологічною структурою.

**Предметом дослідження** виступають теоретичні, методичні та прикладні засади геоінформаційного картографування та екологічного моніторингу водних геоекосистем, а також інструменти ГІС-аналізу, які застосовуються для оцінки просторової організації, динаміки та екологічного стану водних об'єктів у межах міста Києва.

**Методологічною основою** дослідження є системний і ландшафтно-екологічний підходи, що поєднуються з принципами геоінформаційного аналізу, класифікаційного моделювання та еколого-картографічної візуалізації. Серед застосованих методів дослідження: картографічний аналіз, цифрова обробка геопросторових даних, дистанційне зондування Землі, польові гідроекологічні спостереження, кластерний і багатofакторний аналіз, а також методи побудови баз геоданих та створення електронних карт у програмних середовищах QGIS.

Таким чином, дана наукова праця спрямована на вирішення актуальних проблем просторового дослідження та екологічного контролю стану водних геосистем у межах столиці України. Робота базується на комплексному підході, що передбачає поєднання теоретичних засад природокористування з інноваційними ГІС-рішеннями, та має на меті створити науково-обґрунтовану основу для прийняття практичних рішень у сфері урбаністичної екології, екосистемного менеджменту та стійкого розвитку міського середовища.

# 1 ТЕОРЕТИЧНІ ТА МЕТОДОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО КАРТОГРАФУВАННЯ ТА МОНІТОРИНГУ ВОДНИХ ГЕОЕКОСИСТЕМ МІСТА КИЄВА

## 1.1 Ландшафтно-екологічний підхід до визначення поняття водної геоекосистеми.

Водні геоекосистеми являють собою складні природні комплекси, що включають різноманітні компоненти, які взаємодіють між собою та з навколишнім середовищем. У контексті трансдисциплінарної геоєкології, водні геосистеми розглядаються як цілісні просторово-екологічні утворення, що забезпечують функціонування гідрологічних, біотичних та антропогенних процесів на певній території [20]. Згідно з підходом, викладеним у монографії Круглова (2020), геоекосистеми можуть бути класифіковані на базові, спеціальні та тотальні залежно від рівня деталізації та складності їхньої просторової організації [20].

Базова геоекосистема (Б-ГЕС) описує загальну генетичну модель ландшафту, яка включає основні компоненти водної екосистеми, такі як водні тіла, донні відклади, прибережна рослинність та гідрофауна. Вона слугує основою для інтеграції спеціальних геоекосистем, забезпечуючи комплексне уявлення про екологічний стан водних об'єктів та їхню взаємодію з іншими елементами довкілля [20]. В контексті міського середовища, до основних компонентів водних геоекосистем належать водні тіла (наприклад, річка Либідь чи озеро Тельбін), донні відклади (мул на дні ставків), прибережна рослинність (очерет, осока) та біота, яка представлена гідрофауною (плоскирка, рачки, планктон). Ці компоненти виконують важливі функції у водній геоекосистемі, такі як гідрологічна стабільність, акумуляція забруднень, біофільтрація та біоіндикація. У такому контексті Б-ГЕС є відправною точкою для інтеграції даних з інших рівнів — біологічного, хімічного, соціально-економічного. Зокрема, у міських умовах базова геоекосистема охоплює не лише фізичні межі

водойм, а й прилеглі території, що зазнають впливу урбанізації — забудови, транспортної інфраструктури, господарської діяльності. Це забезпечує цілісне уявлення про функціонування водойми як елемента міського простору, що одночасно є і природним об'єктом, і інфраструктурною одиницею.

Спеціальна геоекосистем (С-ГЕС) є деталізованою моделлю, яка поглиблює розуміння окремих аспектів водної геосистеми, в свою чергу, деталізує окремі процеси в межах базової структури. Вона дозволяє застосовувати галузеві методики дослідження — наприклад, гідробіологічний або гідрохімічний моніторинг, аналіз антропогенного навантаження або моделювання гідродинаміки. У практичному сенсі це означає, що для однієї водойми може бути створено кілька спеціалізованих моделей: одна — для оцінки водообміну, інша — для вивчення вмісту важких металів у донних відкладах, ще одна — для аналізу структури фітопланктону. Усі ці моделі функціонують автономно, але водночас пов'язані між собою на основі загальної просторової логіки, заданої Б-ГЕС [20].

Тотальна геоекосистема є фінальним етапом інтеграції — вона синтезує всі напрацювання спеціального рівня в межах просторової структури, визначеної базовою геоекосистемою. Її головна перевага — можливість проведення міждисциплінарного аналізу: об'єднання екологічних, соціальних, правових та технічних аспектів управління водними ресурсами. Наприклад, у разі розробки природоохоронної програми для міського району, тотальна геоекосистема дозволяє не лише оцінити екологічний стан водойм, а й виявити слабкі місця в системі інженерної інфраструктури, запропонувати заходи з ревіталізації прибережної зони, а також моделювати вплив майбутніх забудов на водний режим. Таким чином, Т-ГЕС створює платформу що дозволяє ефективно оцінювати екосистемні послуги водних об'єктів, їхню роль у міських ландшафтах, а також розробляти програми оптимізації управління водними ресурсами [20].

У своїх працях Круглов особливу увагу приділяє дослідженню річкових басейнів як ключових структурних одиниць у просторовій організації

геоекосистем. Він розглядає басейн не лише як гідрографічну одиницю, а як комплексний функціональний простір, у якому відбувається взаємодія природних, біотичних та антропогенних компонентів. Зокрема, у дослідженнях малих та середніх річок Круглов застосовує інтегрований підхід, поєднуючи картографічне моделювання, польові гідроекологічні обстеження, аналіз якісного складу води та біоіндикацію для оцінки екологічного стану. Особливу увагу він приділяє ландшафтно-геохімічним особливостям території басейну, міграції забруднюючих речовин та впливу забудови на гідродинаміку. Такий підхід дозволяє не лише виявити локальні осередки деградації, але й розробити адаптивні стратегії відновлення річкових екосистем, з урахуванням усіх рівнів організації геоекосистем — від локального до регіонального [20].

Цей підхід може бути вдало використаний для дослідження водних геоекосистем у межах урбанізованих територій, зокрема міста Києва. Басейнова модель дозволяє розглядати екологічні проблеми не окремо для кожного водного об'єкта, а в контексті взаємодії між усіма компонентами водної мережі міста — річками, озерами, струмками, системами дренажу. Саме завдяки такій інтеграції можливо визначити ключові осередки деградації водних ресурсів, обґрунтувати заходи щодо їхнього відновлення та підвищити ефективність екологічного моніторингу. Наступний абзац буде присвячено практичним прикладам застосування цього підходу для аналізу стану водних геоекосистем Києва та розробці рекомендацій для їхньої оптимізації.

Адже структура водних геоекосистем у міському середовищі потребує окремого розгляду, адже саме міська забудова, інтенсивна рекреація, колекторизація річок та комплексне регулювання водних ресурсів значно впливають на їхній стан та функціонування.

Наприклад, у межах міської водної мережі, такі геоекосистеми можуть представляти модель впливу антропогенних факторів на водні ресурси річок або озер, а також описувати специфіку прибережних ландшафтів і їхню стійкість до змін навколишнього середовища [20]. У Таблиці 1.1 наведено основні рівні організації таких водних систем: мікрорівень (локальні водойми), мезорівень

(районні водні мережі) та макрорівень (басейни великих річок), що забезпечує комплексний підхід до їх дослідження.

**Таблиця 1.1**

**Рівні організації міських водних геоекосистем**

Рівень організації	Просторова одиниця	Приклад у Києві	Особливості функціонування
Мікрорівень	Локальна водойма	Став у парку «Перемога»	Інтенсивна рекреація
Мезорівень	Районна водна мережа	Русло Либіді з притоками	Часткова колекторизація
Макрорівень	Басейн/суббасейн	Басейн Дніпра в межах Києва	Комплексне регулювання

Таким чином, геоекосистемний підхід дозволяє розглядати водні об'єкти не просто як ізольовані водойми, а як інтегровані екологічні системи, що функціонують у складній взаємодії з природними та антропогенними факторами. Це створює міцне підґрунтя для ефективного управління водними ресурсами, забезпечуючи сталий розвиток та екологічну безпеку урбанізованих територій [20].

**1.2 Аналіз методик геоінформаційного картографування і моніторингу водних геоекосистем**

Геоінформаційне картографування та моніторинг водних геоекосистем є одним із ключових етапів забезпечення сталого управління водними ресурсами в умовах урбанізації. Сучасні методики моніторингу дозволяють не лише фіксувати поточний стан водних об'єктів, але й прогнозувати їхні зміни під впливом як природних, так і антропогенних факторів.

Це досягається завдяки застосуванню геоінформаційних систем (ГІС), технологій дистанційного зондування (ДЗЗ), супутникового моніторингу та польових досліджень [1; 2; 3].

Геоінформаційне картографування включає декілька методик, серед яких виділяють топографічне, гідрологічне, екологічне та моніторингове картографування. Топографічне картографування забезпечує створення базових карт місцевості з відображенням рельєфу, водних об'єктів, ліній комунікацій та інших важливих елементів [1].

Воно є основою для створення більш спеціалізованих карт, таких як гідрологічні та екологічні. Важливою складовою є гідрологічне картографування, яке спрямоване на відображення гідрологічних характеристик водних об'єктів: рівень води, швидкість течії, динаміка водного потоку, глибина водного дзеркала та об'єми води. Такий підхід дозволяє більш точно оцінити водний баланс річок та озер у межах міської зони, що є критичним для управління водними ресурсами у містах [2].

Екологічне картографування спрямоване на моніторинг забруднення водних об'єктів, концентрації хімічних речовин, важких металів та біологічних показників якості води. За допомогою ГІС відбувається візуалізація даних, що дозволяє виявити найбільш критичні зони, де потрібні природоохоронні заходи [4; 5]. Наприклад, у дослідженнях Мокрого [1] використання ГІС для екологокартографічного моделювання дозволило виявити зони підвищеного забруднення в природоохоронних територіях Західного Полісся. Подібний підхід був застосований у роботі Атрасевича та Загородньої [2], де здійснювалося картографування басейну річки Прип'ять, що дало змогу відслідковувати зміни у водному балансі внаслідок антропогенного впливу.

Моніторингове картографування, що базується на регулярному оновленні даних, дозволяє здійснювати постійне відстеження змін у водних геоекосистемах. Це досягається завдяки використанню супутникових даних та аерофотозйомки, які забезпечують оперативну інформацію про зміну рівня води, замулення, заростання водною рослинністю, а також деградацію прибережних

зон [3; 7]. Зокрема, Загородня, Охарєв та Попова [3] описують використання геоінформаційних технологій для моніторингу водно-болотних екосистем Українського Полісся, що дозволило оцінити їхній екологічний стан і ступінь антропогенного впливу.

Важливим компонентом сучасного моніторингу є цифрові моделі місцевості (ЦММ), що дозволяють створювати тривимірні карти водних об'єктів і моделювати їхній стан у різних умовах. За допомогою таких моделей можна прогнозувати зміни рівня води під час паводків, оцінювати ризики затоплень та визначати обсяги можливих втрат водних ресурсів [4; 5]. Трофимчук та Мокрий [4] у своїй роботі підкреслюють, що використання гідроакустичного моніторингу на базі ЦММ є одним із найточніших способів виявлення змін у глибині водойм та їхньому донному шарі.

Сучасні методи моніторингу включають також використання супутникових технологій, які забезпечують безперервне спостереження за водними ресурсами. Це дозволяє отримувати актуальну інформацію в реальному часі, що особливо важливо для зон з підвищеною загрозою затоплення або екологічної деградації. Загородня [9] у своїй роботі описує використання дистанційного зондування для оцінки екологічного стану природно-заповідних територій, де спостереження супутників дозволяють виявляти найменші зміни у структурі водних об'єктів.

У таблиці 2.2 представлено аналітичне порівняння основних типів картографування та моніторингу водних геоекосистем з виділенням їхніх ключових характеристик, методів збору даних, програмного забезпечення та областей застосування.

Таким чином, сучасні методики геоінформаційного картографування і моніторингу водних геоекосистем забезпечують високий рівень деталізації даних, їхню актуальність та оперативність у зборі й обробці. Це дозволяє не лише оцінювати поточний стан водних ресурсів, а й формувати прогнози, що сприяють ефективному управлінню водними об'єктами в умовах урбанізації [20].

Таблиця 2.2

**Аналітичне порівняння основних методик геоінформаційного картографування та моніторингу водних геоекосистем**

<b>Тип картографування</b>	<b>Методи збору даних</b>	<b>Програмне забезпечення</b>	<b>Основні характеристики</b>	<b>Область застосування</b>
Топографічне	Аерофотозйомка, польові дослідження	ArcGIS, QGIS	Відображення рельєфу, водних об'єктів, мереж	Планування забудови, управління ресурсами
Гідрологічне	ДЗЗ, польові вимірювання	HEC-RAS, MIKE 21	Відображення потужності потоку, рівня води	Водний баланс, прогнозування паводків
Екологічне	Супутникові знімки, польові вимірювання	ENVI, ERDAS Imagine	Забруднення, біологічні показники, важкі метали	Оцінка стану водних об'єктів, природоохоронні заходи
Моніторингове	Супутникові знімки, аерофотозйомка	ArcGIS, QGIS, Google Earth	Динамічне оновлення карт, прогнозування змін	Зони ризику, затоплення, ерозія берегів
Цифрові моделі місцевості	ДЗЗ, лазерне сканування	ArcGIS, AutoCAD, Global Mapper	Тривимірне моделювання водних об'єктів	Прогнозування паводків, управління басейнами

*Джерело* : складено автором

### **1.3 Аналіз попередніх досліджень геоінформаційного картографування водних геоекосистем міста Києва.**

Водні геосистеми міста Києва є унікальними за своєю структурою та екологічним значенням. Вишневський у своїй праці *"Водойми Києва"* (2021) акцентує увагу на тому, що Київ вирізняється не лише великою кількістю водних об'єктів, але й їхньою різноманітністю та функціональністю. До складу водних геосистем міста входять річки, озера, ставки, затоки, водосховища, а також технічні водойми, створені внаслідок господарської діяльності людини [21].

Дніпро є найголовнішою водною артерією Києва, яка перетинає місто майже посередині, утворюючи численні рукави та затоки, такі як Десенка, Чорторий, Оболонь та інші. Окрім Дніпра, місто має велику кількість малих річок, серед яких Вишневський виділяє Либідь, Сирець, Почайну, Клов та інші. У своїй монографії він детально описує історію їх формування, поточний екологічний стан та роль у міському водному балансі [21].

Особливе місце займають водойми безстічного або з обмеженою циркуляцією типу — ставки та озера. У Києві їх нараховується кількості, і вони виконують важливі функції у підтримці місцевої гідрологічної стабільності, біофільтрації, біоіндикації та акумуляції забруднень. Ці водойми є не лише естетично привабливими, але й екологічно важливими для міського середовища [21]. Наприклад, Вишневський наводить дані щодо озер Опечень, Качине, Тельбін, Лугове, які виконують значні екосистемні функції, хоча багато з них зазнали істотного антропогенного впливу. Більш детально основні характеристики компонентів водних геоекосистем Києва можна побачити в таблиці 1.3.

Крім природних водойм, у Києві є також значна кількість технічних водойм, серед яких купальні, зливові резервуари, болота та штучно створені озера. Вони часто виникали в результаті видобутку піску або будівництва на прилеглих територіях. Вишневський відзначає, що багато таких об'єктів мають потенціал для відновлення та інтеграції в природоохоронні заходи міста [21].

Таблиця 1.3

**Типи компонентів водної геоекосистеми та їхні основні характеристики**

<b>Компонент</b>	<b>Приклад</b>	<b>Функція в геоекосистемі</b>	<b>Стан у міському середовищі</b>
Водне тіло	Річка Либідь, озеро Тельбін	Гідрологічна стабільність	Забруднене, змінена морфологія
Донні відклади	Мул на дні ставка	Акумуляція забруднень	Перенасичення важкими металами
Прибережна рослинність	Очерет, осока	Біофільтрація, захист берегів	Часткова деградація
Біота (гідрофауна)	Плоскирка, рачки, планктон	Біоіндикація	Різко знижене біорізноманіття

*Джерело* : складено автором за [21]

У своїй класифікації водних геосистем Вишневецький виділяє кілька основних типів:

- Морфо-генетичні водні геосистеми, що формуються під впливом природних процесів, таких як річкові, озерні та болотні комплекси.
- Еколого-ландшафтні геосистеми, що відображають функціональні особливості водойм у міському середовищі.
- Урбогеосистемні геосистеми, які розглядають водойми як частину міського ландшафту з урахуванням їх адаптації до урбанізації.
- ГІС-орієнтовані підходи до класифікації, що базуються на використанні сучасних геоінформаційних технологій для моніторингу та управління водними ресурсами [20].

У цьому контексті геоінформаційне картографування та просторовий моніторинг водних геоекосистем виступають не просто допоміжними інструментами, а невід'ємною частиною сучасного управління водними ресурсами мегаполісу. Особливо це важливо для Києва, де водні об'єкти перебувають під постійним тиском урбанізації, забруднення, змін гідрологічного режиму. Методика ГІС-картографування дозволяє інтегрувати екологічну інформацію з просторовими даними, оперативно відслідковувати зміни стану

водойм, прогнозувати можливі екологічні ризики (наприклад, підтоплення, евтрофікацію, засмічення), а також формувати науково обґрунтовані природоохоронні заходи на рівні окремих басейнів або водозбірних територій [21]. Такий підхід дозволяє не лише покращити екологічний стан техногенних і природних водойм Києва, а й забезпечити їхню стійку інтеграцію у міський ландшафт як повноцінних екосистем, що виконують гідрологічні, санітарні, кліматичні та рекреаційні функції.

Згідно з дослідженнями Вишневського (2021), картографування водойм Києва здійснювалося з використанням геоінформаційних систем (ГІС), що забезпечують високу точність просторових даних, оперативний доступ до інформації та можливість оновлення картографічного матеріалу у реальному часі. Основним джерелом інформації для створення карт стали супутникові знімки високої роздільної здатності, а також результати польових досліджень, що включали оцінку глибини водойм, стану прибережної зони, рівня забруднення води та донних відкладів [21].

Вишневський виділяє кілька етапів геоінформаційного картографування водних геоекосистем. На першому етапі відбувається збір вихідних даних, серед яких: топографічні карти, супутникові знімки, аерофотознімки, матеріали геодезичних зйомок, а також архівні картографічні матеріали. Важливою особливістю є застосування методів дистанційного зондування, що дозволяє отримувати актуальну інформацію про стан водних об'єктів безпосередньо з космосу. Це особливо ефективно для спостереження за динамікою змін берегової лінії, появою нових водойм або замуленням старих [21].

Другий етап включає обробку отриманих даних у середовищі геоінформаційних систем (ГІС). На цьому етапі здійснюється векторизація контурів водойм, визначення їхніх геометричних параметрів (площа, довжина, ширина), моделювання рельєфу дна, а також побудова цифрових моделей місцевості. Одним із головних завдань цього етапу є створення багатопланових карт, де кожен шар відображає окремі характеристики водної геосистеми: гідрологічні параметри, біотичний склад, забрудненість води та донних відкладів

[21]. У процесі картографування активно використовуються ГІС-платформи, такі як ArcGIS та QGIS, які забезпечують можливість інтеграції різних типів даних, їхнє поєднання та просторовий аналіз.

Третій етап передбачає створення тематичних карт, що відображають екологічний стан водних об'єктів, їхню прибережну зону, а також ризики, пов'язані з антропогенним навантаженням. Вишневський у своїй роботі "Водойми Києва" наводить приклади таких карт, що включають карти евтрофікації водойм, забруднення важкими металами, замулення та деградації прибережної рослинності [20]. Це дозволяє виявляти критичні ділянки, де потрібні невідкладні природоохоронні заходи. Особлива увага приділяється ділянкам з високим рівнем нафтового забруднення (наприклад, озеро Лугове), де застосовуються технології дистанційного зондування для фіксації забруднень в реальному часі [20].

Моніторинг водних геоекосистем, згідно з підходом Вишневського, є систематичним спостереженням за станом водних об'єктів з метою виявлення змін у їхній структурі та функціонуванні під впливом природних і антропогенних факторів. Він виділяє кілька рівнів організації моніторингу: локальний, районний та басейновий. Локальний рівень охоплює малі водойми, ставки та локальні гідрологічні системи, де основна увага приділяється зміні рівня води, забрудненню та біологічному стану. Районний рівень моніторингу охоплює річкові мережі в межах окремих районів міста, таких як русло Либеді або Сирця, де оцінюється динаміка водного потоку, стан берегової зони та рівень забруднення. Басейновий рівень включає великі річкові басейни, такі як басейн Дніпра в межах міста Києва, що дозволяє здійснювати контроль за комплексним впливом урбанізації на водні ресурси.

