

ДЕРЖАВНА УСТАНОВА "НАУКОВИЙ ЦЕНТР АЕРОКОСМІЧНИХ
ДОСЛІДЖЕНЬ ЗЕМЛІ ІНСТИТУТУ ГЕОЛОГІЧНИХ НАУК НАЦІОНАЛЬНОЇ
АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ"

Кваліфікаційна
наукова праця на
правах рукопису

МАРГЕС СЕРГІЙ ВІКТОРОВИЧ

УДК 528.8:551.3:504.05

ДИСЕРТАЦІЯ

МЕТОДИКА ГЕОЕКОЛОГІЧНОГО АНАЛІЗУ БАСЕЙНІВ СЕРЕДНІХ РІЧОК
ЛІВОБЕРЕЖЖЯ ДНІПРА НА ОСНОВІ ДАНИХ АЕРОКОСМІЧНОГО
МОНІТОРИНГУ І НАЗЕМНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
(НА ПРИКЛАДІ БАСЕЙНУ РІЧКИ СУПІЙ)

Спеціальність: 103 – Науки про Землю

Галузь знань: 10 – Природничі науки

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень.

Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело _____ С.В. Маргес

Науковий керівник: Філіпович Володимир Євгенович,
кандидат геологічних наук, старший науковий співробітник

АНОТАЦІЯ

Маргес С. В. Методика геоecологічного аналізу басейнів середніх річок Лівобережжя Дніпра на основі даних аерокосмічного моніторингу і наземних досліджень (на прикладі басейну річки Супій) – кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 103 – «Науки про Землю», галузь знань 10 – «Природничі науки». Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», м. Київ, 2026.

В умовах кліматичних змін та посилення антропогенного навантаження на природні геосистеми, зумовленого інтенсивним розорюванням земель, урбанізацією, зміною структури землекористування, осушувальними меліораціями, нераціональним водокористуванням, пониженням рівня ґрунтових вод і зростанням теплового навантаження, суттєво активізуються процеси трансформації геологічного середовища. Це призводить до порушення природної рівноваги між компонентами ландшафтів, зміни режиму зволоження, підтоплення, заболочування окремих територій, посухи, розвитку деградаційних процесів ґрунтів та активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів.

Особливої уваги потребують рівнинні території, де небезпечні геологічні процеси часто мають менш виражений, але більш масштабний і тривалий характер. До таких територій належить басейн річки Супій. Для подібних територій найбільш характерними є площинна та лінійна ерозія, сезонне підтоплення, локальне заболочування, суфозійні процеси, просідання лесових ґрунтів, замулення водотоків, деградація ґрунтового покриву та зміни гідрологічного режиму малих річок. Саме поступовість їх розвитку ускладнює своєчасне виявлення традиційними польовими методами спостережень, що зумовлює необхідність застосування сучасних геоінформаційних технологій, методів ДЗЗ та алгоритмів виявлення просторових аномалій для оперативного моніторингу, оцінювання стану територій і прогнозування розвитку небезпечних процесів. За таких умов особливої актуальності набуває моніторинг просторово-

часових змін природного середовища, оцінювання їхньої інтенсивності та прогнозування подальшого розвитку з метою своєчасного виявлення потенційно небезпечних територій і мінімізації негативних наслідків.

Метою дисертаційної роботи є розроблення та апробація методики супутникового геоecологічного аналізу басейнів середніх річок Лівобережжя Дніпра (на прикладі річки Супій).

Об'єктом дослідження є басейн річки Супій як природно-антропогенна геосистема, у межах якої формуються й розвиваються певні геоecологічні процеси, зумовлені взаємодією природних умов та антропогенного навантаження.

Предметом дослідження є методика супутникового геоecологічного аналізу, що ґрунтується на басейновому підході, використанні даних ДЗЗ, просторово-часовому аналізі геоecологічних індикаторів та агрегації результатів для оцінювання геоecологічного стану й виділення зон потенційної небезпеки.

Методологічною основою дослідження обрано басейновий принцип, який розглядає річковий басейн як цілісну природно-антропогенну систему, де взаємопов'язані гідрологічні, геоморфологічні, ґрунтові, біотичні, кліматичні та антропогенні процеси.

На відміну від традиційних підходів, орієнтованих переважно на аналіз окремих показників, запропонована методика ґрунтується на комплексному підході, що поєднує виявлення аномалій та інтерпретацію геоecологічних показників із класичними методами геоecологічного аналізу. Геопросторові аномалії розглядаються як локальні відхилення від характерного стану природно-антропогенних систем, які можуть свідчити як про негативні, так і про позитивні зміни залежно від природних умов, типу землекористування та просторового контексту.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю переходу від фрагментарного оцінювання окремих компонентів природного середовища до цілісного просторово-часового аналізу стану басейнових геосистем. Басейни середніх річок Лівобережжя Дніпра зазнають тривалого сільськогосподарського,

меліоративного, водогосподарського та локального урбанізаційного впливу, що спричиняє деградацію ґрунтів, зниження їх вологозабезпеченості, трансформацію рослинного покриву, замулення та заростання водойм, локальне заболочування, розвиток ерозійних процесів, підвищення поверхневих температур і формування зон потенційної геоекологічної небезпеки.

Особливість цих процесів полягає в їхній просторовій і часовій нерівномірності. Вони по-різному проявляються у межах заплав, схилових ділянок, орних земель, торфово-болотних угідь, водоохоронних зон, природоохоронних територій і трансформованих ділянок землекористування. Традиційні польові методи не завжди забезпечують достатню просторову повноту, регулярність і повторюваність спостережень, тому дані дистанційного зондування Землі є важливим джерелом інформації для виявлення, кількісного оцінювання та моніторингу геоекологічних змін.

Для досягнення поставленої мети проаналізовано теоретико-методологічні підходи до геоекологічного аналізу річкових басейнів; обґрунтовано доцільність басейнового принципу як просторової та методичної основи дослідження; охарактеризовано природні передумови формування геоекологічних проблем у басейнах середніх річок Лівобережжя Дніпра; визначено склад супутникових, кліматичних, картографічних, морфометричних і наземних даних; сформовано систему корисних геоекологічних індикаторів; розроблено підхід до узгодження різнотипних показників у межах єдиної методичної шкали; опрацьовано методику виявлення геопросторових аномалій та їх інтерпретації у взаємозв'язку з геоекологічними показниками; апробовано методику в басейні річки Супій та визначено можливості її практичного застосування.

Методичну основу дослідження становить комплекс загальнонаукових, геоекологічних, географічних, дистанційних, геоінформаційних і статистичних методів. До загальнонаукових методів належать аналіз, синтез, порівняння, узагальнення та систематизація наукових джерел. Геоекологічні та географічні методи включають ландшафтно-геоекологічний аналіз, морфометричний аналіз рельєфу, оцінювання природно-антропогенних процесів, типологізацію та

районування територій. Застосування цих методів забезпечує коректне трактування стану природно-антропогенних геосистем і виявлення просторових закономірностей розвитку геоекологічних процесів. Методи дистанційного зондування включають оброблення супутникових знімків, розрахунок спектральних індексів та їхню просторово-часову динаміку. Геоінформаційні методи охоплюють побудову баз даних, просторове моделювання, картографування та інтеграцію різнотипних показників. Статистичні методи застосовано для нормалізації індикаторів, визначення порогових значень, аналізу варіацій та кореляційних зв'язків. Важливим елементом методики є аналіз аномалій геоекологічних індикаторів, що дозволяє виявляти локальні відхилення від характерного стану геосистем і визначати зони потенційної геоекологічної небезпеки. Басейновий принцип реалізовано через просторову ієрархію дослідження, яка включає басейн, тестові ділянки та піксельний рівень супутникових даних.

Інформаційну базу дослідження становлять матеріали дистанційного зондування Землі різної просторової, спектральної та часової розрізненості. Використано багатоспектральні супутникові дані Sentinel-2, Landsat, PlanetScope, цифрові моделі місцевості SRTM та AW3D30, кліматичні та метеорологічні дані, картографічні матеріали, дані наземних спостережень, результати БПЛА-зйомки та високодетальні знімки для візуальної і просторової валідації.

Дані Sentinel-2 використано для аналізу стану рослинного покриву, водних об'єктів, вологості поверхні та просторової неоднорідності земного покриву. Дані Landsat застосовано для аналізу багаторічної динаміки поверхневої температури та оцінювання теплового режиму території. Знімки PlanetScope використано для детальнішого дешифрування локальних проявів геоекологічних процесів на тестових ділянках, зокрема тоді, коли просторової розрізненості відкритих супутникових даних недостатньо для виявлення дрібномасштабних аномалій. Цифрові моделі місцевості залучено для аналізу морфометричних

умов, напрямів поверхневого стоку, локальних понижень і потенційних зон концентрації вологи.

У межах дослідження використано спектральні індекси та похідні показники, що характеризують стан рослинного покриву, поверхні за вологістю, водних об'єктів, ґрунтового покриву, теплового режиму та антропогенного впливу.

Особливу увагу приділено тематичній інтерпретації супутникових індикаторів відповідно до конкретних геоекологічних процесів. Однакові або близькі значення окремих спектральних показників можуть мати різний зміст залежно від типу території, сезону, землекористування, поверхневого зволоження та структури рослинного покриву. Тому в роботі обґрунтовано необхідність поєднання індексного аналізу з просторовим контекстом, морфометричними умовами, польовою перевіркою та дешифруванням високодетальних знімків.

У першому розділі дисертації узагальнено теоретико-методологічні засади супутникового геоекологічного аналізу басейнів річок, розглянуто геоекологічний аналіз як інтегративний підхід до вивчення взаємодії природних і антропогенних процесів у геосистемах та визначено його відмінність від екологічного моніторингу, ландшафтно-екологічного й геоінформаційного аналізу. Показано, що геоекологічний аналіз орієнтований не лише на фіксацію окремих показників стану довкілля, а й на виявлення просторово-часових зв'язків між компонентами природно-антропогенних систем. Охарактеризовано геолого-геоморфологічні, ландшафтні та гідрологічні особливості басейнів середніх річок Лівобережжя Дніпра, які зумовлюють їхню чутливість до геоекологічних змін, та проаналізовано ключові проблеми цих територій, зокрема трансформацію водного режиму, замулення, заростання й заболочування водойм і заплав, деградацію ґрунтів, ерозійні процеси та антропогенне перетворення земного покриву. Обґрунтовано вибір басейну річки Супій як модельного об'єкта апробації методики, оскільки він поєднує сільськогосподарські угіддя, заплавні та водно-болотні комплекси,

природоохоронні території, трансформовані руслові й прибережні зони, а також включає ділянки природно-заповідного фонду та об'єкти Смарагдової мережі, що підсилює практичну значущість оцінювання їхнього стану в контексті прилеглого землекористування та басейнових процесів.

У другому розділі розроблено методику супутникового геоекологічного аналізу за басейновим принципом, яка охоплює визначення меж басейну та тестових ділянок, формування інформаційної бази, розрахунок системи геоекологічних індикаторів, їх нормалізацію та агрегацію, просторово-часову інтерпретацію та валідацію результатів. Методика має багаторівневу структуру: попиксельно виявляються локальні зміни спектральних, теплових і морфометричних характеристик; на рівні тестових ділянок здійснюються апробація, уточнення інтерпретації та валідація супутникових індикаторів, оцінюються просторові закономірності поширення геоекологічних процесів; а на рівні басейну формується узагальнена оцінка геоекологічного стану природно-антропогенної системи. У межах методики визначено основні тематичні блоки аналізу – стан рослинного покриву, водних ресурсів, ґрунтів, теплового режиму, клімато-екологічних небезпек та антропогенного впливу – для яких підібрано відповідні супутникові індикатори, визначено їхню змістову інтерпретацію, можливості застосування та обмеження.

Окреме місце в методиці займає виявлення аномальних зон на супутникових знімках, що реалізується через статистичний аналіз розподілу значень індикаторів, виділення ділянок із відхиленнями від фонового стану, порівняння різночасових зображень та подальшу перевірку за польовими матеріалами, БПЛА-зйомкою, високодетальними знімками й морфометричним аналізом. Розроблено підхід до оцінювання деградації орних земель за ознаками суфозії та лінійної ерозії на початкових стадіях, що поєднує спектральні індикатори стану рослинності й вологості поверхні з морфометричними характеристиками рельєфу та даними польової верифікації. Також запропоновано методичний підхід до оцінювання пожежонебезпечності торфово-болотних угідь, який враховує стан рослинного покриву, дефіцит

вологи, поверхневу температуру, евапотранспірацію, посушливість та наявність відкритої води або перезволожених ділянок.

У третьому розділі здійснено апробацію розробленої методики на прикладі басейну річки Супій. Надано загальну характеристику басейну як об'єкта геоекологічного аналізу, визначено його природні умови, особливості землекористування, гідрологічну структуру, просторове положення природоохоронних територій і тестових ділянок. Обґрунтовано вибір тестових ділянок, що репрезентують різні типи геоекологічних умов і процесів: заплавні та водно-болотні комплекси, орні землі, ділянки з підвищеною вологістю ґрунтів, замулення, заростання, деградація ґрунтового покриву, ерозійно-суфозійні прояви і підвищена теплова напруженість. У межах апробації виконано оцінювання стану рослинного покриву, водних ресурсів, ґрунтового покриву та теплового режиму. На основі багаторічних супутникових даних проаналізовано просторову диференціацію вегетаційних показників, а також індикатори, що дозволяють виявляти відкриті водні поверхні, перезволожені ділянки, зони зниження вологості та потенційного замулення або заростання водойм тощо.

За результатами апробації сформовано інтегральну оцінку геоекологічного стану та виділено зони потенційної геоекологічної небезпеки, де поєднуються несприятливі значення кількох індикаторів: зниження стану рослинності, дефіцит вологи, підвищена поверхнева температура, ознаки деградації ґрунтів, ерозійно-суфозійні прояви, заболочування, замулення або інтенсивне антропогенне навантаження. Поєднання різних індикаторів забезпечує уникнення однобічної інтерпретації та підвищує надійність виділення проблемних ділянок.

У четвертому розділі узагальнено результати дослідження та визначено можливості практичного застосування розробленої методики. Показано, що запропонований підхід може бути використаний для моніторингу геоекологічного стану басейнів середніх річок, виділення зон потенційної геоекологічної небезпеки, визначення ділянок, які потребують першочергової

польової перевірки, обґрунтування природоохоронних заходів і підтримки управлінських рішень у сфері басейнового природокористування. Окремим напрямом апробації стало оцінювання стану природоохоронних територій у межах басейну річки Супій, де показано важливість аналізу не лише внутрішнього стану природних комплексів, а й впливу прилеглих територій, характеру землекористування, динаміки поверхневого зволоження, теплового режиму та просторової близькості до зон антропогенної трансформації, що дозволяє розглядати природоохоронні території як складові басейнкової геосистеми.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у розвитку методичних засад супутникового геоecологічного аналізу басейнів середніх річок шляхом поєднання басейнового принципу, багаторівневої просторової організації дослідження, системи супутникових геоecологічних індикаторів, їх узгодження в єдиній методичній шкалі та впровадження підходу до виявлення й інтерпретації геопросторових аномалій для інтегрального виділення зон підвищеного геоecологічного навантаження.

У дисертаційній роботі:

- ***Вперше в Україні розроблено*** методику супутникового геоecологічного аналізу за басейновим принципом, що охоплює просторову ієрархію дослідження, формування інформаційної бази, розрахунок і нормалізацію геоecологічних індикаторів, їх інтеграцію та просторово-часову інтерпретацію результатів із урахуванням виявлення та аналізу геопросторових аномалій як складової інтегральної оцінки геоecологічного стану;
- ***Вперше виділено зони потенційної геоecологічної небезпеки в межах басейну річки Супій*** як частини об'єктів Смарагдової мережі та природоохоронних територій;
- ***Розроблено*** інструмент автоматизованого виявлення геопросторових аномалій на супутникових даних, що дозволяє експериментальним шляхом

ідентифікувати аномальні значення растрів з миттєвою можливістю оцифрування за допомогою порогових критеріїв.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи полягає у можливості використання розробленої методики для моніторингу геоекологічного стану басейнів середніх річок, виявлення зон потенційної геоекологічної небезпеки, визначення пріоритетних ділянок польової перевірки, обґрунтування природоохоронних заходів і підтримки управлінських рішень у сфері охорони довкілля, басейнового природокористування та територіального планування.

Розроблена методика може бути використана органами місцевого самоврядування, басейновими управліннями водних ресурсів, природоохоронними установами, регіональними структурами екологічного моніторингу та науковими організаціями для оцінювання стану річкових басейнів, виявлення проблемних ділянок, планування природоохоронних заходів і контролю змін у межах природно-антропогенних систем.

Практичне застосування методики можливе для просторового районування територій за рівнем потенційної геоекологічної небезпеки; оцінювання стану об'єктів природно-заповідного фонду, територій Смарагдової мережі, водоохоронних зон і водно-болотних комплексів; аналізу пожежонебезпечності торфово-болотних угідь; виявлення деградації орних земель; оцінювання трансформації водного режиму; визначення ділянок, що потребують пріоритетного моніторингу або детальнішого польового обстеження.

Запропонований підхід може бути масштабований на інші басейни середніх річок Лівобережжя Дніпра, зокрема Трубіж, Сулу, Псел, Ворсклу, за умови адаптації порогових значень індикаторів, урахування локальних природно-кліматичних умов, особливостей землекористування та наявної інформаційної бази.

Результати дисертаційного дослідження апробовано під час виконання науково-дослідних робіт, підготовки наукових публікацій і доповідей на

науково-практичних конференціях, присвячених проблемам геоекології, дистанційного зондування Землі, геоінформаційного аналізу, моніторингу природних територій, оцінювання деградаційних процесів і потенційних геоекологічних небезпек. Основні положення дисертації викладено у наукових працях автора, зокрема у статтях у фахових виданнях України, публікаціях, що індексуються у міжнародних наукометричних базах, а також у матеріалах міжнародних і всеукраїнських конференцій.

Під час підготовки дисертаційної роботи інструменти штучного інтелекту, зокрема ChatGPT, Microsoft Copilot, Gemini, використовувалися виключно як допоміжні засоби для мовностилістичного редагування, перекладу окремих фрагментів тексту, структурування матеріалу, перевірки логічності викладення та створення допоміжних ілюстративних матеріалів. Усі результати, отримані за допомогою таких інструментів, були перевірені, відредаговані та змістовно опрацьовані автором. Виконання дослідження, аналіз даних, інтерпретація результатів і формулювання наукових висновків здійснені автором самостійно.

За результатами досліджень опубліковано 16 наукових праць: статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до Переліку наукових фахових видань України – 5, з них 3 проіндексовані в базах даних Web of Science та Scopus; 11 – у збірниках та матеріалах тез доповідей вітчизняних і міжнародних конференцій, з яких 4 – міжнародні, що проіндексовані в базі даних Scopus.

Ключові слова: дистанційне зондування Землі, басейновий принцип, геоекологічні індикатори, геоекологічний аналіз, пожежонебезпечність торфово-болотних угідь, деградація екосистем, аерокосмічний моніторинг, просторово-часова динаміка, ландшафтне та геоморфологічне картографування, ГІС, геоінформаційне моделювання.

ABSTRACT

Marhes S. V. Methodology of Geoecological Analysis of Medium-Sized River Basins of the Left-Bank Dnipro Based on Aerospace Monitoring and Ground-Based Research (a Case Study of the Supii River Basin) – Qualification scholarly work (manuscript).

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in Specialty 103 Earth Sciences, Field of Knowledge 10 Natural Sciences. State Institution “Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine”, Kyiv, 2026.

Under conditions of climate change and the intensification of anthropogenic pressure on natural geosystems, caused by intensive land ploughing, urbanization, changes in land-use structure, drainage reclamation, irrational water use, lowering of groundwater levels, and increasing thermal load, the processes of geological environment transformation are significantly intensified. This leads to the disruption of the natural balance among landscape components, changes in the moisture regime, flooding, waterlogging of certain territories, droughts, the intensification of soil degradation processes, and the activation of hazardous exogenous geological processes.

Particular attention should be paid to lowland territories, where hazardous geological processes often have a less pronounced but more large-scale and long-term character. Such territories include the Supii River basin. For territories of this type, the most characteristic processes are sheet and linear erosion, seasonal flooding, local waterlogging, suffusion processes, subsidence of loess soils, siltation of watercourses, degradation of the soil cover, and changes in the hydrological regime of small rivers. It is precisely the gradual nature of their development that complicates their timely detection through traditional field observation methods, thereby necessitating the application of modern geoinformation technologies, remote sensing methods, and algorithms for spatial anomaly detection for operational monitoring, assessment of territorial conditions, and forecasting the development of hazardous processes. Under such conditions, the monitoring of spatio-temporal changes in the natural environment,

the assessment of their intensity, and the forecasting of their further development become particularly relevant for the purpose of the timely identification of potentially hazardous territories and the minimization of negative consequences.

The aim of the dissertation is to develop and validate a methodology for satellite-based geocological analysis of medium-sized river basins of the Left Bank of the Dnipro (using the Supii River as a case study).

The object of the study is the Supii River basin as a natural–anthropogenic geosystem, within which specific geocological processes are formed and develop, conditioned by the interaction between natural conditions and anthropogenic pressure.

The subject of the study is a methodology of satellite-based geocological analysis, which is based on the basin approach, the use of remote sensing data, the spatio-temporal analysis of geocological indicators, and the aggregation of results for the assessment of geocological condition and the delineation of potential hazard zones.

As the methodological basis of the study, the basin principle was selected, which considers a river basin as an integral natural–anthropogenic system, within which hydrological, geomorphological, soil, biotic, climatic, and anthropogenic processes are interconnected.

Unlike traditional approaches, focused primarily on the analysis of individual indicators, the proposed methodology is based on a comprehensive approach that combines the detection of anomalies and the interpretation of geocological indicators with classical methods of geocological analysis. Geospatial anomalies are considered as local deviations from the characteristic state of natural–anthropogenic systems, which may indicate both negative and positive changes depending on natural conditions, the type of land use, and the spatial context.

The relevance of the study is determined by the necessity of transitioning from the fragmented assessment of individual components of the natural environment to a holistic spatio-temporal analysis of the state of basin geosystems. The basins of medium-sized rivers of the Left Bank of the Dnipro are subjected to prolonged agricultural, reclamation, water-management, and local urbanization impacts, which

cause soil degradation, reduce their moisture availability, lead to the transformation of vegetation cover, the siltation and overgrowth of water bodies, local waterlogging, the development of erosion processes, increased surface temperatures, and the formation of zones of potential geoeological hazard.

A distinctive feature of these processes is their spatial and temporal unevenness. They manifest differently within floodplains, slope areas, arable lands, peatland and wetland areas, water protection zones, protected natural areas, and transformed land-use areas. Traditional field methods do not always provide sufficient spatial coverage, regularity, and repeatability of observations; therefore, Earth remote sensing data constitute an important source of information for the detection, quantitative assessment, and monitoring of geoeological changes.

To achieve the stated aim, theoretical and methodological approaches to the geoeological analysis of river basins were analysed; the expediency of the basin principle as a spatial and methodological basis for the study was substantiated; the natural preconditions for the formation of geoeological problems in the basins of medium-sized rivers of the Left Bank of the Dnipro were characterised; the composition of satellite, climatic, cartographic, morphometric, and ground-based data was determined; a system of informative geoeological indicators was developed; an approach to harmonising heterogeneous indicators within a unified methodological scale was designed; a methodology for the detection of geospatial anomalies and their interpretation in relation to geoeological indicators was elaborated; the methodology was validated in the Supii River basin, and the possibilities of its practical application were identified.

The methodological basis of the study is formed by a complex of general scientific, geoeological, geographical, remote sensing, geoinformation, and statistical methods. General scientific methods include analysis, synthesis, comparison, generalization, and systematization of scientific sources. Geoeological and geographical methods include landscape–geoeological analysis, morphometric analysis of relief, assessment of natural–anthropogenic processes, typologization, and territorial regionalization. The application of these methods ensures the correct

interpretation of the condition of natural–anthropogenic geosystems and the identification of spatial patterns in the development of geoecological processes.

Remote sensing methods include the processing of satellite imagery, the calculation of spectral indices, and the analysis of their spatio-temporal dynamics. Geoinformation methods encompass database construction, spatial modelling, mapping, and the integration of heterogeneous indicators. Statistical methods were applied for the normalization of indicators, the determination of threshold values, and the analysis of variations and correlations. An important element of the methodology is the analysis of geoecological indicator anomalies, which makes it possible to identify local deviations from the characteristic state of geosystems and to delineate zones of potential geoecological hazard. The basin principle was implemented through a spatial hierarchy of research, which includes the basin, test sites, and the pixel level of satellite data.

The information base of the study consists of Earth remote sensing materials of different spatial, spectral, and temporal resolutions. Multispectral satellite data from Sentinel-2, Landsat, and PlanetScope, digital elevation models SRTM and AW3D30, climatic and meteorological data, cartographic materials, ground observation data, UAV survey results, and very high-resolution imagery for visual and spatial validation were used.

Sentinel-2 data were used for the analysis of the condition of vegetation cover, water bodies, surface moisture, and the spatial heterogeneity of land cover. Landsat data were applied for the analysis of long-term surface temperature dynamics and the assessment of the thermal regime of the territory. PlanetScope imagery was used for more detailed interpretation of local manifestations of geoecological processes within test sites, particularly in cases where the spatial resolution of open-access satellite data was insufficient for the detection of small-scale anomalies. Digital elevation models were employed for the analysis of morphometric conditions, surface runoff directions, local depressions, and potential zones of moisture accumulation.

Within the framework of the study, spectral indices and derived indicators characterizing the condition of vegetation cover, surface moisture, water bodies, soil cover, thermal regime, and anthropogenic influence were used.

Particular attention was paid to the thematic interpretation of satellite-derived indicators in accordance with specific geoecological processes. Identical or similar values of individual spectral indicators may have different meanings depending on the type of territory, season, land use, surface moisture conditions, and the structure of vegetation cover. Therefore, the study substantiates the necessity of combining index-based analysis with spatial context, morphometric conditions, field verification, and the interpretation of very high-resolution imagery.

In the first chapter of the dissertation, the theoretical and methodological foundations of satellite-based geoecological analysis of river basins are summarized; geoecological analysis is considered as an integrative approach to the study of the interaction between natural and anthropogenic processes within geosystems, and its distinction from environmental monitoring, landscape–ecological analysis, and geoinformation analysis is defined. It is demonstrated that geoecological analysis is oriented not only toward the identification of individual indicators of environmental condition, but also toward the detection of spatio-temporal relationships between the components of natural–anthropogenic systems.

The geological–geomorphological, landscape, and hydrological features of the medium-sized river basins of the Left Bank of the Dnipro, which determine their sensitivity to geoecological changes, are characterized, and the key problems of these territories are analysed, in particular the transformation of the hydrological regime, the siltation, overgrowth, and waterlogging of water bodies and floodplains, soil degradation, erosion processes, and the anthropogenic transformation of land cover.

The selection of the Supii River basin as the model object for methodology validation is substantiated, since it combines agricultural lands, floodplain and wetland complexes, protected natural areas, transformed river-channel and riparian zones, and also includes sites of the nature reserve fund and Emerald Network areas, which

enhances the practical significance of assessing their condition in the context of adjacent land use and basin-scale processes.

In the second chapter, a methodology for satellite-based geoecological analysis based on the basin principle was developed, encompassing the delineation of basin boundaries and test sites, the formation of the information base, the calculation of a system of geoecological indicators, their normalization and aggregation, as well as the spatio-temporal interpretation and validation of results. The methodology has a multi-level structure: at the pixel level, local changes in spectral, thermal, and morphometric characteristics are detected; at the level of test sites, validation, interpretation refinement, and verification of satellite-derived indicators are carried out, and the spatial patterns of geoecological process distribution are assessed; while at the basin level, an integrated assessment of the geoecological condition of the natural–anthropogenic system is formed.

Within the framework of the methodology, the main thematic blocks of analysis were defined—vegetation cover condition, water resources, soils, thermal regime, climate-related ecological hazards, and anthropogenic impact—for which appropriate satellite-derived indicators were selected, and their conceptual interpretation, applicability, and limitations were determined.