Важливою складовою моніторингу є використання цифрових моделей місцевості (ЦММ), які дозволяють проводити моделювання змін рівня води під час паводків або злив, оцінювати ризики затоплень, а також прогнозувати зміни берегової лінії. Зокрема, у своїй роботі Вишневський демонструє використання

ГІС для оцінки впливу урбанізації на затоплення прибережних зон, підвищення рівня води у ставках та озерах у разі екстремальних погодних явищ [21].

Для підвищення точності спостережень у рамках моніторингу застосовуються супутникові технології, що дозволяють відстежувати зміни в реальному часі. Супутниковий моніторинг дає можливість виявляти процеси замулення, деградації прибережних зон, евтрофікації та нафтового забруднення. Вишневський підкреслює, що це особливо важливо для таких водойм, як озеро Лугове, де фіксувалися випадки викидів нафтопродуктів [21].

Таким чином, методика геоінформаційного картографування та моніторингу водних геоекосистем, запропонована Вишневським, є сучасним підходом до управління водними ресурсами в умовах міської урбанізації. Вона базується на використанні ГІС-технологій, дистанційного зондування та цифрових моделей місцевості, що забезпечує високу точність спостережень та можливість оперативного реагування на екологічні виклики. Це дозволяє не лише виявляти поточний стан водних об'єктів, але й прогнозувати зміни, що спричинені як природними процесами, так і антропогенним впливом [21].

## 2 МЕТОДИКА ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО КАРТОГРАФУВАННЯ ТА МОНІТОРИНГУ ВОДНИХ ГЕОЕКОСИСТЕМ.

### 2.1 Основні кроки методики геоінформаційного картографування та моніторингу водних геоекосистем міста Київ

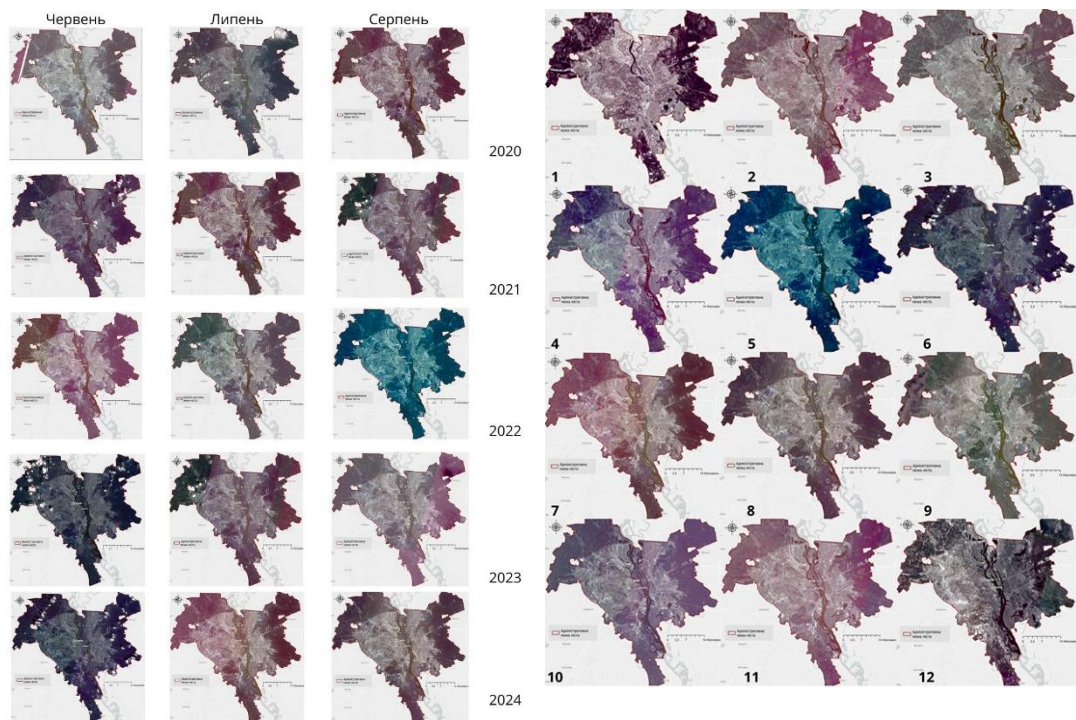
Методика передбачає розробку геопросторової бази даних картографування та оцінки стану водойм міста Києва, виявлення проблем та формування дорожньої карти прийняття управлінських рішень. Ця методика інтегрує дані дистанційного зондування Землі, ГІС-технології та польові дослідження для валідації отриманих даних. Методика включає 6 основних етапів:

**1. Збір та підготовка вихідних даних.** Цей етап є основою для проведення всього подальшого аналізу.

Вибір супутникових знімків для моніторингу водойм часто використовують оптичні супутники з різною просторовою та часовою роздільною здатністю, наприклад, Sentinel-2 (багатоспектральні дані, регулярність), Landsat (історичні дані, довгострокові тренди), PlanetScope (висока просторова роздільна здатність, щоденна зйомка), MODIS (частота зйомки, велике покриття).

Відбір дат по знімкам, що відповідають нашим завданням (наприклад, літні місяці для оцінки евтрофікації, періоди паводків для каламутності).

Також, важливим кроком є попередня обробка, що містить: - атмосферну корекцію – перетворення цифрових значень (DN) у коефіцієнти поверхневої відбивної здатності; - геометричну корекцію, яка усуває спотворення та приводить знімків до єдиної системи координат; - гармонізація, яка унормовує спектральні значення з різних сенсорів мультиспектральних супутникових знімків PlanetScope (рис. 2.1) і унормовує до еталонних спектральних сигнатур знімків Sentinel-2; - видалення або маскування хмар, хмарних тіней та інших атмосферних перешкод [24].



**Рис. 2.1. Супутникові знімки PlanetScope.**

## **2. Аналіз даних дистанційного зондування**

Аналіз даних дистанційного зондування є ключовим інструментом у сучасному моніторингу водних геоекосистем, особливо в умовах урбанізованих територій. За допомогою супутникових знімків високої роздільної здатності можна оперативно отримувати екологічну інформацію про водойми, оцінювати їх площу, якість води, стан прибережної зони та ступінь евтрофікації. Застосування спектральних індексів (NDCI, NDTI, NDWI) дозволяє не лише виявити водні об'єкти, а й відслідковувати просторові й часові зміни. Класифікація земного покриву допомагає деталізувати типи покриття, зокрема водну рослинність і прилеглі території. Додатково, спектральні характеристики поєднуються з наземними даними для створення регресійних моделей, які дають змогу точно оцінити параметри якості води, зокрема вміст хлорофілу «а» у мг/м<sup>3</sup>. Таким чином, дистанційне зондування інтегрується в систему постійного моніторингу, що дозволяє не лише оцінювати поточний стан водойм, а й моделювати ризики та тенденції їхнього подальшого розвитку.

### **3. Геоінформаційне картографування водних геоекосистем дозволяє нам візуалізувати дані у вигляді карт.**

Це дає змогу не лише створити тематичні карти, які показують розподіл хлорофілу "а", TSS, площі водного дзеркала, типів водної рослинності, але ще дозволяє проводити просторовий аналіз. Завдяки якому визначаються зони підвищеної концентрації забруднюючих речовин, місця інтенсивного "цвітіння", зміни у площі водойм. Крім цього, за допомогою візуалізації динаміки створюються карти в яких демонструються часові зміни. В подальшому всі ці матеріали можна використовувати для створення звітів , що є основою для аналізу та презентації [26].

### **4. Моніторинг та аналіз змін є циклічним етапом і дозволяє відстежувати процеси у водоймі.**

Починаючи з порівняльного аналізу зіставляємо карти за різні періоди часу для виявлення тенденцій та змін. Також важливою частиною є виявлення аномалій, які допомагають нам ідентифікувати незвичайні явища або різкі зміни у параметрах водойми. Для оцінки впливу використовуємо аналіз кореляції між змінами у водоймі та потенційними факторами впливу , такими як зміни клімату або антропогенне навантаження. На основі виявлених тенденцій та моделей робимо коротко- або середньострокові прогнози стану водойми.

### **5. Валідація та моніторинг.**

Валідація передбачає постійну перевірку точності отриманих даних та моделей за допомогою нових польових вимірювань. Це дозволяє вдосконалювати моделі та підвищувати точність до результатів. Моніторинг включає регулярне оновлення геоінформаційних шарів та карт, щоб відображати поточний стан водойм (рис. 2.2).

### **6. Створення наборів геопросторових даних для прийняття рішень та управління відновленням належного стану водних геоекосистем.**

На основі результатів геоінформаційного картографування та моніторингу формуються розробки екологічних заходів, оцінки ефективності вже впроваджених програм, а також для стратегічного планування майбутніх дій.

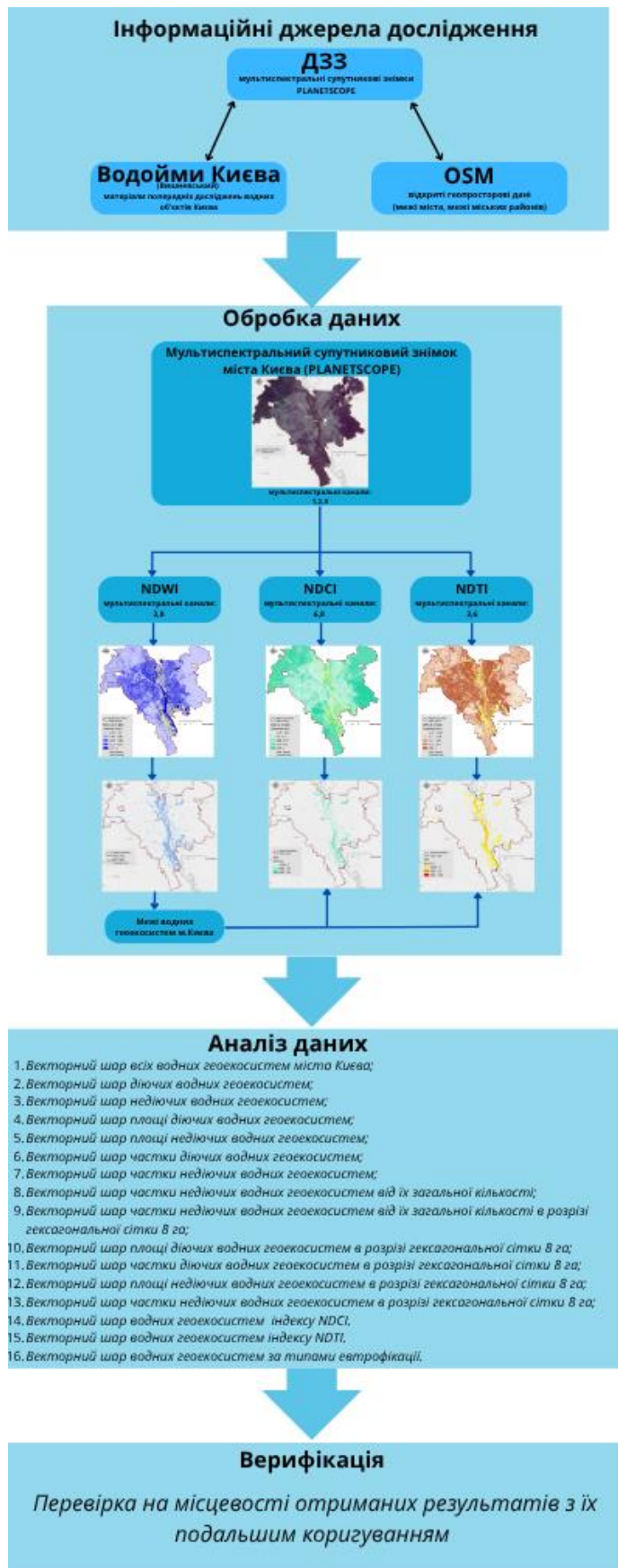


Рис. 2.2. Блок-схема етапів дослідження водних геоекосистем м. Києва.

(розроблено автором на основі власних досліджень)

Ці дані також слугують важливим інструментом інформування громадськості та залучення зацікавлених сторін до процесу управління водними ресурсами [24].

Ця методика є комплексним підходом, що поєднує можливості дистанційного зондування для отримання широкого спектра даних та ГІС-технологій для їх аналізу, візуалізації та управління, забезпечуючи ефективний моніторинг водних ресурсів.

## 2.2 Геоінформаційне картографування водних геоекосистем.

Індекс NDWI (Normalized Difference Water Index) є одним з найефективніших інструментів у геоінформаційному картографуванні водних геоекосистем. Він дозволяє чітко ідентифікувати водні об'єкти на супутникових знімках завдяки специфічним спектральним властивостям, що відрізняється від інших типів покриття, таких як рослинність або ґрунт. Його використання забезпечує точну просторову оцінку стану водних об'єктів у динаміці [22].

### Принцип та формула індексу NDWI.

Індекс NDWI використовує зелений та ближній інфрачервоний (NIR) діапазони спектра. Принцип його роботи ґрунтується на тому, що: вода має відносно високу відбивну здатність у зеленому діапазоні, тоді як у ближньому інфрачервоному – майже повністю його поглинає. Саме завдяки цій контрастності індекс дозволяє чітко виділити водні об'єкти серед інших поверхонь.

Формула NDWI виглядає так:

$$\text{NDWI} = (\text{RGreen} - \text{RNIR}) / (\text{RGreen} + \text{RNIR}) \quad (1)$$

Де:

RGreen — коефіцієнт відбиття у зеленому діапазоні спектра (для Sentinel-2 це смуга B3, близько 560 нм).

RNIR — коефіцієнт відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні спектра (для Sentinel-2 це смуга B8, близько 842 нм) [22].

### Значення NDWI варіюються в діапазоні від -1 до +1.

Значення  $\text{NDWI} > 0.5$  – вказують на відкриті водні об'єкти (річки, озера, водосховища). Чим ближче значення до +1, тим вища ймовірність присутності чистої води.

Значення NDWI близько 0 – може відповідати зонам з високою вологістю ґрунту, перехідним зонам або змішаним пікселям, що містять як воду, так і рослинність або ґрунт.

Значення  $NDWI < 0$  - вказують на суходол, такі як рослинність, ґрунт, забудовані території. Рослинність має високу відбивну здатність у NIR діапазоні, що дає негативні значення NDWI [22].

### **Застосування NDWI у геоінформаційному картографуванні водних геоекосистем.**

Використання індексу NDWI є ключовим для кількох аспектів картографування та моніторингу водних геоекосистем:

1. NDWI є одним із найефективніших інструментів для автоматичного виділення водного об'єкту на супутникових знімках. Це дозволяє точно визначати межі водойм, що є основою для подальшого аналізу.

2. Оцінюючи NDWI для знімків, отриманих у різні періоди часу, можна відстежувати зміни у площі озер, річок, ставків. Це важливо для оцінки наслідків посух, паводків, забору води для зрошення, або змін у гідрологічному режимі.

3. NDWI дозволяє ідентифікувати тимчасові водойми, наприклад, після сильних опадів або весняних розливів, що важливо для розуміння динаміки водних ресурсів.

4. Завдяки своїй чутливості до вологості, NDWI може допомагати у виділенні зон переходу від водної до сухопутної екосистеми, а також потенційно затоплених територій.

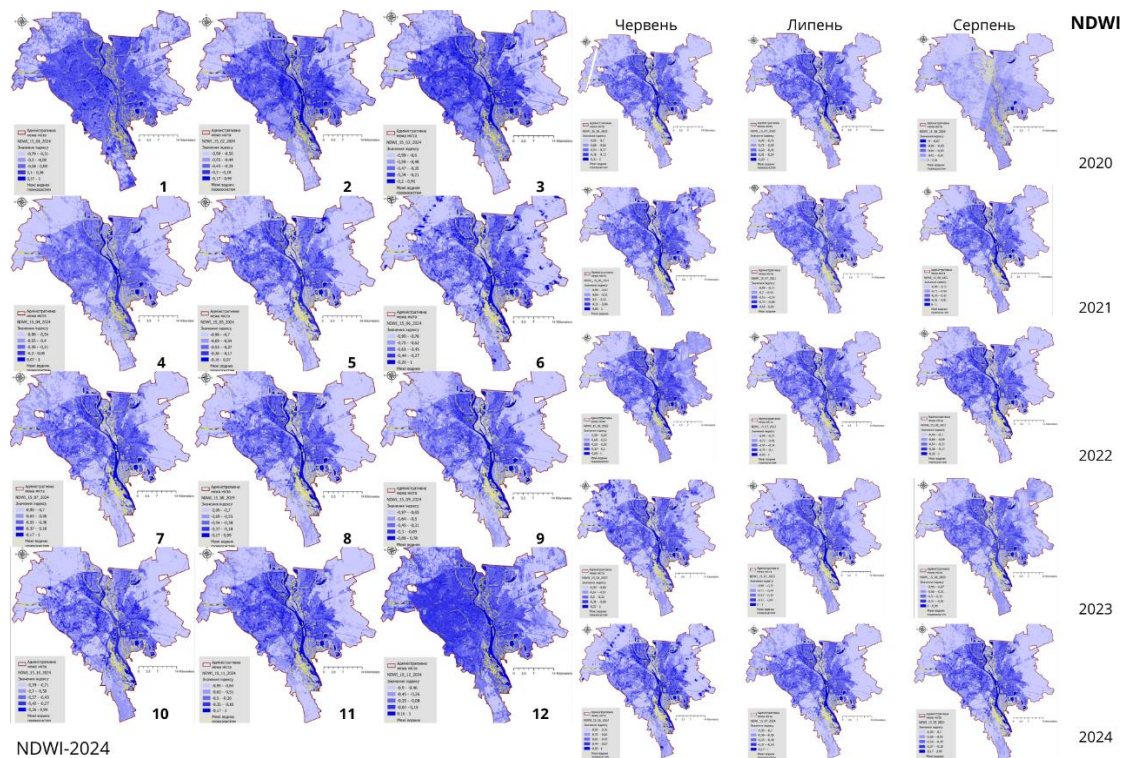
5. Зміни в NDWI можуть вказувати на антропогенний вплив, такий як меліорація, будівництво дамб, що призводить до трансформації водних геоекосистем.

6. Отримані за допомогою NDWI карти можуть бути використані як вхідні дані для складніших геоінформаційних моделей та можуть бути важливою складовою сталого управління водними ресурсами.

Таким чином, NDWI індекс є простим і дуже ефективним інструментом для геоінформаційного картографування водних геоекосистем [22].

Для дослідження водних геоекосистем міста Києва та динаміки їхніх характеристик був розрахований Нормалізований диференційний водний індекс (NDWI). Обчислення проводилися на основі супутникових знімків за ключові

дати: щомісячно протягом 2024 року, а також для літніх місяців (червень, липень, серпень) у період з 2020 по 2024 рік (рис. 2.3). Розрахунок індексу, що ефективно відображає наявність та стан поверхневих вод, виконувався в середовищі QGIS за допомогою інструменту «Растровий калькулятор».



**Рис. 2.3. Річний та багаторічні цикли індексу NDWI для м. Київ**

Карти NDWI чітко ідентифікують основні водні артерії та об'єкти Києва, зокрема річку Дніпро, її затоки, протоки, а також міські озера та інші водойми. Високі позитивні значення індексу (відображені насиченими синіми кольорами на наданих картах) корелюють з відкритими водними поверхнями, дозволяючи точно окреслювати їхні межі. Території суходолу, навпаки, характеризуються нижчими або негативними значеннями NDWI. Стосовно щомісячних даних NDWI за 2024 рік (NDWI-2024) демонструє стабільне відображення великих водних об'єктів протягом усього року. В зимові місяці (січень-березень, грудень) можливий вплив льодового покриття на значення індексу, що може дещо змінювати інтенсивність сигналу від водної поверхні, проте контури водойм залишаються чітко видимими. Весняний період (квітень-травень) може

характеризуватися підвищенням вологості прибережних зон та максимальним наповненням водойм, що також знаходить своє відображення у значеннях NDWI. Влітку та восени індекс продовжує ефективно розрізняти воду та суходіл. При спостереженні даних NDWI за літній період (червень-серпень) з 2020 по 2024 рік ("NDWI") встановлено, що основні водні геоекосистеми здебільшого залишаються у стабільному стані. Разом з тим, певні коливання значень індексу або контурів менших водойм та заплавної зон можуть бути обумовлені річною кількістю опадів та загальними гідрологічними характеристиками відповідного року.