A separate component of the methodology is the detection of anomalous zones in satellite imagery, which is implemented through the statistical analysis of indicator value distributions, the identification of areas with deviations from the background state, the comparison of multi-temporal images, and subsequent verification using field materials, UAV surveys, very high-resolution imagery, and morphometric analysis. An approach was developed for assessing the degradation of arable land based on indicators of suffusion and linear erosion at their initial stages, combining spectral indicators of vegetation condition and surface moisture with morphometric characteristics of relief and field verification data.

In addition, a methodological approach was proposed for assessing the fire hazard of peatland and wetland areas, which takes into account the condition of

vegetation cover, moisture deficit, surface temperature, evapotranspiration, aridity, and the presence of open water or excessively moist areas.

In the third chapter, the developed methodology was validated using the Supii River basin as a case study. A general characterization of the basin as an object of geoecological analysis is provided, and its natural conditions, land-use characteristics, hydrological structure, and the spatial distribution of protected areas and test sites are determined. The selection of test sites representing different types of geoecological conditions and processes is substantiated, including floodplain and wetland complexes, arable lands, areas with increased soil moisture, siltation, overgrowth, soil cover degradation, erosion–suffusion manifestations, and elevated thermal stress.

Within the framework of the validation, an assessment of the condition of vegetation cover, water resources, soil cover, and the thermal regime was carried out. Based on long-term satellite data, the spatial differentiation of vegetation indicators was analysed, as well as indicators enabling the detection of open water surfaces, excessively moist areas, zones of reduced moisture, and areas of potential siltation or overgrowth of water bodies.

Based on the results of the validation, an integrated assessment of geoecological condition was produced, and zones of potential geoecological hazard were delineated, where unfavourable values of several indicators coincide: deterioration of vegetation condition, moisture deficit, elevated surface temperature, signs of soil degradation, erosion–suffusion manifestations, waterlogging, siltation, or intensive anthropogenic pressure. The combination of different indicators makes it possible to avoid one-sided interpretation and increases the reliability of identifying problematic areas.

In the fourth chapter, the results of the study are summarized, and the possibilities for the practical application of the developed methodology are identified. It is demonstrated that the proposed approach can be used for monitoring the geoecological condition of medium-sized river basins, delineating zones of potential geoecological hazard, identifying areas requiring priority field verification, substantiating environmental protection measures, and supporting management decisions in the field of basin-based natural resource management. A separate direction

of validation involved the assessment of the condition of protected areas within the Supii River basin, where the importance of analysing not only the internal condition of natural complexes but also the influence of adjacent territories, the character of land use, the dynamics of surface moisture, the thermal regime, and the spatial proximity to zones of anthropogenic transformation was demonstrated, allowing protected areas to be considered as components of the basin geosystem.

The scientific novelty of the dissertation lies in the development of the methodological foundations of satellite-based geoecological analysis of medium-sized river basins through the integration of the basin principle, a multi-level spatial organization of the study, a system of satellite-derived geoecological indicators, their harmonization within a unified methodological scale, and the implementation of an approach for the detection and interpretation of geospatial anomalies for the integrated delineation of zones of increased geoecological pressure.

In the dissertation:

- For the first time in Ukraine, a methodology for satellite-based geoecological analysis based on the basin principle has been developed, encompassing the spatial hierarchy of the study, the formation of the information base, the calculation and normalization of geoecological indicators, their integration, and the spatio-temporal interpretation of results, taking into account the detection and analysis of geospatial anomalies as a component of the integrated assessment of geoecological condition;
- For the first time, zones of potential geoecological hazard within the Supii River basin have been delineated as part of Emerald Network sites and protected natural areas;
- An automated geospatial anomaly detection tool based on satellite data has been developed, enabling the experimental identification of anomalous raster values with an immediate capability for digitization using threshold-based criteria.

The practical significance of the dissertation results lies in the possibility of applying the developed methodology for monitoring the geoecological condition of medium-sized river basins, identifying zones of potential geoecological hazard, determining priority areas for field verification, substantiating environmental

protection measures, and supporting management decision-making in the fields of environmental protection, basin-based natural resource management, and spatial planning.

The developed methodology can be applied by local self-government authorities, basin water resources management agencies, environmental protection institutions, regional environmental monitoring bodies, and scientific organizations for the assessment of river basin conditions, the identification of problematic areas, the planning of environmental protection measures, and the monitoring of changes within natural–anthropogenic systems.

The practical application of the methodology is possible for the spatial zonation of territories according to the level of potential geocological hazard; the assessment of the condition of nature reserve fund sites, Emerald Network areas, water protection zones, and wetland complexes; the analysis of the fire hazard of peatland and wetland areas; the detection of arable land degradation; the assessment of hydrological regime transformation; and the identification of areas requiring priority monitoring or more detailed field investigation.

The proposed approach can be scaled to other medium-sized river basins of the Left Bank of the Dnipro, including the Trubizh, Sula, Psel, and Vorskla rivers, provided that the threshold values of indicators are adapted and local natural and climatic conditions, land-use characteristics, and the available information base are taken into account.

Copilot said: The results of the dissertation research were validated through the implementation of research projects, the preparation of scientific publications, and presentations at scientific and practical conferences dedicated to the issues of geocology, Earth remote sensing, geoinformation analysis, monitoring of natural areas, assessment of degradation processes, and potential geocological hazards.

The principal provisions of the dissertation are presented in the author's scientific works, including articles published in peer-reviewed Ukrainian scientific journals, publications indexed in international scientometric databases, as well as proceedings of international and national scientific conferences.

During the preparation of the dissertation, artificial intelligence tools, including ChatGPT, Microsoft Copilot, and Gemini, were used exclusively as auxiliary instruments for linguistic and stylistic editing, the translation of individual text fragments, the structuring of material, the verification of the logical consistency of presentation, and the creation of supplementary illustrative materials. All results obtained with the assistance of such tools were verified, edited, and substantively processed by the author. The conduct of the research, data analysis, interpretation of results, and formulation of scientific conclusions were carried out independently by the author.

Based on the research results, 16 scientific publications were produced: 5 articles in scientific journals included, at the time of publication, in the List of Scientific Professional Publications of Ukraine, of which 3 are indexed in the Web of Science and Scopus databases; and 11 publications in conference proceedings and collections of abstracts from national and international conferences, of which 4 international conference publications are indexed in the Scopus database.

Keywords: remote sensing, basin principle, geoecological indicators, geoecological analysis, fire hazard of peatland and wetland areas, ecosystem degradation, aerospace monitoring, spatio-temporal dynamics, landscape and geomorphological mapping, GIS, geoinformation modelling.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у фахових виданнях (категорії А, Б, міжнародні рецензовані)

1. **Маргес С.** Методика багаторівневого супутникового аналізу геоекологічних ризиків. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2026. Т. 13, № 1. С. 25–30. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2026.13.1.304>
Категорія Б
2. **Marhes, S., Filipovych, V., & Lubskyi, M.** (2025). Spatiotemporal analysis of surface temperature dynamics in the Supii River basin using regression methods. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 47(5), P. 82–94. <https://doi.org/10.24028/gj.v47i5.333289>
(Особистий внесок: здійснив підготовку та попередню обробку вихідних супутникових даних, виконав регресійний аналіз багаторічних часових рядів температури земної поверхні, забезпечив отримання, візуалізацію та графічне оформлення результатів дослідження, а також переклад матеріалів)
Категорія А, укр., Scopus
3. Гудак В., **Маргес С.**, Зацерковний В. Розробка інтерактивного інструменту для виявлення й аналізу геопросторових аномалій у QGIS на основі супутникових даних. *Географічний часопис Волинського національного університету імені Лесі Українки*. 2025. Т. 6, № 6. <https://doi.org/10.32782/geochasvnu.2025.6.13>
(Особистий внесок: виконав підготовку супутникових даних до аналізу, реалізував алгоритми обробки та виявлення геопросторових аномалій, розробив і описав авторський плагін для QGIS, забезпечив візуалізацію результатів і підготовку графічних матеріалів)
Категорія Б
4. Hudak, V., **Marhes, S.**, Zatserkovnyi V., & De Donatis, M. (2025). Methodology for the automated detection of anomalous geospatial zones in satellite imagery using statistical analysis and a custom QGIS plugin. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3(110), P. 117-126. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.110.13>
(Особистий внесок: у співавторстві розробив спеціалізований плагін для QGIS, здійснив концептуалізацію дослідження, виконав підготовку та валідацію супутникових даних, забезпечив візуалізацію результатів і підготовку графічних матеріалів, а також написав початковий варіант рукопису)
Категорія А, укр., Scopus
5. **Marhes, S.**, Hudak, V., Zatserkovnyi, V., Filipovych, V., & De Donatis, M. (2026). Detection of soil degradation processes in river basins using satellite

indices and a custom QGIS plugin. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(112), P. 122-132. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.112.14>

(Особистий внесок: у співавторстві розробив оновлену версію спеціалізованого плагіна для QGIS, здійснив концептуалізацію та методичне забезпечення дослідження, виконав підготовку й валідацію супутникових даних, застосував методику індексного оцінювання процесів деградації ґрунтів і підготував початкову редакцію рукопису)
Категорія А, укр., Scopus

Матеріали конференцій, тези, інші публікації

6. Filipovych V., Lischenko L., **Marhes S.** Methodology for Assessing and Forecasting the Landslide Hazard of the Territory of the Dnieper Landslide Zone in the City of Kyiv Based on Satellite Data. *Fourth EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities*. Lviv, 18–21 September 2023. P. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023500007>

(Особистий внесок: брав участь в опрацюванні матеріалів дистанційного зондування, підготовці картографічних матеріалів та написанні англійської версії статті)
укр., Scopus

7. Filipovych V., Lischenko L., **Marhes S.** Monitoring of Activation and Neotectonic Dependence of Landslide Processes within the Right Bank of Kyiv. *5th EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities*. September 2025. Vol. 2025. P. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025520020>

(Особистий внесок: брав участь в опрацюванні матеріалів дистанційного зондування, підготовці картографічних матеріалів та написанні англійської версії статті)
укр., Scopus

8. **Marhes S.**, Filipovych V. Methodology for Assessing Arable Land Degradation through the Analysis of Suffosion and Linear Erosion Using Satellite Data. *19th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Apr 2026*. European Association of Geoscientists & Engineers. Kyiv, 2026. P. 1 – 5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202655064>

(Особистий внесок: брав участь в опрацюванні матеріалів дистанційного зондування, польових дослідженнях, аналізу даних і підготовці картографічних матеріалів)
укр., Scopus

9. Tustanovska L., Liashenko D., Trofymenko P., Tytarenko O., **Marhes S.** Geocological Monitoring of Hazardous Erosional-Denudational Zones in the

Urban Environment of Kyiv. *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace 2025»*. Lviv, 6–9 October 2025. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202552074>

(Особистий внесок: брав участь в опрацюванні матеріалів дистанційного зондування, підготовці картографічних матеріалів та написанні англомовної версії статті)

укр., Scopus

10. Філіпович В., Маргес С. Алгоритм аналізу пожежонебезпечності ландшафтів за супутниковими індексами: демонстрація на прикладі пожежі у водно-болотних угіддях басейну річки Супій із використанням знімків PlanetScore. *Різнноманіття ландшафтних різнноманіть*: матеріали наук.-прикладного семінару. Київ, 2025. ISBN 978-966-946-791-1.

(Особистий внесок: розробив алгоритм аналізу пожежонебезпечності водно-болотних угідь, виконав обробку супутникових знімків, розрахунок спектральних індексів, векторизацію та інтерпретацію результатів дистанційного зондування)

11. Marhes S., Hudak V. A GIS-Based Open Source Tool for Experimental Detection of Geospatial Anomalies in Geology. Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2025 : тези доповідей XX Міжнар. конф. (Чернігів, 10–12 листопада 2025 р.). Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2025. С. 91–94. ISBN 978-617-7932-91-7.

(Особистий внесок: виконав аналіз результатів обробки супутникових знімків у плагіні QGIS, здійснив налаштування алгоритму виявлення геопросторових аномалій, виконав їх векторизацію та підготував графічні матеріали)

12. Marhes S.V. Satellite Geoecological Analysis of the Peat Swamp System of the Supii River. *Ideas and Innovations in Earth Sciences: Proceedings of the 10-th International Geosciences Conference of Young Researchers* (Kyiv, Ukraine, May 23–24, 2024). Kyiv, 2024. P. 74–75. <https://doi.org/10.30836/igs.iies.2024.34>

укр.

13. Ліщенко Л., Філіпович В., Маргес С. Супутниковий геоecологічний моніторинг наслідків руйнування Каховської ГЕС. *Природа в окупації – 10 років російської військової агресії проти довкілля. Перспективи відновлення природоохоронних територій України*: зб. матеріалів Всеукр. наук.-практ. конф., Хмельницький, 28–29 березня 2024 р. Київ: Центр екологічної освіти та інформації, 2024. С. 115–120.

(Особистий внесок: здійснив попередню обробку супутникових зображень, виконав розрахунок та аналіз спектральних індексів)

- 14.Ліщенко Л., Філіпович В., **Маргес С.** Методико-технологічний комплекс супутникового моніторингу торфовищ з метою оцінки їх пожежонебезпечного стану. *Актуальні проблеми та інноваційні технології у сфері цивільного захисту та екологічної безпеки для повоєнного відновлення України*: зб. наук. праць Міжнар. наук.-практ. конф., 28–30 травня 2024 р., Київ. Київ: НУХТ, 2024. ISBN 978-966-612-335-3.
(Особистий внесок: доповнив комплекс спектральних індексів індексом посухи, виконав обробку супутникових знімків і розрахунок спектральних індексів для оцінювання пожежної небезпеки торфовищ)
- 15.**Маргес С.** Результати супутникового моніторингу водних ресурсів басейну р. Супій в умовах зміни клімату. *Natural Resources of Border Areas under a Changing Climate*. The 7th International Scientific Conference : program, abstracts. Chernihiv, 27–29 September 2023. P. 93–94. ISBN 978-617-8020-87-3.
- 16.**Маргес С.** Дослідження долини річки Супій як ланки Смарагдової мережі Європи засобами ГІС-технологій та методами дистанційного зондування Землі. *Інформаційно-комунікаційні технології для перемоги та відновлення*: колективна монографія за матеріалами XXII Міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційно-комунікаційні технології та сталий розвиток» (Київ, 14–15 листопада 2023 р.) / за заг. ред. С. О. Довгого. Київ: ТОВ «Видавництво «Юстон», 2023. С. 193–195. ISBN 978-617-7854-58-5.
<https://doi.org/10.35350/2021-1-1-1-223>

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	29
ВСТУП	31
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ СУПУТНИКОВОГО ГЕОЕКОЛОГІЧНОГО АНАЛІЗУ БАСЕЙНІВ РІЧОК	40
1.1 Геоекологічний аналіз як інтегративний підхід до вивчення взаємодії природних і антропогенних процесів у геосистемах	40
1.2 Огляд досліджень геоекологічного стану басейнів середніх річок Лівобережжя Дніпра	46
1.3 Загальна геолого-геоморфологічна і ландшафтна будова басейнів середніх річок лівобережжя Дніпра та основні геоекологічні проблеми.....	53
1.4 Фактичний матеріал та принципи формування тестових ділянок для апробації методики	64
1.4.1 Басейн річки як об'єкта апробації методики	64
1.4.2 Джерела вихідних даних та фактичний матеріал дослідження.....	66
1.4.3 Принципи вибору та просторове розміщення тестових ділянок	68
1.5 Геоекологічні індикатори оцінювання стану басейнів річок	69
1.5.1 Поняття геоекологічних індикаторів у басейнових дослідженнях	69
1.5.2 Класифікація геоекологічних індикаторів для аналізу	72
1.5.3 Критерії оцінювання та інтеграція геоекологічних індикаторів.....	78
1.5.4 Роль геоекологічних індикаторів у формуванні методики дослідження	79
1.6 Обмеження та проблеми існуючих підходів супутникового геоекологічного аналізу басейнів	80
Висновки до першого розділу.....	83
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА СУПУТНИКОВОГО ГЕОЕКОЛОГІЧНОГО АНАЛІЗУ ЗА БАСЕЙНОВИМ ПРИНЦИПОМ.....	85
2.1 Басейновий підхід та просторова організація геоекологічного аналізу....	85
2.1.1 Басейновий підхід як основа методики дослідження	85

2.1.2	Визначення меж басейну та роль тестових ділянок у реалізації геоecологічного аналізу	88
2.2	Інформаційно-технологічне забезпечення супутникового аналізу	90
2.2.1	Типи супутникових і наземних даних, застосованих у методиці	90
2.2.2	Програмно-алгоритмічне забезпечення.....	95
2.2.2.1	Авторський плагін Anomalies to contours (QGIS)	101
2.3	Формування геоecологічних індикаторів: обчислення, виявлення геоecологічних параметрів та процесів та побудова карт потенційних геоecологічних небезпек	107
2.3.1	Супутникові індекси, поверхнева температура та інші обчислення	107
2.3.2	Геоecологічні параметри та процеси: методи їх виявлення й інтерпретації та валідація.....	116
2.3.3	Нормалізація, агрегація та формування карти потенційних геоecологічних небезпек	125
	Висновки до другого розділу	127
РОЗДІЛ 3.	АПРОБАЦІЯ МЕТОДИКИ СУПУТНИКОВОГО ГЕОЕКОЛОГІЧНОГО АНАЛІЗУ НА ПРИКЛАДІ БАСЕЙНУ РІЧКИ СУПІЙ	129
3.1	Характеристика басейну річки Супій як об'єкта апробації	129
3.2	Тестові ділянки та їх роль у апробації методики.....	138
3.2.1	Вибір та просторове розміщення тестових ділянок	138
3.2.2	Підготовка та попередня обробка даних ДЗЗ	153
3.2.3	Тематична інтерпретація супутникових індексів з урахуванням локальних умов.....	158
3.3	Геоecологічний аналіз тестових ділянок за методикою	171
3.3.1	Аналіз тестової ділянки «Свидовець»	172
3.3.2	Аналіз тестової ділянки «Усівський»	173
3.3.3	Аналіз тестової ділянки «Озерна»	174
3.3.4	Аналіз тестової ділянки «Бутовщина»	175
3.3.5	Аналіз тестової ділянки «Ташанський»	176

3.3.6 Аналіз тестової ділянки «Ковраєць»	177
3.4 Потенційна геоекологічна небезпека в межах басейну р.Супій	178
3.5 Переваги та обмеження методики	183
Висновки до третього розділу.....	185
РОЗДІЛ 4. УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ МЕТОДИКИ	187
4.1 Узагальнення результатів супутникового геоекологічного аналізу та ключові висновки апробації.....	187
4.2 Рекомендації щодо застосування методики для моніторингу та управління басейновими геосистемами.....	189
4.3 Рекомендації щодо застосування методики для природно-заповідного фонду, Смарагдової мережі та водоохоронних зон.....	194
4.4 Рекомендації щодо застосування методики для інших басейнів середніх річок Лівобережжя Дніпра	202
4.5 Перспективи розвитку та вдосконалення методики.....	206
Висновки до четвертого розділу.....	208
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	210
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	211
ДОДАТКИ.....	229

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ДЗЗ	дистанційне зондування Землі
ДАВР	Державне агентство водних ресурсів України
GEE	<i>Google Earth Engine</i> , хмарна платформа для обробки геопросторових даних
SAGA	<i>System for Automated Geoscientific Analyses</i> , ГІС-система для наукового аналізу
БПЛА	безпілотний літальний апарат
ЦММ (DEM)	цифрова модель місцевості (<i>Digital Elevation Model</i>)
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i> , нормалізований різницевий вегетаційний індекс
GNDVI	<i>Green Normalized Difference Vegetation Index</i> , нормалізований різницевий вегетаційний індекс (зелений канал)
LCI	<i>Leaf Chlorophyll Index</i> , індекс листкового хлорофілу
EVI	<i>Enhanced Vegetation Index</i> , підсилений вегетаційний індекс
AFVI	<i>Aerosol Free Vegetation Index</i> , вегетаційний індекс без впливу аерозолів
NDRE	<i>Normalized Difference Red Edge Index</i> , вегетаційний індекс червоного краю
WDRVI	<i>Wide Dynamic Range Vegetation Index</i> , вегетаційний індекс із розширеним динамічним діапазоном
CIG	<i>Chlorophyll Index Green</i> , індекс хлорофілу (зелений канал)
CIRE	<i>Chlorophyll Index Red Edge</i> , індекс хлорофілу (червоний край)

(O)SAVI	<i>(Optimized) Soil-Adjusted Vegetation Index,</i> (оптимізований) вегетаційний індекс, скоригований на вплив ґрунту
(M)NDWI	<i>(Modified) Normalized Difference Water Index,</i> (модифікований) водний індекс
NDMI	<i>Normalized Difference Moisture Index,</i> індекс вологості
NDPI	<i>Normalised Difference Pond Index,</i> індекс ставків/мілководдя
NDDI	<i>Normalized Difference Drought Index,</i> індекс посухи
AWEI	<i>Automated Water Extraction Index,</i> автоматизований індекс виокремлення води
NDTI	<i>Normalized Difference Turbidity Index,</i> індекс каламутності води
BSI	<i>Bare Soil Index,</i> індекс оголеного ґрунту
MBI	<i>Modified Bare Soil Index,</i> модифікований індекс оголеного ґрунту
NDSI	<i>Normalized Difference Salinity Index,</i> нормалізований індекс засоленості
SI	<i>Salinity Index,</i> індекс засоленості
NDBI	<i>Normalized Difference Built-up Index,</i> індекс забудови
LST	<i>Land Surface Temperature,</i> поверхнева температура

ВСТУП

Сучасний стан природно-антропогенних систем України, зокрема басейнів середніх річок лівобережжя Дніпра, характеризується посиленням геоекологічних проблем, пов'язаних із трансформацією ландшафтів, деградацією ґрунтового покриву, порушенням водного режиму, змінами рослинності, замуленням і заростанням русел та заплав, підвищенням температурної напруженості поверхні й зростанням клімато-екологічних показників. Значна частина цих процесів має виражену просторово-часову мінливість, що ускладнює їх своєчасне виявлення, кількісне оцінювання та порівняння традиційними методами спостережень.

У цьому контексті особливого значення набуває застосування даних дистанційного зондування Землі, які забезпечують регулярне, просторово узгоджене та відтворюване отримання інформації про стан основних компонентів геосистем. Поєднання даних ДЗЗ із басейновим принципом аналізу дозволяє розглядати річкові басейни як цілісні природно-антропогенні системи, у межах яких взаємодіють гідрологічні, геоморфологічні, ґрунтові, біотичні, кліматичні та антропогенні процеси. Саме така просторово-функціональна цілісність басейну робить його доцільною одиницею для комплексного геоекологічного аналізу.

Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених використанню даних ДЗЗ для оцінювання окремих показників стану природного середовища, більшість із них орієнтована на компонентний аналіз, окремі часові зрізи або локальні ділянки. Недостатньо розробленими залишаються питання інтеграції різнотипних супутникових індикаторів у межах єдиної басейнової схеми, поєднання піксельного аналізу з агрегацією результатів за тестовими ділянками, а також розмежування актуального стану, короткострокових змін, накопичених трансформацій і довготривалих тенденцій. Це зумовлює необхідність розроблення методики супутникового геоекологічного аналізу, яка забезпечує комплексне, просторово-часове та відтворюване оцінювання геоекологічного

стану басейнів середніх річок з метою виявлення потенційних геоекологічних небезпек.

Особливо актуальною така методика є для басейнів середніх річок лівобережжя Дніпра, що зазнають інтенсивного сільськогосподарського, меліоративного, водогосподарського й локального урбанізаційного впливу та водночас містять природоохоронні території, водно-болотні угіддя, заплавні комплекси, об'єкти природно-заповідного фонду й території Смарагдової мережі. В умовах кліматичних змін, зростання пожежонебезпечності осушених торфово-болотних угідь, а також потенційних геоекологічних небезпек, пов'язаних із надзвичайними ситуаціями та воєнним впливом, зростає потреба у науково обґрунтованих інструментах просторового оцінювання потенційної геоекологічної небезпеки і підтримки управлінських рішень.

У зв'язку з цим розроблення та апробація методики супутникового геоекологічного аналізу басейнів середніх річок, орієнтованої на формування та використання геоекологічних індикаторів на основі даних ДЗЗ, є актуальним науковим завданням, що має як теоретичне, так і прикладне значення.

Отже, актуальність дослідження зумовлена необхідністю переходу від фрагментарного оцінювання окремих компонентів природного середовища до цілісного просторово-часового аналізу стану басейнових геосистем. Така методика поєднує просторову організацію різнотипних супутникових та наземних даних за басейновим принципом, систему геоекологічних індикаторів, узгодження показників, просторово-часовий аналіз, нормалізацію та можливість практичного застосування для моніторингу й управління природно-антропогенними системами, виявлення та аналізу потенційних небезпек.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в рамках наукових досліджень, що проводились у Державній установі «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України» за такими темами: «Удосконалення методології вирішення задач оперативного геоекологічного моніторингу і раціонального природокористування шляхом

комплексування різномірних супутникових і наземних даних» (державний реєстраційний номер 0119U003171), «Методологія застосування сучасних технологій дистанційного зондування Землі при моніторингових дослідженнях небезпечних геологічних процесів, що активізуються і розвиваються внаслідок дії природних та антропогенних чинників» (державний реєстраційний номер 0125U000486).

Метою дисертаційної роботи є розроблення та апробація методики супутникового геоecологічного аналізу басейнів середніх річок Лівобережжя Дніпра (на прикладі річки Супій).

Для досягнення поставленої мети у дисертаційній роботі вирішено такі основні завдання:

1. Проаналізовано теоретико-методологічні підходи до геоecологічного аналізу річкових басейнів і використання даних дистанційного зондування Землі для оцінювання стану природно-антропогенних систем.
2. Охарактеризовано природні передумови формування геоecологічних проблем у басейнах середніх річок лівобережжя Дніпра та обґрунтовано вибір басейну річки Супій як модельного об'єкта апробації.
3. Визначено склад супутникових, кліматичних, картографічних, морфометричних і наземних даних, придатних для комплексного геоecологічного аналізу басейнів середніх річок.
4. Розроблено методику супутникового геоecологічного аналізу за басейновим принципом, що передбачає ієрархічну просторову організацію дослідження, поєднання піксельного аналізу з агрегацією результатів за тестовими ділянками та басейном у цілому.
5. Сформовано систему геоecологічних індикаторів для оцінювання стану рослинного покриву, водних ресурсів, ґрунтового покриву, теплового режиму, клімато-екологічних показників та антропогенного впливу.
6. Апробовано розроблену методику в межах басейну річки Супій, зокрема на системі тестових ділянок, що репрезентують різні природні умови, типи землекористування та прояви геоecологічних процесів.

7. Виконано просторово-часовий і багаторівневий аналіз геоекологічного стану басейну, що дозволив розмежувати актуальний стан території, короткострокові зміни, накопичені трансформації та довготривалі тенденції.
8. Виділено зони потенційної геоекологічної небезпеки та оцінено можливості застосування методики для моніторингу, природоохоронного планування, аналізу природно-заповідного фонду, територій Смарагдової мережі, водоохоронних зон і надзвичайних ситуацій.

Об'єктом дослідження є басейн річки Супій як природно-антропогенна геосистема, у межах якої формуються й розвиваються певні геоекологічні процеси, зумовлені взаємодією природних умов та антропогенного навантаження.

Предметом дослідження є методика супутникового геоекологічного аналізу, що ґрунтується на басейновому підході, використанні даних ДЗЗ, просторово-часовому аналізі геоекологічних індикаторів та агрегації результатів для оцінювання геоекологічного стану й виділення зон потенційної небезпеки.

У дисертаційній роботі використано комплекс загальнонаукових, географічних, геоекологічних та геоінформаційних методів дослідження, що забезпечує системний підхід до аналізу геоекологічного стану басейнів середніх річок.

Для узагальнення теоретичних положень і сучасних підходів до геоекологічного аналізу застосовано **методи аналізу, синтезу, порівняння та узагальнення наукових джерел.**

Басейновий принцип дослідження реалізовано з використанням **системного та територіального підходів**, що дозволяють розглядати річкові басейни як цілісні природно-територіальні системи з взаємопов'язаними природними та антропогенними процесами.

Основу методичного апарату становлять **методи дистанційного зондування Землі**, зокрема обробка та аналіз багатоспектральних і теплових

супутникових даних з метою оцінювання стану рослинного покриву, водних ресурсів, ґрунтів, теплового режиму та клімато-екологічних показників.

Для опрацювання просторово-часових даних використано **геоінформаційні методи**, включно з просторовим аналізом, растрово-векторними перетвореннями, картографічним моделюванням та візуалізацією результатів у середовищах геоінформаційних систем і хмарних геоінформаційних платформ.

Програмно-алгоритмічна реалізація дослідження здійснювалася з використанням хмарних платформ, геоінформаційних систем і локальних аналітичних середовищ (зокрема GEE, QGIS, SAGA GIS, SNAP) та авторських програмних рішень (Python, Scilab). Їх поєднання забезпечило можливість обробки багаторічних супутникових даних, розрахунку індикаторів, просторової інтеграції результатів і формування карт геоекологічного стану.

Оцінювання динаміки та мінливості геоекологічних показників здійснювалося із застосуванням **статистичних методів аналізу**, зокрема аналізу часових рядів, розрахунку середніх значень, аномальних відхилень і приростів, приведення геоекологічних індикаторів до єдиного методичного діапазону значень в цілях інтеграції та порівняльного аналізу результатів для тестових ділянок і басейну в цілому.

Для інтеграції різнотипних геоекологічних індикаторів кожен з показників приведено до порівнюваного діапазону значень з урахуванням напряму їх геоекологічної інтерпретації. Узгодження показників здійснюється з урахуванням характеру відповідних геоекологічних процесів: значення коригуються так, щоб сильні прояви процесу відображалися високими значеннями, а слабкі – низькими, незалежно від вихідної фізичної інтерпретації показника. Такий підхід забезпечує можливість інтеграції вегетаційних, водних, ґрунтових, теплових і антропогенних показників у межах єдиної аналітичної системи.

Для перевірки працездатності, достовірності та універсальності розробленої методики застосовано **метод просторово-часової апробації** на

сукупності тестових ділянок, що відрізняються природними умовами та ступенем антропогенного впливу.

Валідація та уточнення інтерпретації результатів здійснювалися шляхом зіставлення супутникових індикаторів із матеріалами польових спостережень, БПЛА-зйомки, цифровими моделями рельєфу, високодетальними знімками та допоміжними картографічними даними. Такий підхід дозволив перевірити зв'язок дистанційно виявлених аномалій із реальними проявами лінійної ерозії, локального поверхневого перезволоження, мікрорельєфних заглиблень внаслідок суфозійних процесів.

Під час підготовки дисертаційної роботи інструменти штучного інтелекту, використовувалися виключно як допоміжні засоби для мовностилістичного редагування, перекладу окремих фрагментів тексту, структурування матеріалу, перевірки логічності викладення та створення допоміжних ілюстративних матеріалів. Усі результати, отримані за допомогою таких інструментів, були перевірені, відредаговані та змістовно опрацьовані автором. Виконання дослідження, аналіз даних, інтерпретація результатів і формулювання наукових висновків здійснені автором самостійно.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у розвитку методичних засад супутникового геоecологічного аналізу басейнів середніх річок на основі поєднання басейнового принципу, просторово-часових даних дистанційного зондування Землі, системи геоecологічних індикаторів та виділення зон потенційної геоecологічної небезпеки.

У процесі виконання дисертаційного дослідження:

1. ***Вперше в Україні розроблено*** методику супутникового геоecологічного аналізу за басейновим принципом, що охоплює просторову ієрархію дослідження, формування інформаційної бази, розрахунок і нормалізацію геоecологічних індикаторів та їх агрегацію;
2. ***Вперше виділено зони потенційної геоecологічної небезпеки в межах басейну річки Суній*** як частини об'єктів Смарагдової мережі та природоохоронних територій;

3. **Розроблено** у співавторстві інструмент автоматизованого виявлення геопросторових аномалій на супутникових даних, що дозволяє експериментальним шляхом ідентифікувати аномальні значення растрів з миттєвою можливістю оцифрування за допомогою порогових критеріїв.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи полягає у можливості використання розробленої методики супутникового геоecологічного аналізу для моніторингу геоecологічного стану басейнів середніх річок, виявлення зон потенційної геоecологічної небезпеки, визначення пріоритетних ділянок польової перевірки, обґрунтування природоохоронних заходів і підтримки управлінських рішень у сфері охорони довкілля та басейнового природокористування.

Розроблена методика може бути використана:

- у діяльності органів місцевого самоврядування, басейнових управлінь водних ресурсів, природоохоронних установ і регіональних структур екологічного моніторингу для оцінювання стану річкових басейнів, планування природоохоронних заходів і виявлення проблемних ділянок;
- для районування територій за рівнем потенційної геоecологічної небезпеки та визначення ділянок, які потребують пріоритетного моніторингу, польової перевірки або детальнішого аналізу;
- у практиці природоохоронного планування для оцінювання стану об'єктів природно-заповідного фонду, територій Смарагдової мережі, водоохоронних зон, заплавних і водно-болотних комплексів;
- для аналізу надзвичайних ситуацій, зокрема потенційного забруднення, пожежонебезпечності торфово-болотних угідь, трансформації водного режиму та наслідків воєнного впливу на природно-антропогенні системи;
- для масштабування підходу на інші басейни середніх річок лівобережжя Дніпра, зокрема Трубіж, Сулу, Псел, Ворсклу, Оріль, Самару та Конку, за умови адаптації порогових значень і врахування локальних природно-кліматичних умов;

- у наукових дослідженнях та освітньому процесі під час підготовки фахівців у галузі географії, екології, дистанційного зондування Землі та геоінформаційних технологій;
- як основа для створення або вдосконалення прикладних програмних інструментів, скриптів і модулів геоінформаційного аналізу, призначених для обробки даних ДЗЗ і виділення потенційної геоекологічної небезпеки.

Особистий внесок здобувача: головні результати дисертаційного дослідження отримані здобувачем особисто. Автором особисто оброблено і проаналізовано понад 150 багатоспектральних супутникових знімків різної просторової розрізненості від 3 до 30 м та проведено польові дослідження на двох тестових ділянках в межах басейну р.Супій.

Результати дисертаційного дослідження апробовано під час виконання науково-дослідної роботи, підготовки наукових публікацій і доповідей на науково-практичних конференціях, присвячених проблемам геоекології, дистанційного зондування Землі, геоінформаційного аналізу, моніторингу природних територій та оцінювання деградаційних процесів.

Перелік конференцій, семінарів, доповідей:

Fourth EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities, Sep 2023; Природа в окупації – 10 років російської військової агресії проти довкілля. Перспективи відновлення природоохоронних територій України (2024); International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2025»; XV Всеукраїнська молодіжна наукова конференція-школа «Сучасні проблеми наук про Землю», Київ (2025); Fifth EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and impact on communities, Sep 2025; Науково-прикладний семінар, приурочений до 25-річчя підписання Європейської ландшафтної конвенції «Різноманіття ландшафтних різноманіть» (2025); XIX International Scientific Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment».

За результатами досліджень опубліковано 16 наукових праць: статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до Переліку наукових

фахових видань України та міжнародних рецензованих виданнях – 5 (з них 3 проіндексовані в базах даних Web of Science та Scopus); 11 – у збірниках і матеріалах тез доповідей вітчизняних та міжнародних конференцій, з яких 4 проіндексовані в базі даних Scopus.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаної літератури (150 найменувань на 18 сторінках) та 4 додатків на 32 сторінках. Робота викладена на 260 сторінках, що містять 182 сторінки основного тексту, 40 рисунків і 31 таблицю.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ СУПУТНИКОВОГО ГЕОЕКОЛОГІЧНОГО АНАЛІЗУ БАСЕЙНІВ РІЧОК

1.1 Геоекологічний аналіз як інтегративний підхід до вивчення взаємодії природних і антропогенних процесів у геосистемах

За результатами дослідження Krainiukov і Timchenko (2019), ефективне природокористування потребує об'єктивної та всебічної екологічної оцінки стану довкілля, а інтегральна оцінка екологічного стану є одним із ключових завдань геоекологічного аналізу (*Дерій, 2012*).

Геоекологічні дослідження розглядаються як один із напрямів геологічного картографування, оскільки дають змогу оцінити просторові особливості техногенної трансформації геологічного середовища. Результати такого аналізу повинні містити відомості про стан і ступінь техногенних змін у межах досліджуваного району та прилеглих територій. Основною метою цих робіт є складання схематичної еколого-геологічної карти, що відображає ключові параметри та сучасний стан геологічного середовища (*Мичак та ін., 2010*).

У науковій літературі геоекологічний аналіз часто розглядають у контексті суміжних підходів, таких як екологічний моніторинг, ландшафтно-екологічний та геоінформаційний аналіз. Попри певну спільність об'єктів і методів, між цими підходами існують суттєві відмінності, що зумовлюють виокремлення геоекологічного аналізу як самостійного напрямку досліджень.

Екологічний моніторинг спрямований насамперед на регулярне спостереження за окремими показниками стану довкілля з метою фіксації їх динаміки та виявлення можливих перевищень нормативних значень (*Бачинський, 2003*). Встановлення взаємозв'язків між компонентами природно-антропогенних систем, як правило, не є його пріоритетним завданням.

Ландшафтно-екологічний аналіз спрямований на дослідження структури та функціонування ландшафтів, зокрема на оцінювання просторової диференціації природних комплексів і ступеня їх трансформації (*Гродзинський, 1993; Маринич, 1986*). Водночас у межах цього підходу просторово-часова динаміка змін зазвичай розглядається фрагментарно.

Геоінформаційний аналіз виступає інструментальним підходом, спрямованим на обробку, інтеграцію та візуалізацію просторових даних, проте не задає змістовних рамок дослідження (*Longley et al., 2015*). Сам по собі не визначає методологічних принципів оцінювання геоекологічного стану територій.

Термін «геоекологічний» був запропонований німецьким географом К. Троллем ще у 1966 році для позначення наукового напрямку, що формується на межі географії та екології та фактично розглядається як розвиток ідей ландшафтно-екології (*Гродзинський, 1993*). У 1970-х роках цей термін був введений у вітчизняну наукову практику, зокрема в роботах В. Б. Сочави (*Гавриленко, 2008*) поступово набули широкого використання у дослідженнях природно-антропогенних геосистем.

Подальший розвиток геоекології супроводжувався формуванням різних підходів до її трактування. У більшості робіт геоекологія розглядається як інтегральний науковий напрям, що поєднує географічний і екологічний підходи до вивчення природного середовища та взаємодії його компонентів (*Гродзинський, 1993*). У межах цього підходу основна увага приділяється аналізу просторової організації природних систем, їх функціонування та змін під впливом природних і антропогенних чинників.

Водночас у науковій літературі існують і інші підходи до визначення геоекології. Зокрема, її розглядають як частину екології, орієнтовану на дослідження екосистем високих ієрархічних рівнів, або як напрям, близький до екологічної геології, що зосереджується на взаємодії геологічного середовища та екологічних процесів (*Рудько та Гошовський, 2009*).

Сучасний погляд трактує геоекологію як галузь знань, в якій вивчаються закономірні зв'язки між живими організмами, у тому числі людиною, техногенними спорудами та геологічним середовищем (Гавриленко, 2008).

Таким чином, сучасний геоекологічний аналіз відрізняється від суміжних підходів інтегративним характером, орієнтацією на просторово-часову динаміку та врахуванням взаємодії природних і антропогенних компонентів у межах цілісних геосистем, зокрема річкових басейнів (Андрейчук, 2012; Андрейчук та ін., 2021; Вознюк, 2006; Круглов, 2004; Ковальчук, 1997; Шищенко & Гавриленко, 2017; 2020; Маргес, 2025; Ліщенко та ін., 2024b; Круглов, 2020).

Інтегративний підхід до аналізу природних систем сформувався на основі класичних екологічних і географічних концепцій (Кошик та ін., 1987; Стецюк та ін., 2001), у межах яких територія розглядається як цілісна система з взаємопов'язаними компонентами. Визначальну роль у цьому відіграло впровадження поняття екосистеми як базової одиниці екологічного аналізу (Tansley, 1935), а також розвиток уявлень про ієрархічну організацію природних систем і взаємозв'язок процесів у просторі та часі (Hutchinson, 1957; Strahler, 1952b). Подальший розвиток системного підходу в географії сприяв формуванню методологічних засад аналізу природно-антропогенних систем як відкритих динамічних геосистем (Chorley, 1972).

В Україні геоекологічний аналіз описано у працях О. Адаменка, О. Гавриленко, С. Генсірука, К. Геренчука, М. Гродзинського, М. Гуцуляка, Г. Денисика, І. Ковальчука, О. Маринича, А. Мельника, В. Некоса, Я. Олійника, Ю. Олішевської, В. Пащенко, К. Позаченюк, Л. Руденка, Г. Рудька, В. Стецюка, Л. Царика, І. Черваньова, Г. Швєбса, П. Шищенко, О. Топчієва та ін. (Нестерчук, 2011; Олішевська, 2014).

Проблеми вивчення середніх та малих річок та їхніх басейнів освітлені в працях В. Вишневського, В. Гребіня, І. Ковальчука, Л. Курганевич, О. Ліхо, А. Михновича, Я. Мольчака, О. Ободовського, М. Паламарчука, В. Перехреста, В. Поліщука, М. Проскурняка, В. Тімченка, С. Сніжка, Л. Фільчагова, В. Хільчевського, Р. Хімка, М. Цепенди, М. Чемериса, І. Шуляренко,

Ю. Ющенко, А. Яцика, О. Крилюка, С. Кирилюка та ін. (*Ковальчук, 2008; Ковальчук & Павловська, 2008; Кирилюк & Кирилюк, 2023*).

Актуальність геоекологічного аналізу зумовлена зростанням антропогенного навантаження на природні території, посиленням деградаційних процесів та впливом кліматичних змін, що проявляються у вигляді порушення водного режиму, деградації ґрунтів, трансформації рослинного покриву та зростання частоти небезпечних природних явищ (*Демчишин, 1991; Лялько & Попов, 2006; Мичак & Філіпович, 2010; Мичак та ін., 2010; Федоровский & Лищенко, 2003*). Як зазначають М. Клименко і І. Статник (2012) збільшення антропогенного навантаження зазвичай пов'язане, перш за все, із сільськогосподарським та промисловим освоєнням цих територій, відзначаючи, що особливо суттєві антропогенні зміни стали проявлятися в останні десятиріччя. У таких умовах традиційні локальні методи спостережень не завжди забезпечують повного уявлення про просторову структуру та динаміку змін, що відбуваються у межах великих природно-територіальних систем.

Інтегративний характер геоекологічного аналізу полягає у комплексному врахуванні природних і антропогенних чинників та їх взаємодії в межах геосистем. Такий підхід дозволяє розглядати територію не як сукупність ізольованих елементів, а як цілісну систему, у межах якої геологічні, геоморфологічні, гідрологічні, кліматичні та біотичні процеси перебувають у постійній взаємодії та взаємозалежності.

У світовій науковій практиці геоекологічний аналіз охоплює широкий спектр напрямів, включно з оцінюванням стану ландшафтів і ґрунтового покриву, аналізом водних ресурсів і басейнових систем, дослідженням техногенного навантаження та змін землекористування, вивченням клімато-екологічних процесів і оцінюванням природних та техногенних небезпек (*Самойленко та ін., 2018*). Використання цього підходу в межах річкових басейнів забезпечує урахування просторової цілісності гідрологічних систем і закономірностей поширення деградаційних процесів у межах водозбірних територій.

Важливим інструментом геоекологічного аналізу є геоекологічні індикатори, під якими розуміють показники, що відображають стан або динаміку окремих компонентів геосистем з точки зору їх екологічних функцій і стійкості. Такі індикатори можуть характеризувати стан рослинного покриву, ґрунтів, водних ресурсів, теплового режиму території та рівень антропогенного навантаження. У міжнародних дослідженнях системи індикаторів широко використовуються для оцінювання деградації земель, стану водних ресурсів, кліматичних показників та змін землекористування, зокрема в межах ініціатив ООН, європейських екологічних програм і регіональних систем моніторингу (*United Nations, 2015; United Nations Convention to Combat Desertification, 2021; Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2021; European Environment Agency, 2020*).

Інтеграція геоекологічних індикаторів у межах єдиного методичного підходу дозволяє перейти від фрагментарного аналізу окремих компонентів середовища до комплексної оцінки геоекологічного стану територій. Такий підхід створює передумови для формування багатофакторних моделей оцінювання стійкості та вразливості геосистем, що є необхідним для прогнозування деградаційних процесів і обґрунтування заходів раціонального природокористування.

Розвиток геоекологічного аналізу впродовж останніх десятиліть тісно пов'язаний із впровадженням методів дистанційного зондування Землі, які суттєво розширили можливості дослідження природно-антропогенних систем. На відміну від традиційних польових і стаціонарних спостережень, супутникові дані забезпечують систематичне охоплення великих територій та дозволяють аналізувати динаміку геоекологічних процесів упродовж тривалих часових інтервалів.

Використання матеріалів дистанційного зондування не замінює класичних методів геоекологічних досліджень, проте виступає їх важливим доповненням, особливо в умовах обмеженості наземних спостережень. Супутникові дані забезпечують можливість виявлення просторових закономірностей, які

залишаються недоступними при локальних дослідженнях, зокрема у межах великих і морфологічно складних річкових басейнів.

Для геоecологічного аналізу особливого значення набуває здатність дистанційного зондування відображати інтегральні характеристики стану земної поверхні, що дозволяє оцінювати сукупний вплив кліматичних і антропогенних чинників. Це створює передумови для формування методичних підходів, орієнтованих на комплексну оцінку геоecологічного стану територій і подальше застосування отриманих результатів у практиці територіального планування та управління природними ресурсами.

У сучасних умовах геоecологічний аналіз дедалі частіше розглядається не лише як інструмент наукового пізнання, а й як складова системи підтримки управлінських рішень у сфері використання та охорони природних ресурсів. Інтегративний характер цього підходу дозволяє переходити від фрагментарних оцінок окремих компонентів довкілля до узагальнених характеристик геоecологічного стану територій.

Застосування геоecологічного аналізу на басейновому рівні створює передумови для розроблення обґрунтованих рекомендацій щодо зниження екологічних небезпек, оптимізації землекористування та планування природоохоронних заходів. Саме ця прикладна спрямованість зумовлює зростання ролі супутникових методів, які забезпечують оперативність, просторову повноту та відтворюваність результатів досліджень.

Таким чином, геоecологічний аналіз як інтегративний підхід є методологічною основою для дослідження річкових басейнів як цілісних природно-антропогенних систем. Його поєднання з методами ДЗЗ та геоінформаційного аналізу забезпечує можливість переходу від описової характеристики окремих компонентів середовища до комплексного просторово-часового оцінювання геоecологічного стану територій. Саме така логіка покладена в основу розроблення методики супутникового геоecологічного аналізу басейнів середніх річок.

1.2 Огляд досліджень геоекологічного стану басейнів середніх річок Лівобережжя Дніпра

Згідно з класифікацією до середніх належать річки, які мають площу водозбору від 2 до 50 тис. км² (*Водний кодекс України № 213/95, 1995*). Лівобережжя Дніпра включає такі середні річки, як Трубіж (4 700 км²), Супій (2 165 км²), Сула (19 600 км²), Псел (22 800 км²), Ворскла (14 700 км²), Орель (9 800 км²), Самара (22 600 км²), Конка (2 600 км²) (*Швець та ін., 1957*). Зазначені водозбірні системи формують основу гідрографічної структури регіону та відіграють важливу роль у підтриманні його водно-ресурсного, ландшафтного та екологічного балансу (рис.1.1).

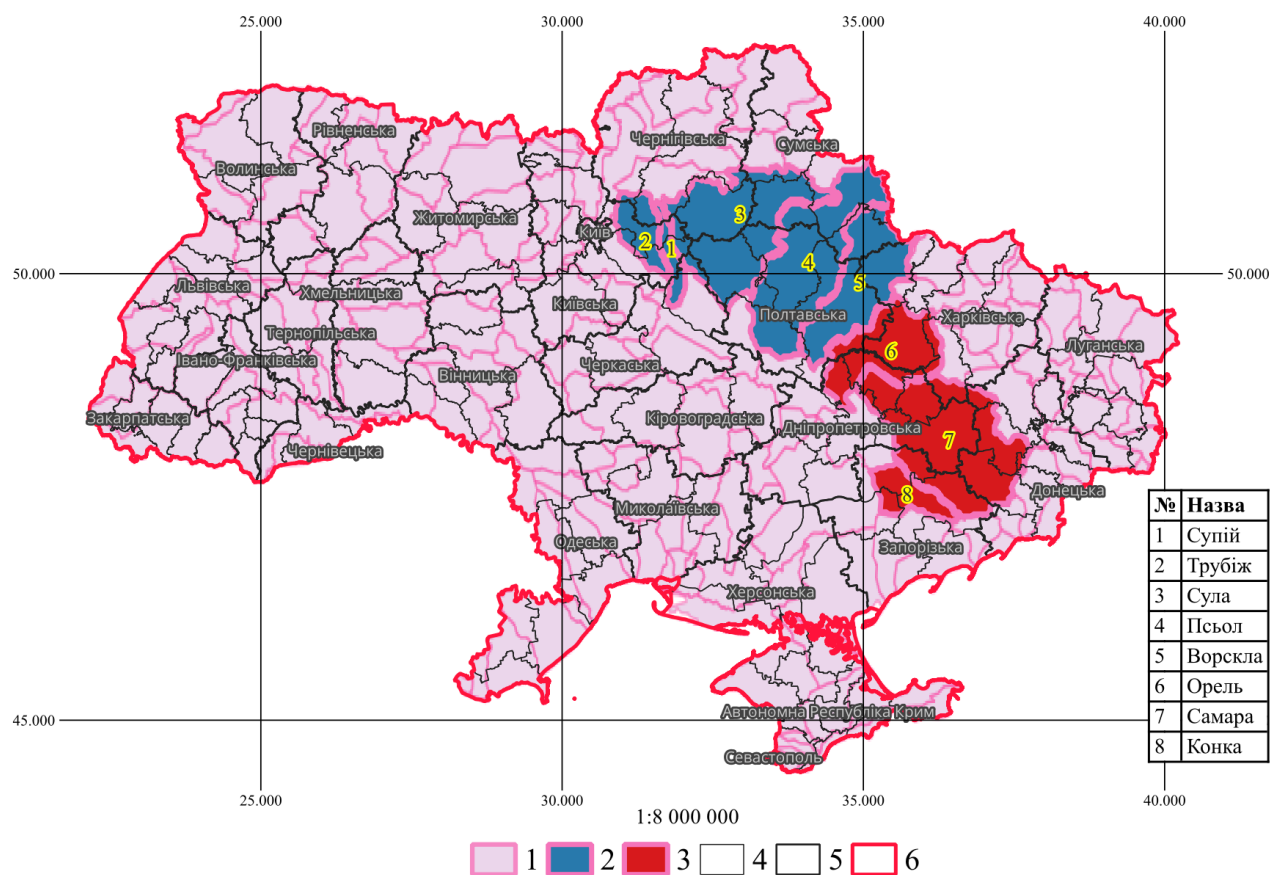


Рис.1.1 Розташування басейнів середніх річок Лівобережжя Дніпра

Умовні позначення: 1) басейни річок за ДАВР 2025р., 2) перша група середніх річок Нижнього Дніпра, 3) друга група середніх річок Середнього

Дніпра, 4) адміністративні райони, 5) межі областей, 6) державний кордон України

Такі річки, як Трубіж, Супій, Сула, Псел та Ворскла, належать до суббасейну Середнього Дніпра (далі – група 1); Орель, Самара та Конка – Нижнього Дніпра (далі – група 2). Перший характеризується більш складною структурою приток і значним локальним формуванням стоку, тоді як другий функціонує в умовах трансформованого, зарегульованого режиму та виражених акумулятивно-дельтових процесів.

Дослідження геоекологічного стану басейнів цих річок мають тривалу історію та формувалися в межах різних наукових підходів, що відображали еволюцію уявлень про функціонування природно-територіальних систем і роль антропогенного впливу в їх трансформації (Пазинич, 2007).

У ранніх роботах увага зосереджувалася переважно на фізико-географічних характеристиках територій, зокрема особливостях рельєфу, геологічної будови, гідрографічної мережі та ґрунтового покриву, що розглядалися як основа формування природних умов річкових басейнів (Попов та ін., 1968; Пазинич, 2004; Николаенко, 2007; Маринич, 1985). Геоекологічний аспект у цих роботах переважно розглядався опосередковано – через оцінювання природних передумов розвитку ерозійних, суфозійних та заболочувальних процесів.

Вагомий внесок у формування уявлень про просторову організацію та динаміку басейнових систем Лівобережжя Дніпра зробили геоморфологічні дослідження, спрямовані на аналіз морфоструктурних особливостей території та закономірностей розвитку сучасних екзогенних процесів.

У працях М. Дмитрієва, В. Бондарчука, Б. Лічкова, Д. Соболева було детально охарактеризовано морфологію долин середніх річок, структуру терасових комплексів, особливості вододільних поверхонь та їх ерозійну розчленованість (Цись, 1962). Особлива увага приділялася аналізу схилових

процесів, яружно-балкової мережі та умов розвитку лінійної ерозії, що визначають сучасний морфодинамічний стан басейнів.

Подальші дослідження були спрямовані на вивчення активізації екзогенних процесів у зв'язку з господарським освоєнням території. Встановлено, що поєднання природної схилової розчленованості, лесових відкладів та високого рівня розораності сприяє формуванню осередків інтенсивної водної ерозії, суфозійних деформацій і локальних просадкових явищ, що мають безпосереднє геоекологічне значення.

Таким чином, геоморфологічні дослідження заклали теоретичну основу для подальшого переходу від морфологічного опису до оцінювання небезпеки деградаційних процесів у межах басейнових систем.

Подальший і сучасний розвиток досліджень був пов'язаний із впровадженням **басейнового підходу**, який дозволив розглядати річкові басейни як цілісні системи з внутрішніми зв'язками між водозбором, русловою мережею та прилеглими ландшафтами (*Сташук та ін., 2014*). У межах цього підходу геоекологічний стан басейнів оцінювався через аналіз змін землекористування, водного режиму, процесів ерозії та заболочування, а також впливу меліоративних і господарських заходів на природні компоненти території.

Витоки басейнового підходу пов'язують із роботами Р. Хортон, який закріпив теоретичні основи структурної організації річкових систем (*Horton, 1945*). У його дослідженнях було здійснено системний аналіз природних чинників, що взаємодіють у межах водозбору, розроблено принципи порядкової інтерпретації (ієрархізації) річок та сформульовано закономірності будови річкових мереж. Ці положення стали підґрунтям сучасної структурної гідрографії та морфометричного аналізу басейнів.

Подальший розвиток басейнового підходу відбувся в межах становлення системного аналізу у фізичній географії та геоморфології, зокрема у працях Р. Хортон, Р. Чорлі і А. Страйлера (*Chorley & Kennedy, 1971; Chorley, 1962; Strahler, 1952a; Strahler, 1957*), які розглядали річкові басейни як відкриті природні системи з ієрархічною структурою та впорядкованими потоками

речовини. Подальше поглиблення системної інтерпретації природних комплексів пов'язане з екосистемною концепцією Г. Одум, у контексті якої басейн трактується як енергетично збалансована функціональна система (*Odum, 1969*).

У межах такого підходу водозбір розглядається як морфодинамічно цілісна структура, де взаємодія кліматичних, літологічних та морфометричних чинників визначає співвідношення процесів денудації й акумуляції. Басейн різного порядку виступає просторовою одиницею, у межах якої реалізуються основні гідрологічні та геохімічні баланси, що формують теоретичні передумови для комплексного геоекологічного аналізу. В українській гідрологічній школі ці положення отримали розвиток у працях В. Гребінь, де обґрунтовано доцільність використання басейнів середніх річок як індикативних систем оцінювання змін водного режиму (*Гребінь, 2010а; Гребінь, 2013*).