Загалом, картосхеми NDWI слугують надійним інструментом для геоінформаційного картографування водних ресурсів Києва. Вони дозволяють точно ідентифікувати водні поверхні, оцінювати їхню просторову конфігурацію та відстежувати деякі сезонні й міжрічні зміни.

### **2.3 Моніторинг стану водних геоекосистем через розрахунок евтрофікації водойм через спектральні індекси.**

Евтрофікація водойм є значною екологічною проблемою, і супутниковий моніторинг за допомогою спектральних вегетаційних індексів на основі даних дистанційного зондування є ефективним інструментом для її оцінки. Використання знімків PlanetScore з багатоспектральними можливостями та регулярністю спостережень, забезпечуть детальніший та динамічний моніторинг [24].

Основні кроки для розрахунку евтрофікації за допомогою спектральних індексів на основі гармонізованих знімків PlanetScore компанії Planet Labs PBC:

Насамперед обираються якісні супутникові знімки, бажано без хмар або з мінімальною хмарністю з потрібного періоду спостереження. Дуже важливо, щоб ці знімки були максимально близькими за датами, особливо коли виконується гармонізація, що вимагає порівняння одночасних даних.

Наступним кроком є атмосферна корекція — вона дозволяє отримати коректні значення відбивної здатності поверхні, що є критичним для точного аналізу.

Далі виконується гармонізація — процес узгодження зображень між собою, щоб забезпечити їхню порівнянність у спектральному та просторовому вимірах. Для цього проводять спектральне та просторове узгодження, а також радіометричну нормалізацію, яка мінімізує відмінності між різними знімками. Ці методи базуються на використанні еталонних поверхонь або ділянок, спільних для всіх кадрів.

Після підготовки зображень розпочинається аналіз спектральних індексів, що пов'язані з ознаками евтрофікації, зокрема з концентрацією хлорофілу "а" та завислими речовинами. Хлорофіл "а" активно поглинає світло у синьому та червоному діапазонах і відбиває у зеленому та ближньому інфрачервоному, тому ці спектральні особливості використовуються для побудови відповідних індексів. Саме такі індекси дозволяють ефективно виявляти ділянки із підвищеним рівнем біопродуктивності, що свідчить про розвиток процесів евтрофікації [24].

Для точної кількісної оцінки евтрофікації бажано мати синхронні наземні вимірювання концентрації хлорофілу "а", TSS або інших показників якості води у водоймі.

Ці дані допоможуть встановити статистичні залежності (наприклад, лінійну або нелінійну регресію) між значеннями розрахованих спектральних індексів та відповідними наземними вимірюваннями. Ці моделі дозволять перетворити значення індексів зі супутникових знімків у оцінки концентрації хлорофілу "а" або TSS. Застосування калібрувальних моделей до всіх гармонізованих знімків дозволить отримати просторові карти розподілу концентрації хлорофілу "а" або TSS для кожної дати знімка.

Порівняння карт за різні періоди часу для оцінки зміни рівня евтрофікації у водоймі, виявлення ділянок з найбільшою інтенсивністю процесу та моніторингу ефективності заходів з відновлення.

Отримані карти концентрацій хлорофілу "а" або TSS є індикаторами стану евтрофікації. Високі значення цих показників свідчать про високий рівень біомаси водоростей та/або значне забруднення завислими речовинами, що є ознаками евтрофікації. Порівняння з історичними даними або еталонними значеннями може допомогти оцінити ступінь евтрофікації [26]. Точність оцінки евтрофікації значною мірою залежить від якості гармонізації даних PlanetScore. Неточності у гармонізації можуть призвести до помилкових значень індексів [24].

Оптимальні спектральні індекси та калібрувальні моделі можуть варіюватися залежно від типу водойми (глибина, оптичні властивості води), сезону та регіону дослідження. Рекомендується провести дослідження для визначення найбільш підходящих індексів та моделей для конкретної водойми.

Наявність якісних синхронних наземних даних є вкрай важливою для калібрування та валідації моделей. Без наземних даних оцінки будуть менш точними і матимуть якісний або напівкількісний характер.

Проте на точність супутникової оцінки впливають такі фактори, як хмарність, атмосферні умови, глибина водойми (у мілких водоймах може впливати дно) та наявність інших оптично активних компонентів у воді (наприклад, кольорових розчинених органічних речовин).

Використання гармонізованих даних PlanetScore для розрахунку спектральних вегетаційних індексів є потужним інструментом для моніторингу евтрофікації, дозволяючи отримувати інформацію з високою просторовою та часовою деталізацією, що є цінним для прийняття управлінських рішень щодо стану водних ресурсів.

## 2.4 Індeksi: NDCI та NDTI, відібрані на основі проведеного аналізу для моніторингу стану водних геоекосистем міста Київ

Індекс Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI) є одним з поширених спектральних індексів, що використовується для оцінки концентрації хлорофілу "а" у воді за даними дистанційного зондування. Хлорофіл "а" є основним пігментом фітопланктону, і його висока концентрація є ключовою ознакою евтрофікації водойми.

Формула NDCI:

$$\text{NDCI} = (\text{RRedEdge} - \text{RRed}) / (\text{RRedEdge} + \text{RRed}) \quad (2)$$

Де:

RRedEdge - коефіцієнт відбиття у діапазоні "червоного краю" (Red-Edge). Для Sentinel-2 зазвичай використовують смугу B5 (близько 705 нм).

RRed - коефіцієнт відбиття у червоному діапазоні спектра. Для Sentinel-2 зазвичай використовують смугу B4 (близько 665 нм) [25].

Отримані значення NDCI інтерпретуються в діапазоні від -1 до +1. Високі позитивні значення NDCI (ближче до +1): Вказують на високу різницю між відбивністю на "червоному краю" та у червоному діапазоні. Це є прямим індикатором високої концентрації хлорофілу "а" у воді. Високі значення NDCI корелюють зі значним розвитком фітопланктону, що є характерною ознакою високого рівня евтрофікації або навіть цвітіння води. Значення NDCI близько нуля або слабо позитивні: Можуть вказувати на помірну або низьку концентрацію хлорофілу "а". Це відповідає помірному або низькому рівню евтрофікації. Низькі або негативні значення NDCI (ближче до -1): Свідчать про низьку відбивність на "червоному краю" порівняно з червоним діапазоном. Це зазвичай спостерігається у чистій воді з низькою концентрацією хлорофілу "а" та мінімальним розвитком фітопланктону. Такі значення характерні для водойм з низьким рівнем евтрофікації [25].

Прямий зв'язок індекса NDCI між його високими позитивними значеннями та евтрофікацією полягає у тому, що NDCI є чутливим індикатором біомаси

фітопланктону, вираженої через концентрацію хлорофілу "а". Евтрофікація – це процес збагачення водойми поживними речовинами, що призводить до надмірного росту водоростей та інших водних рослин, головним чином фітопланктону. Таким чином, просторовий та часовий аналіз значень NDCI дозволяє: 1) чітко побачити на картах NDCI області, де концентрація хлорофілу "а" є найвищою, що відповідає зонам інтенсивної евтрофікації або цвітіння; 2) відстежувати динаміку аналізуючи зміни NDCI протягом часу (наприклад, сезонні зміни або багаторічні тренди), можна оцінити, як змінюється рівень евтрофікації у водоймі; 3) оцінювати вплив зовнішніх факторів, пов'язаних зі скидами забруднювальних речовин, змінами температури води, гідрологічним режимом тощо.

Щоб правильно інтерпретувати дані, отримані за допомогою індексу NDCI (Normalized Difference Chlorophyll Index), потрібно враховувати низку важливих чинників. По-перше, без локальної калібровки значення індексу залишаються відносними — тобто показують лише тенденції (вищий або нижчий рівень хлорофілу «а»), але не дають точних концентрацій. Для кількісного аналізу слід порівнювати супутникові дані з результатами одночасних наземних вимірювань у конкретній водоймі [27].

По-друге, на результати NDCI можуть впливати інші речовини у воді, зокрема завислі частки (TSS) та розчинені органічні речовини (CDOM), особливо у складних, оптично неоднорідних водах. У таких випадках індекс може відображати не лише концентрацію хлорофілу, а й інші компоненти, що ускладнює інтерпретацію.

Також слід зважати на глибину водойми — у мілководних ділянках відбите світло від дна може спотворювати сигнали, які реєструє супутник. Навіть після атмосферної корекції залишкові атмосферні явища, а також умови освітлення під час зйомки (наприклад, кут сонця або хмарність) можуть вплинути на точність відбивної здатності та, відповідно, на сам індекс [25].

### **Відбір знімків для NDCI**

Таким чином, високі позитивні значення NDCI є вагомою ознакою евтрофікації, що вказує на значне зростання біомаси фітопланктону. Для більш точної кількісної оцінки рівня евтрофікації та концентрації хлорофілу "а" рекомендується проводити локальну калібрування індексу за допомогою наземних даних.

Для правильного розрахунку та інтерпретації NDCI (Normalized Difference Chlorophyll Index) з метою оцінки евтрофікації водойм, вибір дат супутникових знімків має вирішальне значення. Оскільки NDCI є індикатором концентрації хлорофілу "а", який, своєю чергою, відображає біомасу фітопланктону, дати знімків повинні відповідати періодам активного розвитку фітопланктону [27].

Оптимальні дати для відбору знімків для розрахунку NDCI з метою оцінки евтрофікації:

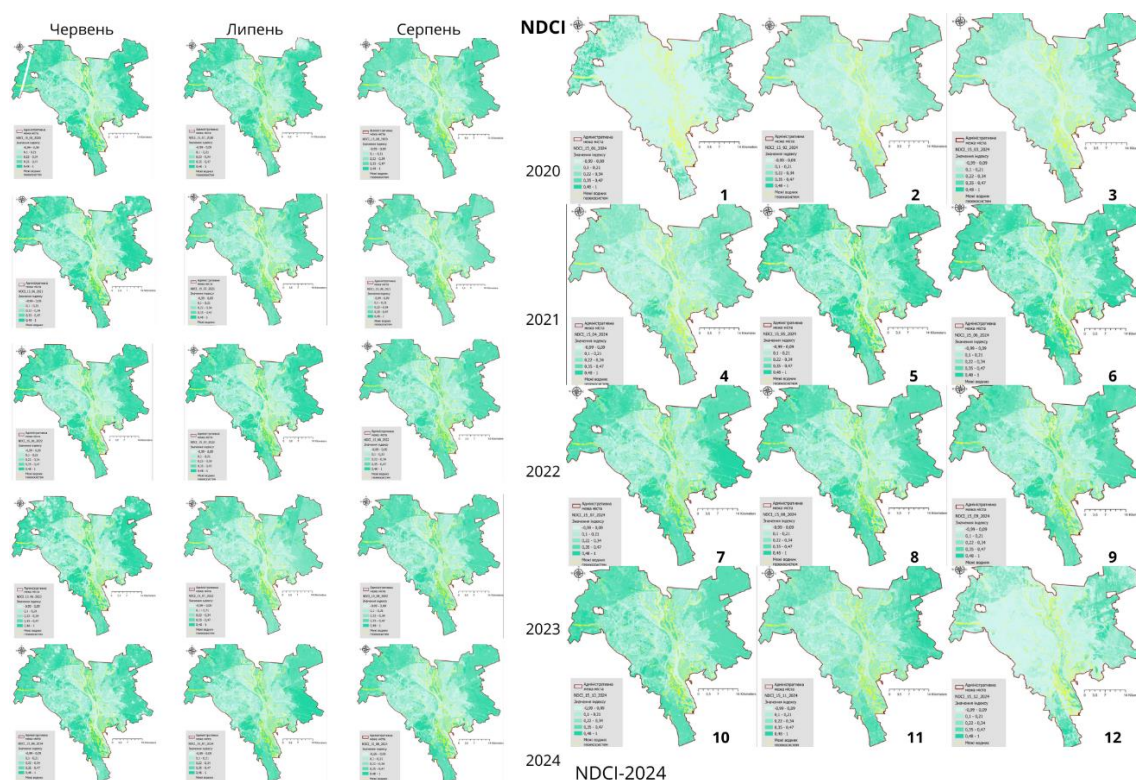
У помірному кліматичному поясі пік розвитку фітопланктону зазвичай припадає на літні місяці — з червня по серпень. У цей період у водоймах спостерігаються найвищі концентрації хлорофілу «а». Основні причини цього явища — висока температура води, що сприяє активному росту водоростей, інтенсивне сонячне освітлення, яке забезпечує енергію для фотосинтезу, а також наявність поживних речовин, які накопичуються після весняного стоку або вивільняються з донних відкладів. Крім того, термічна стратифікація, характерна для літа, сприяє скупченню фітопланктону у верхніх шарах води, де умови для росту є найбільш сприятливими [27]. Тому знімки, зроблені в період з червня по серпень, є найбільш показовими для оцінки пікового рівня евтрофікації та виявлення "цвітіння" води.

У деяких водоймах періоди "цвітіння" води можуть виникати не лише влітку, а й мати кілька піків протягом усього вегетаційного сезону, залежно від особливостей самої водойми та кліматичних умов. Якщо заздалегідь відомо, коли саме у певній водоймі спостерігається інтенсивне розмноження водоростей, доцільно обирати супутникові знімки саме на ці дати. Крім того, весна й осінь також можуть виявлятися активними періодами росту фітопланктону — це

пов'язано з циркуляцією водних мас та надходженням поживних речовин, тож знімки в ці сезони допоможуть краще зрозуміти річну динаміку евтрофікації [27].

Підсумовуючи, для оцінки евтрофікації за допомогою NDCI найкраще обирати знімки за періоди, коли очікується найвища концентрація фітопланктону, що зазвичай припадає на літні місяці. Врахування специфіки водойми та мети дослідження допоможе оптимізувати вибір дат знімків.

Для оцінки стану та динаміки водних геоекосистем міста Києва було проведено розрахунок Нормалізованого диференційного індексу хлорофілу (NDCI) (рис. 2.4). Розрахунки виконані на основі супутникових знімків для ключових дат за допомогою інструменту «Растровий калькулятор» в середовищі QGIS.



**Рис.2.4. Річний та багаторічні цикли індексу NDCI для м. Київ**

Індекс чітко візуалізує основні акваторії – річку Дніпро, її затоки та міські озера. Підвищені значення NDCI, що свідчать про вищу концентрацію хлорофілу, характерні для мілководних, менш проточних ділянок та зон, схильних до

накопичення біогенних речовин. Простежується виражений річний хід активності фітопланктону: мінімальні значення NDCI взимку, поступове зростання навесні, досягнення максимуму влітку (зазвичай липень-серпень), що супроводжується "цвітінням" води, та спад восени. Інтенсивність та масштаби літнього "цвітіння" водних об'єктів варіюють з року в рік, що зумовлено коливаннями погодних умов та, ймовірно, антропогенним впливом. Картографи NDCI є ефективним інструментом для оперативного моніторингу стану водних геоекосистем Києва. Вони дозволяють ідентифікувати зони підвищеної біологічної продуктивності (евтрофікації), оцінювати сезонні зміни та міжрічні тенденції.

### NDTI

За допомогою Normalized Difference Turbidity Index (NDTI) можна отримати важливу інформацію про каламутність (turbidity) та опосередковано про концентрацію загальних завислих речовин (Total Suspended Solids - TSS) у водоймах. Ці параметри є ключовими індикаторами фізичного стану води та можуть бути пов'язані з різними процесами, включаючи евтрофікацію.

Формула NDTI:

$$\text{NDTI} = (\text{RRed} - \text{RGreen}) / (\text{RRed} + \text{RGreen}) \quad (3)$$

Де:

RRed – коефіцієнт відбиття у червоному діапазоні спектра (для Sentinel-2 це смуга B4, близько 665 нм).

RGreen – коефіцієнт відбиття у зеленому діапазоні спектра (для Sentinel-2 це смуга B3, близько 560 нм) [23].

За допомогою індексу NDTI (Normalized Difference Turbidity Index) можна отримати важливу інформацію про стан водойм, зокрема про рівень їхньої каламутності. Цей індекс є чутливим показником наявності у воді завислих часток – саме вони впливають на здатність води розсіювати та поглинати світло [23]. Принцип дії NDTI полягає у порівнянні відбивної здатності води в червоному та зеленому спектральних діапазонах. У чистій воді поглинання світла в цих діапазонах досить низьке, однак наявність завислих речовин значно змінює

ситуацію: у червоному діапазоні вони помітно підвищують відбивну здатність, а у зеленому — вплив може бути іншим, наприклад, через присутність хлорофілу. Саме тому співвідношення цих показників дозволяє точно оцінити рівень каламутності води [23].

Якщо значення NDTI високе й позитивне, це вказує на значну каламутність — у воді міститься багато завислих часток, які інтенсивно розсіюють світло, особливо в червоному спектрі. Натомість низькі або навіть від'ємні значення індексу свідчать про чистішу або прозорішу воду з незначною кількістю домішок [26].

Застосування індексу NDTI дає змогу не лише оцінити загальний рівень каламутності води, а й простежити її просторовий розподіл у межах усієї акваторії водойми. На основі таких даних можна побудувати карту каламутності, яка наочно демонструє, як саме розподіляються завислі речовини у різних частинах водойми.

Це дуже корисно для виявлення потенційних джерел надходження завислих часток. На основі побудованої карти добре видно місця, де у водойму впадають річки, які приносять з собою багато мулу, або ділянки, де відбувається розмив берегів чи ведуться будівельні роботи. Усе це може спричинити підвищену каламутність води.

Окрім того, така карта допомагає визначити зони, де завислі речовини накопичуються або навпаки — розсіюються. Це може бути пов'язано з течіями, вітровими явищами та іншими гідродинамічними процесами, які впливають на рух води і, відповідно, на розподіл часток у ній.

Ще один важливий аспект — виявлення ділянок із різним ступенем прозорості води. У межах однієї водойми можуть існувати як каламутні, так і майже кришталево чисті зони, що свідчить про неоднорідність водного середовища та дозволяє краще зрозуміти екологічний стан цієї території [26].

Аналіз значень індексу NDTI у різні періоди часу дозволяє відстежити, як змінюється каламутність води у водоймах з плином часу. Це надзвичайно

корисно для розуміння природних та антропогенних процесів, що впливають на якість водного середовища.

Зокрема, NDTI допомагає виявити сезонні коливання. Наприклад, у весняний період під час паводків або після сильних злив рівень каламутності часто зростає через інтенсивне надходження дощових чи талих вод, які змивають до водойми велику кількість завислих речовин.

Крім цього, індекс дозволяє оцінити вплив окремих подій, таких як шторми або будівництво на узбережжі. Він також чутливий до довготривалих процесів, наприклад, ерозії берегів чи поступового забруднення води.

Ще одна важлива функція NDTI — можливість перевірити, наскільки ефективними є заходи, спрямовані на покращення стану водойми. Якщо впроваджуються програми очищення води або зменшення потрапляння забруднюючих речовин, аналіз змін індексу з часом дає змогу оцінити реальні результати таких дій [26].

Індекс NDTI, хоча й розрахований передусім для вимірювання каламутності води, може також опосередковано вказувати на процеси, пов'язані з евтрофікацією водойм. Залежно від контексту, підвищення рівня завислих речовин може бути одним із проявів цього явища.

Одним із таких процесів є розмив берегів. Якщо на узбережжі водойми відбувається надмірне заростання рослинністю або спостерігається її деградація через господарську діяльність чи зміну природних умов — це може призводити до ерозії. В результаті у воду потрапляє велика кількість мінеральних часток, що підвищує її каламутність.

Ще один поширений механізм — ресуспензія донних відкладів. У евтрофікованих водоймах часто накопичується багато органічного матеріалу на дні. Під впливом вітру, течій або активності водних організмів ці осади можуть підніматися з дна й змішуватися з водою, тим самим збільшуючи її каламутність [26]. Крім того, варто враховувати і зв'язок між каламутністю та біомасою фітопланктону. В окремих випадках саме активне розмноження водоростей (особливо під час "цвітіння" води) може бути основною причиною зниження

прозорості. Хоча NDTI не спеціалізується на визначенні саме фітопланктону (для цього краще підходить індекс NDCI), його значення все одно реагують на загальну кількість завислих у воді часток. Тому важливо вміти розрізнити, чим саме викликана каламутність — органічними речовинами, зокрема фітопланктоном, чи мінеральними домішками [27].

Індекс NDTI є корисним інструментом для аналізу каламутності води, проте його інтерпретація має певні обмеження та особливості, які варто враховувати під час досліджень.