Подальшого розвитку комплексний підхід набув у межах конструктивно-географічної (конструктивно-гідрологічної) концепції, запропонованої В. Вишневським (*Вишневський, 2003*). В її основі лежить методологія конструктивно-гідрологічного аналізу, що передбачає системне дослідження стану річок у взаємозв'язку з факторами природного та антропогенного впливу. Метою такого підходу є не лише діагностика сучасного стану водних об'єктів, а й розроблення практичних заходів щодо мінімізації негативних наслідків господарської діяльності, раціоналізації водокористування та оптимізації функціонування водогосподарського комплексу. Таким чином, конструктивно-гідрологічна концепція інтегрує різні методи та інструменти дослідження трансформованих річкових систем у єдину прикладну модель управління їх станом.

За О. Данильченко (2019) геоекологічний аналіз річкових басейнів розглядається як структурований послідовний процес, що реалізується за визначеним алгоритмом і включає три взаємопов'язані стадії: теоретичне обґрунтування підходу, формування концептуальної моделі басейнової системи та практичну реалізацію цієї моделі у вигляді прикладного алгоритму

дослідження. Методика передбачає поетапне виконання трьох основних блоків: географо-гідрологічного аналізу території; оцінювання наслідків взаємодії природних і антропогенних чинників; розроблення рекомендацій щодо раціонального водокористування та покращення геоекологічного стану басейнів.

Результатом застосування такої схеми є побудова картосхеми ландшафтно-гідрологічного районування, що відображає просторову організацію басейнових систем та їх ієрархічну структуру; формування тематичних карт оцінювання антропогенного навантаження, якості води за індексами забруднення та екологічної оцінки; а також підготовка комплексу практичних рекомендацій з оптимізації водокористування та водоохоронних заходів.

Водночас аналіз запропонованої методики дозволяє виявити низку обмежень. По-перше, її структура орієнтована переважно на гідрологічний компонент, тоді як інші складові геоекологічної системи (грунтові процеси, деградація земель, температурні аномалії, стан рослинності) інтегруються опосередковано або фрагментарно. По-друге, методика ґрунтується здебільшого на традиційних картографічних та статистичних підходах, що обмежує можливості аналізу просторово-часової динаміки процесів; такі підходи потребують значних фінансових і організаційних ресурсів, оскільки передбачають проведення польових вимірювань, відбір зразків та їх подальшу обробку. По-третє, відсутня чітка процедура інтеграції різнорідних показників у єдину кількісну модель, що ускладнює формалізацію рівня геоекологічної напруженості та порівнянність результатів між різними басейнами.

Таким чином, попри концептуальну цілісність, зазначений підхід потребує подальшого методичного розвитку в напрямі інтеграції багатокомпонентних індикаторів, застосування дистанційних даних і кількісних алгоритмів оцінювання просторово-часових змін.

Для басейнів середніх річок лівобережжя Дніпра характерним стало поєднання природних чинників із тривалим антропогенним навантаженням, що

зумовило підвищену вразливість геосистем до деградаційних процесів (*Водна Ініціатива Плюс Європейського Союзу для країн Східного партнерства, 2021*).

Аналіз наукових публікацій дозволяє виокремити суттєву диференціацію підходів залежно від просторового масштабу досліджень. За цією ознакою умовно можна виокремити локальні, басейнові та регіональні дослідження, кожне з яких має свої методичні особливості та обмеження.

Локальні дослідження, як правило, зосереджуються на окремих ділянках річкових долин, заплав або водоохоронних зон і дозволяють детально аналізувати специфічні геоекологічні процеси. Водночас результати таких робіт часто мають обмежену можливість узагальнення, оскільки не враховують просторову цілісність басейну та взаємозв'язки між його окремими частинами.

Басейнові дослідження орієнтовані на аналіз річкових систем у межах природних водозбірних границь і забезпечують комплексне бачення геоекологічного стану територій. Саме в межах цього підходу створюються передумови для виявлення причинно-наслідкових зв'язків між процесами у верхів'ях, середніх та нижніх течіях річок, що є особливо важливим для середніх річок лівобережжя Дніпра.

Регіональні узагальнення охоплюють великі території та дозволяють виявляти загальні закономірності геоекологічних змін, проте нерідко супроводжуються втратою детальності та спрощенням інтерпретації результатів. Це зумовлює необхідність поєднання регіональних підходів із детальнішим басейновим аналізом.

З кінця XX – початку XXI століття у дослідженнях геоекологічного стану басейнів регіону все ширше застосовуються ландшафтно-екологічні та інженерно-географічні підходи, спрямовані на комплексну оцінку стану природних компонентів і виявлення територій з підвищеним рівнем екологічної небезпеки. У межах таких досліджень використовувалися картографічні матеріали, результати польових спостережень та статистичні дані, що дозволяло формувати узагальнені характеристики геоекологічного стану окремих басейнів або їх частин.

Важливим етапом розвитку досліджень стало впровадження **геоінформаційних систем**, які забезпечили можливість інтеграції різнотипних просторових даних і виконання багатофакторного аналізу. ГІС-підходи дозволили уточнити просторову структуру геоекологічних процесів у межах басейнів середніх річок, зокрема, простежити взаємозв'язок між особливостями землекористування, гідрологічними умовами та проявами деградації ландшафтів (Самойленко & Діброва, 2019; Самойленко та ін., 2022; Гродзинський, 2005; 2014). У сучасних роботах супутникові дані застосовуються для оцінювання змін рослинного покриву, стану водних об'єктів, теплового режиму поверхні та наслідків антропогенного впливу в межах водозборів (Turner et al., 2001; Wulder et al., 2018). Це дало змогу перейти від статичних характеристик до аналізу динаміки геоекологічних показників у багаторічному розрізі.

Сучасні дослідження дедалі частіше орієнтуються на використання часових рядів даних ДЗЗ та інтеграцію різнотипних індикаторів. Проте відсутність уніфікованих методик і чітких критеріїв інтеграції обмежує можливість порівняння результатів різних досліджень і їх застосування для практичних цілей управління річковими басейнами.

Аналіз наукових праць, присвячених геоекологічному стану басейнів середніх річок лівобережжя Дніпра, свідчить про значний обсяг накопичених знань щодо окремих компонентів геосистем і процесів їх трансформації. Водночас більшість досліджень має фрагментарний характер і не забезпечує комплексного просторово-часового аналізу геоекологічного стану басейнів у межах єдиного методичного підходу. Це зумовлює необхідність розроблення методики, яка поєднує басейновий принцип, супутникові дані, геоінформаційний аналіз та систему геоекологічних індикаторів.

Окрім класичних геоморфологічних і гідрологічних досліджень, територія басейнів цих річок стала об'єктом численних тематичних науково-дослідних робіт прикладного характеру. Значний масив публікацій присвячено аналізу сеймотектонічної обстановки Дніпровсько-Донецької западини, вивченню глибинної будови та сучасної геодинамічної активності регіону. У межах нафто-

і газопошукових робіт детально досліджувалися стратиграфія осадового чохла, літологічні особливості відкладів, розломна тектоніка та флюїдодинамічні процеси, що, своєю чергою, мають значення для розуміння гідрогеологічних умов і формування підземного стоку.

Окремий напрям становлять гідрогеологічні дослідження, спрямовані на оцінювання ресурсів підземних вод, їхнього хімічного складу та взаємозв'язку з поверхневими водотоками. Вивчалися також процеси підтоплення, суфозії, просідання лесових товщ, що безпосередньо впливають на стійкість схилів долин середніх річок. У контексті інженерно-геологічних робіт значна увага приділялася умовам будівництва гідротехнічних споруд, меліоративних систем і транспортної інфраструктури в межах водозборів.

Таким чином, басейни середніх річок Лівобережжя Дніпра виступають не лише об'єктом фізико-географічного аналізу, а й полігоном багатогалузевих геологічних, геофізичних та гідрогеологічних досліджень. Проте більшість цих робіт має вузькотематичний характер і орієнтована на вирішення окремих прикладних завдань, що зумовлює необхідність інтеграції накопичених результатів у межах цілісного геоекологічного підходу.

Попри наявність значного масиву досліджень, присвячених геоекологічному стану басейнів середніх річок лівобережжя Дніпра, **відсутня уніфікована методика**, яка б забезпечувала комплексний просторово-часовий аналіз геоекологічних процесів на основі даних ДЗЗ і була придатною для відтворюваного застосування в межах різних басейнів регіону. Це зумовлює необхідність розроблення та апробації методики супутникового аналізу.

1.3 Загальна геолого-геоморфологічна і ландшафтна будова басейнів середніх річок лівобережжя Дніпра та основні геоекологічні проблеми

Басейни середніх річок лівобережжя Дніпра групи 1 формуються в межах рівнинної частини Лісостепової зони України та характеризуються поєднанням

сприятливих для господарського освоєння природних умов із підвищеною вразливістю геосистем до деградаційних процесів. Для таких басейнів типовими є відносно невеликі ухили поверхні, слабо розчленований рельєф і значна роль заплавних та надзаплавних терас, що зумовлює специфіку перебігу сучасних геоекологічних процесів.

Ці річки формуються і функціонують у межах Дніпровсько-Донецької западини та частково приурочені до відрогів Українського кристалічного щита, що зумовлює особливості їхньої долинної морфології, гідрологічного режиму та геоморфологічної динаміки. Рельєф території низовинний, сформований Полтавською рівниною (середні абсолютні висоти 100–200 м) та Придніпровською низовиною (60–140 м).

Лівобережна частина суббасейну Середнього Дніпра лежить в межах Придніпровської низовини. Долини річок тут виразно асиметричні: праві схили круті та високі, ліві-низькі й пологі. Лівий берег низький, піщаний, часто вкритий сосновим лісом, підноситься на схід широкими терасами. Долина річки широка – складає 6–10 км, (*Водна Ініціатива Плюс Європейського Союзу для країн Східного партнерства, 2021*).

Басейни середніх річок лівобережжя Дніпра групи 2 (Оріль, Самара, Конка) формуються в межах південної частини Придніпровської низовини та північного сектору Причорноморської степової зони, що визначає інші гідрокліматичні та морфодинамічні умови їх функціонування порівняно з річками лісостепового регіону. Для цієї групи характерне поєднання рівнинного рельєфу з вищою континентальністю клімату, меншою залісненістю та значною трансформацією природних ландшафтів унаслідок аграрного освоєння і гідротехнічного регулювання стоку.

Сукупність цих ознак формує відносно однорідний тип басейнових систем, для яких притаманні подібні умови формування стоку, структура землекористування та спектр сучасних геоекологічних процесів (*Пилинович & Ковальчук, 2017*). Саме тому обраний для апробації басейн є репрезентативним представником першої групи й може розглядатися як достовірне джерело для

перевірки методичних підходів. Для басейнів другої групи, що характеризуються більшою природною та ландшафтною різноманітністю, складнішою морфологією або іншими режимними особливостями, така пряма екстраполяція результатів може бути менш релевантною, що потребує окремого аналізу в подальших дослідженнях. У подальшому викладенні увага зосереджена саме на басейнах першої групи, оскільки вони забезпечують найбільш достовірну та методично однорідну основу для перевірки запропонованих підходів.

Річки приурочені до південного схилу Дніпровсько-Донецької западини та частково пов'язані зі структурними елементами Українського щита, що зумовлює складну літологічну будову четвертинного чохла та варіабельність морфології долин (Гожик та ін., 2019). Рельєф території переважно низовинний, з пересічними абсолютними відмітками 50–120 м, представлений хвилястими акумулятивно-денудаційними рівнинами з добре розвиненою яружно-балковою мережею. У нижніх течіях річок простежуються широкі заплавні комплекси та надзаплавні тераси, що формують значні акумулятивні поверхні.

Долини річок цієї групи характеризуються значною шириною та асиметричністю, що зумовлено поєднанням тектонічних передумов і сучасних екзогенних процесів. Заплави часто заболочені або трансформовані меліоративними заходами, а в нижніх частинах басейнів фіксується вплив регулювання стоку Дніпровським каскадом водосховищ. Лівобережні схили здебільшого пологі, складені лесовими і лесовидними відкладами, тоді як правобережні ділянки нерідко мають більшу розчленованість і розвиток ерозійних форм.

Басейни середніх річок лівобережжя Дніпра характеризуються низкою спільних геолого-геоморфологічних і ландшафтних рис, що зумовлює подібність умов формування та розвитку геоecологічних процесів. У межах регіону можна виокремити кілька типових морфологічних і ландшафтних ситуацій, які визначають специфіку функціонування річкових басейнів.

Усі перелічені річки розташовані в межах Придніпровської низовини – великої фізико-географічної області, що характеризується переважанням

рівнинного акумулятивно-денудаційного рельєфу, широким розвитком лесових та лесовидних відкладів і значною морфологічною диференціацією долинно-вододільних комплексів.

Геологічну будову території формують дочетвертинні породи, що залягають у підшві четвертинної товщі та визначають морфоструктурні особливості басейну (рис. 1.2). Їх перекривають четвертинні відклади, деталізація яких у межах окремих басейнів дозволяє уточнити механізми формування сучасних геоекологічних процесів.

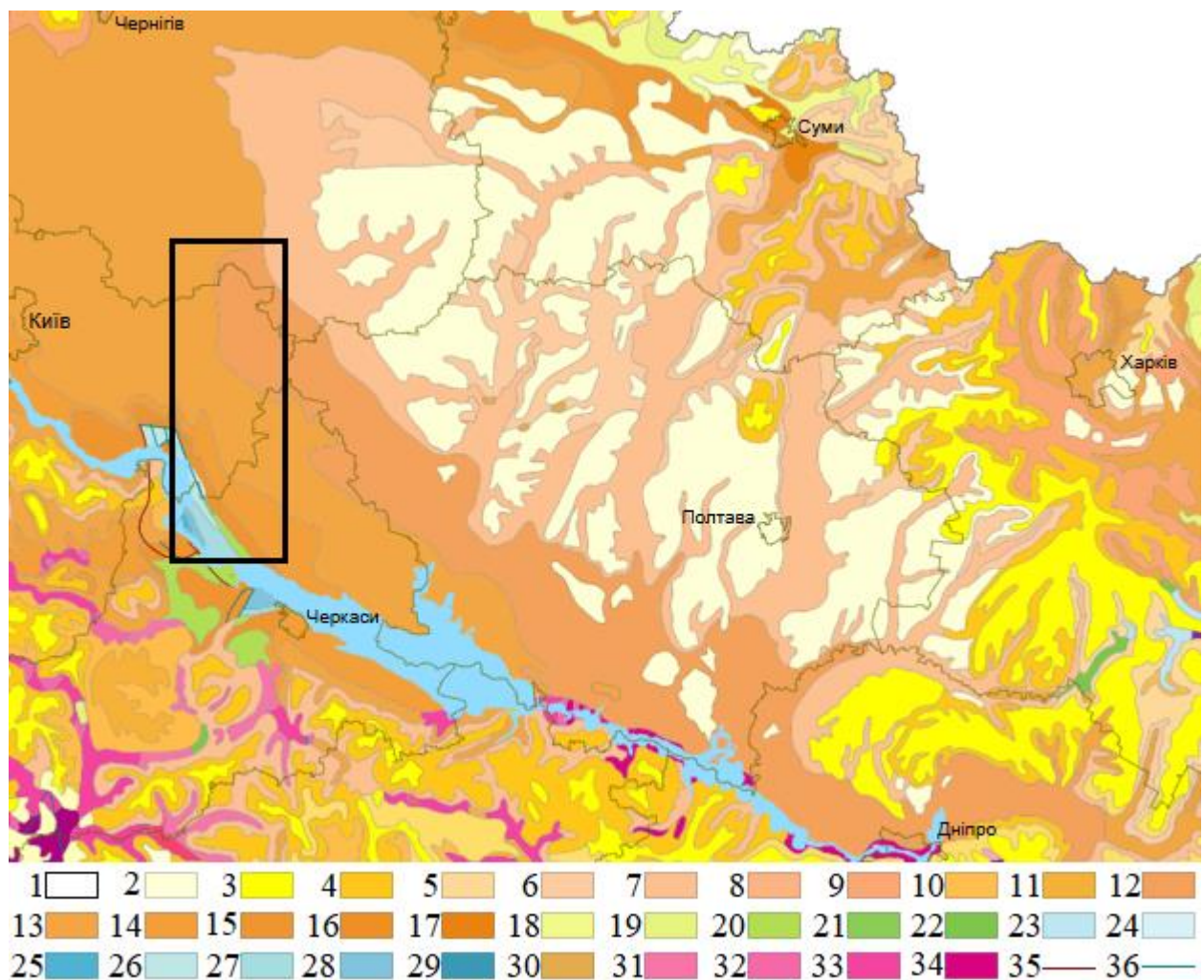


Рис. 1.2 Фрагмент з карти геологічної будови України (дочетвертинний зріз) за Велікановим, Гожином та Педанюком (2007)

Умовні позначення: 1) територія дослідження; 2) Пліоцен нерозчленований (N_2); 3) Товща строкатих глин (N_{2sg}); 4) Новопетровій (N_{1np}); 5) Берекій та новопетровій ($P_{3br}-N_{1np}$); 6) Берекій (P_{3br}); 7) Межигір'я (P_{3mz}); 8)

Київ, обухів, межигір'їй ($P_{2-3kv+mz}$); 9) Олігоцен нерозчленований (P_3); 10) Еоцен-олігоцен (P_{2-3}); 11) Еоцен нерозчленований (P_2); 12) Обухів (P_{2ob}); 13) Київ, обухів (P_{2kv+ob}); 14) Бучак (P_{2bc}); 15) Канів (P_{2kn}); 16) Палеоцен-еоцен (P_{1-2}); 17) Палеоцен нерозчленований (P_1); 18) Маастріхт a1.1.2.1.1.1 (K_2m); 19) Кампан a1.1.2.1.1.2 (K_2km); 20) Сенман a1.1.2.1.1.6 (K_2s); 21) Нижня a1.1.2.1.2 (K_1); 22) Крейда нерозчленована (K); 23) Верхня a1.1.2.2.1 (J_3); 24) Оксфорд a1.1.2.2.1.3 (J_3o); 25) Середня a1.1.2.2.2 (J_2); 26) Келовей a1.1.2.2.2.1 (J_2k); 27) Бат a1.1.2.2.2.2 (J_2bt); 28) Байос a1.1.2.2.2.3 (J_2b); 29) Нижня a1.1.2.2.3 (J_1); 30) Нижній відділ a1.1.3.3.3 (D_1); 31) Статерій (Палеопротерозой) Габро-анортозити, анортозити, граніти-рапакові, діорити, сублужні граніти, габро, габро-норити; 32) Метаморфічні і плутоно-метаморфічні комплекси неогархею (побужій); 33) Метаморфічні і плутоно-метаморфічні комплекси палеопротерозою та неогархею (криворожій); 34) Палеогархей Метаморфічні і плутоно-метаморфічні комплекси мезогархею (дніпровій); Розривні порушення – 35) встановлені, 36) ймовірні.

У межах басейнів середніх річок лівобережжя Дніпра четвертинні відклади представлені переважно алювіальними, делювіальними, еолово-делювіально-елювіальними товщами різного гранулометричного складу. Просторово домінують леси і лесовидні суглинки, що підстиляються алювіальними піщано-супіщаними відкладами надзаплавних терас (*Атлас природних умовий и естественных ресурсов Украинской ССР, 1978*).

Згідно з картою четвертинних відкладів (рис. 1.3) у межах усіх розглянутих басейнів сучасні алювіальні відклади голоценового віку (QIV) приурочені до заплавних комплексів і формують активну акумулятивну частину річкових долин. Верхньоантропогенові товщі (QIII) мають повсюдне поширення в межах перших і других надзаплавних терас та визначають морфоструктуру терасового рельєфу. Середньоантропогенові відклади (QII) характеризуються нерівномірним просторовим розподілом і більшою мірою представлені у північних басейнах, де фіксуються льодовикові та водно-льодовикові комплекси. У південніших басейнах їх поширення обмежене та має локальний характер, що

зумовлює регіональну диференціацію літологічних та інженерно-геологічних умов.

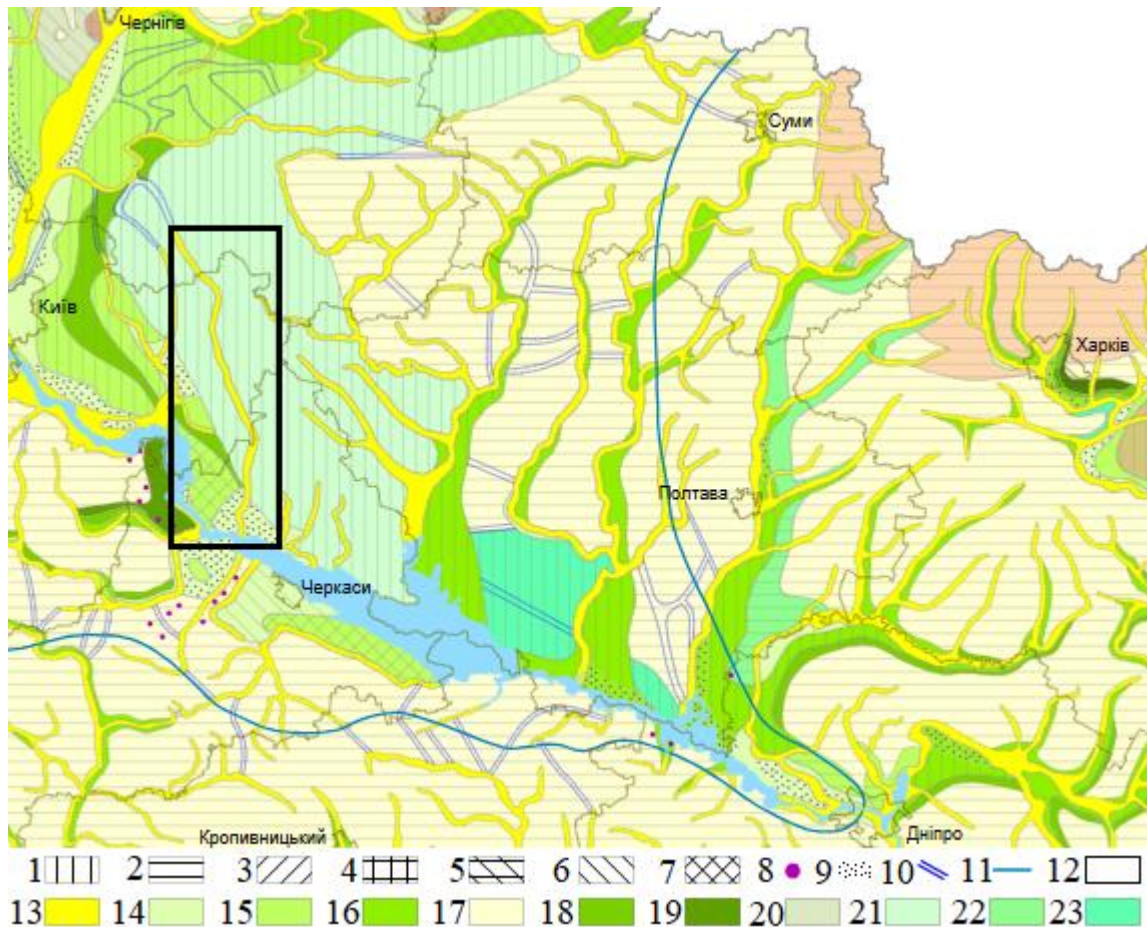


Рис. 1.3 Фрагмент з карти четвертинних відкладів (за матеріалами Державної геологічної карти України масштабу 1:200 000, серія М-200)

Умовні позначення: Літологія – 1) Леси і лесовидні породи на четвертинних алювіальних відкладах; 2) Леси і лесовидні породи на інших відкладах; 3) Суглинки щебенюваті (переважно лесовидні); 4) Валунні суглинки; 5) Щебенюгато-суглинкові породи; 6) Піски; 7) Торф; Відклади, що не виражені у масштабі карти – 8) Гляціодислокації, відторженці, 9) Піски, 10) Воднольодовикові долини, 11) Границя максимального поширення Дніпровського заледеніння; 12) територія дослідження; 13) Алювіальні відклади заплав(Q_{IV}); 14) Алювіальні відклади перших надзаплавних терас(Q_{III}); 15) Алювіальні відклади других надзаплавних терас (Q_{III}); 16) Алювіальні відклади нерозчленованих перших і других надзаплавних терас (Q_{III}); 17) Еолово-делювіальні відклади (Q_{III}); 18) Алювіальні відклади третіх надзаплавних терас

(Q_{II}); 19) Алювіальні відклади четвертих надзаплавних терас (Q_{II}); 20) Водно льодовикові відклади (Q_{II}); 21) Алювіальні відклади четвертих - шостих надзаплавних терас (Q_{II-I}); 22) Алювіальні відклади четвертих і п'ятих надзаплавних терас (Q_{II-I}); 23) Алювіальні відклади п'ятих надзаплавних терас (Q_I).

Потужність четвертинного чохла змінюється від 10–20 м у межах підвищених вододільних ділянок до 40–80 м і більше в межах терасових та заплавних комплексів, що зумовлює різну інтенсивність геодинамічних процесів у межах окремих басейнів (*Возгрин & Гожик, 2007*).

Глибина залягання перших від поверхні водоносних горизонтів у межах досліджуваних басейнів переважно становить 0–10 м у заплавних ділянках та 10–15 м на вододілах. Близьке залягання ґрунтових вод у поєднанні з лесовою структурою суглинків створює передумови для розвитку процесів підтоплення, заболочування та суфозії.

Лесові породи характеризуються пористою структурою, просадковістю та високою капілярністю, що підвищує їх чутливість до зволоження і механічного порушення. Алювіальні піски мають високу фільтраційну здатність, що зумовлює активний водообмін у межах заплав.

У межах регіону фіксуються сумарні амплітуди неотектонічних рухів від 50 до 150 м, що зумовлює диференційовані умови денудації та акумуляції.

Локальні підняття сприяють активізації ерозійних процесів і формуванню яружно-балкової мережі, тоді як зони відносного опускання акумулюють потужні товщі алювіальних і болотних відкладів.

Переважають чорноземи типові та опідзолені, сформовані на лесових відкладах, а в межах заплав – лучні, лучно-болотні та торфово-болотні ґрунти. Лесова основа зумовлює добру агрономічну цінність, проте водночас підвищену еродованість.

У межах піщаних терас формуються дерново-піщані та супіщані ґрунти з підвищеною водопроникністю, що сприяє швидкій інфільтрації атмосферних опадів.

Незважаючи на спільну приуроченість до лесової рівнинної зони, окремі басейни відрізняються потужністю четвертинного чохла, глибиною залягання ґрунтових вод та співвідношенням алювіальних і делювіальних відкладів. Це зумовлює різну інтенсивність суфозійних, ерозійних процесів та заболочування у межах кожного з них.

Такі геоморфологічні умови зумовлюють специфіку формування гідрографічної мережі, інтенсивність схилових процесів та розвиток яружно-балкових систем. Геоморфологічна будова (рис. 1.4) розглядається як один із ключових факторів формування гідрологічного режиму, активізації всіх геологічних процесів і просторової диференціації геоекологічної напруженості.