По-перше, NDTI не дозволяє розрізнити тип завислих речовин. Він відображає загальну концентрацію часток у воді, але не надає інформації про їхній склад — чи це органічні речовини, мінеральні частинки або суміш обох. Така деталізація може бути критично важливою у дослідженнях, де важливо знати саме походження речовин, то одного NDNI буде не достатньо тому, що він не зазначить дрібний пісок або рештки рослин. По-друге, хоча чутливість NDTI до хлорофілу нижча, ніж у спеціалізованих індексів, таких як NDCI, але його показники можуть впливати й інші компоненти води, що поглинають чи розсіюють світло. Це може спричинити похибки але такий вплив все ж можливий і його варто брати до уваги [26].

Крім того, для того щоб використовувати NDTI та отримати точні дані наприклад, для визначення точної концентрації завислих речовин (TSS) або прозорості води, необхідно провести локальне калібрування. Це означає, що супутникові дані мають бути зіставлені з результатами реальних вимірювань, аби забезпечити точність і достовірність результатів.

**Вибір оптимальних дат для супутникового моніторингу каламутності за допомогою індексу NDTI** безпосередньо залежить від мети дослідження каламутності та динаміки, на відміну від індексу хлорофілу (NDCI), піки каламутності можуть бути зумовлені не лише біологічними, а й фізичними або антропогенними факторами.

Для фіксації пікових значень каламутності доцільно використовувати знімки, отримані невдовзі після сильних опадів або паводків (через 1–3 дні), коли

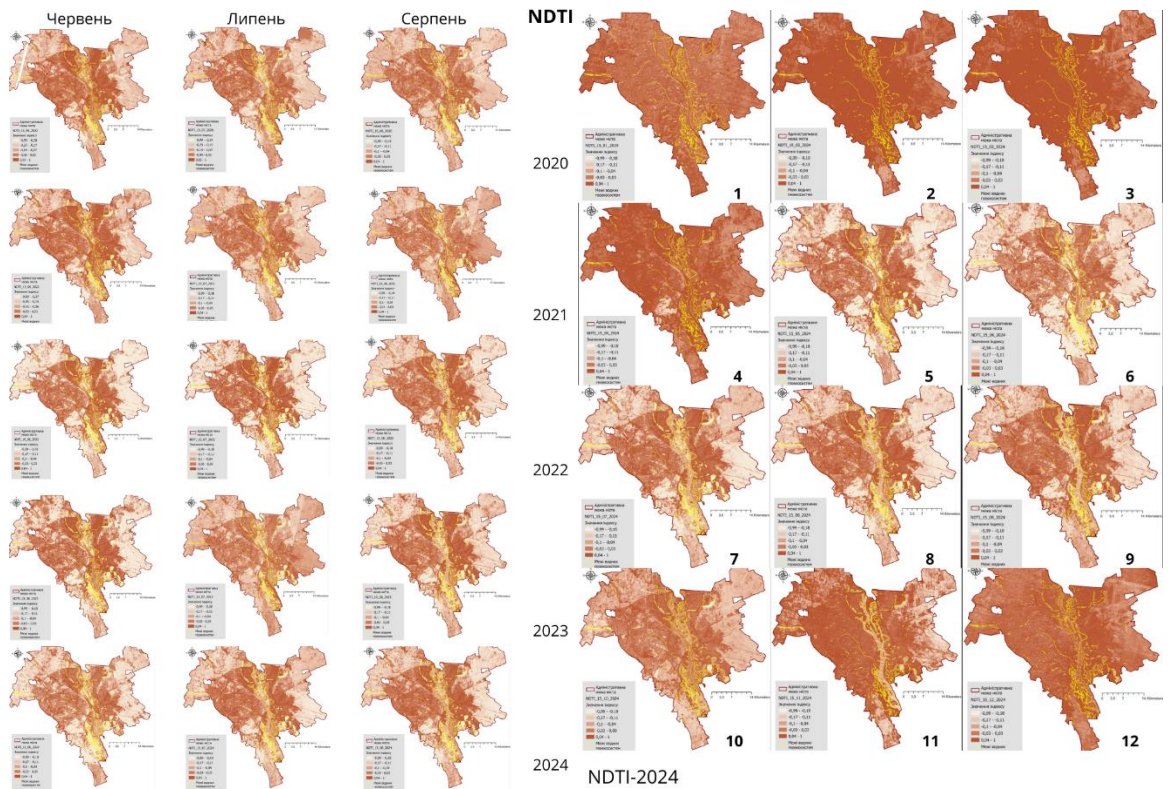
водні потоки приносять у водойму значну кількість мулу та зважених часток. Також варто враховувати періоди сильних вітрів, що спричиняють ресуспензію донних осадів, особливо у мілководних ділянках. Якщо у водоймі ведуться будівельні чи днопоглиблювальні роботи, аналіз знімків у ці періоди дозволить оцінити вплив антропогенних чинників.

У разі моніторингу **сезонних змін каламутності** доцільно здійснювати регулярний відбір знімків із фіксованою частотою (наприклад, щомісяця) . протягом усього безльодоставного періоду. Це дає змогу виявити природні коливання, пов'язані зі змінами кліматичних умов — таненням снігу навесні, літніми зливами або осіннім перемішуванням водної маси.

Для оцінки **фонових рівнів каламутності**, не пов'язаних із короткочасними подіями, слід обирати знімки, зроблені у періоди тривалої сухої та безвітряної погоди, коли зовнішні впливи мінімальні. Якщо досліджується **вплив конкретної події** (наприклад, зміна землекористування чи запуск технічного об'єкта), необхідно аналізувати супутникові знімки до та після конкретної події , для проведення порівняльного аналізу.

Підсумовуючи, вибір дат для розрахунку NDTI повинен бути гнучким і залежати від мети вашого дослідження. Для виявлення пікових значень зосереджуйтесь на періодах після сильних опадів, вітрів або антропогенних впливів. Для загальної динаміки - на регулярних інтервалах протягом року.

Для характеристики стану водних геоекосистем міста Києва, зокрема для оцінки каламутності води, було проведено розрахунок Нормалізованого диференційного індексу каламутності (NDTI). Ці розрахунки базувалися на супутникових знімках, отриманих для ключових дат: щомісячно протягом 2024 року, а також для літніх місяців (червень, липень, серпень) у період з 2020 по 2024 рік (рис. 2.5). Обробка даних та розрахунок індексу виконувалися в середовищі QGIS за допомогою інструменту «Растровий калькулятор». NDTI дозволяє кількісно оцінити вміст зважених часток у воді, що є важливим показником її прозорості та якості.



**Рис. 2.5. Річний та багаторічні цикли індексу NDTI для м. Київ**

Спостерігається значна варіативність рівня каламутності по різних ділянках водних об'єктів. Зокрема, існують помітні відмінності у значеннях NDTI між головним річищем Дніпра та його затоками чи міськими озерами, причому останні часто характеризуються локальними зонами з підвищеними показниками каламутності. Простежується чітка річна циклічність у змінах каламутності. Як правило, в зимовий період вона є мінімальною, навесні спостерігається її збільшення (спричинене таненням снігу та опадами), влітку рівень каламутності може варіювати під впливом інтенсивності дощів та біологічної активності у водоймах, а восени знову відбувається її спад. Також, помітно що інтенсивність каламутності, особливо протягом літнього сезону, може значно різнитися в різні роки. Такі відмінності, ймовірно, обумовлені щорічними коливаннями метеорологічних умов та ступенем антропогенного навантаження на водні системи.

Отже, метод картографування на основі індексу NDTI є дієвим інструментом для візуалізації та аналізу просторово-часової динаміки каламутності. Це забезпечує цінними даними систему моніторингу якості водних

ресурсів міста Києва, дозволяючи ефективно відстежувати зміни та визначати проблемні зони.

Для комплексної оцінки евтрофікації водойм за допомогою спектральних індексів **NDCI** (Normalized Difference Chlorophyll Index) та **NDTI** (Normalized Difference Turbidity Index) на основі гармонізованих знімків PlanetScope оптимальним періодом для відбору знімків є літні місяці [24,23].

Оскільки індекс NDCI безпосередньо відображає концентрацію хлорофілу "а", що є головним індикатором біомаси фітопланктону та ступеня евтрофікації. У помірних широтах саме влітку (червень-серпень) створюються ідеальні умови для інтенсивного росту водоростей: високі температури води, тривалий світловий день та накопичення поживних речовин. Відбір знімків у цей період дозволить зафіксувати максимальні прояви "цвітіння" води та оцінити пікові рівні евтрофікації [27].

Хоча **NDTI** вимірює каламутність та загальні завислі речовини, які можуть бути спричинені різними факторами (зливи, вітер), літо також є періодом, коли каламутність може бути пов'язана з органічними процесами, типовими для евтрофікованих водойм (наприклад, ресуспензія органічних відкладень або вплив інтенсивної біологічної активності). Більше того, моніторинг **NDTI** влітку може допомогти виявити джерела надходження поживних речовин, що сприяють евтрофікації, якщо вони пов'язані з літньою діяльністю людини чи природними явищами.

Таким чином, зосереджуючись на знімках за літні місяці, ви отримуете найбільш репрезентативну картину евтрофікації. Це дозволяє не тільки виявити максимальне поширення водоростей, а й оцінити загальний стан водойми в період її найбільшої біологічної активності. Звісно, для повної картини та відстеження динаміки, цінними можуть бути і знімки з інших сезонів, але для комплексної оцінки евтрофікації літні дані є пріоритетними. Показники індексів розраховані на ключових ділянках на основі характеристик стану водойми (табл. 2.1)

## Характеристика рівнів евтрофікації водойм на основі значень NDCI та NDTI

№	Рівень евтрофікації	Значення NDCI	Значення NDTI	Характеристика стану водойми
1	Низький рівень евтрофікації (Від оліготрофного до нижньо-мезотрофного)	(-1 - 0.05)	(-1 - 0)	Мало поживних речовин і водоростей. Вода переважно прозора. Якщо іноді каламутна, то зазвичай через змиви ґрунту, а не через "цвітіння".
2	Середній рівень евтрофікації (Від верхньо-мезотрофного до евтрофного)	(0.05 - 0.25)	(0 - 0.3)	Більше поживних речовин, помітний ріст водоростей. Вода може втрачати прозорість, стаючи каламутною через водорості або інші завислі частинки.
3	Високий рівень евтрофікації (Від евтрофного до гіперевтрофного)	(0.25 - 1)	(0.2 - 1)	Дуже багато поживних речовин, що спричиняє сильне "цвітіння" води. Вода зазвичай каламутна через велику кількість водоростей та продукти їх розпаду. Можливий дефіцит кисню, що шкодить рибі та іншим водним мешканцям.

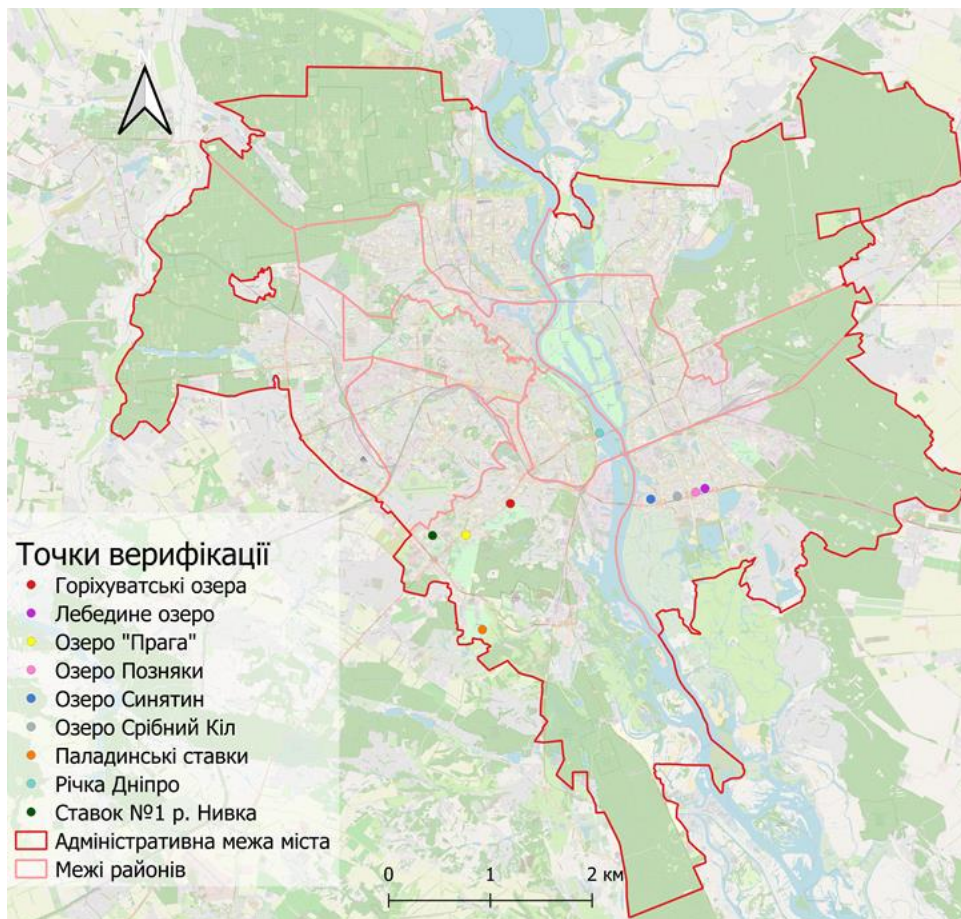
*Джерело:* створено автором.

NDCI є основним індикатором рівня евтрофікації (пов'язаної з хлорофілом), NDTI дає додаткову інформацію про загальну прозорість/каламутність води. При високому рівні евтрофікації, високі значення NDTI часто є прямим наслідком великої кількості водоростей. Однак, високий NDTI може спостерігатися і при низькому NDCI, якщо вода каламутна через неорганічні суспензії. Наведені спектральні діапазони є узагальненими значеннями отриманими внаслідок польового дослідження еталонних водойм, без лабораторних аналізів.

Під час дослідження я здійснювала виїзди на місцевість у межах міста Києва з метою фотографування водойм. Це була частина процесу верифікації — перевірки достовірності отриманих попередньо результатів на основі картографічних даних і супутникових знімків. У ході верифікації я звіряла фактичне розташування та стан водойм. Такий підхід дозволяє забезпечити точність та актуальність картографічного матеріалу (рис. 2.6).

У процесі верифікації я здійснила фотографування дев'ять водойм, розташованих у різних районах міста Києва. Зокрема, до переліку об'єктів дослідження увійшли: озеро Синятин, Лебедине, Позняки, Срібний Кіл, Горіхуватські озера, озеро "Прага", ставок №1 річки Нивка, Палаціндські ставки, річка Дніпро. Фотофіксація дозволила не лише підтвердити наявність та точне розташування водойм, але й зафіксувати їхній сучасний стан — рівень

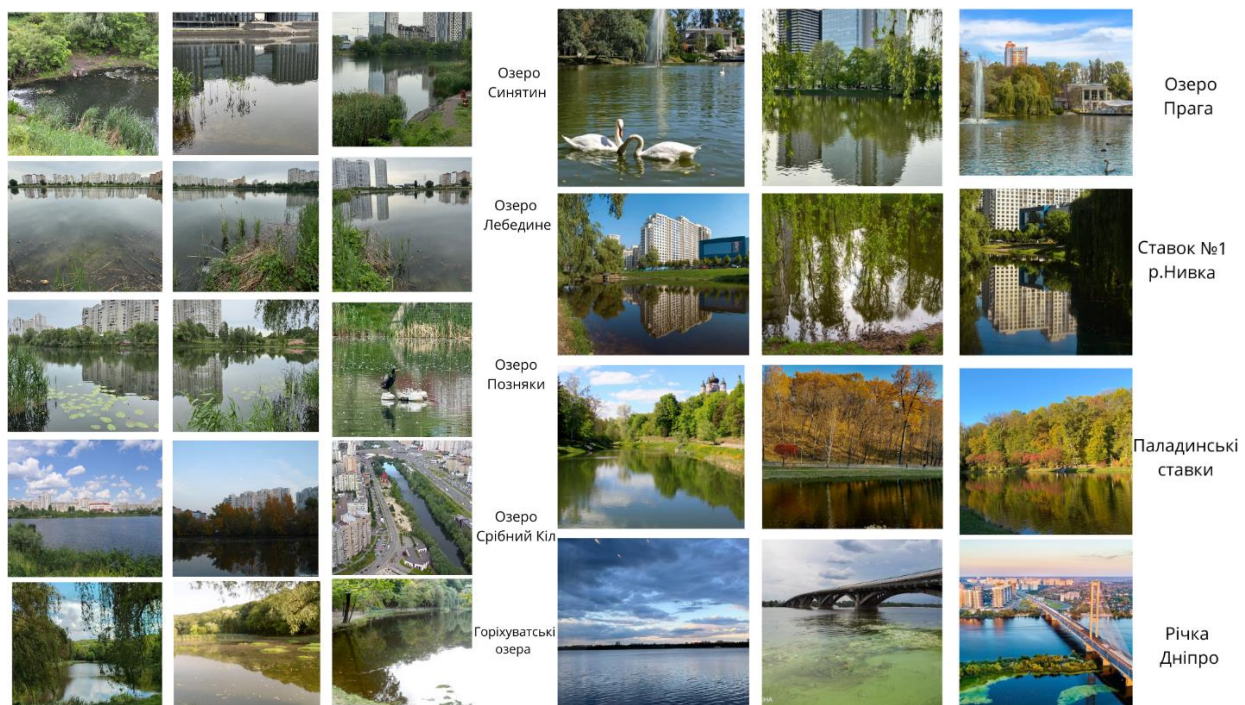
заростання прибережної зони, прозорість води, ознаки рекреаційного використання, технічну інфраструктуру навколо, а також виявити ознаки забруднення або антропогенного навантаження.



**Рис. 2.6.** Розташування точок верифікації (розроблено автором на основі власних досліджень)

Наприклад, озера Лебедине, Позняки та Срібний Кіл мають ознаки активного антропогенного впливу: на знімках чітко видно багатоповерхову забудову впритул до берегової лінії, наявність облаштованих пішохідних доріжок, а також доглянуту прибережну рослинність. Це свідчить про інтенсивне рекреаційне використання цих водойм. Водночас Горіхуватські озера мають значно природніший вигляд — на фотографіях видно щільну прибережну рослинність, частково замулену воду та відсутність облаштованої

інфраструктури, що свідчить про їх меншу урбанізованість, але й про потенційне забруднення внаслідок антропогенного заростання (рис. 2.7).



**Рис. 2.7. Фото водних об'єктів міста Київ (фото автора)**

Ставок № 1 річки Нивка, згідно з фотознімками, оточений забудовою, але берегова лінія виглядає менш впорядкованою, з ознаками надмірного розростання водної рослинності та відсутністю облаштованих зон для рекреації. Озеро "Прага" вирізняється доглянутим станом, видно декоративні фонтани, наявність лебедів, що свідчить про регулярне технічне обслуговування. Паладинські ставки зберігають переважно природний характер, видно щільну рослинність уздовж берегів, наявність водної рослинності та ознак забруднення. Прибережна зона виглядає стабільною, без ерозійних процесів, що свідчить про задовільний екологічний стан. Навколо водойми є незначне антропогенне навантаження, що дозволяє зберігати природну рівновагу водойми.

Річка Дніпро представлена з різних ракурсів. Це дозволило отримати цілісне уявлення про її сучасний стан. У деяких місцях вода виглядає прозорою та відносно чистою, тоді як на окремих ділянках зафіксовано інтенсивне цвітіння

водоростей, що вказує на ознаки забруднення органічними речовинами та розвиток евтрофікації. Такі контрасти свідчать про нерівномірне екологічне навантаження на річку в межах міста.

## **3 ГІС-СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ВОДНИХ ГЕОЕКОСИСТЕМ МІСТА КИЇВ**

### **3.1 Геопросторовий блок даних загальних характеристик водних геоекосистем міста Києва**

Загальна площа всіх водних геоекосистем Києва становить 5 075 гектарів, а загальна кількість об'єктів — 803 одиниці. У структурі переважають природні геоекосистеми, які займають 96% усієї площі (4 894 га) та становлять 64% від загальної кількості об'єктів (515 одиниць). Натомість штучні водні об'єкти, хоч і займають лише 4% площі (182 га), складають 36% від усієї кількості (286 об'єктів). Такий дисбаланс є типовим для великих міст — природні водойми займають великі площі, а штучні створюються у значній кількості, але мають малу площу.