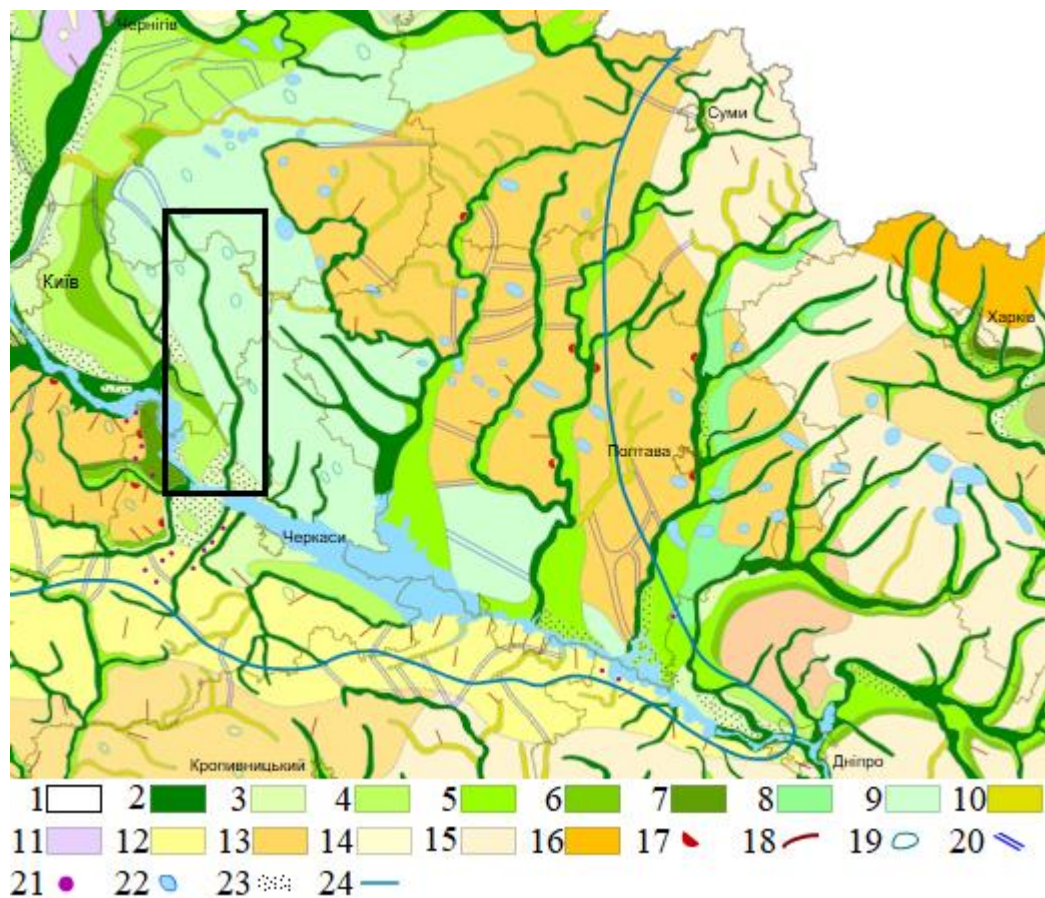


Рис. 1.4 Фрагмент з геоморфологічної карти України за Гожиком і Педанюком (2007)

Умовні позначення: 1) територія дослідження; Алювіальні рівнини – 2) Заплавні (голоценові) тераси, 3) Перші надзаплавні (верхньоантропогенові) тераси, 4) Другі надзаплавні (верхньоантропогенові) тераси, 5) Перші, другі надзаплавні (нерозчленовані верхньоантропогенові) тераси і тераси-дельти, 6) Треті надзаплавні (середньоантропогенові) тераси, 7) Четверті надзаплавні (середньоантропогенові) тераси, 8) Четверті і п'яті надзаплавні нерозчленовані (середньо-ніжньоантропогенові) тераси, 9) Четверті-шості надзаплавні (середньо-нижньоантропогенові) тераси, 10) Річкові долини з невиділеними терасами; Льодовикові і воднольодовикові рівнини – 11) Моренно-зандрові; Лесові рівнини, Льодовикові і прильодовикові області (N-Q) – 12) Піднесені, сильно розчленовані, 13) Піднесені розчленовані, 14) Піднесені низинні розчленовані; Позальодовикові області (N-Q) – 15) Піднесені розчленовані; Акумулятивно-денудаційні рівнини (N_1 -Q) – 16) Піднесені останцево-горбисті, місцями переходять у грядово-горбисті; Форми рельєфу не виражені у масштабі карти: Гравітаційно-денудаційні – 17) Зсуви; Ерозійно-денудаційні – 18) Яри, 19) Блюдця, поди; Льодовикові і воднольодовикові – 20) Воднольодовикові долини, 21) Гляціодислокації, відторженці; Тектонічні – 22) Соляні купола; Еолові – 23) Масиви дюнних і кучугурних пісків що розсіюються, 24) Границя максимального поширення Дніпровського заледіння.

Переважна частина басейнів сформована в умовах рівнинного рельєфу з незначними абсолютними перевищеннями та слабко вираженою вертикальною диференціацією. Такі умови сприяють розвитку широких заплав, акумулятивних форм рельєфу та значній ролі ґрунтово-рослинного покриву в регулюванні стоку і геоекологічних процесів. Лесові та лесоподібні відклади, поширені в межах регіону, визначають підвищену чутливість територій до ерозійних і суфозійних процесів, особливо за умов інтенсивного сільськогосподарського використання.

Значну роль у формуванні геоекологічного стану басейнів відіграють заплавно-болотні комплекси, які виконують функції акумуляції вологи, регулювання стоку та підтримання біорізноманіття. Трансформація цих

комплексів унаслідок меліоративних заходів і зміни гідрологічного режиму призводить до порушення природних механізмів саморегуляції геосистем.

Геологічна будова басейнів середніх річок лівобережжя Дніпра представлена переважно осадовими породами четвертинного віку, які залягають на більш давніх відкладах і формують потужний осадовий чохол. Поширення піщаних, супіщаних і суглинистих відкладів у поєднанні з близьким заляганням ґрунтових вод створює умови для активізації суфозійних процесів, розвитку заболочування та формування акумулятивних форм рельєфу в заплавах долин. Такі літологічні особливості значною мірою визначають просторову неоднорідність геоекологічного стану басейнів.

Геолого-геоморфологічна будова басейнів середніх річок лівобережжя Дніпра безпосередньо визначає характер і інтенсивність геоекологічних процесів, що відбуваються в їх межах. Поєднання рівнинного рельєфу, значної потужності пухких відкладів та неглибокого залягання ґрунтових вод створює передумови для розвитку процесів підтоплення, заболочування та деградації ґрунтів.

Особливості морфології долин і заплав зумовлюють високу чутливість цих територій до змін гідрологічного режиму, зокрема до регулювання стоку та осушувальних заходів. У результаті порушується баланс між акумулятивними та ерозійними процесами, що відображається на стані руслової мережі, заплавних екосистем і прилеглих земель.

Таким чином, геолого-геоморфологічні умови виступають базовим чинником, який визначає просторову неоднорідність геоекологічного стану басейнів і має враховуватися при розробленні методик їх оцінювання та моніторингу (Черваньов, 2002; Черваньов & Кравчук, 2001).

Рельєф басейнів середніх річок лівобережжя Дніпра має переважно рівнинний характер із незначною амплітудою висот, що зумовлює повільний поверхневий стік і сприяє накопиченню дрібнозернистого матеріалу в руслах і заплавах. Водночас на схилах долин і яружно-балкової мережі поширені ерозійні процеси, інтенсивність яких зростає за умов антропогенного порушення

грунтового-рослинного покриву. Поєднання акумулятивних і ерозійних процесів формує складну мозаїку геоecологічних умов у межах одного басейну.

Грунтового-рослинний покрив басейнів середніх річок лівобережжя Дніпра зазнав істотної трансформації внаслідок тривалого сільськогосподарського використання територій. Високий рівень розораності водозборів, осушувальні меліоративні заходи та зміна природної рослинності призвели до зниження екологічної стійкості геосистем, посилення процесів деградації ґрунтів і порушення природного водного режиму. У заплавних частинах річкових долин значну роль відіграють лучно-болотні та торфові екосистеми, стан яких є чутливим індикатором змін гідрологічних і кліматичних умов (ДНВП «Картографія», 2007).

Гідрологічні умови басейнів середніх річок лівобережжя Дніпра характеризуються відносно невеликою водністю, значною залежністю від атмосферного живлення та сезонною мінливістю стоку. Регулювання русел, осушення заплав і створення штучних водойм суттєво змінили природний гідрологічний режим, що сприяло замуленню русел, заростанню водних об'єктів і погіршенню якості поверхневих вод. Ці процеси мають яскраво виражений просторовий характер і проявляються з різною інтенсивністю в межах окремих ділянок басейнів.

У сукупності природні умови та антропогенна трансформація територій зумовлюють формування типових для басейнів середніх річок лівобережжя Дніпра **геоекологічних проблем**, серед яких ключовими є деградація ґрунтового покриву, ерозійні процеси, заболочування і торфоутворення, замулення та заростання русел, а також підвищення пожежної небезпеки в осушених заплавах і торфових масивах. Просторово-часова мінливість цих процесів ускладнює їх оцінювання традиційними методами спостережень і потребує застосування інтегрованих підходів аналізу.

Сукупність геолого-геоморфологічних і ландшафтних особливостей басейнів середніх річок лівобережжя Дніпра зумовлює їх підвищену вразливість до сучасних природних і антропогенних впливів. Поєднання рівнинного

рельєфу, трансформованих заплав, інтенсивного землекористування та змін кліматичних умов створює умови для розвитку комплексу геоecологічних проблем, які проявляються з різною інтенсивністю в межах окремих ділянок басейнів.

Урахування зазначених передумов є необхідним для коректної інтерпретації результатів супутникового геоecологічного аналізу та обґрунтування вибору індикаторів, що використовуються для оцінювання стану територій. Це забезпечує логічний перехід від загальної характеристики природних умов регіону до опису фактичного матеріалу та методики проведення досліджень, викладених у наступному підрозділі.

Таким чином, геолого-геоморфологічні, гідрологічні та ландшафтні умови басейнів середніх річок лівобережжя Дніпра формують природну основу розвитку сучасних геоecологічних процесів. Рівнинний рельєф, поширення лесових і алювіальних відкладів, близьке залягання ґрунтових вод, трансформовані заплави та високий рівень сільськогосподарського освоєння зумовлюють підвищену вразливість цих басейнів до ерозії, суфозії, підтоплення, заболочування, замулення, деградації рослинного покриву та порушення водного режиму. Саме ці процеси зумовлюють необхідність використання супутникових індикаторів стану рослинності, поверхневої вологості, температурного режиму, морфометричних характеристик рельєфу та антропогенного навантаження в межах подальшої методики дослідження.

1.4 Фактичний матеріал та принципи формування тестових ділянок для апробації методики

1.4.1 Басейн річки як об'єкта апробації методики

Для апробації розробленої методики супутникового геоecологічного аналізу обрано басейн річки Супій. Річка є середньою рівнинною річкою з

переважно заплавно-долинним характером долини, що зумовлює високу чутливість її басейну до змін природних умов і антропогенного навантаження.

Басейн річки характеризується значною трансформацією природних ландшафтів унаслідок інтенсивного сільськогосподарського освоєння, осушувальних меліоративних заходів та регулювання русла. Поєднання розораності водозбірної території, наявності меліорованих заплав і зміненого гідрологічного режиму створює передумови для розвитку типових для середніх річок лівобережжя Дніпра геоекологічних процесів, зокрема деградації ґрунтів, ерозії, замулення та заростання русла, заболочування і підвищеної пожежної небезпеки в заплавних екосистемах. Просторова неоднорідність природних і антропогенних умов у межах басейну зумовила доцільність виділення низки тестових ділянок для апробації методики.

Також об'єкт дослідження включає ділянки природно-заповідного фонду та території з обмеженим господарським використанням, що дозволяє здійснювати порівняльний аналіз трансформованих і відносно збережених геосистем у межах одного басейну. Наявність таких контрастних умов є важливою для перевірки чутливості запропонованих індикаторів та оцінювання їх здатності відображати як природну варіабельність, так і наслідки антропогенного впливу.

Крім того, басейн річки Супій характеризується різноманіттям морфоструктурних елементів – заплави, першої надзапавної тераси, вододільних поверхонь, балкових систем, меліоративних каналів і штучних водойм – що створює складну мозаїку землекористування та ландшафтних типів (Черваньов, 1995). Така структура забезпечує можливість апробації методики в умовах різної інтенсивності геоекологічних процесів і перевірки її універсальності щодо різних морфолого-генетичних комплексів.

Важливою передумовою вибору саме цього басейну є також наявність достатнього масиву даних ДЗЗ різної просторової та часової розрізненості, що дозволяє виконати багаторівневий аналіз і простежити динаміку змін за багаторічний період. Поєднання доступності фактичного матеріалу,

репрезентативності природних умов та вираженості актуальних геоекологічних проблем забезпечує можливість комплексної перевірки розробленої методики.

Отже, басейн річки Супій є репрезентативним модельним об'єктом для апробації методики супутникового геоекологічного аналізу. Його вибір обґрунтований поєднанням типових для середніх річок лівобережжя Дніпра природних умов, виражених проявів антропогенної трансформації, наявності заплавної і водно-болотних комплексів, природоохоронних територій та достатнього масиву даних ДЗЗ різної просторової і часової розрізненості.

1.4.2 Джерела вихідних даних та фактичний матеріал дослідження

Фактичний матеріал дослідження сформовано на основі поєднання даних ДЗЗ, картографічних, допоміжних геопросторових даних, а також матеріалів польової перевірки.

Для аналізу геоекологічного стану басейну використано багатоспектральні супутникові знімки середньої просторової розрізненості, отримані в рамках програм Landsat та Sentinel-2, що забезпечують можливість багаторічного просторово-часового аналізу стану земної поверхні. Знімки охоплюють період з 1980-х років до сучасності та використовуються для оцінювання динаміки рослинного покриву, вологості поверхні та теплових характеристик території в межах тестових ділянок. Аналіз здійснювався з використанням безхмарних знімків вегетаційного періоду, що забезпечує коректність порівняння просторово-часових змін.

Для деталізації просторової структури аномалій і виявлення локальних проявів деградаційних процесів додатково залучено знімки високої просторової розрізненості PlanetScore (приблизно 3 м), що дозволяють уточнювати межі ерозійних форм, осередків перезволоження та порушень ділянок заплави. Використання даних високої просторової розрізненості забезпечує

масштабування результатів від регіонального до локального рівня та підвищує достовірність інтерпретації в межах тестових полігонів.

З метою забезпечення порівнянності супутникових матеріалів та мінімізації впливу погодних умов для підбору репрезентативних знімків залучено кліматичні дані глобального атмосферного моделювання ERA5, які використовувалися для оцінювання температурного режиму, кількості опадів та аномалій вологості ґрунтів у відповідні періоди знімання. Це дозволило виключити сцени, отримані в екстремальних гідрометеорологічних умовах, і забезпечити коректне зіставлення міжрічних змін.

Для характеристики рельєфу та морфометричних параметрів території використано цифрові моделі рельєфу глобального покриття, зокрема SRTM DEM (NASA Jet Propulsion Laboratory, 2013) та AW3D30 (*Japan Aerospace Exploration Agency, 2021*), що забезпечують достатню точність для аналізу морфометричних показників водозбору, розрахунку похилів, експозицій та параметрів дренажної мережі. Використання цієї моделі дозволило оцінити особливості поверхневого стоку та просторові умови розвитку ерозійних і акумулятивних процесів.

Додатково залучалися тематичні картографічні матеріали, геологічні та ґрунтові карти, а також результати попередніх наукових досліджень, необхідні для інтерпретації супутникової інформації та уточнення меж тестових ділянок. Хоча існують інші джерела дистанційних і геопросторових даних з вищою деталізацією або спеціалізованим призначенням, використаний комплекс матеріалів є достатнім для виконання інтегрованого геоecологічного аналізу регіонального рівня та апробації запропонованої методики.

Окрім супутникових даних, проведено детальне дослідження із застосуванням БПЛА та відбором проб вологості та температури ґрунту на одній із тестових ділянок в межах водозбору.

Сукупність використаних даних забезпечує можливість комплексного аналізу основних компонентів геосистем у межах басейну та створює

інформаційну основу для апробації розробленої методики супутникового геоекологічного аналізу.

1.4.3 Принципи вибору та просторове розміщення тестових ділянок

Для апробації розробленої методики необхідний вибір тестових ділянок, розташованих уздовж русла річки з урахуванням просторової диференціації природних умов, типів землекористування та інтенсивності сучасних геоекологічних процесів. Такий підхід забезпечує репрезентативне охоплення різних морфодинамічних зон басейну – від витоків до гирлової частини – та дозволяє простежити закономірності просторово-часових змін у межах єдиної річкової системи.

Використання чітких критеріїв відбору тестових ділянок є необхідним для забезпечення репрезентативності апробації методики та уникнення суб'єктивності у виборі територій дослідження (Дугін, 2017).

Основними критеріями вибору тестових ділянок є:

- репрезентативність різних частин басейну (верхня, середня, нижня течія);
- контрастність природних умов та ступеня антропогенної трансформації;
- наявність типових для регіону геоекологічних процесів (лінійна та площинна ерозія, суфозія, заболочування, замулення, деградація рослинного покриву, теплове навантаження);
- можливість здійснення багаторічного просторово-часового аналізу на основі даних ДЗЗ різної просторової розрізненості.

У сукупності тестові ділянки формують просторово репрезентативну систему спостереження, що охоплює різні морфологічні, гідрологічні та антропогенно трансформовані зони басейну. Це забезпечує комплексну перевірку розробленої методики в умовах різної інтенсивності та типології геоекологічних процесів.

Виділення шести тестових ділянок у межах басейну річки Супій забезпечує репрезентативність дослідження та створює умови для комплексної апробації методики супутникового геоecологічного аналізу. Поєднання різних типів природних умов і ступенів антропогенного впливу дозволяє оцінити універсальність методичних підходів і можливість їх застосування до інших басейнів середніх річок лівобережжя Дніпра.

Таким чином, сформований фактичний матеріал і система тестових ділянок є достатньою інформаційною основою для реалізації методики, опис якої наведено в наступному розділі дисертації.

1.5 Геоecологічні індикатори оцінювання стану басейнів річок

1.5.1 Поняття геоecологічних індикаторів у басейнових дослідженнях

У сучасних геоecологічних дослідженнях оцінювання стану річкових басейнів дедалі частіше ґрунтується на використанні системи індикаторів, які дозволяють кількісно або якісно відобразити стан окремих компонентів геосистем та характер їх змін у просторі й часі. Геоecологічні індикатори розглядаються як узагальнені показники, що відображають реакцію природно-антропогенних систем на зовнішні впливи та внутрішні трансформаційні процеси.

Система індикаторів була розроблена як інтегрований інструмент для оцінювання швидких змін у природному середовищі та вимірювання екологічного стану геосистем шляхом аналізу абіотичних компонентів ландшафту. Індикатори охоплюють сукупність параметрів, що відображають геологічні, гідрологічні та атмосферні процеси, які здатні зазнавати помітних змін протягом життя однієї генерації, що робить їх корисними для моніторингу сучасних геоecологічних змін та антропогенного впливу на природні системи.

За Р.Гікінсом і Дж.Вудом основою підходу є **чек-лист із 27 геоіндикаторів**, які охоплюють різні аспекти геосистем – від якостей ґрунту та ерозійних процесів до змін руслової морфології та стану підземних вод (*National Park Service, 2001; Stellars, 1997*). Серед них виділяють індикатори, що характеризують склад і послідовність осадових товщ, рівні ґрунтових і поверхневих вод, морфологію водотоків, якість води, зміну водного стоку, розвиток ерозійних форм, а також стан болотних і заплавних комплексів. Такий перелік дозволяє охопити важливі компоненти геоекологічної динаміки в різних природних умовах.

Кожен такий індикатор оцінюється за низкою **спеціальних критеріїв**, що включають значущість показника для конкретної екосистеми, здатність розрізняти природні та антропогенні зміни, просторовий масштаб застосування, метод вимірювання та частоту спостережень, а також можливі межі зміни без значних порушень екологічної рівноваги. Така багатокритеріальна оцінка забезпечує не лише кількісне вимірювання змін, а й якісний аналіз тенденцій у геоекологічних процесах.

За кілька десятків років від моменту формування концепції геоіндикаторів її базові положення залишилися загалом незмінними: ключовою ідеєю й надалі є використання вимірюваних абіотичних параметрів для фіксації швидких змін у геосистемах та оцінювання їх екологічного стану. Як і раніше, вони розглядаються як інструмент виявлення тенденцій у розвитку ерозійних, гідрологічних, седиментаційних і геоморфологічних процесів, що мають значення для природоохоронного планування та управління територіями.

Водночас сучасна адаптація поняття індикаторів суттєво розширила їх функціональне наповнення. Якщо первинно акцент робився переважно на польових спостереженнях і локальних вимірюваннях, то нині геоіндикатори інтегруються в системи ДЗЗ, геоінформаційного аналізу та комплексних даних. Сучасний індикатор розглядається не лише як окремий параметр, а й як елемент інтегрованої системи оцінювання, що поєднує морфометричні, гідрологічні,

біофізичні та кліматичні характеристики у межах єдиного аналітичного середовища.

У сучасному трактуванні геоекологічні індикатори виконують подвійну функцію: з одного боку, вони слугують засобом кількісної фіксації змін природних компонентів, а з іншого – виступають інструментом просторової інтерпретації складних процесів у межах басейнових систем. Завдяки використанню даних ДЗЗ індикатори набувають властивостей масштабованості, повторюваності та просторової безперервності, що забезпечує можливість аналізу динаміки змін у багаторічному розрізі.

Таким чином, сучасне розуміння індикаторів виходить за межі їх первинної геологічної інтерпретації та набуває міждисциплінарного характеру, поєднуючи фізико-географічні, геоінформаційні та екологічні підходи. Це створює методологічну основу для формування інтегрованих систем оцінювання геоекологічного стану басейнів річок, у яких окремі показники об'єднуються в комплексні критерії аналізу та просторово-часового моніторингу.

Геоіндикаційний підхід передбачає адаптацію переліку індикаторів до конкретних регіональних умов, що дозволяє виділяти ті параметри, які найкраще характеризують динаміку процесів у вивченій території. Це робить систему гнучкою і придатною для використання як спеціалістами, так і менеджерами природних ресурсів без обов'язкової присутності геологів, сприяючи науково обґрунтованому прийняттю рішень щодо моніторингу, планування та управління природно-географічними системами.

У межах басейнового підходу індикатори відіграють ключову роль, оскільки саме вони забезпечують можливість порівняльного аналізу різних частин водозбору, виявлення зон потенційної геоекологічної небезпеки та оцінювання ефективності природоохоронних заходів. На відміну від локальних екологічних показників, геоекологічні індикатори мають інтегративний характер і враховують взаємодію кількох компонентів геосистем.

Використання багатокomпонентних супутникових індикаторів забезпечує просторово узгоджене та довгострокове спостереження за ключовими

абіотичними характеристиками території. Одними з таких індикаторів є температурний режим поверхні, вологість ґрунту, стан рослинності та земного покриву, кліматичні характеристики, зокрема сумарна річна кількість опадів та рівень сонячної радіації тощо. Сукупне використання цих індикаторів формує комплексну основу для оцінювання сучасних екологічних умов та просторово-часової динаміки природних процесів (*Lubskyi et al., 2025a*).

Узагальнення поняття геоєкологічних індикаторів у контексті басейнових досліджень дає змогу розглядати їх як структуровану систему кількісних і якісних показників, що відображають стан природних компонентів та інтенсивність геоєкологічних процесів у межах річкового басейну. Однак сам факт наявності широкого спектра індикаторів ще не забезпечує можливості їх ефективного використання в аналітичних процедурах. Для подальшого застосування цих показників у комплексній оцінці стану басейну необхідно здійснити їх змістовне групування за функціональними ознаками, типом екологічної інформації та роллю у відображенні природно-антропогенних процесів. Класифікація індикаторів дозволяє впорядкувати їх за змістовими ознаками та аналітичними функціями, що забезпечує послідовний перехід до подальшого розгляду у наступному підрозділі.

1.5.2 Класифікація геоєкологічних індикаторів для аналізу басейнів річок

У науковій практиці застосовується широкий спектр геоєкологічних індикаторів, які можуть бути згруповані за характером відображуваних процесів та джерелами даних. Для дослідження басейнів середніх річок доцільно виділяти такі основні групи індикаторів:

- морфометричні індикатори, що характеризують рельєф, схиліві процеси та просторову структуру водозбору;
- гідрологічні індикатори, які відображають режим стоку, рівень поверхневої вологості та стан водних об'єктів;

- біофізичні індикатори, пов'язані зі станом рослинного покриву та ґрунтів;
- кліматичні та термічні індикатори, що характеризують тепловий режим поверхні та кліматичні умови формування геоекологічних процесів.

У межах кожної з виділених груп індикаторів можуть бути конкретизовані показники, що безпосередньо відображають розвиток окремих геоекологічних процесів у басейнових системах.

Морфометричні індикатори охоплюють показники схилів, експозиції, енергії рельєфу, густоти та розчленованості ерозійної мережі, а також морфометричні параметри руслових систем. Вони є базовими для аналізу процесів лінійної та площинної ерозії, розвитку ярів і балок, а також для оцінювання потенційної схильності території до суфозійних проявів. Використання цифрових моделей рельєфу дозволяє кількісно оцінити зміну параметрів ерозійної мережі у часі та просторову диференціацію морфодинамічних процесів.

На відміну від динамічних біофізичних характеристик, морфометричні показники є відносно стабільними в часі, проте саме вони формують просторову «матрицю» розподілу геоекологічних процесів. Інтенсивність лінійної ерозії, схильність до суфозійних проявів, формування акумулятивних комплексів і заболочування значною мірою детермінуються конфігурацією рельєфу та енергетичними параметрами поверхні. У цьому контексті морфометричні індикатори виконують роль первинних умов, що визначають просторову диференціацію геоекологічної напруженості.

Гідрологічні індикатори відображають характеристики поверхневого і підземного стоку, зміну площ водних об'єктів, конфігурації русел та ступінь замулення. До них належать показники варіації площі водних об'єктів, ступінь заболочування, зміни конфігурацію русла, а також параметри гідрологічної трансформації, пов'язані з регулюванням стоку та меліоративними заходами. У контексті басейнового аналізу вони є ключовими для оцінювання процесів заболочування, заростання заплав, замулення водойм та трансформації гідрологічного режиму.

Особливість гідрологічних індикаторів полягає в їх високій чутливості до змін кліматичних умов і антропогенного впливу. На відміну від морфометричних параметрів, вони мають виражену часову динаміку, що дозволяє використовувати їх для аналізу тенденцій пересихання заплав, замулення водотоків, вторинного заболочування або деградації малих річок.

У межах басейнового підходу поєднання морфометричних і гідрологічних індикаторів забезпечує цілісне розуміння взаємодії структурних передумов і функціональних змін геосистем. Морфометрія визначає потенціал розвитку процесів, тоді як гідрологічні показники відображають їх фактичну реалізацію в сучасних природно-антропогенних умовах.

Біофізичні індикатори характеризують стан рослинного покриву та ґрунтів і включають вегетаційні та вологостатичні індекси, що дозволяють виявляти деградацію земель, стресові стани рослинності та вторинні зміни ґрунтового покриву. Просторова динаміка таких показників є індикативною для виявлення осередків суфозії, ерозійного розмиву, дегуміфікації та деградації агроландшафтів.

Біофізичні індикатори посідають центральне місце у системі геоекологічного аналізу басейнів річок, оскільки стан рослинного покриву та ґрунтів інтегрує вплив морфометричних, гідрологічних і кліматичних чинників. Рослинність виступає чутливим індикатором змін у вологості ґрунту, тепловому балансі та антропогенному навантаженні, а тому її просторово-часова динаміка дозволяє фіксувати як короткострокові коливання, так і довгострокові тенденції деградації геосистем.

До біофізичних індикаторів належать показники щільності та продуктивності рослинного покриву, ступеня його фрагментації, вологості ґрунтів, а також ознаки фізіологічного стресу рослин. Просторова неоднорідність цих параметрів у межах басейну відображає різний ступінь антропогенної трансформації території та інтенсивність деградаційних процесів.

У басейнах середніх річок лівобережжя Дніпра біофізичні індикатори є особливо інформативними для виявлення:

- зон деградації орних земель і зниження продуктивності агроландшафтів;
- осередків лінійної та площинної ерозії, що супроводжуються зменшенням рослинного покриву;
- ділянок із проявами суфозійних процесів, які формують локальні депресії та порушення структури ґрунтово-рослинного покриву;
- трансформації заплавних екосистем, включаючи пересихання, вторинне заболочування або заростання водних об'єктів.

Особливе значення мають індикатори, що відображають стан зволоження та тепловий режим поверхні. Зміни у співвідношенні вологості ґрунтів і температури поверхні дозволяють виявляти зони потенційної небезпеки пересихання заплав, формування пожежонебезпечних умов у торфових масивах та деградації лучно-болотних екосистем.

Перевагою біофізичних індикаторів є їхня висока чутливість до змін у межах одного вегетаційного періоду, що робить можливим аналіз сезонної динаміки геоекологічних процесів. У поєднанні з багаторічними рядами супутникових спостережень вони дозволяють оцінити тенденції стабілізації або прогресування деградаційних явищ у межах басейнових систем.