У структурі природних водних геоекосистем найбільшу площу займають річки — 3 411 гектарів, що становить 67% від площі всіх водних об'єктів міста. Проте їх кількість відносно невелика — 50 об'єктів, або лише 6% від загальної кількості. Це свідчить про те, що річкові системи Києва є протяжними та займають великі території, проте структурно представлені невеликою кількістю русел. Натомість озера, що також належать до природних геоекосистем, займають 1 483 га, або 29% від загальної площі, але їх значно більше — 465 об'єктів, що становить 58% усіх водойм столиці. Це вказує на поширеність озер у межах міста та їх важливу роль у формуванні прибережних та рекреаційних ландшафтів.

Що стосується штучних водних геоекосистем, то вони представлені переважно ставками та каналами. Найбільшу частку серед них займають ставки — 148 га, що становить 3% загальної площі водних об'єктів. Проте вони є дуже чисельними — 278 об'єктів, тобто 35% від загальної кількості. Це свідчить про те, що ставки активно створюються на території міста, часто для господарських, естетичних чи рекреаційних цілей. Канали ж мають найменші показники як за

площею (34 га, або 1%), так і за кількістю — лише 8 об'єктів (1%), що свідчить про їхню обмежену присутність у водному середовищі Києва.

Таблиця 3.1 ілюструє водні геоекосистеми міста Києва, які розподілені за типами (природні та штучні), площами, кількістю об'єктів і їх часткою у загальній структурі.

**Таблиця 3.1.**

**Розподіл водних геоекосистеми міста Києва за типами (природні та штучні), площами, кількістю об'єктів і їх часткою у загальній структурі**

Типи водної геоекосистем и	Площа водних геоекосистем , га	Частка площі водних геоекосистем від типу, %	Загальна кількість	Загальна частка кількості типу, %
<b>Природні</b>	<b>4 894</b>	<b>96</b>	<b>515</b>	<b>64</b>
Річка	3 411	67	50	6
Озеро	1 483	29	465	58
<b>Штучні</b>	<b>182</b>	<b>4</b>	<b>286</b>	<b>36</b>
Ставок	148	3	278	35
Канал	34	1	8	1
<b>Сума загалом</b>	<b>5 075</b>	<b>100</b>	<b>803</b>	<b>100</b>

*Джерело:* створено автором.

Аналіз даних, представлених у таблиці, дозволяє сформулювати декілька висновків. По-перше, водне середовище Києва формується переважно за рахунок природних геоекосистем, які домінують за площею. Найбільші за площею — річки, а найчисельніші — озера. По-друге, штучні водойми мають значну частку в загальній кількості, але за площею значно поступаються природним, що характерно для урбанізованих територій. Такий тип співвідношення обумовлений практикою створення невеликих штучних водойм у районах житлової та промислової забудови, а також в умовах забудованої берегової зони. Загалом структура водних геоекосистем міста Києва є показовою з точки зору просторової організації водного балансу великого міста. Наявність значної кількості водойм різного походження створює сприятливі умови для біорізноманіття, мікрокліматичного регулювання, організації зон відпочинку населення, а також для сталого розвитку міського простору.

Наступним етапом став розподіл водних геоекосистем міста Києва за типом (природні та штучні) та за функціональним станом — діючі та недіючі. Загальна площа всіх діючих водних об'єктів становить 5 067 га, що відповідає 100% усієї діючої водної території, тоді як площа недіючих — лише 8 га або 0,16%. Водночас загальна кількість діючих водойм дорівнює 765 об'єктам (100% від кількості діючих), а недіючих — 38 об'єктів, що також становить 100% від усієї кількості недіючих водойм.

Природні водойми залишаються найбільш стабільно функціонуючими, оскільки з 4 888 га, що становить 96% усієї площі діючих водойм. Усього нараховується 482 діючих природних водних об'єктів, що становить 63% від загальної кількості діючих водних геоекосистем міста. З них, річки займають 3 408 га (67% площі діючих), з яких лише 19 річок (2%) є діючими. Водночас площа недіючих річок становить 2 га (0,05%), а їх кількість — 31 об'єкт, що складає 82% від усіх недіючих водойм. Озера займають 1 480 га (29%), із них 463 озера є діючими (61% усіх діючих водойм), а лише 2 озера — недіючі (4 га або 0,07%), що становить 5% серед усіх недіючих водойм. Усього недіючих природних водойм — 33 об'єкти (87% усіх недіючих), їхня загальна площа становить 6 га, або 0,12% загальної площі водних геоекосистем (табл. 3.2).

**Таблиця 3.2.**

**Розподіл водних геоекосистем за типами, площею та кількістю (діючі та недіючі)**

Типи водної геоекосистем и	Площа діючих, га	Частка, %	Кількість діючих	Частка кількості діючих, %	Площа недіючих, га	Частка, %	Кількість недіючих	Частка недіючих, %
<b>Природні</b>	4 888	96	482	63	6	0,12	33	87
Річка	3 408	67	19	2	2	0,05	31	82
Озеро	1 480	29	463	61	4	0,07	2	5
<b>Штучні</b>	179	4	281	37	2	0,05	5	13
Ставок	145	3	273	36	2	0,05	5	13
Канал	34	1	8	1	-	0,00	0	0
<b>Сума загалом</b>	5 067	100	765	100	8	0,16	38	100

*Джерело:* створено автором.

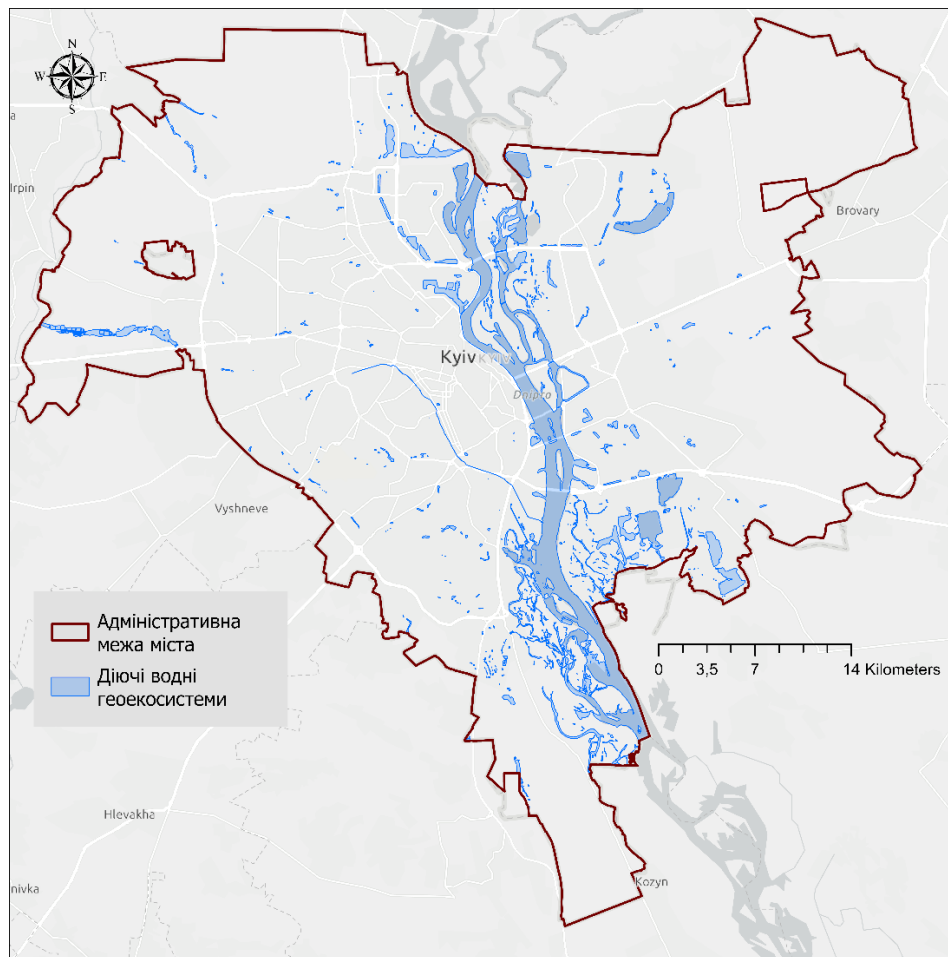
Штучні водойми охоплюють 179 га діючих вод, що становить 4% площі, та 281 діючий об'єкт (37% від загальної кількості діючих). Серед них, ставки

займають 145 га, мають 273 діючі одиниці, що становить 36% усіх діючих водойм. Недійсних ставків налічується 5 об'єктів (13% усіх недіючих), їх площа — 2 га, або 0,05%. Канали охоплюють 34 га, мають 8 діючих каналів, жодного недіючого, що свідчить про 100% функціонування цієї категорії водних об'єктів. Загальна кількість недіючих штучних водойм становить 5 об'єктів (13% від усіх недіючих), їх сумарна площа — 2 га, тобто 0,05% від площі всіх водойм.

Представлені табличні дані свідчать про те, що більшість водних об'єктів у межах Києва перебувають у задовільному функціональному стані та залишаються діючими. Це свідчить про відносно стабільну ситуацію у сфері водокористування та водної екології міста. Водночас наявність недіючих водойм, хоч і в незначній кількості, вказує на потребу у постійному моніторингу та своєчасному втручанні для запобігання їх подальшій деградації.

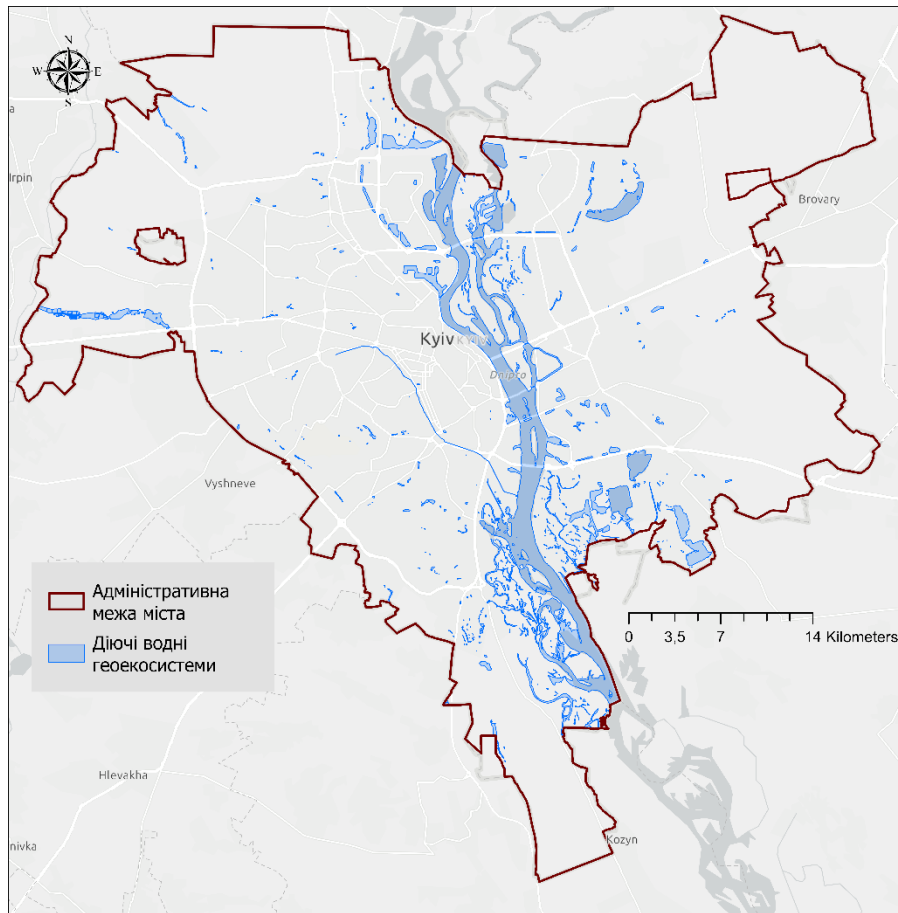
Карта водних геоекосистем відображає розміщення та типи водних екосистем на території столиці України (рис. 3.1). На карті проведено класифікацію водних геоекосистем за типами: річки, озера, ставки та канали. Цей поділ враховує як природні, так і штучно створені водні об'єкти, що мають екосистемні функції — зокрема, участь у гідрологічному кругообігу, підтримання біорізноманіття, водоочисні властивості, рекреаційне чи господарське значення. Водні об'єкти карти поділено на дві великі категорії. Діючі водні геоекосистеми — це водні об'єкти, які зберегли природну або напівприродну функцію. До них належать зокрема річка Дніпро, малі річки (Либідь, Сирець, Нивка тощо). Недіючі водні геоекосистеми — водні об'єкти, які зазнали деградації або втратили екологічну активність через урбанізацію, забруднення, осушення чи техногенні зміни.

Загалом, за результатами просторового аналізу, на території міста Києва було виявлено 803 водні геоекосистеми, які сумарно займають площу 5075 гектарів. Найбільшу частину площі займають ділянки вздовж основного русла Дніпра, а також прилеглі до нього заплавні системи, численні затоки, озера та болотисті зони, особливо у південній та східній частинах міста.



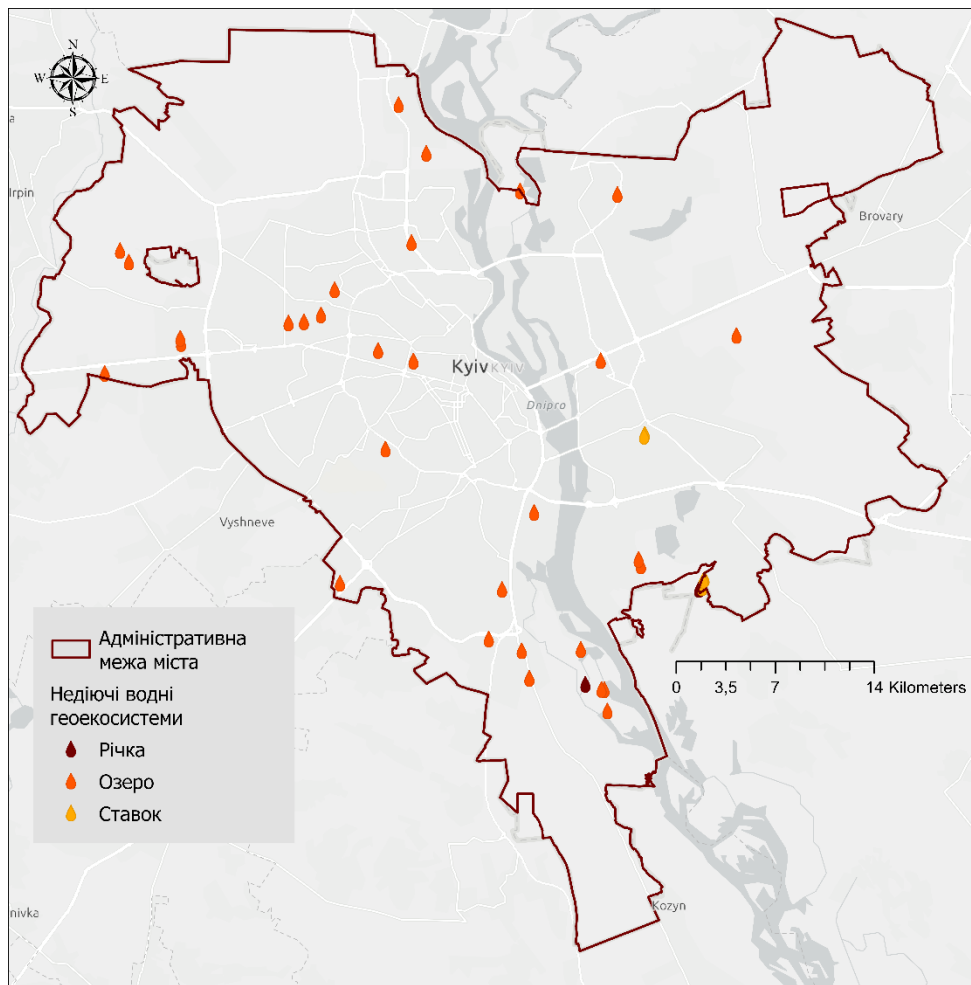
**Рис. 3.1. Водні геоекосистеми міста Київ** (розроблено автором на основі власних досліджень)

На карті чітко визначено адміністративну межу міста, яка окреслює досліджувану територію. Синім кольором, згідно з легендою, позначені всі діючі водні геоекосистеми. Центральним та домінуючим елементом водної системи Києва, як видно з карти, є річка Дніпро. Вона протікає через усю територію міста з півночі на південь, формуючи складну гідрографічну структуру. Карта детально відображає цю розгалужену систему, підкреслюючи значущість Дніпра як головної водної геоекосистеми. Окрім Дніпра, на картосхемі представлено значну кількість інших водних об'єктів. Це менші річки та струмки, що є притоками Дніпра або належать до басейнів інших річок. Термін «діючі водні геоекосистеми» наголошує на тому, що на карті відображені саме ті водні об'єкти, які існують та функціонують на даний час (рис. 3.2).



**Рис. 3.2. Діючі водні геоекосистеми (розроблено автором на основі власних досліджень)**

Наступною створена карта недіючих водних геоекосистем, місцезнаходження позначено спеціальними точковими умовними знаками, які диференційовані за типом: річка, озеро та ставок (рис. 3.3). Розміщення умовних знаків, що символізують недіючі водні геоекосистеми, свідчить про їх значне поширення по всій території Києва. Втрачені річки, озера та ставки фіксуються як на правому, так і на лівому берегах Дніпра, охоплюючи різні райони столиці. Деякі з цих колишніх водойм знаходились у безпосередній близькості до існуючих нині річок та озер, вказуючи на скорочення площі водно-болотних угідь або зміну конфігурації річкових долин.



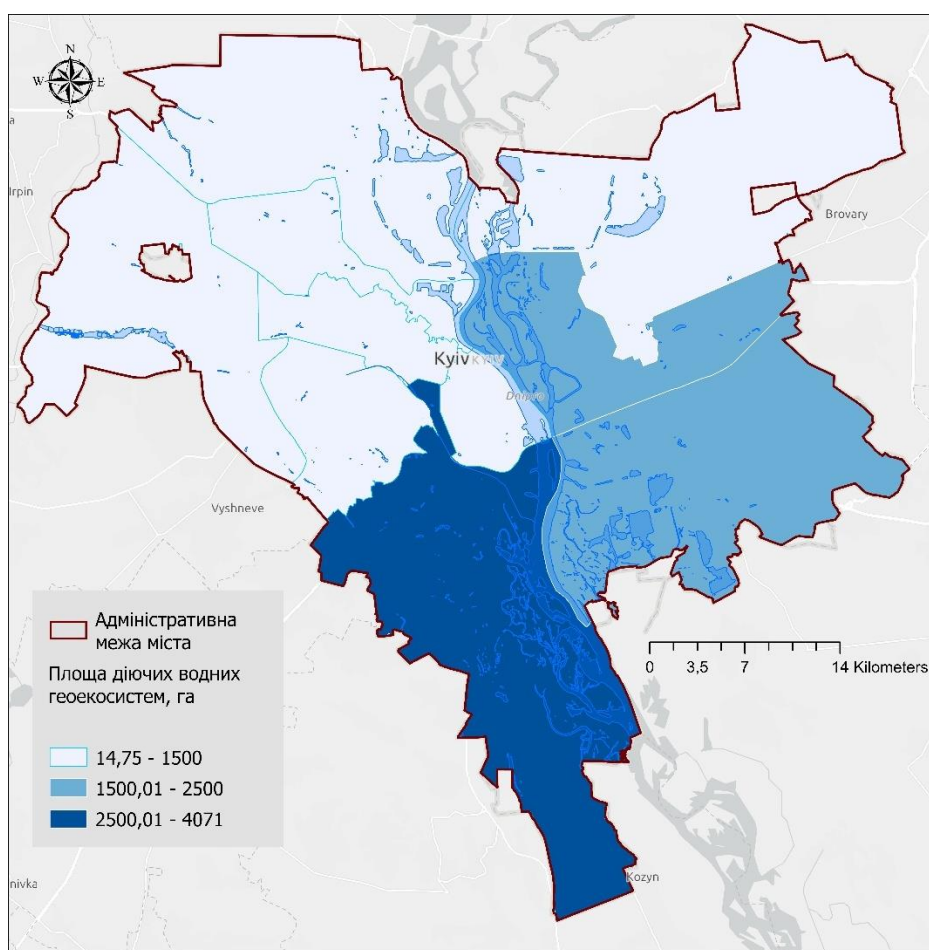
**Рис. 3.3. Недіючі водні геоекосистеми (розроблено автором на основі власних досліджень)**

Під терміном «недіючі водні геоекосистеми» розуміються ті об'єкти, які внаслідок природних процесів або антропогенної діяльності припинили своє функціонування, тобто вони втратили свої природні гідрологічні та екологічні функції. Таким чином, представлена карта дозволяє оцінити масштаби недіючих водних геоекосистем, а також враховуватися при розробці стратегій сталого розвитку міста.

Представлена карта дає змогу оцінити територіальне співвідношення водних екосистем у різних адміністративних районах столиці, а також виявити райони з найбільшою природною водною складовою.

Залежно від площі водних геоекосистем, територія Києва умовно поділена на три зони, які відрізняються за ступенем насиченості водними

геоекосистемами. Світло-блакитним кольором позначені райони, де площа водних геоекосистем становить від 14,75 до 1500 гектарів (рис. 3.4). До цієї категорії належать переважно північні та західні частини міста, зокрема Святошинський і Солом'янський райони, які мають порівняно малу кількість природних водойм. Райони, що мають площу водних геоекосистем у межах 1500,01–2500 гектарів, виділені блакитним кольором. Це території з помірним рівнем водного насичення, до яких відносяться Дніпровський, Деснянський і частково Печерський райони.

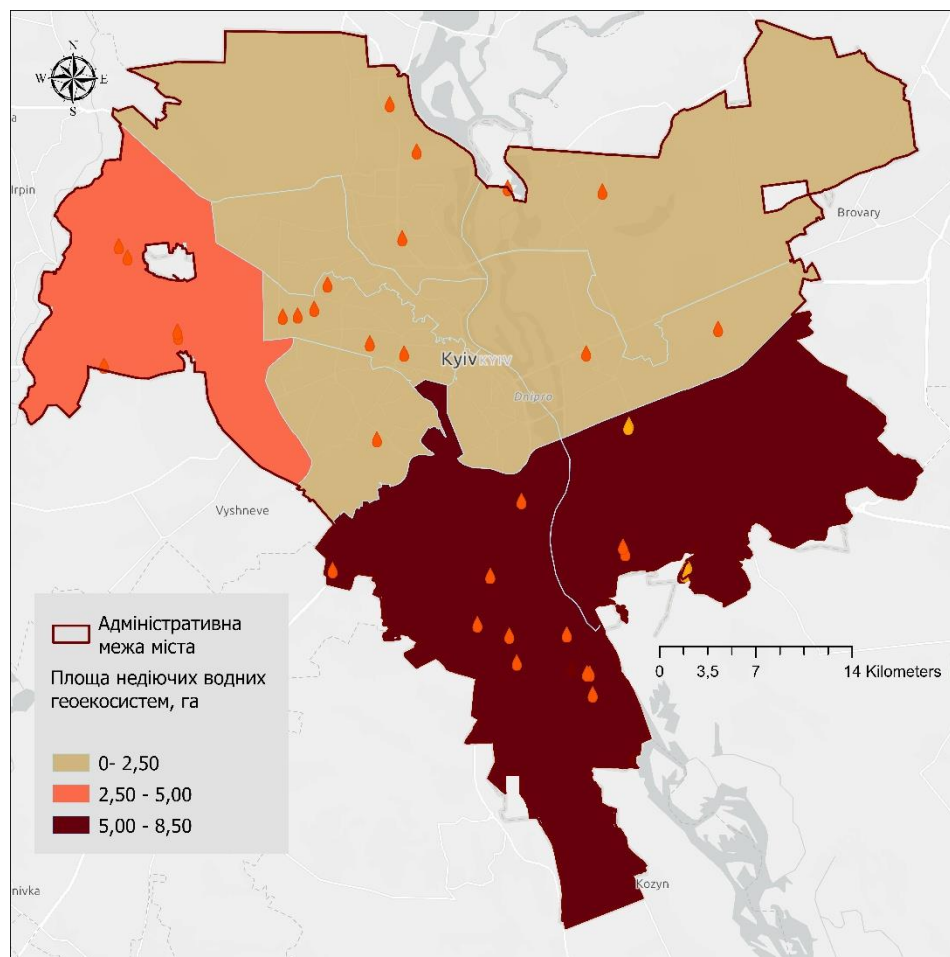


**Рис. 3.4. Площі діючих водних геоекосистем (розроблено автором на основі власних досліджень)**

Найбільш насиченими водними геоекосистемами є райони, позначені темно-синім кольором, де площа водних геоекосистем перевищує 2500 гектарів і сягає до 4071 га. До цієї групи входять переважно південні райони міста, зокрема

Голосіївський та Дарницький, які мають високу щільність річкових проток і озер. Загалом карта візуалізує суттєву територіальну нерівномірність у розміщенні водних геоекосистем у Києві.

На представленій карті зображено просторовий розподіл площ недіючих водних геоекосистем у межах адміністративної території міста Києва (рис. 3.5). Райони поділено за площею недіючих водних геоекосистем (у гектарах) на три категорії, які візуалізовані відтінками від світло-оранжевого до темно-бордового. Це дозволяє виявити райони, де водні екосистеми перебувають у деградованому або втрачено активному стані.



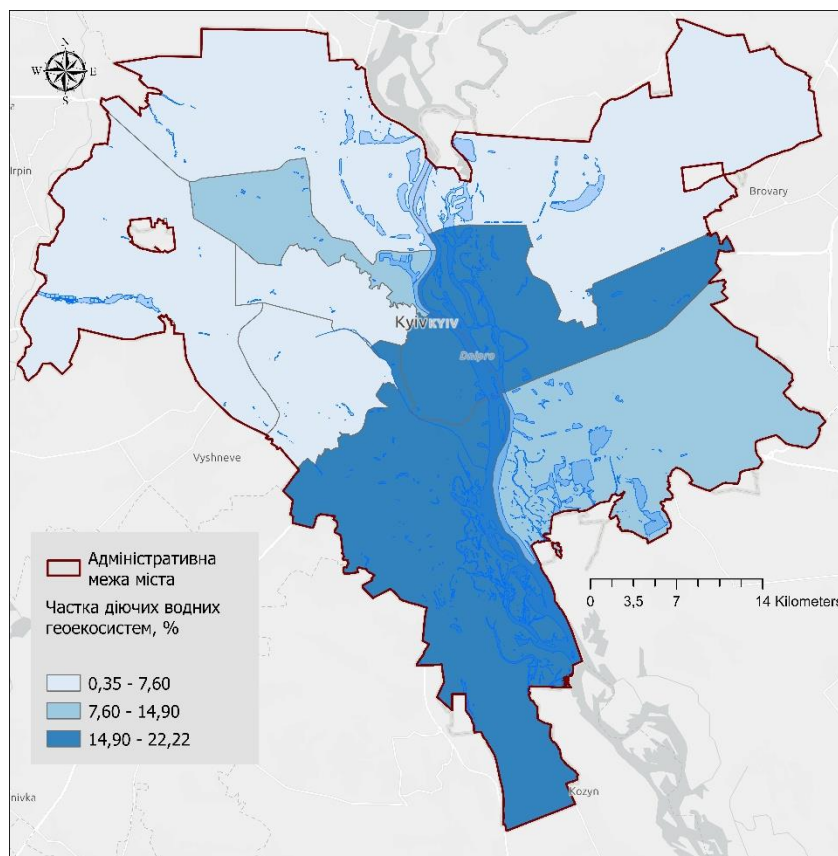
**Рис. 3.5. Площа недіючих водних геоекосистем** (розроблено автором на основі власних досліджень)

Світло-оранжевим кольором позначені райони з найменшою площею недіючих водних геоекосистем — від 0 до 2,50 га. До цієї групи належать Солом'янський, Шевченківський, Подільський, Оболонський, Печерський, Дніпровський та Деснянський райони. У водних геоекосистем може бути пояснена меншою щільною міською забудовою або меншою насиченістю водних геоекосистем. Помаранчевим кольором відображений Святошинський район, де площа недіючих водних геоекосистем становить від 2,50 до 5,00 га. У цьому районі спостерігається помірна деградація водних геоекосистем, зумовлена урбанізаційними процесами, частковим осушенням водойм або змінами у водному балансі малих річок.

Найбільшу площу недіючих водних геоекосистем — від 5,00 до 8,50 га — мають райони, позначені темно-бордовим кольором. До них належать Дарницький та Голосіївський райони. У цих районах діючі водні геоекосистеми значною мірою втратили свої функції. Це може бути наслідком інтенсивної забудови прибережних зон, меліоративних робіт та зниження рівня ґрунтових вод.

Карта частки діючих водних геоекосистем у межах адміністративних районів міста Києва, виражена у відсотках до загальної площі кожного району (рис. 3.6). Територія поділена на три групи за часткою водних геоекосистем.

Найменшу частку діючих водних геоекосистем мають такі райони: Святошинський, Солом'янський, Шевченківський, Оболонський та Деснянський. Це переважно густо забудовані міські зони, де природні водні об'єкти або були відсутні або зазнали значного скорочення унаслідок урбанізації та техногенного впливу. До групи з середнім рівнем частки водних геоекосистем належать: Подільський та Дарницький райони. У цих районах присутні значні водні об'єкти, як-от затоки, озера та канали, однак вони займають помірну частку загальної площі району. Найвищу частку мають Голосіївський, Дніпровський та Печерський райони. У цих районах переважає річкова й заплавна структура, а також численні водойми, болота та водно-болотні угіддя, які формують цілісні природні комплекси.



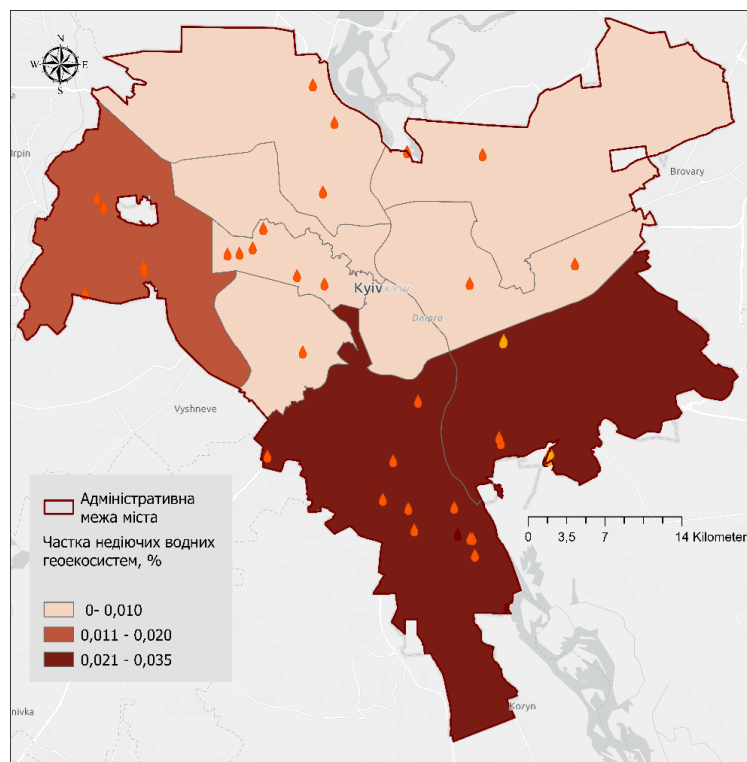
**Рис. 3.6. Частка діючих водних геоекосистем** (розроблено автором на основі власних досліджень)

На цій карті відображено частку недіючих водних геоекосистем у межах адміністративних районів міста Києва у відсотковому співвідношенні до загальної площі кожного району. Територія міста поділена на три категорії за відсотковим показником частки недіючих водних екосистем: від 0 до 0,010%, від 0,011 до 0,020% та від 0,021 до 0,035%. Такий розподіл дозволяє оцінити інтенсивність деградації водного середовища на рівні районів.

Найменшу частку недіючих водних геоекосистем — від 0 до 0,010% — мають райони, позначені найсвітлішим відтінком. До них належать Солом'янський, Шевченківський, Подільський, Оболонський, Деснянський та Дніпровський райони.

До другої категорії (0,011–0,020%) належить Святошинський район. У цьому районі простежується помірна деградація водних геоекосистем, яка може бути спричинена зміною русел малих річок або осушенням заболочених ділянок.

Найвищу частку недіючих водних геоекосистем — від 0,021% до 0,035% — мають Дарницький і Голосіївський райони, які виділені найтемнішим кольором (рис. 3.7). Саме ці райони характеризуються найбільшою кількістю раніше активних, але нині деградованих водних об'єктів. До причин цього можна віднести активну забудову заплавл Дніпра, меліорацію боліт, зниження рівня ґрунтових вод та порушення природного гідрологічного балансу.

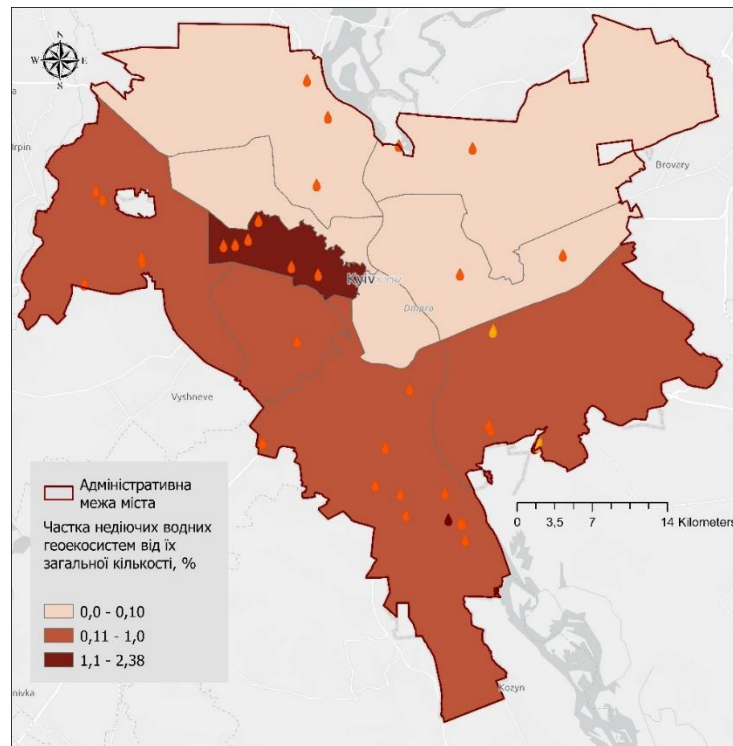


**Рис. 3.7. Частка недіючих водних геоекосистем** (розроблено автором на основі власних досліджень)

Ця карта візуалізує частку недіючих водних геоекосистем у відсотках від загальної площі всіх геоекосистем у межах адміністративних кордонів міста Києва (рис. 3.8). Дані представлені для різних територіальних зон міста, кожна з яких забарвлена відповідно до цієї частки. Згідно з легендою, найсвітліший коричнево-бежевий колір (0,0 - 0,10 %) вказує на зони, де недіючі водні геоекосистеми становлять дуже малу частку від загальної площі всіх геоекосистем – не більше 0,10 %. Зони, забарвлені у середньо-коричневий колір

(0,11 - 1,0 %), характеризуються дещо вищою часткою недіючих водних геоекосистем, яка становить від 0,11 % до 1,0 % від їх загальної площі.

Ці території розподілені по місту, межуючи як зі світлішими, так і з темнішими зонами. Насичений коричнево-червоний колір (1,1-2,38 %), позначає зони з найвищою часткою площі, зайнятої недіючими водними геоекосистемами, що становить від 1,1 % до 2,38 % від загальної площі всіх геоекосистем у цих зонах. Такі зони з максимальною концентрацією спостерігаються переважно у західній частині міста, де велика суцільна територія забарвлена цим кольором, а також у значній частині південних та південно-східних районів.

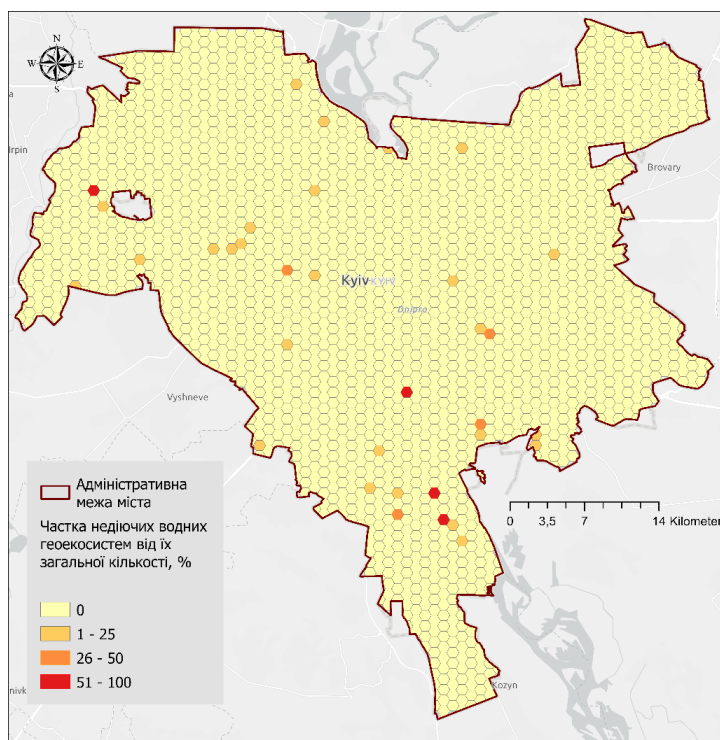


**Рис. 3.8. Частка недіючих водних геоекосистем від їх загальної кількості**  
(розроблено автором на основі власних досліджень)

Представлена карта детально відображає розподіл частки недіючих водних геоекосистем від їх загальної кількості на території міста Києва. Дані представлені у відсотках за допомогою гексагональної сітки, що покриває всю адміністративну межу міста. Кожен елемент (гексагон) цієї сітки зафарбований відповідним кольором, який відображає кількісний показник – відсоток недіючих

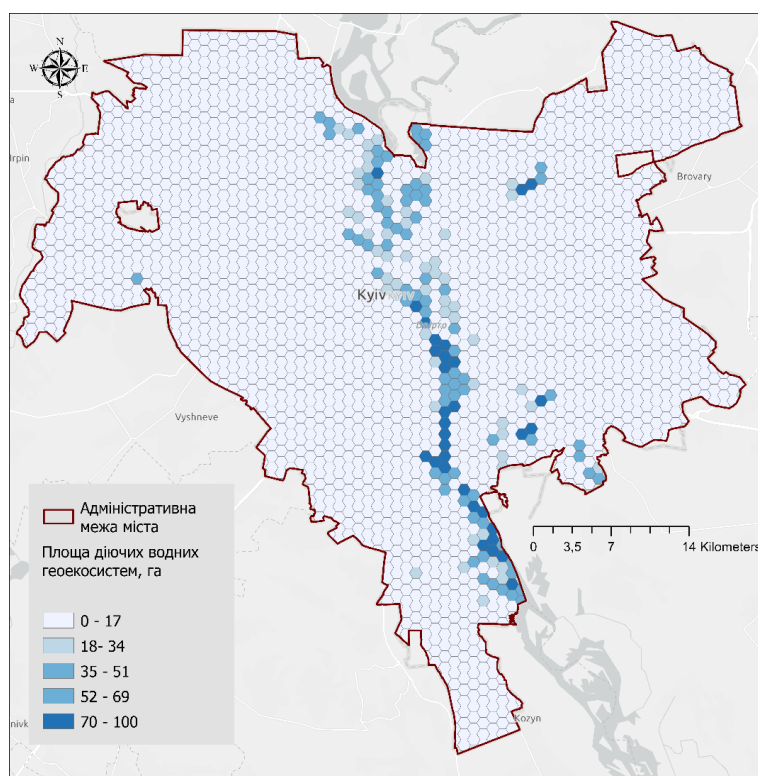
водних геоекосистем від загальної кількості водних геоекосистем. Легенда карти чітко визначає чотири класифікаційні групи: світло-жовтий колір відповідає гексагонам, де частка недіючих систем становить 0% (тобто всі діючі); блідо-жовтогарячий – від 1 до 25%; жовтогарячий – від 26 до 50%; і червоний колір позначає гексагони з найвищою часткою втрачених водних геоекосистем – від 51 до 100%.

Переважає частина міста характеризується світло-жовтим та блідо-жовтогарячим забарвленням гексагонів, що свідчить про відносно низьку частку недіючих водойм (0-25%). Це вказує на те, що в багатьох районах більшість діючих водних геоекосистем. Гексагони, зафарбовані червоним кольором (51-100% недіючі), вказують на повну втрату геоекосистем. Зони з помірною часткою втрат (26-50%, жовтогарячий колір) часто розташовуються поблизу «червоних» зон або самостійні, що також свідчить про майже повну або суттєву втрату (рис. 3.9).