Таким чином, біофізичні індикатори виконують роль інтегрального показника стану природно-антропогенних ландшафтів, забезпечуючи зв'язок між структурними характеристиками території та їх функціональною динамікою. Їх використання є необхідною складовою комплексного супутникового геоекологічного аналізу.

Кліматичні та термічні індикатори охоплюють показники температури поверхні, теплового навантаження, сезонні зміни вологості та гідрометеорологічні умови формування стоку. Вони дозволяють оцінити роль кліматичного чинника у розвитку геоекологічних процесів, зокрема в умовах підвищеної посушливості або аномалій вологості ґрунту.

Кліматичні та термічні індикатори відображають енергетичні та гідрометеорологічні умови функціонування геосистем і є ключовими чинниками формування сучасного геоекологічного стану басейнів річок. Температурний

режим, кількість та сезонний розподіл опадів, інтенсивність випаровування і частота екстремальних погодних явищ визначають характер стоку, умови зволоження території та швидкість розвитку деградаційних процесів.

У межах басейнового підходу кліматичні індикатори виконують роль фонових параметрів, що формують загальні передумови розвитку ерозії, суфозії, заболочування або пересихання заплав. Тривалі посушливі періоди сприяють деградації рослинного покриву, зниженню ґрунтової вологості та підвищенню пожежної небезпеки, тоді як надмірне зволоження може активізувати акумулятивні процеси, замулення русел і трансформацію заплавних екосистем.

Термічні індикатори, зокрема показники температури земної поверхні та її сезонної мінливості, дозволяють оцінювати просторову неоднорідність теплового режиму території. Вони є інформативними щодо виявлення зон перегрівання, пересихання заплав, деградації торфових масивів і трансформації лучно-болотних комплексів. У поєднанні з показниками вологості та стану рослинності термічні індикатори формують основу для аналізу стресових станів геосистем.

Важливою особливістю кліматичних і термічних показників є їх виражена часово-просторова мінливість. Використання багаторічних рядів спостережень дозволяє оцінити тенденції змін кліматичних умов, виявити аномальні періоди та співвіднести їх із динамікою біофізичних і гідрологічних індикаторів. Такий інтегрований підхід підвищує достовірність інтерпретації супутникових даних та дозволяє відокремити короточасні коливання від довгострокових трансформацій геоекологічного стану.

Таким чином, кліматичні та термічні індикатори є невід'ємною складовою системи геоекологічного аналізу, оскільки забезпечують розуміння енергетичних передумов розвитку процесів у межах річкових басейнів і створюють основу для комплексної інтеграції природних та антропогенних чинників у межах розробленої методики.

Таким чином, класифікація геоекологічних індикаторів за функціонально-процесним принципом дозволяє впорядкувати їх відповідно до

ключових напрямів басейнового аналізу, охоплюючи розвиток суфозії, лінійної ерозії, трансформації рослинного покриву, замулення та інших деградаційних процесів, а також прояви антропогенного навантаження й кліматичних змін у межах річкових басейнів. Інтеграція показників різних груп забезпечує багаторівневу інтерпретацію геоекологічного стану території та підвищує достовірність оцінювання його просторово-часової динаміки.

Для басейнового аналізу середніх річок необхідно враховувати, що індикатори повинні відображати закономірності на рівні водозбору, а не окремих локальних об'єктів, якщо інше не передбачено завданням дослідження.

Так, морфометричні індикатори, розраховані за цифровими моделями рельєфу з просторовою розрізненістю 30 м, є достатніми для оцінювання загальної структури водозбору, щільності ерозійної мережі та диференціації схилових процесів у межах середнього басейну. Водночас для виявлення початкових форм лінійної ерозії або локальних суфозійних проявів може бути необхідною вища просторова деталізація, що дозволяє фіксувати мікроморфологічні порушення поверхні.

Аналогічно, біофізичні індикатори, отримані за даними середньої просторової розрізненості, ефективні для аналізу загальних тенденцій деградації агроландшафтів чи трансформації заплав, проте для дослідження фрагментованості рослинного покриву або малих ерозійних форм доцільним є використання даних більш високої деталізації. Таким чином, вибір індикаторів і джерел даних повинен здійснюватися з урахуванням масштабу дослідження, просторової структури басейну та характеру геоекологічних процесів.

Урахування масштабного рівня забезпечує коректність інтерпретації результатів і запобігає надмірній генералізації або, навпаки, необґрунтованій деталізації аналізу. Це особливо важливо при інтеграції різнотипних індикаторів у межах єдиної методики супутникового геоекологічного оцінювання.

1.5.3 Критерії оцінювання та інтеграція геоекологічних індикаторів

Окремі геоекологічні індикатори, навіть за умови їх високої інформативності, відображають лише окремі аспекти функціонування геосистем і не дозволяють сформувати цілісну характеристику стану басейну. Морфометричні показники визначають структурні передумови розвитку процесів, гідрологічні – відображають функціональні зміни водної складової, біофізичні – фіксують реакцію рослинного покриву та ґрунтів, а кліматичні – характеризують енергетичні умови їх формування. Лише інтеграція цих груп індикаторів забезпечує комплексне уявлення про геоекологічний стан території.

Формування критеріїв оцінювання передбачає узгодження різнотипних показників у просторовому, часовому та функціональному вимірах. Просторове узгодження полягає у приведенні індикаторів до єдиної територіальної основи аналізу (водозбір, тестова ділянка). Часове узгодження забезпечує можливість зіставлення динамічних показників із різною періодичністю спостережень та відокремлення короткочасних коливань від стійких тенденцій. Функціональне узгодження передбачає визначення ролі кожного індикатора в системі оцінювання – як базового, допоміжного або контрольного.

Критерії оцінювання формуються на основі співвідношення між індикаторами та їх пороговими або відносними значеннями, що дозволяє ідентифікувати зони з різним рівнем геоекологічної напруженості. Важливим є не лише абсолютне значення показника, а й його просторовий контекст та динаміка змін у часі. Такий підхід забезпечує перехід від аналізу окремих параметрів до виявлення системних зв'язків між процесами.

Інтеграція індикаторів у межах басейнового принципу дозволяє врахувати взаємодію структурних і функціональних компонентів геосистем, що є особливо важливим для середніх річок із різномірними природно-антропогенними умовами. Важливим елементом загальної концепції інтеграції є приведення значень індикаторів до єдиного нормованого діапазону від 0 до 1, що забезпечує

їх порівнянність та узгодженість у межах спільної аналітичної рамки. У результаті формується багаторівнева система оцінювання, яка створює методичну основу для подальшого розроблення алгоритму комплексного супутникового геоекологічного аналізу.

1.5.4 Роль геоекологічних індикаторів у формуванні методики дослідження

Систематизація та узагальнення геоекологічних індикаторів є ключовим етапом розроблення методики супутникового геоекологічного аналізу басейнів середніх річок. Саме індикатори виступають структурними елементами методики, визначаючи її логіку, послідовність аналітичних процедур і вибір джерел вихідних даних.

Морфометричні індикатори формують основу просторової структуризації басейну та дозволяють виділити морфодинамічні зони з різним потенціалом розвитку деградаційних процесів. Гідрологічні показники забезпечують оцінювання функціонального стану водної складової геосистем. Біофізичні індикатори відображають інтегральну реакцію рослинного покриву та ґрунтів на зміну природних і антропогенних чинників. Кліматичні та термічні параметри визначають енергетичні передумови розвитку сучасних геоекологічних процесів. Таким чином, кожна група індикаторів виконує визначену функцію в структурі методики та забезпечує багаторівневий аналіз стану території.

Формування методики передбачає не механічне поєднання показників, а їх ієрархізацію та інтеграцію відповідно до завдань дослідження. Індикатори визначають вибір супутникових даних, часові інтервали аналізу, рівень просторової деталізації та алгоритми інтерпретації результатів. Саме через систему індикаторів забезпечується перехід від теоретичного розуміння геоекологічних процесів до їх кількісного опису та картографічного відображення.

Отже, аналіз геоекологічних індикаторів і критеріїв оцінювання створює концептуальне та методологічне підґрунтя для формалізації алгоритму супутникового аналізу, викладеного у наступному розділі дисертації. Індикаторний підхід забезпечує структурну цілісність дослідження та обґрунтовує вибір аналітичних процедур, що застосовуються для оцінювання геоекологічного стану басейнів середніх річок.

1.6 Обмеження та проблеми існуючих підходів супутникового геоекологічного аналізу басейнів

Попри значний прогрес у застосуванні супутникових даних для геоекологічного аналізу річкових басейнів, сучасні підходи залишаються обмеженими низкою концептуальних і практичних проблем. Найпоширенішими серед них є *методологічна фрагментарність*, що проявляється у домінуванні одноіндикаторних схем та недостатній узгодженості різнотипних показників; *обмежений аналіз просторово-часової динаміки*, який не дозволяє повною мірою враховувати сезонні та багаторічні зміни; *труднощі інтеграції різнорідних даних у межах басейнового принципу*, особливо за умов складної природно-антропогенної структури середніх річок; а також *недостатня апробація існуючих методик* на репрезентативній сукупності тестових ділянок.

Методологічна фрагментарність та домінування одноіндикаторних схем. Аналіз сучасних наукових публікацій у сфері дистанційного геоекологічного моніторингу свідчить про переважання компонентно орієнтованих досліджень, у яких окремі складові геосистем розглядаються ізольовано. Найчастіше увага зосереджується на окремих компонентах геосистем – рослинному покриві, зволоженні ґрунтів або температурному режимі поверхні – без системного врахування їх функціональної взаємодії в межах басейнової геосистеми.

Такий підхід дозволяє отримувати детальні результати для окремих процесів, проте не забезпечує комплексного уявлення про геоекологічний стан

річкового басейну як інтегрованої системи. Унаслідок цього результати досліджень часто мають обмежену прикладну цінність і не можуть бути безпосередньо використані для підтримки управлінських рішень на басейновому рівні.

Характерною рисою багатьох сучасних досліджень є домінування одноіндикаторних схем аналізу, у межах яких окремі супутникові індекси трактуються як узагальнюючі показники геоекологічного стану. Використання одного індексу або одного типу даних спрощує процедуру аналізу, проте обмежує інтерпретаційний потенціал отриманих результатів.

Одноіндикаторні схеми не враховують різноспрямованість і неоднорідність геоекологічних процесів у межах басейнів середніх річок, де деградація ґрунтів, зміни водного режиму та трансформація рослинного покриву можуть проявлятися з різною інтенсивністю й у різних просторово-часових масштабах. У результаті такі підходи обмежують можливість комплексної діагностики геоекологічних процесів та ускладнюють виявлення зон потенційної геоекологічної небезпеки в межах басейнових систем.

Недостатній аналіз просторово-часової динаміки. Значна частина досліджень ґрунтується на окремих часових зрізах або коротких часових інтервалах спостережень, що обмежує можливості інтерпретації динаміки процесів. У таких випадках зміни геоекологічного стану можуть бути наслідком короточасних кліматичних аномалій або сезонних коливань, а не відображенням довгострокових тенденцій.

Для басейнів середніх річок, де геоекологічні процеси мають інерційний характер і розвиваються протягом тривалого часу, ігнорування просторово-часової динаміки призводить до спрощених і потенційно хибних висновків. В умовах сучасної кліматичної мінливості та посилення антропогенного навантаження таке спрощення може призводити до некоректної інтерпретації довгострокових тенденцій.

Додатковою складністю є те, що нові супутникові місії, попри високу просторову та спектральну розрізненість, часто мають відносно короткі часові

ряди, що не дозволяють самостійно охопити багаторічну динаміку. Проте інтеграція даних різних супутникових платформ – як сучасних, так і тих, що працюють протягом тривалого часу, – дає змогу сформувані узгоджені довгострокові ряди спостережень і компенсувати обмеження окремих місій.

Таким чином, відсутність довгострокового просторово-часового аналізу знижує прогностичний потенціал супутникових досліджень.

Обмеження басейнового принципу та інтеграції різнотипних даних.

Попри формальне декларування басейнового підходу в наукових публікаціях, на практиці аналіз часто здійснюється в межах адміністративних або довільно визначених територій, що не відповідає природним межах функціонування геосистем. У результаті аналіз здійснюється без урахування цілісності водозбору як функціональної одиниці геосистеми.

Недостатнє врахування басейнового принципу ускладнює інтегрований аналіз процесів у межах річкової системи та знижує можливість встановлення причинно-наслідкових зв'язків між різними частинами водозбору. У цьому контексті інтеграція даних ДЗЗ має здійснюватися саме в межах природних кордонів водозбору.

Додатковою проблемою є складність інтеграції різнотипних супутникових даних, що відрізняються просторовою розрізненістю, спектральними характеристиками та періодичністю спостережень. Відсутність стандартизованих процедур гармонізації таких даних у межах басейнового аналізу знижує відтворюваність результатів та ускладнює їх практичне застосування. Для середніх річок лівобережжя Дніпра, де антропогенний вплив має мозаїчний характер, ця проблема є особливо актуальною.

Недостатня апробація методик на сукупності тестових ділянок. У багатьох дослідженнях супутникові методики перевіряються на обмеженій кількості локальних ділянок, що не дозволяє оцінити їх відтворюваність, універсальність та адаптивність до різних природно-ландшафтних умов. Відсутність апробації на сукупності тестових ділянок з різною структурою

геосистем обмежує можливість узагальнення результатів і перенесення методик на інші території.

Сукупність зазначених обмежень свідчить про недостатню системність та інтегрованість існуючих підходів до супутникового геоекологічного аналізу. Зазначені обмеження обґрунтовують необхідність розроблення інтегрованої методики, орієнтованої на поєднання басейнового принципу, системи геоекологічних індикаторів та багаторічного супутникового аналізу з апробацією на сукупності тестових ділянок.

Отже, сукупність окреслених проблем демонструє, що сучасні супутникові підходи до геоекологічного аналізу басейнів залишаються концептуально та практично неповними, що ускладнює формування цілісного уявлення про просторово-часову організацію природних процесів. Це зумовлює необхідність їх критичного переосмислення та системного аналізу, який і становить зміст наступних підрозділів.

Висновки до першого розділу

1. У розділі I обґрунтовано теоретико-методологічні засади супутникового геоекологічного аналізу басейнів середніх річок та доцільність дотримання басейнового підходу. Показано, що геоекологічний аналіз є інтегративним підходом, який поєднує дослідження природних і антропогенних чинників у межах цілісних геосистем та дозволяє оцінювати їхній стан і динаміку.

2. Проаналізовано стан наукових досліджень басейнів середніх річок лівобережжя Дніпра. Встановлено, що наявні роботи охоплюють широкий спектр питань – від геоморфологічної, гідрологічної та ландшафтної характеристики до оцінювання антропогенного впливу, якості вод, ерозійних і суфозійних процесів. Водночас більшість таких досліджень має компонентний або локальний характер і не забезпечує цілісного просторово-часового оцінювання геоекологічного стану басейнів на основі єдиної системи супутникових індикаторів.

3. Обґрунтовано, що басейни середніх річок лівобережжя Дніпра мають спільні природні передумови формування геоекологічних проблем: рівнинний характер рельєфу, поширення лесових і алювіальних відкладів, значна роль заплавних і терасових комплексів, близьке залягання ґрунтових вод, висока частка сільськогосподарського освоєння та трансформація природного водного режиму.

4. Обґрунтовано вибір басейну річки Супій як модельного об'єкта апробації методики. Його репрезентативність визначається належністю до групи середніх річок лівобережжя Дніпра, поєднанням типових природних умов і виражених антропогенних трансформацій, наявністю заплавних, водно-болотних, сільськогосподарських і природоохоронних територій, а також достатньою забезпеченістю супутниковими та допоміжними геопросторовими даними.

5. Сформовано принципи вибору тестових ділянок для апробації методики. Їх виділення здійснюється з урахуванням положення в різних частинах басейну, контрастності природних умов і землекористування, наявності типових геоекологічних процесів та можливості просторово-часового аналізу за даними ДЗЗ різної просторової розрізненості. Такий підхід забезпечує репрезентативність фактичного матеріалу та створює основу для перевірки чутливості запропонованих індикаторів.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА СУПУТНИКОВОГО ГЕОЕКОЛОГІЧНОГО АНАЛІЗУ ЗА БАСЕЙНОВИМ ПРИНЦИПОМ

2.1 Басейновий підхід та просторова організація геоекологічного аналізу

2.1.1 Басейновий підхід як основа методики дослідження

Басейновий підхід є методичною основою супутникового геоекологічного аналізу (Данильченко, 2019; Ковальчук, 1997; 2018; Круглов, 2003, Vörösmarty et.al, 2000; Wouters et.al, 2014; Apitz et.al, 2006; United Nations Environment Programme, 2011), оскільки річковий басейн виступає цілісною природно-антропогенною геосистемою, у межах якої відбувається взаємодія гідрологічних, геоморфологічних, ґрунтових, біотичних і кліматичних процесів.

Цей принцип не є новим – він закріплений на законодавчому рівні, який регламентує управління водними ресурсами за басейновим принципом. Ключовим нормативно-правовим актом у цій сфері є Закон України від 4 жовтня 2016 року № 1641-VIII (Закон України № 1641-VIII, 2016).

У межах розробленої методики басейновий підхід використовується не лише як принцип вибору об'єкта дослідження, а й як структурна основа організації аналізу. Він визначає просторову ієрархію, послідовність опрацювання даних та логіку інтеграції геоекологічних індикаторів.

Методика супутникового геоекологічного аналізу ґрунтується на ієрархічній організації просторового дослідження, що передбачає поетапне опрацювання території на кількох взаємопов'язаних рівнях. Така структура дозволяє узгодити масштаби аналізу з природною організацією водозбірної системи та забезпечити логічну інтеграцію результатів.

У межах методики виокремлюються такі рівні просторової ієрархії:

- басейн річки як інтегральна природно-географічна одиниця аналізу;

- тестові ділянки, які використовуються для деталізації результатів та апробації індикаторів у різних природно-антропогенних умовах.

Ієрархічна організація дозволяє поєднувати узагальнені характеристики геоекологічного стану всього басейну з детальним аналізом локальних ділянок, що відрізняються морфометричними, гідрологічними та ландшафтними параметрами. Такий підхід забезпечує масштабованість методики та створює можливість її адаптації до інших басейнів за аналогічних природних передумов.

У розробленій методиці басейновий підхід виконує не лише концептуальну, а й структуроутворюючу функцію. Він визначає:

- просторову організацію аналізу;
- порядок агрегації та узгодження індикаторів;
- масштаби інтерпретації результатів;
- принципи порівняння різних ділянок у межах однієї річкової системи.

Застосування басейнового принципу забезпечує системність дослідження та підвищує його відтворюваність. Це створює передумови для масштабування методики та її адаптації до інших басейнів середніх річок за подібних природних умов.

Для узагальнення логіки реалізації методики супутникового геоекологічного аналізу побудовано блок-схему (рис. 2.1), яка відображає послідовність дій від розрахунку індексів та інших показників до тематичного геоекологічного оцінювання. Такий підхід забезпечує логічну узгодженість результатів, їх екологічну обґрунтованість та можливість адаптації до різних типів басейнів.



Рис. 2.1 Методика супутникового геоекологічного аналізу басейнів середніх річок

Алгоритм реалізації методики за басейновим принципом передбачає послідовний перехід від формування інформаційної бази та розрахунку спектральних індексів до тематичної інтерпретації геоекологічних процесів. На схемі виділено ключові групи процесів – деградація рослинності, дефіцит вологи та посуха, зменшення площі водних дзеркал, заболочення, підтоплення, ерозійні процеси, зростання антропогенного навантаження, зміни температурного режиму, теплове навантаження та пожежонебезпечність. Для кожного процесу наведено відповідні методи виявлення, що ґрунтуються на аналізі динаміки спектральних індексів, а також показників температури поверхні та випаровуваності.

Наступним етапом є інтеграція даних, яка включає нормування значень індикаторів до діапазону від 0 до 1, узгодження різнотипних показників та їх об'єднання у межах єдиної аналітичної системи. Нормування забезпечує порівнянність індикаторів, що мають різні одиниці вимірювання, діапазони значень та чутливість до екологічних процесів. Після нормування здійснюється агрегація результатів, яка дозволяє сформувати узагальнену оцінку геоекологічного стану та виділити зони потенційної небезпеки.

Завершальним етапом є побудова карти потенційних геоекологічних небезпек, що інтегрує результати аналізу різних процесів і дозволяє здійснювати просторово-часову оцінку стану річкового басейну, виявляти аномальні ділянки та визначати пріоритетні зони для подальших досліджень і моніторингу.

2.1.2 Визначення меж басейну та роль тестових ділянок у реалізації геоекологічного аналізу

Визначення меж басейну є початковим етапом методики та здійснюється на основі цифрових моделей рельєфу з урахуванням конфігурації гідрографічної мережі. Межі водозбору визначають просторову область аналізу, у межах якої виконується обробка даних ДЗЗ і розрахунок геоекологічних індикаторів. Такий підхід дійсний за умови відсутності офіційних меж басейнів.

В Україні басейновий принцип управління водними ресурсами інституційно закріплений у рамках імплементації положень Водної рамкової директиви Європейського Союзу, інтегрованих у національне законодавство з 2016 року. На державних геоінформаційних ресурсах сформовано офіційні цифрові межі водозбірних басейнів, використання яких у наукових дослідженнях забезпечує просторову узгодженість аналізу та підвищує порівнюваність результатів (*Державне агентство водних ресурсів України, 2025*).

Визначення меж басейну формує загальну просторову рамку дослідження, однак для детального аналізу природно-антропогенних процесів цього рівня узагальнення недостатньо. У межах великої території окремі геоекологічні явища можуть проявлятися локально, бути просторово неоднорідними або мати різну інтенсивність. Саме тому наступним кроком є виділення тестових ділянок – ключових елементів реалізації методики супутникового геоекологічного аналізу, які забезпечують перехід від загального огляду басейну до детального вивчення конкретних процесів.

Тестові ділянки є одними із ключових елементів реалізації методики супутникового геоекологічного аналізу, оскільки саме на їх основі забезпечується перехід від загального до детального вивчення конкретних природно-антропогенних процесів. Тестові ділянки дають змогу зосередити аналіз на територіях, де геоекологічні процеси проявляються найчіткіше. Саме в їх межах доцільно відстежувати деградацію рослинного покриву, зміни вологості ґрунтів, заболочення, замулення, заростання, ерозійні процеси, термічні аномалії та інші трансформації, які на рівні всього басейну можуть бути згладженими. Завдяки цьому тестові ділянки дозволяють не лише зафіксувати наявність змін, а й зрозуміти їх характер, інтенсивність, часову динаміку та зв'язок із місцевими природними умовами й антропогенним впливом.

2.2 Інформаційно-технологічне забезпечення супутникового аналізу

2.2.1 Типи супутникових і наземних даних, застосованих у методиці

Аерокосмічна інформація використовується не лише для вирішення геологічних завдань (*Мичак та ін., 2010*), але й для моніторингу та аналізу екзогенних процесів (суфозія, ерозія, замулення тощо), оцінювання стану ландшафтів і рослинного покриву (*Lischenko et al., 2017; Pazynych, 2017; Денисик, 1998; 2001; 2003*) тощо. У межах методики залучаються дані, що відповідають масштабам дослідження басейнів середніх річок, мають достатню просторову та часову деталізацію для виявлення стійких тенденцій розвитку геоекологічних процесів і характеризуються стабільною доступністю та відтворюваністю результатів.

Важливо, що методика орієнтована переважно на використання джерел даних із вільним або спрощеним доступом, а також інструментів, які не потребують обов'язкового залучення дорогих комерційних програмних рішень. Такий підхід підвищує практичну відтворюваність дослідження, спрощує повторне застосування методики для інших басейнових систем і робить її доступною не лише для спеціалізованих наукових установ, а й для закладів вищої освіти, природоохоронних установ та органів місцевого управління. З огляду на це, більшість етапів аналізу можуть бути реалізовані на основі відкритих супутникових архівів, загальнодоступних похідних наборів даних і поширених геоінформаційних платформ, що забезпечує методичну гнучкість без суттєвого зниження аналітичної якості результатів.

Супутникові оптичні дані. Оптичні супутникові дані середньої та високої просторової розрізненості застосовуються для оцінювання стану земного покриву, рослинності та водних об'єктів. У межах дослідження використано багатоспектральні знімки місій Sentinel-2 (10–20 м) та Landsat (30 м), що забезпечують формування багаторічних часових рядів та дозволяють аналізувати

сезонну й міжрічну динаміку геосистем. Вільний доступ до даних надається зареєстрованим користувачам.

Для деталізованого дешифрування локальних змін і уточнення просторової структури ландшафтів застосовано знімки надвисокої просторової розрізненості PlanetScope (близько 3 м). Їх використання є доцільним для виявлення дрібномасштабних проявів ерозії, трансформації заплав та змін у структурі землекористування. Доступ до даних забезпечується індивідуальною дослідницькою ліцензією (*Planet Team, 2020*).

В окремих випадках, коли виїзд на об'єкт був неможливий через обмежений доступ, несприятливі погодні умови або інші фактори, для валідації результатів дешифрування та уточнення характеру локальних об'єктів і змін додатково використовувалися знімки надвисокої просторової роздільності, зокрема продукція Махар, які завдяки надвисокій просторовій розрізненості дають змогу візуально підтверджувати окремі елементи структури земного покриву, межі порушених ділянок або дрібні особливості антропогенної трансформації території. У (частково) вільному доступі.

Поєднання даних різної просторової розрізненості дозволяє забезпечити як регіональний багаторічний аналіз, так і детальне дослідження окремих тестових ділянок.

Теплові супутникові дані. Теплові канали місії Landsat використовуються для оцінювання температурного режиму земної поверхні та виявлення температурних аномалій, що відображають зміни водного режиму, ґрунтового зволоження і рівня антропогенного навантаження. Дані поверхневої температури інтегрують вплив кліматичних умов і властивостей підстильної поверхні, що підвищує їхню інформативність у геоecологічних дослідженнях.

У межах методики теплові дані застосовуються для аналізу просторової та багаторічної мінливості температурних характеристик у поєднанні з біофізичними індикаторами.

Радіолокаційні дані. Радіолокаційні супутникові дані, зокрема цифрові моделі рельєфу типу SRTM DEM та AW3D30, використовуються як базове

джерело інформації про рельєф та морфологічні особливості території. Вони забезпечують можливість виконання морфометричного аналізу, класифікації суббасейнів, оцінювання структурних характеристик земної поверхні та виявлення локальних форм мікрорельєфу.

Можливе застосування Sentinel-1 InSAR DEM, придатного для загальної морфометрії, великих форм рельєфу й відносних перепадів, але не як заміна LiDAR або якісної фотограмметричної ЦММ високої точності. Повноцінне використання цих даних потребує окремого дослідження з багатоступеневою обробкою (генерація інтерферограм, фільтрація когерентності, фазова розмотка, корекція атмосферних впливів, калібрування та валідація), що значно виходить за межі завдань цього дослідження.

Завдяки незалежності від хмарності та освітлення такі дані є корисними для фіксації змін земного покриву, включно з процесами зміщення поверхні, суфозійними просадками, деформаціями ґрунтів, а також для аналізу стану заплавлених територій, заболочених ділянок і зон підвищеної вологості.

Залучення радіолокаційних даних підвищує стійкість результатів при роботі з багаторічними часовими рядами та зменшує залежність аналізу від погодних умов, що є важливим для моніторингу динамічних геоморфологічних процесів.

Кліматичні та метеорологічні дані. Для інтерпретації геоекологічних процесів у межах басейнів залучаються кліматичні та метеорологічні дані, зокрема показники температури повітря, вологості ґрунту, кількості опадів і тривалості посушливих періодів. Вони формують необхідний природний контекст для аналізу змін, зафіксованих за супутниковими матеріалами, та дають змогу відокремлювати кліматично зумовлені зміни від трансформацій, пов'язаних з антропогенним впливом. Важливим джерелом такої інформації є ERA5, який містить растрові метеорологічні дані про стан атмосфери й підстильної поверхні та дозволяє враховувати просторовий розподіл погодних умов у межах басейну.