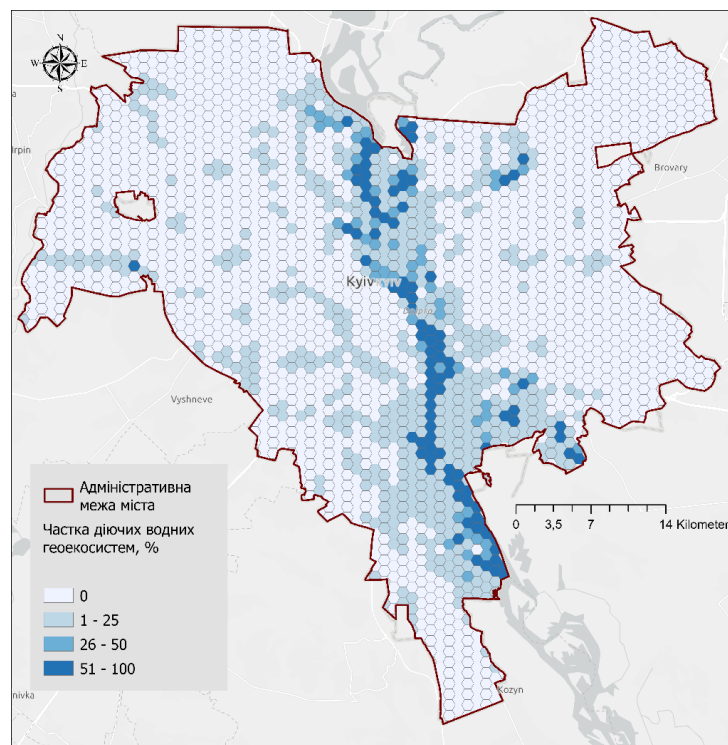
**Рис. 3.9. Частка недіючих водних геоекосистем від їх загальної кількості**  
(розроблено автором на основі власних досліджень)

На карті (рис. 3.10) зображено площу діючих водних геоекосистем у межах міста Києва, виражену в гектарах. Для просторового аналізу використано гексагональну сітку, яка забезпечує рівномірний поділ території на однакові за площею осередки. Кожен гексагон позначений відповідно до площі діючих водних геоекосистем, яка в ньому зафіксована. Значення поділено на п'ять інтервалів і візуалізовано за допомогою градації від світло-блакитного до темно-синього кольору. Аналіз карти показує, що найбільші площі діючих водних геоекосистем сконцентровані вздовж річки Дніпро, яка простягається через центральну частину Києва з півночі на південь. У цій смузі домінують темно-сині та сині гексагони, що свідчить про значне поширення водних геоекосистем. В інших частинах міста водні екосистеми зустрічаються рідше й мають значно менші площі, про що свідчить переважання світлих гексагонів. Це свідчить про нерівномірний розподіл природних водних структур та зосередження їх у межах річкової заплави.



**Рис. 3.10.** Площі діючих водних геоекосистем (розроблено автором на основі власних досліджень)

На цій карті зображено розподіл частки діючих водних геоекосистем у межах міста Києва у відсотках. Для аналізу використано гексагональну сітку, яка дозволяє вивчити екологічну ситуацію на локальному рівні, незалежно від адміністративних меж районів. Кожен гексагон відображає частку площі діючих водних екосистем у межах своєї клітинки, подану у відсотках. Колірна шкала поділяє значення на чотири категорії: 0% — повна відсутність водних геоекосистем (білий колір), 1–25% — низька частка (світло-блакитний), 26–50% — середня частка (блакитний), 51–100% — висока частка (темно-синій). Аналіз карти показує, що найбільша щільність водних геоекосистем зосереджена вздовж долини річки Дніпро, яка проходить через центр Києва з півночі на південь. Саме тут спостерігається найбільше скупчення гексагонів темно-синього кольору, що свідчить про значну частку водної поверхні в межах кожної клітинки (рис. 3.11).

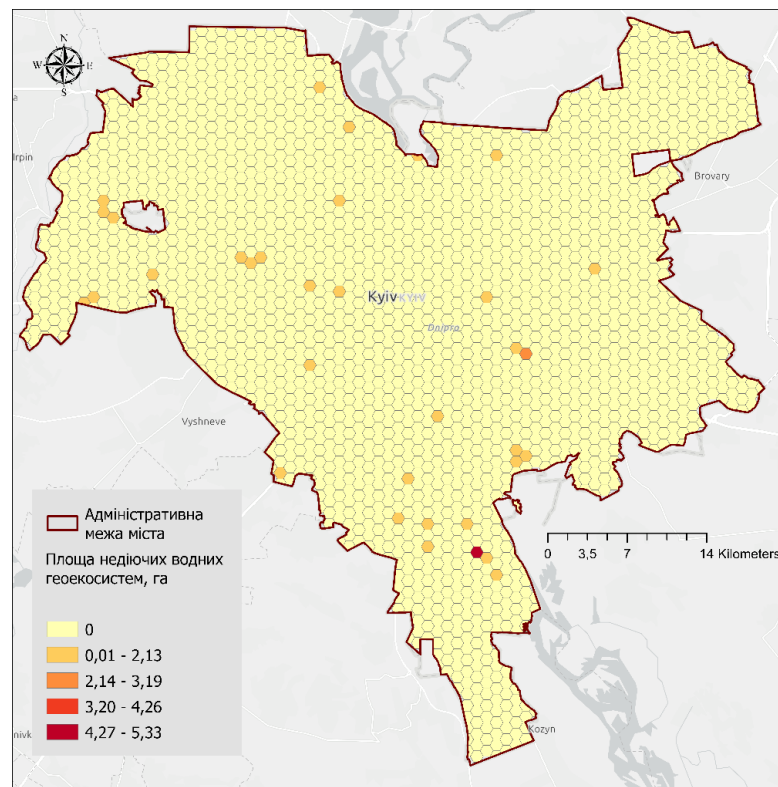


**Рис. 3.11.** Частки діючих водних геоекосистем (розроблено автором на основі власних досліджень)

Поза межами дніпровської заплави домінують гексагони світлих відтінків або повністю білі клітинки, що свідчить про мінімальну або повну відсутність

діючих водних геоекосистем. У таких зонах водні геоекосистеми або відсутні або перебувають у деградованому стані.

На карті (рис. 3.12) зображено розподіл площ недіючих водних геоекосистем у межах міста Києва та прилеглих територій, представлений за допомогою гексагональної сітки. Кожен гексагон на карті візуалізує певну територію, а його колір відповідає площі недіючих водних геоекосистем в гектарах (га) у межах цього гексагону. Переважна більшість території, позначеної світло-жовтим кольором, вказує на відсутність (0 га) або дуже малу площу (0,01 - 2,13 га) недіючих водних геоекосистем. Це свідчить про те, що на значній частині досліджуваної території такі об'єкти або відсутні, або їхня площа є мінімальною.



**Рис. 3.12. Площі недіючих водних геоекосистем (розроблено автором на основі власних досліджень)**

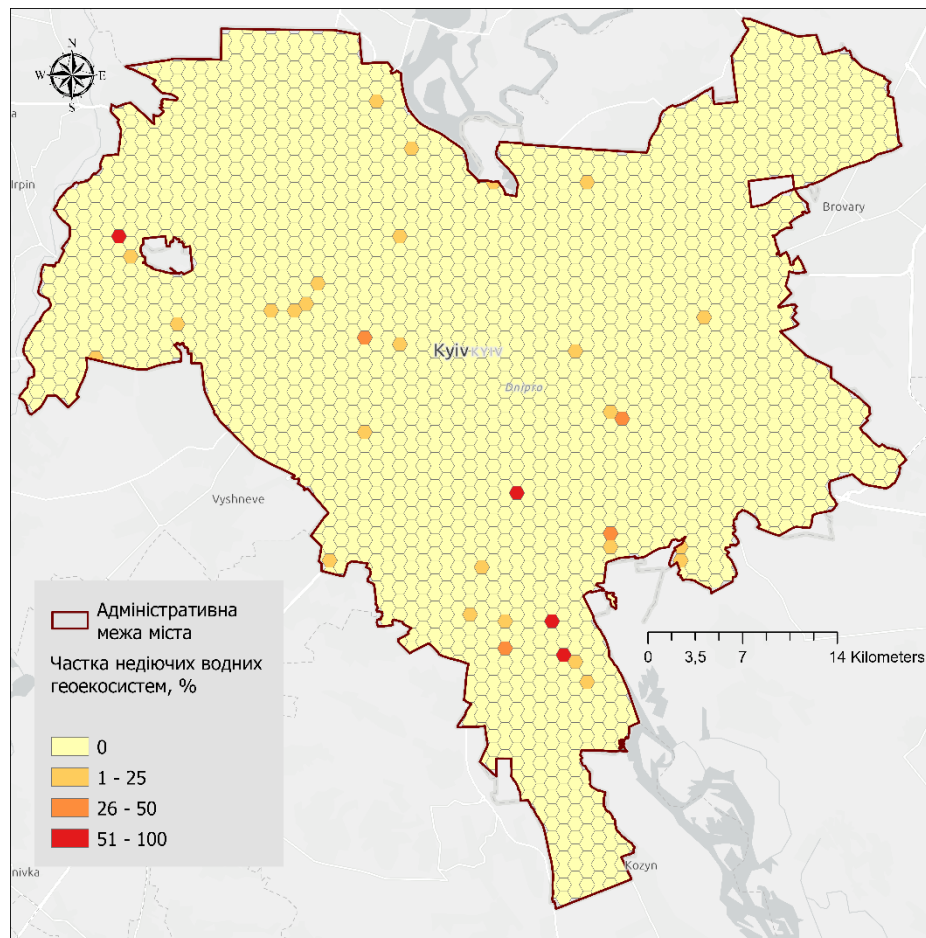
Однак, на карті також спостерігаються окремі осередки з вищими показниками. Гексагони, забарвлені у відтінки помаранчевого та червоного, вказують на більшу концентрацію площ недіючих водних геоекосистем. Зокрема,

світло-помаранчевий колір відповідає площам від 0,01 до 2,13 га, наступний відтінок помаранчевого – від 2,14 до 3,19 га, червонувато-помаранчевий – від 3,20 до 4,26 га, а найтемніший, червоний колір, позначає ділянки з найбільшою площею недіючих водних геоекосистем – від 4,27 до 5,33 га на один гексагон. Такі ділянки з підвищеною концентрацією недіючих водних об'єктів спостерігаються розсіяно по всій території міста, як у центральній частині, так і на периферії. Найбільш інтенсивне забарвлення, що вказує на максимальні значення площ, зустрічається точково, що може свідчити про локальний характер таких утворень.

Ця карта (рис. 3.13) ілюструє частку недіючих водних геоекосистем у відсотках (%) в межах адміністративних кордонів міста Києва та прилеглих територій, використовуючи гексагональну сітку для візуалізації даних. Кожен гексагон на карті відображає певну ділянку, а його колір вказує на відсоток площі всередині цього гексагона, який зайнятий недіючими водними геоекосистемами. Як видно з легенди, переважна більшість території, забарвлена у світло-жовтий колір, відповідає гексагонам, де частка недіючих водних геоекосистем становить 0%. Це свідчить про те, що на значній частині міста такі об'єкти або повністю відсутні, або їхня площа настільки мала, що не досягає 1% від загальної площі відповідного гексагона. Окремі гексагони забарвлені у відтінки помаранчевого та червоного, що вказує на вищу частку недіючих водних геоекосистем. Світло-помаранчевий колір означає, що такі системи займають від 1 до 25% площі гексагона.

Насиченіший помаранчевий колір відповідає частці від 26 до 50%. Найяскравіший, червоний колір, позначає гексагони, де недіючі водні геоекосистеми займають від 51 до 100% площі. Такі ділянки з підвищеною часткою недіючих водних об'єктів є досить рідкісними та розсіяними. Декілька червоних гексагонів, що вказують на найвищу концентрацію (51-100%), можна помітити у західній частині міста, а також поодинокі – у центральній та південно-східній частинах. Гексагони з часткою 26-50% (помаранчевий) також

зустрічаються нечасто і переважно поблизу зон з найвищою концентрацією або як окремі крапляння.

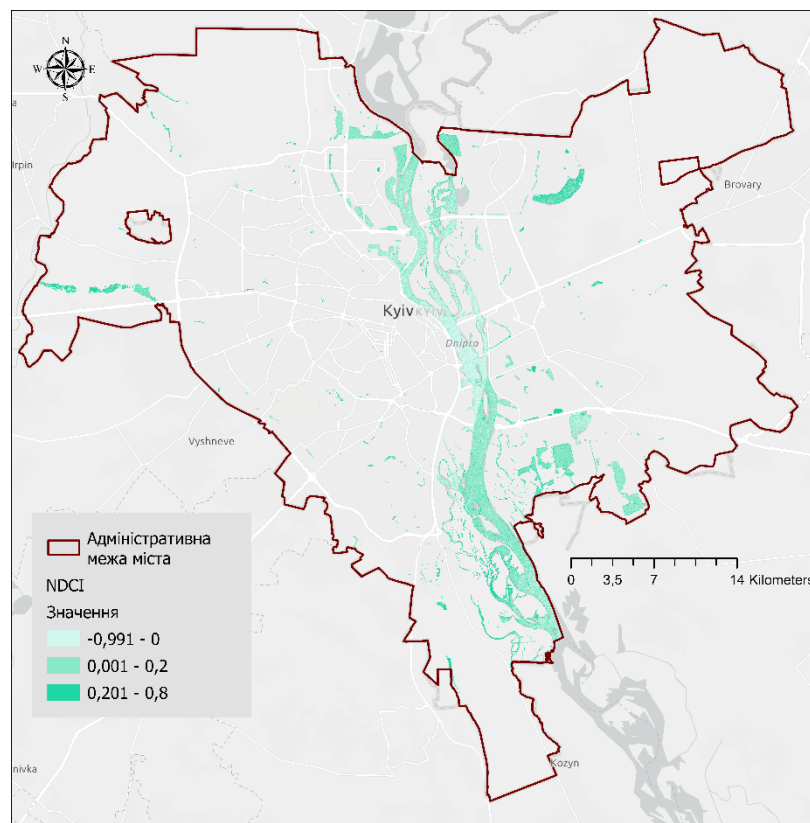


**Рис. 3.13.** Частка недіючих водних геоекосистем (розроблено автором на основі власних досліджень)

### 3.2 Геопросторовий блок даних стану евтрофікації водних геоекосистем міста Києва

На цій карті (рис. 3.14) зображено розподіл значень індексу NDCI (Normalized Difference Chlorophyll Index – Нормалізований різницевий хлорофільний індекс) для водних геоекосистем в межах міста Київ, причому дані обрізані таким чином, щоб відображати значення виключно для водних об'єктів. Індекс NDCI дозволяє оцінити концентрацію хлорофілу "a" у воді, що є показником біомаси фітопланктону.

Додатні значення індексу вказують на наявність хлорофілу. Низькі додатні значення (від 0,001 до 0,2), позначені світло-зеленим кольором, характерні для більшої частини русла Дніпра, особливо ближче до берегів, та багатьох озер і заток. Це свідчить про помірну кількість хлорофілу "а", вказуючи на певний рівень біологічної продуктивності водойми без ознак інтенсивного "цвітіння". Високі додатні значення (від 0,201 до 0,8), позначені насиченим зелено-бірюзовим кольором, чітко локалізовані у мілководних затоках Дніпра, старицях, протоках, а також в деяких менших озерах та ставках. Такі високі значення свідчать про значну концентрацію хлорофілу "а", що є індикатором високої біомаси фітопланктону і часто пов'язано з "цвітінням" води в евтрофованих водоймах, де є надлишок поживних речовин, високі температури та достатньо сонячного світла.



**Рис. 3.14.** Водні геоекосистем в індексі NDCI (розроблено автором на основі власних досліджень)

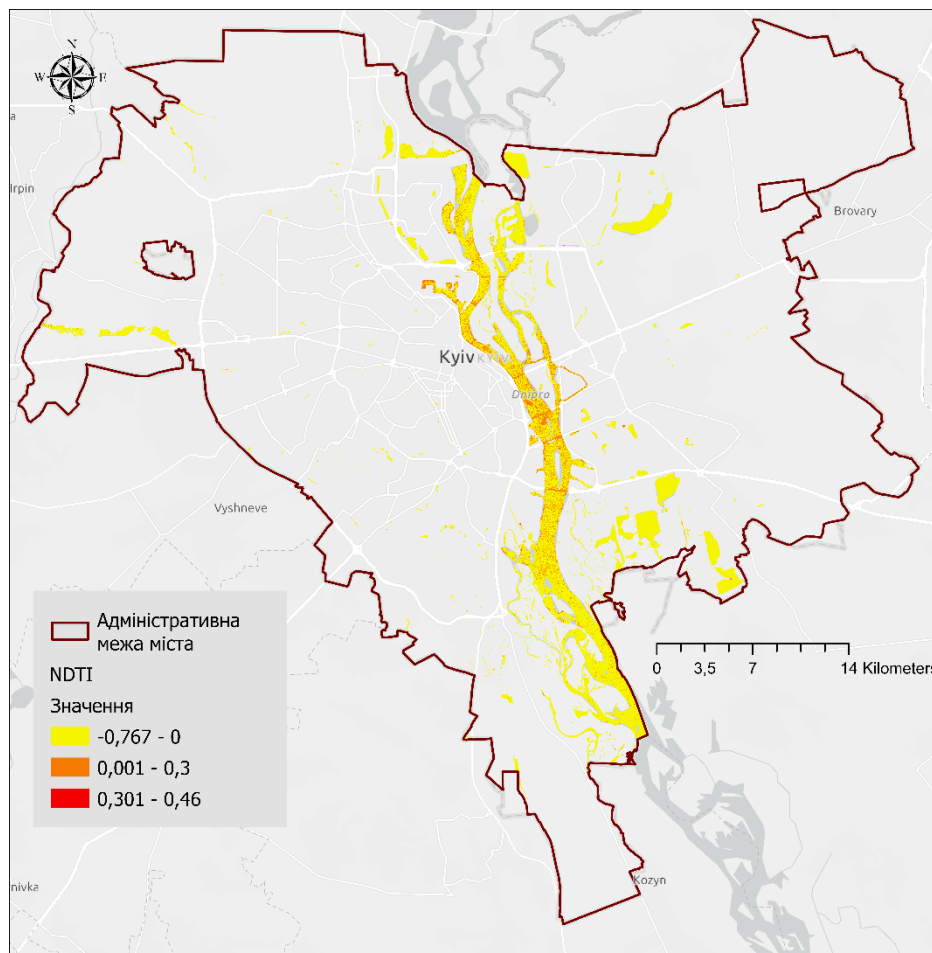
На цій карті (рис. 3.15) представлено розподіл значень індексу NDTI (Normalized Difference Turbidity Index – Нормалізований різницевий індекс каламутності) для водних геоекосистем у межах міста Київ. Зображення сфокусоване виключно на водних об'єктах, таких як річки, озера, ставки та канали, і показує рівень каламутності води на основі супутникових даних.

Загалом, індекс NDTI використовується для оцінки кількості зважених частинок у воді: чим вище значення індексу, тим каламутніша вода. Легенда на карті показує три діапазони значень. Від'ємні та близькі до нуля значення (від -0,767 до 0), позначені жовтим кольором: Такі значення NDTI зазвичай вказують на відносно прозору воду з низькою каламутністю. На карті ці значення переважно спостерігаються у ширших та, можливо, глибших ділянках основного русла Дніпра, де швидкість течії може бути більш стабільною, а осідання зважених частинок інтенсивнішим. В деяких більших озерах або затоках, які менше піддаються впливу прямого надходження зважених речовин. Окремі невеликі водойми на заході та півночі міста також показують ці значення, що може свідчити про їхню відносну чисту воду.

Низькі додатні значення (від 0,001 до 0,3), позначені помаранчевим кольором: Цей діапазон вказує на помірний рівень каламутності води. Такі значення є найпоширенішими на карті і охоплюють значну частину русла Дніпра, особливо вздовж берегової лінії, у вужчих протоках між островами та в місцях з меншою глибиною. Більшість озер, стариць та заток по всій території міста. Це означає, що вода в цих ділянках містить певну кількість зважених частинок, що може бути зумовлено природними процесами (ерозія берегів, донні відкладення, біологічна активність) або антропогенним впливом (стічні води, будівельні роботи поблизу водойм).