Кліматичні й метеорологічні дані використовуються у вигляді багаторічних рядів для оцінювання клімато-екологічних показників і пояснення динаміки індикаторів геоекологічного стану. Вони також відіграють важливу роль у доборі супутникових знімків із найбільш зіставними природними умовами зйомки, що дає змогу зменшити вплив сезонних і погодних відмінностей на результати аналізу та підвищити коректність їх інтерпретації.

Використання даних ERA5 забезпечує щоденні дані щодо пожеж, які є основою для орієнтації в оцінюванні пожежонебезпечності території.

Наземні та картографічні дані. Наземні дані використовуються для уточнення інтерпретації супутникових показників, підвищення достовірності отриманих результатів і пояснення причин просторової диференціації геоекологічних процесів. До них належать матеріали ґрунтових, геоботанічних, гідрологічних і, за наявності, геологічних досліджень, а також картографічні джерела, що відображають природну основу басейнів середніх річок. Зокрема, застосовуються карти четвертинних відкладів, ґрунтів, геоморфологічної будови, гідрографічної мережі та ландшафтною структури, які дають змогу коректно інтерпретувати просторові відмінності геоекологічних індикаторів і враховувати природну неоднорідність території.

Важливе значення мають також історичні картографічні матеріали, архівні джерела та краєзнавчі відомості, які дозволяють уточнювати особливості минулої структури водотоків, заплав, заболочених ділянок і землекористування, а в окремих випадках – відновлювати локальні назви малих річок і водозбірних ділянок. Залучення таких матеріалів дає змогу не лише точніше інтерпретувати довготривалі зміни, а й зберігати історико-географічний контекст території.

Топографічні карти, матеріали статистичного обліку, екологічні паспорти територій, а також результати польових спостережень доповнюють супутниковий аналіз і забезпечують можливість локальної валідації виявлених змін.

Особливу роль відіграють польові обстеження, фотофіксація, використання БПЛА та відбір проб ґрунту, які дозволяють уточнювати сучасний

стан тестових ділянок, характер порушень рослинного покриву, особливості зволоження ґрунтів, прояви ерозійних процесів, замулення, деградації ґрунтового покриву чи локальних антропогенних трансформацій. Важливим доповненням дослідження стане ЦМР для детального дослідження окремих ділянок. Дані щорічних екологічних паспортів та інших регіональних матеріалів екологічного моніторингу можуть використовуватися для перевірки достовірності інтерпретації даних ДЗЗ і зіставлення їх із наземними спостереженнями.

Знімки з просторовою розрізненістю 30 м не забезпечують вищої точності після приведення до розширення 10 м, оскільки ресемплінг не створює нової просторової інформації. Приведення даних різної просторової розрізненості (від 3 до 30 м) до єдиного просторового розширення 10 м виконано для забезпечення їх узгодженості в межах інтегрованого супутникового аналізу.

Таким чином, комплекс наземних матеріалів забезпечує не лише перевірку результатів дистанційного аналізу, а й створює змістову основу для їх правильної геоекологічної інтерпретації в межах конкретного басейну.

Добір даних у межах методики (табл. 2.1) здійснюється з урахуванням їх просторової узгодженості, часової репрезентативності та придатності до повторного використання в аналогічних дослідженнях. Особлива увага приділяється джерелам, що дозволяють формувати багаторічні часові ряди, необхідні для аналізу просторово-часової динаміки геоекологічних процесів у межах басейнів середніх річок.

Орієнтація на стабільно доступні й методично сумісні дані забезпечує відтворюваність методики, тобто можливість її повторного застосування для інших басейнів або в інші часові зрізи. Зазначені типи даних формують інформаційну основу методики та забезпечують можливість подальшого застосування програмно-алгоритмічних засобів обробки й розрахунку геоекологічних індикаторів, описаних у наступних підрозділах.

**Основні джерела даних, використані в методиці супутникового
геоекологічного аналізу**

Джерело даних	Просторова розрізненість	Основні канали / параметри	Доступ
MODIS	250–1000 м	Visible, NIR, MIR, TIR; інші готові продукти	Вільний
Sentinel-2	10–20 м	Visible, NIR, RE, SWIR	Вільний
Landsat	30 м	Visible, NIR, SWIR, TIR	Вільний
PlanetScope	~3 м	Visible, NIR, RE (Yellow, Green, Blue)	Дослідницька ліцензія
Maxar	надвисока	Візуально-інтерпретаційні дані	Вільний доступ (частково)
AW3D30 DEM	30 м	Цифрова модель місцевості	Вільний
SRTM DEM	30 м	Цифрова модель місцевості	Вільний
ERA5	Регіональний масштаб	Температура повітря, вологість ґрунту, опади, інші метеопараметри	Вільний
FIRMS	залежно від сенсора	Точки пожеж, термальні аномалії, яскравісна температура, час фіксації	Вільний
Топографічні та тематичні карти	залежно від масштабу	Рельєф, гідромережа, ґрунти, четвертинні відклади, ландшафти	Архіви / фонди
Історичні, картографічні та архівні матеріали	залежно від джерела	Історична гідромережа, землекористування, місцеві назви	Архіви
Екологічні паспорти, статистичні матеріали	–	Екологічні показники моніторингу	Офіційні матеріали
Польові спостереження, БПЛА, проби ґрунту	Локальний рівень	Фотофіксація, описи, ортофото, фізико-хімічні властивості ґрунту	Власні дослідження

2.2.2 Програмно-алгоритмічне забезпечення

Реалізація методики супутникового геоекологічного аналізу за басейновим принципом передбачає використання програмно-алгоритмічного забезпечення, яке дозволяє обробляти багатоспектральні та багаторічні супутникові дані, здійснювати просторовий аналіз і формувати інтегровані оцінки геоекологічного стану територій. Вибір інструментів обумовлений необхідністю поєднання високопродуктивної обробки даних, гнучкого просторового аналізу та можливості формалізації алгоритмів оцінювання.

У межах методики використовується поєднання геоінформаційних систем, хмарних платформ і авторських програмних рішень, кожне з яких виконує визначену функцію в загальній структурі аналізу.

ГІС як середовище просторового аналізу. Базовим середовищем для просторового аналізу є геоінформаційна система **QGIS**, яка використовується для візуалізації результатів і формування картографічних матеріалів. Важливими перевагами QGIS є її відкритість, зрозумілий інтерфейс і доступність, що забезпечують широке використання як у наукових дослідженнях, так і в практичній діяльності. Розвиток програмного середовища підтримується міжнародною спільнотою розробників і волонтерськими ініціативами, що сприяє постійному вдосконаленню функціоналу, інтеграції нових інструментів і забезпеченню сумісності з різними форматами геопросторових даних.

У рамках методики QGIS виконує функцію інтеграційної платформи, де поєднуються результати обробки даних ДЗЗ, матеріали наземних спостережень і допоміжні картографічні шари. Це забезпечує можливість комплексного аналізу геоекологічного стану територій і підготовки підсумкових карт та аналітичних матеріалів. Альтернатива QGIS – комерційна ArcGIS.

У межах комплексних геоінформаційних досліджень QGIS не може повністю охопити весь спектр спеціалізованих операцій, оскільки його інструментарій орієнтований передусім на інтеграцію даних, базову аналітику та картографічну візуалізацію. Тому для тематичних задач доцільно залучати інші профільні середовища.

Для попередньої обробки та аналізу багаторічних часових рядів супутникових даних у межах методики використовується хмарна платформа **GEE**. Її застосування дозволяє працювати з великими архівами матеріалів дистанційного зондування, оминаючи локальне навантаження, і забезпечує швидке формування часових рядів для великих територій.

У межах методики середовище GEE використовується насамперед для відбору супутникових сцен за просторовими й часовими критеріями, попередньої фільтрації даних, маскуванню хмарності та інших небажаних

пікселів, побудови сезонних або річних композитів, розрахунку спектральних індексів і формування похідних растрових шарів. На цьому ж етапі можуть виконуватися узагальнення часових рядів, обчислення статистичних характеристик і підготовка даних до подальшої інтеграції в геоінформаційному середовищі.

Водночас GEE найбільш ефективний для роботи зі стандартизованими відкритими колекціями даних, зокрема Landsat, Sentinel та MODIS, які мають уніфіковану структуру й часову узгодженість.

Обмеження платформи проявляються у випадках, коли дослідження потребує використання даних, що відсутні у стандартних каталогах GEE. Зокрема, високодетальні комерційні знімки, такі як PlanetScope, потребують окремого завантаження, підготовки та обробки в альтернативних середовищах. Тому в межах методики хмарна обробка поєднується з локальними ГІС-інструментами, що забезпечує гнучкість аналізу при збереженні загальної логіки та послідовності етапів.

SAGA GIS, подібно до QGIS, є відкритим програмним середовищем із широким набором алгоритмів геообробки, включаючи інструменти аналізу рельєфу, статистичної обробки та роботи з растровими даними. У контексті дослідження SAGA GIS добре зарекомендувала себе як ефективна альтернатива хмарним платформам, зокрема GEE, при роботі з високодетальними комерційними знімками або спеціалізованими наборами даних, що не інтегровані у відкриті каталоги. Це забезпечує гнучкість обробки та можливість реалізації складних алгоритмів у локальному середовищі. Водночас інтерфейс програми є менш інтуїтивним, що потребує додаткового досвіду користувача.

Програмний комплекс **SNAP** орієнтований на обробку даних місій Sentinel і забезпечує розвинуті інструменти радіометричної та геометричної корекції, проте має обмежений набір інструментів для комплексного геоінформаційного аналізу.

Ефективною практикою у межах дослідження стало використання власних тематичних скриптів, реалізованих у середовищах GEE, Scilab та Python (зокрема

через середовище розробки Spyder). Такий підхід дозволяє формалізувати алгоритми обробки даних, автоматизувати повторювані операції та забезпечити оперативну відтворюваність результатів.

Перевагою скриптових рішень є їхня орієнтованість на конкретну задачу, що дає змогу уникати надлишкового функціонального навантаження, характерного для універсальних програмних пакетів. Це, у свою чергу, забезпечує ефективніше використання обчислювальних ресурсів і дозволяє обробляти великі обсяги даних ДЗЗ без суттєвого зниження продуктивності.

Водночас використання таких середовищ потребує достатнього рівня підготовки користувача, зокрема знання синтаксису мов програмування та розуміння особливостей роботи з різними бібліотеками й API. Необхідність адаптації до різних програмних середовищ (GEE, Python, Scilab) вимагає певної гнучкості та часу на налаштування робочого процесу, однак ці витрати компенсуються значно ширшими можливостями аналізу та контролю над обчислювальними процедурами.

Вибір програмного середовища для обробки супутникових даних. У межах запропонованої методики вибір програмного середовища визначається не лише типом вхідних даних, а й характером аналітичної задачі, етапом обробки, необхідністю автоматизації та рівнем деталізації дослідження. З огляду на це, доцільно застосовувати не одне універсальне програмне забезпечення, а поєднання кількох середовищ, кожне з яких найбільш ефективно на певному етапі роботи.

Для доступу до відкритих супутникових архівів та первинної обробки багаторічних даних найбільш доцільним є використання GEE. Перевагою цього середовища є можливість працювати з колекціями Sentinel-2, Landsat, MODIS, ERA5-Land, FIRMS та іншими наборами без необхідності попереднього локального завантаження. Це суттєво спрощує формування часових рядів, сезонних і багаторічних композитів, відбір знімків за територією дослідження, а також виконання базових процедур попередньої обробки, зокрема маскування хмарності, агрегації, нормалізації та розрахунку стандартних спектральних

індексів. Саме тому GEE доцільно розглядати як базове середовище первинної підготовки відкритих супутникових і кліматичних даних.

Окремим важливим етапом методики є обчислення геоекологічних індикаторів, на основі яких виконується подальший просторово-часовий аналіз. Для розрахунку стандартних спектральних, температурних, водних, ґрунтових та клімато-екологічних показників найбільш доцільним є використання GEE, якщо необхідні бібліотеки, формули або відповідні набори даних уже доступні в межах платформи. У такому випадку GEE забезпечує швидке й відтворюване обчислення індикаторів на великих територіях і в багаторазовому режимі без потреби у трудомісткому ручному опрацюванні окремих сцен.

У тих випадках, коли потрібні індикатори не реалізовані у стандартному наборі інструментів GEE або коли доцільніше працювати з локально підготовленими растрами, ефективним середовищем стає SAGA GIS. Його перевага полягає у наявності вбудованих інструментів для розрахунку численних індексів і похідних растрових показників, де користувачеві достатньо правильно задати відповідність спектральних каналів. Це особливо зручно у випадках, коли потрібно швидко протестувати різні варіанти індексів, працювати з нестандартними комбінаціями каналів або виконувати розрахунки поза межами хмарного середовища. Таким чином, для масового та серійного обчислення індикаторів доцільніше використовувати GEE, тоді як для локальних розрахунків, нестандартних індексів і гнучкої роботи з растровими шарами SAGA GIS може бути більш зручним рішенням.

Водночас можливості хмарної платформи не охоплюють усі спеціалізовані аналітичні потреби. У разі використання нестандартних бібліотек, авторських математичних процедур, спеціальних алгоритмів фільтрації, регресійного моделювання або інших методичних блоків, нереалізованих стандартними засобами GEE, доцільно переходити до локальної обробки. Для цього найбільш популярними є Python та Scilab, які забезпечують гнучке середовище для реалізації авторських алгоритмів, пакетної обробки, статистичного аналізу та автоматизації дослідницьких процесів. У такій схемі GEE може

використовуватися для отримання, фільтрації та первинного впорядкування даних, тоді як поглиблена аналітична обробка виконується засобами скриптових мов.

Для просторової інтеграції результатів, басейнового аналізу та формування кінцевих картографічних матеріалів основним середовищем доцільно вважати QGIS. Саме це програмне забезпечення найбільш зручне для поєднання результатів, отриманих у різних середовищах, з межами басейнів, суббасейнів, функціональними зонами, тестовими ділянками, геологічними, ґрунтовими та ландшафтними матеріалами. Крім того, QGIS забезпечує ефективну роботу з растровими і векторними шарами, підтримує власні скрипти та плагіни, а також дає змогу формувати фінальні аналітичні карти, схеми та похідні просторові моделі. Отже, в межах методики QGIS виступає центральним середовищем інтеграції та узагальнення результатів.

Для спеціалізованої обробки радіолокаційних даних найбільш доцільним є використання SNAP. Це середовище забезпечує повний набір інструментів для роботи з даними Sentinel-1, зокрема для радіометричної корекції, фільтрації, геокодування та інтерферометричної обробки. У разі застосування підходів InSAR саме SNAP є базовим інструментом формування похідних продуктів, тоді як подальше просторове зіставлення та інтеграцію отриманих результатів доцільно виконувати у QGIS.

Окреме місце у структурі методики займає робота з цифровими моделями рельєфу та похідними морфометричними характеристиками. Для таких задач доцільно застосовувати QGIS, SAGA GIS. Зокрема, SAGA GIS є ефективним для розрахунку морфометричних показників, аналізу схилів, експозиції, локальних форм рельєфу, гідрографічних параметрів і похідних аналізу рельєфу. Такі інструменти є важливим доповненням до супутникового аналізу, оскільки рельєфні умови часто визначають просторові закономірності розвитку ерозійних, суфозійних, заболочувальних та інших геоекологічних процесів.

Таким чином, GEE доцільно використовувати для швидкого доступу до відкритих супутникових архівів, первинної обробки багаточасових даних та

масового обчислення стандартних індикаторів. SAGA GIS забезпечує локальний розрахунок індексів, похідних растрових показників і морфометричних характеристик рельєфу. Python та Scilab застосовуються для реалізації нестандартних алгоритмів, авторських аналітичних процедур та автоматизації обчислень. SNAP використовується для спеціалізованої обробки радіолокаційних та інтерферометричних даних. QGIS – для інтеграції результатів, просторового узгодження та формування підсумкових картографічних матеріалів.

2.2.2.1 Авторський плагін *Anomalies to contours* (QGIS)

Важливим елементом програмно-алгоритмічного забезпечення є використання авторських програмних рішень, розроблених для автоматизації окремих етапів геоecологічного аналізу. Розроблений на базі скриптів Python у співавторстві плагін **Anomalies to contours**, реалізований та розміщений у репозиторії QGIS (рис. 2.2) (Marhes & Hudak, 2025a), дозволяє експериментальним чином ідентифікувати аномальні значення растрів з моментальною можливістю оцифрування за допомогою порогових критеріїв (Гудак та ін., 2025; Marhes & Hudak, 2025b).

Розроблений плагін має широке використання, про що свідчать понад 1300 завантажень. Його універсальність полягає у тому, що використовуються стандартні статистичні методи для виявлення відхилень від заданого діапазону значень (Hudak et al., 2025). Тому використання цього інструменту можливе на будь-яких растрових зображеннях, для яких потрібно знайти аномалії.

Аномальні зони виділяють за статистичним критерієм відхилення значень від середнього за умови наближеного нормального розподілу даних. Аномальними вважаються значення, що виходять за межі:

$$\mu \pm k\sigma \quad (2.1)$$

де μ – середнє значення, σ – стандартне відхилення, k – коефіцієнт аномальності.

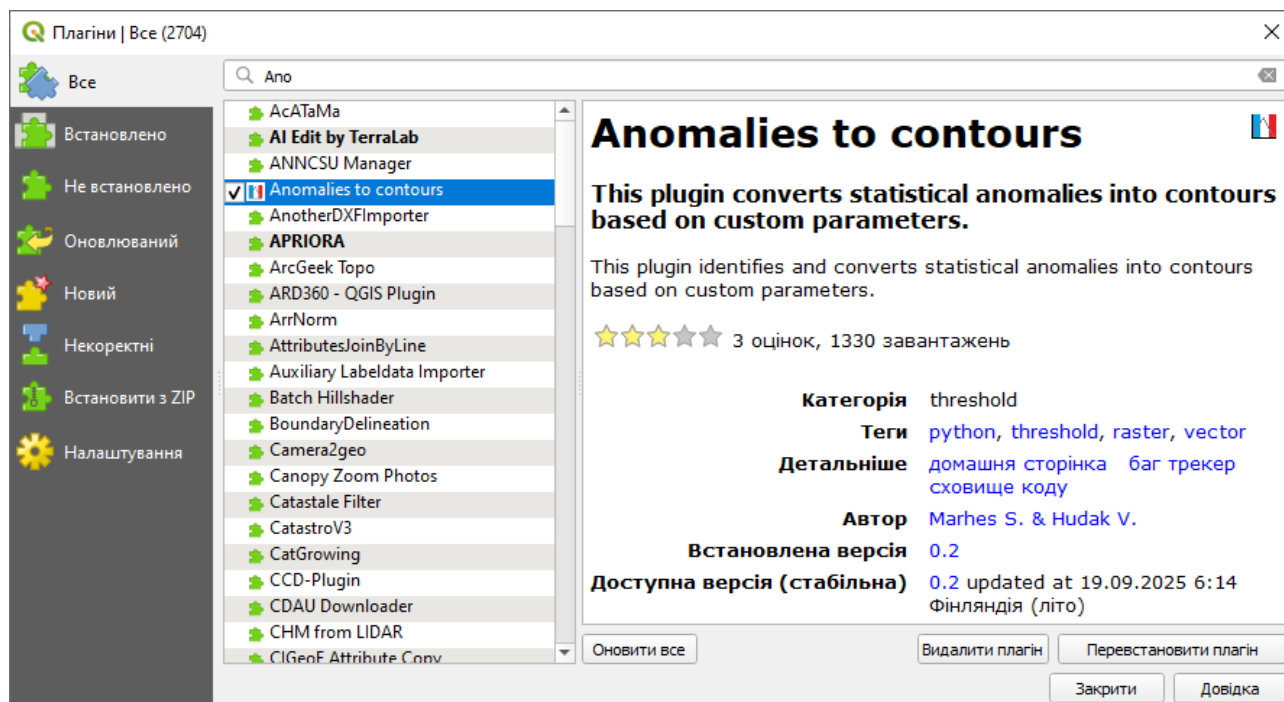


Рис. 2.2 Викопіювання вікна бібліотек QGIS з підсвіченим плагіном Anomalies to contours

У растровому аналізі цей підхід дає змогу виявляти ділянки, інтенсивність яких істотно відрізняється від фонового рівня і може вказувати на природні або техногенні аномалії. Його застосування ґрунтується на припущенні, що розподіл значень пікселів є близьким до гаусівського, що характерно для багатьох даних дистанційного зондування. Весь цикл методики реалізовано в плагіні Anomalies to countours (рис. 2.3) (Cleveland, 1993; Жуков, 2008; Meng et al., 2017).

У межах класифікації аномалій слабкі аномалії доцільно визначати за порогом $k = 2$, що відповідає приблизно 5 % крайніх значень вибірки, тоді як сильні аномалії – за порогом $k = 3$, що відповідає близько 0,5 % найбільш віддалених від середнього значень. Збережено можливість експериментально визначити поріг.

Після запуску плагіна відкривається вікно з параметрами (рис. 2.4), де необхідно вказати зображення та канал, а також встановити поріг за одним із варіантів згідно з алгоритмом.

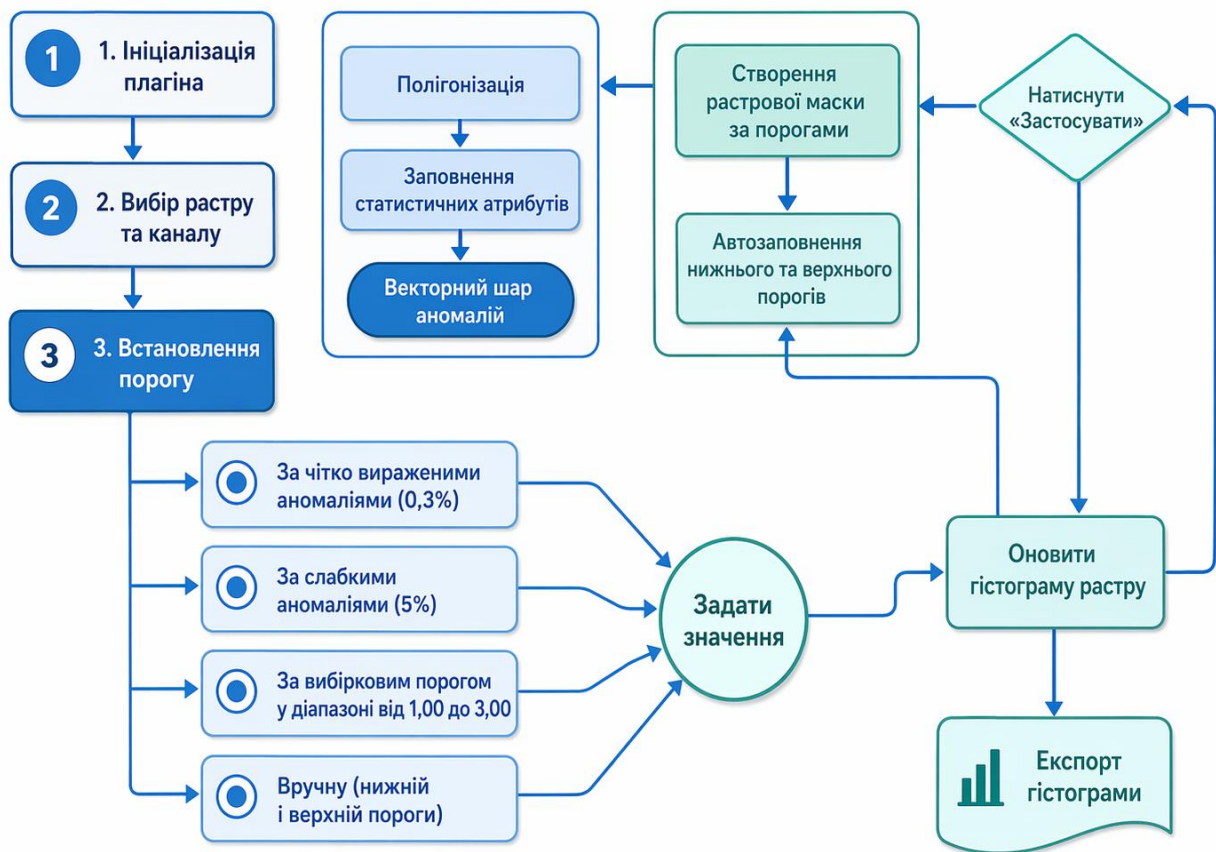


Рис. 2.3 Алгоритм роботи плагіна Anomalies to contours

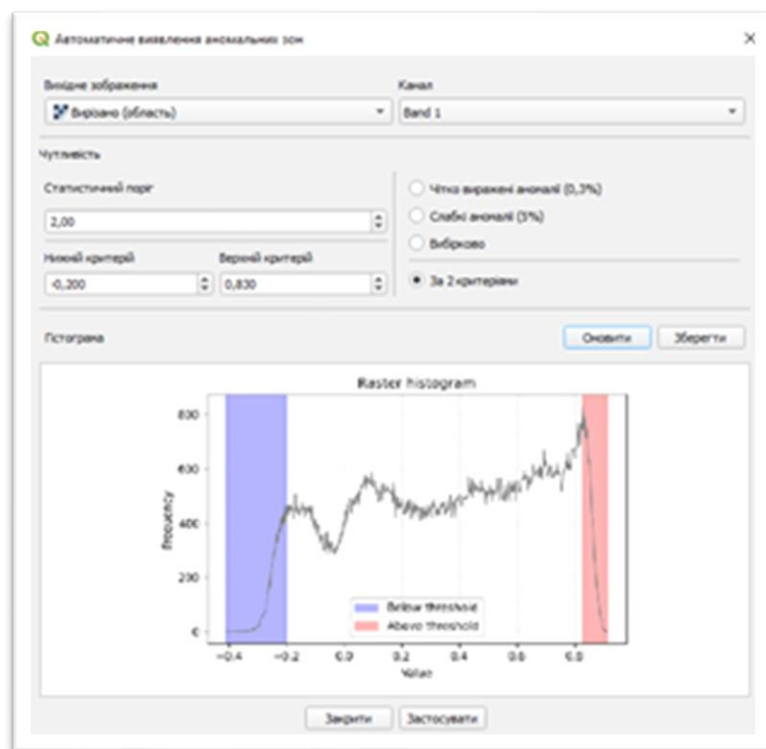


Рис. 2.4 Інтерфейс вікна плагіна Anomalies to contours

На прикладі фрагмента території в межах села Піщане Черкаської області, Україна (49.75147° пн.ш., 31.83662° сх.д.), який характеризується помірним температурним навантаженням, використано супутниковий знімок Landsat від 31 липня 2022 року, а саме теплові інфрачервоні дані. Основною метою аналізу було виділення ділянок із критично високими показниками температури поверхні, їх просторове картографування та подальше формування рекомендацій для регулювання локального температурного режиму у контексті завдань сталого розвитку.

Процедура обробки (припустимо, що теплові інфрачервоні дані приведені до показників поверхневої температури) починалася з побудови гістограми розподілу піксельних значень (рис. 2.5). При кожній зміні параметра чутливості алгоритм автоматично перераховував верхній і нижній пороги, які позначалися на гістограмі відповідними кольоровими межами.