Високі додатні значення (від 0,301 до 0,46), позначені червоним кольором: Ці значення вказують на високу каламутність води. На карті такі ділянки більш локалізовані і спостерігаються у певних вузьких протоках Дніпра, особливо в центральній та південній частині його течії в межах міста, де течія може бути швидшою або де відбувається активне перемішування води та підняття донних

відкладень. В окремих невеликих озерах або ділянках водойм, куди можуть надходити зливові стоки з більшою кількістю зважених речовин, або де мілководдя сприяє замуленню. Висока каламутність може обмежувати проникнення світла у воду, впливаючи на водні організми.



**Рис. 3.15. Водні геоекосистеми в індексі NDTI (розроблено автором на основі власних досліджень)**

Для отримання представленої карти в інтерфейсі QGIS було застосовано інструменти зональної статистики, що дозволило розрахувати узагальнені значення для певних зон на основі растрових даних. Зокрема, було проведено Overlay аналіз, який полягав у накладанні шару водних геоекосистем, представленого у векторному форматі, на серію растрових зображень. Ці растрові зображення відображали значення спектральних індексів NDTI

(Normalized Difference Turbidity Index – нормалізований індекс каламутності) та NDCI (Normalized Difference Chlorophyll Index – нормалізований індекс хлорофілу), розрахованих для періоду з червня по серпень кожного року, починаючи з 2020 по 2024 рік. Таким чином, для кожної водної геоєкосистеми було отримано статистичні показники індексів NDTI та NDCI, що характеризують стан водних об'єктів протягом літніх місяців впродовж п'ятирічного періоду спостережень, візуалізовані на підсумковій карті (рис. 3.16).

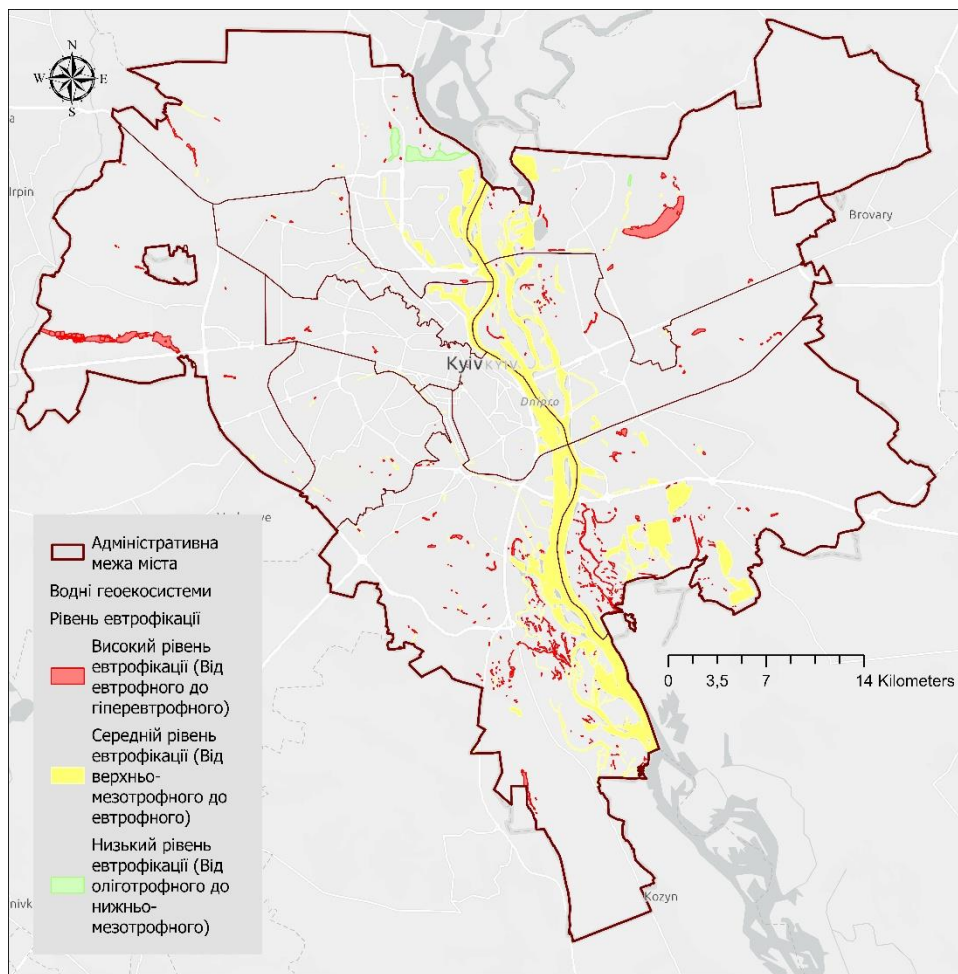


Рис. 3.16. Стан водних об'єктів протягом літніх місяців впродовж п'ятирічного періоду спостережень

Надана таблиця є зведеним кількісним аналізом даних, візуалізованих на карті водних геоєкосистем міста Києва, за рівнями евтрофікації (табл. 3.2). Вона деталізує чотири типи водних об'єктів – канал, озеро, річка та ставок – і для кожного з них наводить сумарну площу в гектарах та кількість об'єктів, що

відповідають високому (від евтрофного до гіперевтрофного), низькому (від оліготрофного до нижньо-мезотрофного) та середньому (від верхньо-мезотрофного до евтрофного) рівням евтрофікації. Крім того, таблиця містить підсумкові дані: "Загальний підсумок" показує сукупну площу та кількість водних об'єктів для кожного рівня евтрофікації по всіх типах геоекосистем, а останні два стовпці ("Разом сума з площею(га)" та "Разом кількість") відображають загальну площу та загальну кількість для кожного типу водних геоекосистем по всіх рівнях евтрофікації, а також фінальний сукупний підсумок по всіх водних об'єктах та рівнях.

**Таблиця. 3.2.**

**Зведений кількісний аналіз даних, візуалізованих на карті водних геоекосистем міста Київ, за рівнями евтрофікації**

Позначки рядків	Високий рівень евтрофікації (Від евтрофного до гіперевтрофного)		Низький рівень евтрофікації (Від оліготрофного до нижньо-мезотрофного)		Середній рівень евтрофікації (Від верхньо-мезотрофного до евтрофного)		Разом сума з площею(га)	Разом кількість
	Сума за площею в га	Кількість	Сума за площею в га	Кількість	Сума за площею в га	Кількість з IDF		
Водні геоекосистеми								
Канал	10,28258706	4			23,96341759	4	34,24600465	8
Озеро	421,2807021	341	138,6945087	4	919,5385342	118	1479,513745	463
Річка	25,68560943	11			3382,486871	8	3408,17248	19
Ставок	123,0728549	230			22,10577426	43	145,1786292	273
Загальний підсумок	580,3217535	586	138,6945087	4	4348,094597	173	5067,110859	763

*Джерело:* створено автором.

Ця таблиця представляє детальний кількісний аналіз евтрофікації водних геоекосистем Києва, структурований за адміністративними районами (табл. 3.3). Зокрема, по кожному району вона ідентифікує наявні типи водних геоекосистем (канали, озера, річки, ставки, хоча не всі типи можуть бути присутні в кожному районі) і для кожного такого типу вказує сумарну площу в гектарах та кількість окремих об'єктів, що відповідають високому (від евтрофного до гіперевтрофного), низькому (від оліготрофного до нижньо-мезотрофного) та середньому (від верхньо-мезотрофного до евтрофного) рівням евтрофікації. Крім цього, для кожного типу водойми в межах конкретного району наводяться підсумкові дані щодо загальної площі та кількості по всіх рівнях евтрофікації, що дозволяє оцінити специфіку та масштаби евтрофікації водних ресурсів у розрізі окремих адміністративних одиниць міста. Таким чином, таблиця дає змогу

порівняти стан водних геоекосистем між районами, визначити, які райони мають найбільші площі чи кількість водойм з певним рівнем евтрофікації, та які типи водних геоекосистем є домінуючими або найбільш проблемними в кожному районі.

Таблиця.3.3

### Кількісний аналіз евтрофікації водних геоекосистем Києва за адміністративними районами

Райони та водні	Високий рівень евтрофікації (Від евтрофного до гіперевтрофного)		Низький рівень евтрофікації (Від оліготрофного до нижньо-мезотрофного)		Середній рівень евтрофікації (Від верхньо-мезотрофного до евтрофного)		Разом сума з	Разом
	Сума з площею в га	Кількість	Сума з площею в га	Кількість	Сума з площею в га	Кількість	площею в га	кількість
<b>Голосіївський район</b>	5665873,5	235	24110,1	1	1350165,6	56	7040149,2	292
Канал	24110,1	1			24110,1	1	49220,2	2
Озеро	4074606,9	169	24110,1	1	795633,3	33	4894350,3	203
Річка	192890,8	8			120550,5	5	313431,3	13
Ставок	1374275,7	57			409871,7	17	1784147,4	74
<b>Дарницький район</b>	3044483,5	155			373192,3	19	3417665,8	174
Канал	39283,4	2					39283,4	2
Озеро	1276710,5	65			294825,5	15	1571336	80
Річка	58925,1	3			19841,7	1	78566,8	4
Ставок	1669544,5	85			58925,1	3	1728469,6	88
<b>Деснянський район</b>	655369,5	30	21845,65	1	480604,3	22	1157819,45	53
Озеро	611678,2	28	21845,65	1	371376,05	17	1004899,9	46
Річка					65536,95	3	65536,95	3
Ставок	43691,3	2			43691,3	2	87382,6	4
<b>Дніпровський район</b>	528247,44	49			269514	25	797761,44	74
Канал	10780,56	1			32341,68	3	43122,24	4
Озеро	355758,48	33			172488,96	16	528247,44	49
Річка					32341,68	3	32341,68	3
Ставок	161708,4	15			32341,68	3	194050,08	18
<b>Оболонський район</b>	307047,06	18	34116,34	2	426454,25	25	767617,65	45
Озеро	136465,36	8	34116,34	2	307047,06	18	477628,76	28
Річка					17058,17	1	17058,17	1
Ставок	170581,7	10			102349,02	6	272930,72	16
<b>Печерський район</b>	3105,34	1			21737,38	7	24842,72	8
Озеро	3105,34	1			9316,02	3	12421,36	4
Річка					6210,68	2	6210,68	2
Ставок					6210,68	2	6210,68	2
<b>Подільський район</b>	59806,56	11			54369,6	10	114176,16	21
Озеро	21747,84	4			27194,8	5	48932,64	9
Річка					5436,96	1	5436,96	1
Ставок	38058,72	7			21747,84	4	59806,56	11
<b>Святошинський район</b>	947652,69	61			93211,74	6	1040864,43	67
Озеро	201958,77	13			62141,16	4	264099,93	17
Ставок	745693,92	48			31070,58	2	776764,5	50
<b>Солом'янський район</b>	76458,12	12			70086,61	11	146544,73	23
Озеро	44600,57	7			38229,06	6	82829,63	13
Річка					6371,51	1	6371,51	1
Ставок	31857,55	5			26486,04	4	57343,59	9
<b>Шевченківський район</b>	45196,47	11			12326,31	3	57522,78	14
Озеро	45196,47	11			8217,54	2	53414,01	13
Річка					4108,77	1	4108,77	1
<b>Загальний підсумок</b>	11333220,18	583	80072,09	4	3151662,09	184	14564954,36	771

Джерело: створено автором.

Ці дані є надзвичайно важливими, оскільки вони формують фундаментальну основу для всіх наступних етапів дослідження та всебічної оцінки водних геоекосистем. В майбутньому можна розробляти та реалізовувати більш поглиблені дослідження, спрямовані на виявлення динаміки змін, оцінку впливу антропогенних та природних факторів, прогнозування потенційних загроз та розробку ефективних заходів зі збереження та відновлення водних ресурсів та екологічної рівноваги.

## ВИСНОВКИ

У межах дипломної роботи було здійснено комплексне дослідження водних геоекосистем міста Києва з позицій геоінформаційного картографування та моніторингу. Вперше запропоновано авторський підхід до класифікації та аналізу водних геоекосистем з урахуванням як класичних геоекологічних принципів, так і сучасних цифрових технологій геопросторового аналізу. Зокрема, розроблено методику багаторівневого моніторингу водних об'єктів із використанням супутникових знімків PlanetScore та спектральних індексів NDCI і NDTI, що дозволяє виявляти рівень евтрофікації та каламутності водних геоекосистем.

На основі зібраних даних створено повноцінну ГІС-систему, яка включає два основні блоки — загальних характеристик та стану евтрофікації водойм. Проведений аналіз дозволив деталізувати просторові закономірності евтрофікації водойм у межах районів міста Києва, виявити зони з найбільшим рівнем навантаження.

NDCI є основним індикатором рівня евтрофікації (пов'язаної з хлорофілом), NDTI дає додаткову інформацію про загальну прозорість/каламутність води. При високому рівні евтрофікації, високі значення NDTI часто є прямим наслідком великої кількості водоростей. Однак, високий NDTI може спостерігатися і при низькому NDCI, якщо вода каламутна через неорганічні суспензії. Наведені спектральні діапазони є узагальненими значеннями отриманими внаслідок польового дослідження еталонних водойм, без лабораторних аналізів. Для отримання більш точних показників потребується проведення валідації за допомогою польових та лабораторних вимірювань що дозволить адаптувати порогові значення індексів.

Результати дипломного дослідження мають як наукову, так і прикладну цінність. Вони можуть використовуватися для подальшого моніторингу, а також слугувати методичною базою для подібних досліджень в інших регіонах.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Мокрий В.І. Інформаційні технології моніторингу і еколого-картографічного моделювання процесів урбанізації природоохоронних територій Західного Полісся. Львів: Наук. вісн. НЛТУ України, 2011. Т. 21, № 18. С. 315–322.
2. Атрасевич О.В., Загородня С.А., Радчук І.В. Технології ДЗЗ для обробки даних моніторингу водних об'єктів в басейні р. Прип'ять. Зб. наук.-практ. конф. «Геоінформаційні системи у сьогоденні». Дунаївці – Залісці, 2013. С. 15–23.
3. Загородня С.А., Охарев В.О., Попова М.А., та ін. Інформаційні технології для екологічного моніторингу водно-болотних екосистем Українського Полісся. Матеріали XII міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях» (с.м.т. Кацівелі 9–13 вересня 2013 р.). Київ, 2013. С. 185–191.
4. Трофимчук О.М., Мокрий В.І., Радчук І.В. та ін. Інформаційне забезпечення гідроакустичного моніторингу озер Західного Полісся. Зб. наук. праць «Екологічна безпека та природокористування». Київ, 2015. Вип. 1(17). С. 5–15.
5. Карпенко Н.І. Типизація озерних улоговин Шацького поозер'я. Українське Полісся: вчора, сьогодні, завтра. Луцьк, 1998. С. 95–96.
6. Карпенко Н.І., Хомік Н.В. Динаміка берегів озер поліського типу. Вісн. Львів. ун-ту. Сер. геог. 2000. Вип. 27. С. 39–45.
7. Ільїн Л.В. Конструктивно-географічні основи господарського використання різнотипних озер Полісся. Наук. вісник Волин. держ. ун-ту імені Лесі Українки. 1999. №9. С. 52–55.
8. Удод В.М., Трофімович В.В., Волошкіна О.С. та ін. Техноекологія: навч. посіб. для студ. КНУБА, Київ: Ін-т телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ., 2007. 195 с. 182

9. Загородня С.А. Оцінка екологічного стану природно-заповідних територій засобами геоінформаційних технологій: дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 21.06.01 «екологічна безпека». Київ, 2016. 141 с.

10. Новохацька Н.А. Комплексна оцінка та прогнозування впливу сміттєзвалищ на складові довкілля: дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 21.06.01 «екологічна безпека». Київ, 2015. 177 с.

11. Охарєв В.О., Радчук І.В., Новохацька Н.А. та ін. Експедиційні дослідження Білоозерської ділянки Рівненського природного заповідника. Матеріали XV Міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях» (3–6 жовтня 2016 р.). Київ, 2016. С. 49–53.

12. Загородня С.А., Новохацька Н.А., Охарєв В.О. Дослідження екологічного стану локальної геосистеми із застосуванням геоінформаційних технологій. Інформаційні технології в задачах екологічної оцінки природнозаповідних: збір. матер. конференції «ГІС-форум-2017». Харків: ХНУ «Смугаста типографія», 2017. Вип. 1. С. 28–31.

13. Радчук І.В., Атрасевич О.В., Охарєв В.О. Ехолокаційна батиметрія лімнологічних акваторій національного природного парку «Прип'ять – Стохід». Матеріали XVI міжнар. наук.-практич. конфер. «Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами з надзвичайних ситуацій» (3–4 жовтня 2017 р.). Київ – Пуща-Водиця, 2017. С. 181–183.

14. Трофимчук О.М., Триснюк В.М., Миронцов М.Л. та ін. Геоекологічний моніторинг водних об'єктів України: комплексна оцінка та прогнозування стану. Зб. наук. праць: «Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами з надзвичайних ситуацій». Матеріали XVI міжнар. наук.-практич. конфер. (6–7 жовтня 2020). Київ, 2020. С. 125–128.

15. Mokryy V., Trofimchuk O., Vasilenko S. et al. Information support of conception of environmental safety of water supply and wastewater treatment. Lublin, 2016. P. 132–145.
16. Mokryy V., Trofimchuk O., Pohrebennyk V. et al. Biophysical monitoring of forest ecosystems. *Journal of Acta facultatis studiorum humanitatis et naturae universitatis Presoviensis*. Slovakia – Presov, 2016. Vol. 43. P. 167–172.
17. Novokhatska N., Zagorodnia S., Tomchenko O. Investigation of wetlands state using remote sensing methods. International youth forum integration processes of the world science in the 21st century (October 10–14, 2016). Azerbaijan – Ganja, 2016. P. 147.
18. Korchenko O., Pohrebennyk V., Gancarczyk J. et al. Use of modern information technologies for and management of nature reserve areas. International multidisciplinary scientific conference SGEM 2019. Bulgaria – Albena, 2019. P. 697–703. URL: [10.5593/sgem2019/2.1/S07.091](https://www.sgem.org/2019/2.1/S07.091) (дата звернення: 07.10.2021)
19. Trofymchuk O., Zahorodnya S., Sheviakina N. et al. Remote Sensing Monitoring of Biotopes Distribution within Nature Reserve Area. *Journal of Environmental Research, Engineering, and Management*. 2020. Vol. 76. №3. P. 109–120. URL: [10.5755/j01.erem.76.3.25204](https://www.ijerem.com/2020/76.3.25204) (дата звернення: 02.05.2025)
20. Круглов, І. Трансдисциплінарна геоекологія: монографія. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2020. 292 с.
21. Вишневецький В.І. Водойми Києва: монографія. Київ: Ніка-Центр, 2021. 280 с.
22. Gao B.-C., McFeeters S. K. Normalized Difference Water Index (NDWI). URL: <https://ng.smartafrihub.com/education/vegetation-indices-in-precision-agriculture/normalized-difference-water-index-ndwi/> (дата звернення: 20.05.2025).
23. Normalized Difference Tillage Index (NDTI). SmartAfriHub, 2023. URL: <https://ng.smartafrihub.com/education/vegetation-indices-in-precision-agriculture/normalized-difference-tillage-index-ndti/> (дата звернення: 20.05.2025).

24. Normalized Difference Chlorophyll Index. Sentinel Hub custom scripts. URL: <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/ndci/> (дата звернення: 21.05.2025).

25. Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI) [Electronic resource]. Climate Engine Support, last updated on July 27, 2023. URL: <https://support.climateengine.org/article/127-normalized-difference-chlorophyll-index> (дата звернення: 21.05.2025).

26. Seagrass distribution, areal cover, and changes (1990-2021) in coastal waters off West-Central Florida, USA. URL: [https://www.researchgate.net/publication/364947274\\_Seagrass\\_distribution\\_areal\\_cover\\_and\\_changes\\_1990-2021\\_in\\_coastal\\_waters\\_off\\_West-Central\\_Florida\\_USA/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/364947274_Seagrass_distribution_areal_cover_and_changes_1990-2021_in_coastal_waters_off_West-Central_Florida_USA/figures?lo=1) (дата звернення: 22.05.2025).

27. Cho H. J., Mishra D. R., Clarke C., Kamerosky A. Hyperspectral signal bands to hico image data bands for seagrass mapping (2013). URL: [https://www.researchgate.net/publication/266708884\\_HYPERSPECTRAL\\_SIGNAL\\_BANDS\\_TO\\_HICO\\_IMAGE\\_DATA\\_BANDS\\_FOR\\_SEAGRASS\\_MAPPING#fullTextFileContent](https://www.researchgate.net/publication/266708884_HYPERSPECTRAL_SIGNAL_BANDS_TO_HICO_IMAGE_DATA_BANDS_FOR_SEAGRASS_MAPPING#fullTextFileContent) (дата звернення: 22.05.2025).