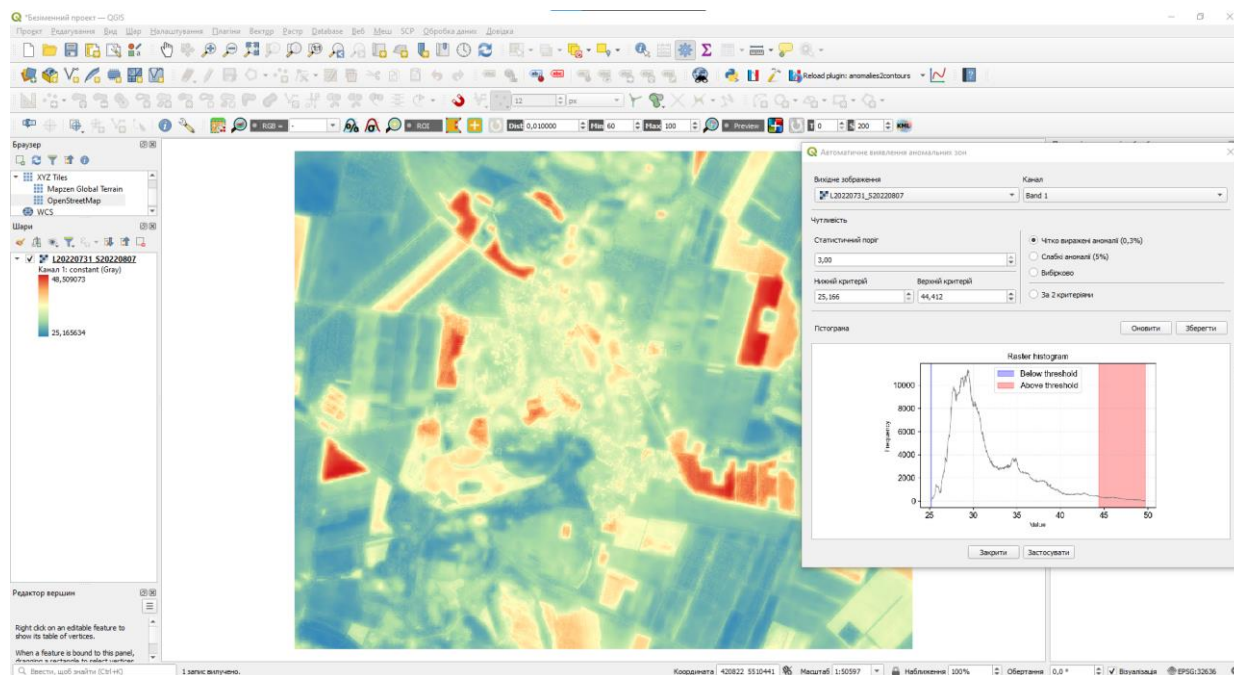


Рис. 2.5 Викопіювання з середовища QGIS з активним вікном плагіна Anomalies to contours

Користувач мав можливість працювати як у стандартному режимі з одним критерієм, так і в режимі «за двома критеріями», коли діапазон аномальних значень визначався нижнім та верхнім порогами (рис. 2.6). Такий підхід

забезпечував адаптивність аналізу та можливість врахування специфічних умов досліджуваної території.

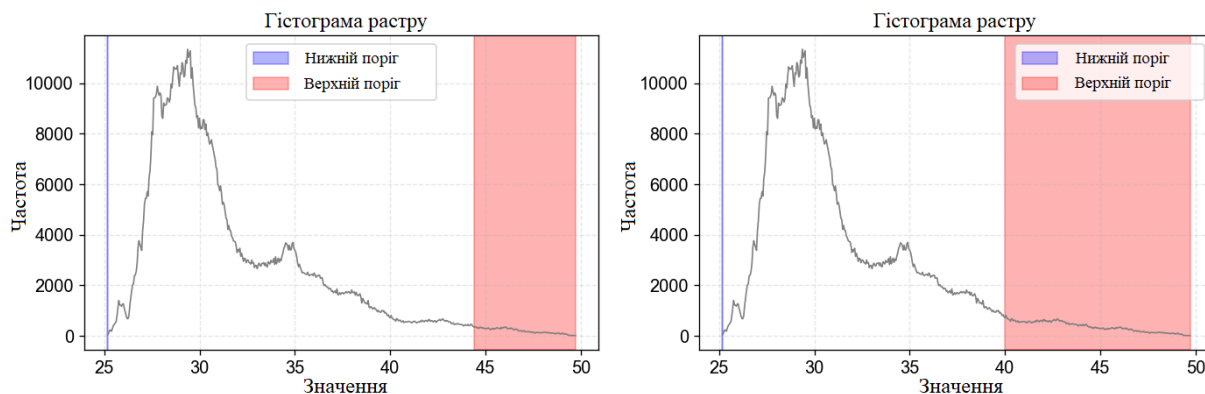


Рис. 2.6 Вигляд гістограми растру: з чітко вираженими аномаліями, де високими аномаліями є значення понад 44.4 °C (ліворуч), та за двома критеріями, де високими аномаліями є значення понад 40.0 °C (праворуч)

Після встановлення параметрів чутливості відбувалася векторизація результатів, у ході якої були побудовані полігони, що задовольняли обрані критерії. Для досліджуваної ділянки (рис. 2.7) виділено дев'ять зон із підвищеним температурним навантаженням. Просторовий розподіл цих полігонів показав різний характер охоплення: від компактних дрібних ділянок до великих територій.

Для кожного векторизованого полігона автоматично розраховувалися основні статистичні характеристики, серед яких: мінімальне (*min*), максимальне (*max*) та середнє (*mean*) значення, стандартне відхилення (*stddev*), сума (*sum*), діапазон (*range*), кількість пікселів (*count*) та площа об'єкта (*area*) (рис. 2.8). Така деталізація дозволила комплексно оцінити властивості кожної зони та визначити рівень відхилення від фонового стану.

У підсумку *Anomalies to contours* у QGIS реалізує повний цикл обробки – від завантаження вихідних растрових зображень і налаштування параметрів чутливості до формування векторизованих шарів аномалій. Це робить його універсальним інструментом для автоматизованого моніторингу геопросторових

процесів, забезпечуючи одночасно високу точність та відтворюваність результатів.

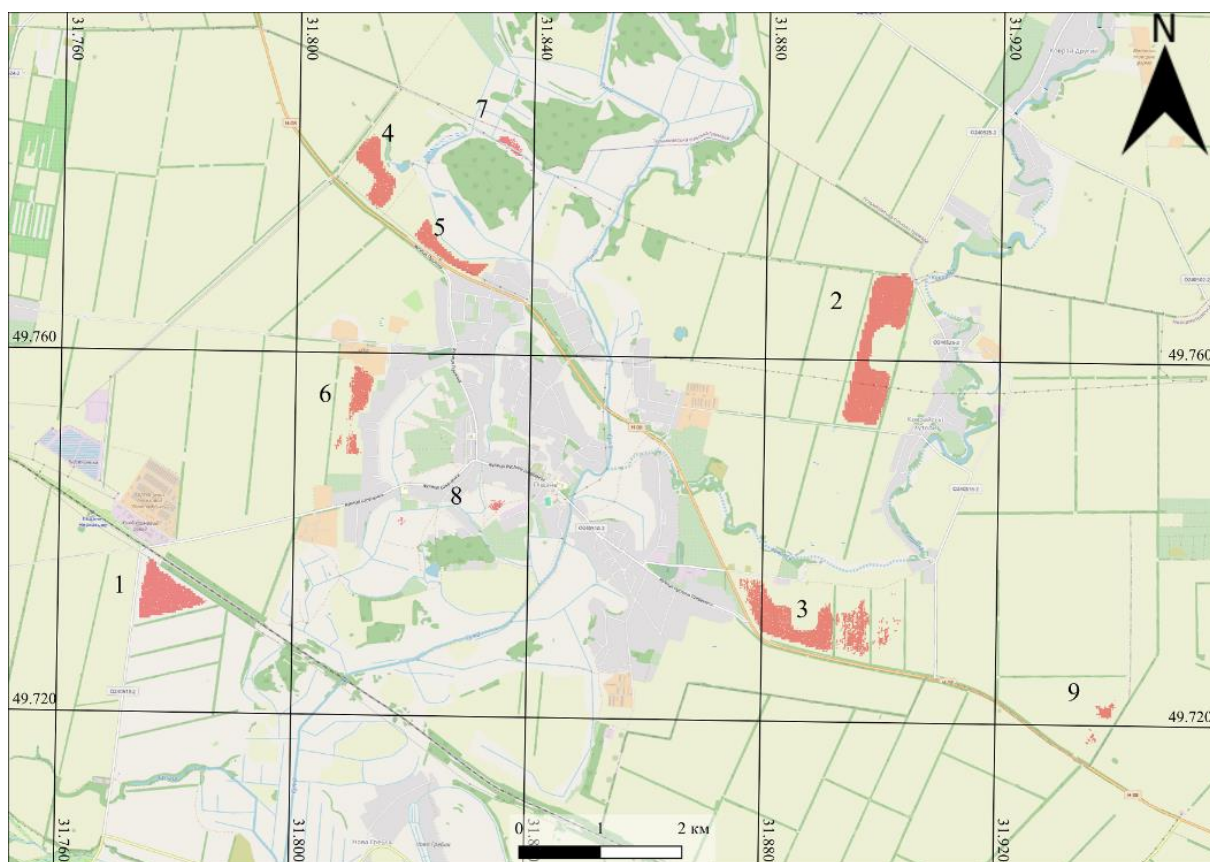


Рис. 2.7 Досліджувана територія з виявленими аномально високими температурами, визначеними з урахуванням локальних умов довкілля

vectorized — Features Total: 704, Filtered: 704, Selected: 0

	id	min	max	mean	stddev	sum	range	count	area
1	1	45,500	46,500	46,037	0,27	59756,268	0,999	1298	129800,000
2	2	45,501	46,499	45,939	0,263	56183,951	0,998	1223	122300,000
3	3	47,509	48,499	48,016	0,268	37884,873	0,99	789	78900,000
4	4	46,501	47,499	46,958	0,285	32870,715	0,998	700	70000,000
5	5	45,500	46,499	46,009	0,259	31700,145	0,999	689	68900,000
6	6	46,501	47,498	47,049	0,289	30911,145	0,997	657	65700,000
7	7	46,501	47,500	46,996	0,279	30735,631	0,998	654	65400,000
8	8	45,509	46,497	46,062	0,282	29893,991	0,988	649	64900,000
9	9	48,515	49,379	48,955	0,224	29960,725	0,865	612	61200,000
10	10	47,507	48,498	47,975	0,286	29312,906	0,991	611	61100,000
11	11	47,502	48,500	47,971	0,284	29022,725	0,998	605	60500,000

Рис. 2.8 Перегляд атрибутів отриманого векторного шару

2.3 Формування геоecологічних індикаторів: обчислення, виявлення геоecологічних параметрів та процесів та побудова карт потенційних геоecологічних небезпек

2.3.1 Супутникові індекси, поверхнева температура та інші обчислення

За методикою оцінювання *стану рослинного покриву* – одного з ключових індикаторів геоecологічного стану річкових басейнів – здійснюється на основі індикаторів вегетаційної активності (табл. 2.2), що кількісно характеризують просторово-часову мінливість біофізичних параметрів рослинності в межах басейну.

Таблиця 2.2

Індекси як індикатори стану рослинного покриву

Індекс	Формула	Першоджерело
NDVI	$\frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	<i>Rouse et al., 1973</i>
GNDVI	$\frac{NIR - GREEN}{NIR + GREEN}$	<i>Gitelson et al., 1996</i>
LCI	$\frac{R_{850} - R_{710}}{R_{850} + R_{680}}$	<i>Datt, 1999</i>
EVI	$G \frac{NIR - RED}{(NIR + C_1 RED - C_2 BLUE) + L}$	<i>Huete et al., 2002</i>
AFVI	$\frac{NIR - 0.66 SWIR_{1.6/2.1}}{NIR + 0.66 SWIR_{1.6/2.1}}$	<i>Karnieli et.al, 2001</i>
NDRE	$\frac{NIR - RE}{NIR + RE}$	<i>Barnes et al., 2000</i>
WDRVI	$\frac{\alpha NIR - RED}{\alpha NIR + RED}$	<i>Gitelson, 2004</i>
CIG	$\frac{NIR}{GREEN} - 1$	<i>Gitelson et al., 2003</i>
CIRE	$\frac{NIR}{RE} - 1$	<i>Gitelson et al., 2003</i>
SAVI, OSAVI	$(1 + L) \frac{NIR - RED}{NIR + RED + L}$	<i>Huete, 1988; Rondeaux et al., 1996</i>

Для LCI: $R_{850}, R_{710}, R_{680}$ – відбивна здатність у відповідних нанометрових діапазонах. Для EVI: $G = 2.5$ – коефіцієнт масштабування, $C_1 = 6, C_2 = 7.5$ –

коефіцієнти корекції аерозолів, $L = 1$ – коефіцієнт освітлення. Для WDRVI: α – ваговий коефіцієнт 0,2 як загалом ефективний. L – коефіцієнт поправки на яскравість ґрунту, визначений (SAVI як 0.5, OSAVI як 0.16) для розміщення більшості типів ґрунтового покриття.

Розрахунок індикатора здійснюється на піксельному рівні з подальшим формуванням просторових розподілів вегетаційної активності в межах просторових одиниць аналізу. Для зменшення впливу випадкових чинників і шумів використовується агрегування значень у часовому вимірі з урахуванням сезонних особливостей розвитку рослинності. Така агрегація дозволяє порівнювати стан рослинного покриття між різними частинами басейну та виявляти зони з підвищеною або зниженою вегетаційною активністю.

Стан водних ресурсів є визначальним компонентом геоекологічного стану річкових басейнів, оскільки саме водний режим забезпечує функціонування природних і природно-антропогенних геосистем та визначає інтенсивність більшості геоекологічних процесів. Для басейнів середніх річок особливо важливими є показники поверхневого та ґрунтового зволоження, стан заплавно-болотних комплексів і динаміка водних об'єктів, які чутливо реагують на кліматичні коливання та антропогенне втручання (Плічко та ін., 2026).

За методикою оцінювання стану водних ресурсів здійснюється на основі сукупності супутникових індикаторів, що відображають просторово-часову мінливість зволоженості, поширення заболочених територій і процеси замулення водних об'єктів (табл. 2.3).

Для AWEI: 1) – для тіньових зон, 2) – для нетіньових зон.

Для оцінювання водних ресурсів використовуються багатоспектральні супутникові дані оптичного діапазону, чутливі до наявності поверхневої вологи та води. Особливе значення мають спектральні канали ближнього та короткохвильового інфрачервоного діапазону, які дозволяють ідентифікувати вологі поверхні, водні об'єкти та заплавні території.

У разі необхідності можуть залучатися радіолокаційні супутникові дані, що забезпечують інформацію про стан поверхні незалежно від хмарності та

дозволяють оцінювати зміну вологості ґрунтів і стан заболочених ділянок. Використання багаторічних часових рядів даних ДЗЗ є обов'язковою умовою для аналізу динаміки водного режиму в межах басейнів.

Таблиця 2.3

Індекси як індикатори стану водних ресурсів

Індекс	Формула	Першоджерело
NDWI	$\frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$	<i>McFeeters, 1996</i>
MNDWI	$\frac{GREEN - SWIR}{GREEN + SWIR}$	<i>Xu, 2006</i>
NDMI	$\frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$	<i>Gao, 1996</i>
NDPI	$\frac{SWIR - GREEN}{SWIR + GREEN}$	<i>Lacaux et al., 2007</i>
NDDI	$\frac{NDVI - NDMI}{NDVI + NDMI}$	<i>Gu et al., 2007</i>
AWEI	1) $4 (Green - SWIR) - (0.25 NIR + 2.75 MIR)$ 2) $BLUE + 2.5Green - 1.5(NIR + SWIR) - 0.25 MIR$	<i>Feyisa et al., 2014</i>
NDTI	$\frac{RED - GREEN}{RED + GREEN}$	<i>Lacaux et al., 2007</i>

Інтерпретація індикаторів водного режиму здійснюється з урахуванням природних особливостей басейну, характеру землекористування та кліматичних умов. Зниження рівня зволоженості, скорочення площ заболочених територій або зростання ознак замулення водних об'єктів можуть свідчити про порушення геоекологічної рівноваги та потенційну геоекологічну небезпеку.

Стан ґрунтового покриття є одним з ключових компонентів геоекологічного стану річкових басейнів, оскільки він визначає умови формування поверхневого та підповерхневого стоку, продуктивність рослинного покриття та стійкість ландшафтів до антропогенних і природних впливів. Для басейнів середніх річок деградаційні процеси ґрунтів, зокрема водна ерозія, вторинне засолення та порушення ґрунтової структури, мають просторово неоднорідний характер і тісно пов'язані з рельєфом, землекористуванням і водним режимом.

За методикою оцінювання стану ґрунтового покриву здійснюється на основі сукупності супутникових та похідних індикаторів, що дозволяють виявляти зони підвищеної ерозійної небезпеки, деградації та потенційної солонцюватості в межах річкових басейнів (табл. 2.4).

Таблиця 2.4

Індекси як індикатори стану ґрунтового покриву

Індекс	Формула	Першоджерело
BSI	$\frac{(SWIR + RED) - (NIR + BLUE)}{(SWIR + RED) + (NIR + BLUE)}$	<i>Chen, 2004</i>
MBI	$0.5 + \frac{SWIR1 - SWIR2 - NIR}{SWIR1 + SWIR2 + NIR}$	<i>Nguyen et al., 2021</i>
NDSI	$\frac{RED - NIR}{RED + NIR}$	<i>Khan et al., 2005</i>
SI	$\frac{RED}{NIR} \text{ АБО } \frac{SWIR}{NIR}$	<i>Rani et al., 2022</i>

Для аналізу ґрунтового покриву використовуються багатоспектральні супутникові дані оптичного діапазону, цифрові моделі рельєфу та допоміжні картографічні матеріали. Оптичні дані забезпечують інформацію про стан поверхні та рослинного покриву, що дозволяє опосередковано оцінювати деградаційні процеси ґрунтів.

Цифрові моделі рельєфу застосовуються для розрахунку морфометричних показників, які визначають схильність територій до розвитку ерозійних процесів. Поєднання супутникових і морфометричних даних створює основу для просторового аналізу ґрунтових процесів у межах басейнів.

Результати оцінювання ґрунтових індикаторів агрегуються в межах басейнових одиниць аналізу, що дозволяє порівнювати рівень деградації ґрунтів між різними частинами басейну. Аналіз просторово-часової динаміки здійснюється на основі багаторічних часових рядів, що дозволяє виявляти тенденції посилення або стабілізації деградаційних процесів.

У межах методики індикатори ґрунтового покриву аналізуються у взаємозв'язку з показниками вегетаційної активності, зволоженості та теплового

режиму, що забезпечує комплексну оцінку геоекологічних процесів у межах басейну.

Тепловий режим земної поверхні є важливим індикатором геоекологічного стану річкових басейнів, оскільки він відображає сукупний вплив кліматичних умов, водного режиму, властивостей ґрунтового покриву, стану рослинності та антропогенного навантаження. Для басейнів середніх річок аналіз поверхневої температури дозволяє виявляти зони порушення природного теплообміну, деградації ландшафтів і змін гідрологічних умов.

За методикою оцінювання теплового режиму здійснюється на основі супутникових даних теплового інфрачервоного діапазону з використанням індикаторів поверхневої температури та просторового аналізу теплових аномалій.

Супутникові температурні знімки (Landsat), отримані за допомогою термального інфрачервоного сенсора TIRS (Thermal Infrared Sensor), є важливим джерелом інформації для моніторингу температурних змін на земній поверхні. Це особливо актуально в умовах зміни клімату, оскільки такі дані дозволяють виявляти тенденції потепління, перегріву урбанізованих територій та зміни вологості ґрунтів (*Lischenko et al., 2017*).

Використовувати канал поверхневої температури як продукт Landsat колекції 2 рівня 2 є прийнятним (*U.S. Geological Survey, 2020*). Щоб коректно інтерпретувати дані температури поверхні, достатньо застосувати масштабний коефіцієнт для перетворення цифрових значень (DN) у температурні значення в градусах та виконати розрахунок за спрощеною формулою (*Earth Resources Observation and Science Center, 2020*):

$$LST = DN \times 0.00341802 - 124.15, \quad (2.2)$$

Однак модель відбиття, яка представлена продуктом ASTER Global Emissivity Dataset, має значні недоліки:

- відносно низька просторова розрізненість (90 м);
- низька частота оновлення (раз на кілька місяців);

- хмарність може маскувати частину досліджуваної території та спотворювати температуру для цієї частини досліджуваної поверхні.

Тому для кращого результату необхідно перераховувати температуру, наприклад, на основі залежності NDVI (*Lubskyi et al., 2025b*).

Поверхнева температура визначається за допомогою закону Планка, адаптованого для супутників Landsat (*Chander et al., 2009*):

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_s} + 1\right)}, \quad (2.3)$$

де T – це LST (K); L_s – спектральна яскравість земної поверхні в тепловому діапазоні після атмосферної корекції, K_1 and K_2 константи для адаптації закону Планка до даних Landsat.

Для точної оцінки температури поверхні суші необхідно ввести в рівняння дані про яскравість, враховуючи вплив атмосфери та коефіцієнт теплового випромінювання земної поверхні. Використовується наступна модель корекції (*Yu et al., 2014*):

$$L_s = \frac{L_i - L_i^\uparrow}{\varepsilon_i \tau_i} - \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} L_i^\downarrow, \quad (2.4)$$

де:

L_i – випромінювання у верхній частині атмосфери в спектральному діапазоні i ;

$L_i^\uparrow$, $L_i^\downarrow$, τ_i – параметри впливу атмосфери на теплове випромінювання, надані супутниковими даними;

ε_i – випромінювальна здатність земної поверхні в спектральному діапазоні i .

Потім отримані значення яскравості включаються в рівняння Планка для визначення температури.

Для виявлення теплових аномалій застосовується аналіз відхилень температурних значень від середніх показників, характерних для відповідних сезонів або типів поверхні. Такий підхід дозволяє виділяти ділянки з аномально підвищеними або зниженими температурами, що можуть бути пов'язані з

порушенням водного режиму, деградацією рослинного покриву або антропогенним впливом.

Аналіз просторово-часової динаміки теплового режиму здійснюється на основі багаторічних часових рядів, що дозволяє виявляти тенденції зміни температурних характеристик і оцінювати стабільність теплового балансу в межах басейну.

Інтерпретація теплових аномалій здійснюється з урахуванням взаємозв'язку теплового режиму з іншими геоекологічними індикаторами. Ділянки з підвищеними значеннями поверхневої температури за відсутності відповідного зниження вегетаційної активності можуть бути пов'язані з антропогенними трансформаціями поверхні або особливостями землекористування.

Поєднання даних про тепловий режим з показниками зволоженості та стану рослинного покриву дозволяє диференціювати кліматично зумовлені температурні зміни від змін, спричинених порушенням геоекологічної рівноваги в межах басейну.

Оцінювання теплового режиму поверхні є важливим етапом супутникового геоекологічного аналізу, оскільки теплові індикатори інтегрують вплив різних природних і антропогенних чинників. Застосування аналізу поверхневої температури та теплових аномалій у межах басейнового підходу забезпечує можливість раннього виявлення деградаційних процесів і підвищує інформативність комплексної оцінки геоекологічного стану басейнів середніх річок.

Клімато-екологічні показники є важливою складовою геоекологічного стану річкових басейнів, оскільки вони відображають реакцію природно-антропогенних систем на зміну кліматичних умов та екстремальні прояви погодно-кліматичних факторів. Для басейнів середніх річок лівобережжя Дніпра особливе значення мають небезпеки, пов'язані з посушливими періодами та підвищеною пожежонебезпечністю, які мають кумулятивний вплив на рослинний покрив, ґрунти та водний режим.

У межах методики клімато-екологічні показники розглядаються як інтегровані індикатори, що формуються на основі поєднання даних ДЗЗ про стан поверхні та кліматичних характеристик і відображають просторову диференціацію вразливості територій у межах басейну.

Для оцінювання клімато-екологічних показників використовуються супутникові дані оптичного та теплового діапазонів, а також кліматичні й метеорологічні показники, представлені у вигляді багаторічних часових рядів. Супутникові індикатори відображають стан рослинного покриву, поверхневе зволоження та тепловий режим, які є чутливими до кліматичних аномалій.

Антропогенний вплив є важливою складовою геоекологічного стану річкових басейнів, оскільки він безпосередньо змінює природні умови функціонування геосистем і визначає характер трансформації ландшафтів. Для басейнів середніх річок лівобережжя Дніпра антропогенне навантаження проявляється насамперед у зміні структури земного покриву, урбанізації, розвитку транспортної та меліоративної інфраструктури, а також у порушенні природного водного режиму.

Оскільки NDBI відображає ступінь антропогенної трансформації поверхні, а інтегральний показник геоекологічної напруги характеризує співвідношення дестабілізуючих і стабілізуючих чинників (табл. 2.5), між цими показниками очікується висока кореляція. Забудовані території, що мають високі значення NDBI, зазвичай характеризуються підвищеною геоекологічною напругою.

Таблиця 2.5

Індекси як індикатори антропогенного впливу

Індекс	Формула	Першоджерело
NDBI	$\frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR}$	<i>Zha et al., 2003</i>
ІПГН	$\frac{\sum \text{д. к.} - \sum \text{е. к.}}{N}$	<i>Ковальчук & Петровська, 2003; Мучак & Filipovich, 2010</i>

Для ІПГН: $\sum \text{д. к.}$ – сума балів дестабілізуючих чинників, $\sum \text{е. к.}$ – екостабілізуючих, N – загальна кількість чинників.

Для рівнинної території до дестабілізуючих чинників відносяться сільськогосподарські угіддя, будівлі, штучні поверхні, кар'єри, родовища, яри тощо з модифікацією (Габчак, 2008) (табл. 2.6).

Таблиця 2.6

Оцінка дестабілізуючих чинників

№	Чинник техногенного впливу на рельєф та інші компоненти довкілля	Коефіцієнт сили впливу	1 бал	2 бали	3 бали	4 бали	5 балів
1	Сільськогосподарські угіддя	2,0	<15	15–30	31–45	46–60	>61
2	Господарські будівлі і двори	1,5	<0,35	0,35–0,60	0,61–0,90	0,91–1,20	>1,20
3	Господарські шляхи і дороги	1,5	<0,5	0,5–1,0	1,1–1,5	1,6–2,0	>2,0
4	Житлова забудова	1,6	<0,4	0,4–0,8	0,9–1,2	1,3–1,6	>1,6
5	Землі промисловості	1,6	<0,05	0,05–0,10	0,11–0,15	0,16–0,20	>0,20
6	Транспорт і зв'язок	1,5	<0,2	0,2–0,4	0,5–0,7	0,8–1,0	>1,0
7	Інженерно-технічна інфраструктура	1,6	<0,01	0,01–0,02	0,03–0,06	0,07–0,08	>0,08
8	Кар'єри і відкриті родовища	1,3	<0,11	0,11–0,22	0,23–0,33	0,34–0,45	>0,45
9	Кам'янисті, піщані землі, яри	1,2	<0,10	0,10–0,20	0,21–0,30	0,31–0,40	>0,40

Для рівнинної території до екостабілізуючих чинників відносяться ліси, зелені насадження, природоохоронні землі, внутрішні води тощо (табл. 2.7).

Таблиця 2.7

Оцінка екостабілізуючих чинників

№	Чинник	Коефіцієнт сили впливу	1 бал	2 бали	3 бали	4 бали	5 балів
1	Ліси та лісовкриті площі	2,0	<5	5–10	11–15	16–20	>20
2	Зелені насадження	1,2	<0,01	0,01–0,02	0,03–0,04	0,05–0,06	>0,06
3	Природоохоронні, оздоровчі землі	1,5	<0,2	0,2–0,3	0,4–0,5	0,6–0,7	>0,7
4	Внутрішні води	2,0	<0,5	0,5–1,0	1,0–1,5	1,6–2,0	>2,0

Ця формула дозволяє оцінити баланс між чинниками, що погіршують стан геосистеми, та тими, що його стабілізують. Території з високим значенням показника характеризуються підвищеною геоекологічною напругою. Класифікація наступна: показник ІПГН до 0,2 означає практично відсутню

напругу на території, від 0,2 до 0,6 – слабку, від 0,6 до 1 – помірну, від 1 до 2 – високу, більше 2 – кризову.

У межах методики також застосовується **класифікація** угідь як інструмент кількісного оцінювання антропогенного впливу, оскільки дозволяє простежити просторовий розподіл і площинне співвідношення категорій землекористування в басейні.

Застосування інтегрального показника геоекологічної напруги та класифікації угідь формує узагальнену картину просторової організації антропогенного впливу в межах басейну, дозволяючи співвіднести рівень дестабілізації геосистеми з характером її землекористування. Однак для повного розуміння причин і механізмів формування цього впливу необхідно перейти від інтегральних оцінок до аналізу конкретних геоекологічних параметрів і процесів, що визначають просторово-часову динаміку природних та антропогенних компонентів. Саме вони забезпечують змістовну інтерпретацію стану басейнової системи та становлять основу подальшого методичного блоку.

2.3.2 Геоекологічні параметри та процеси: методи їх виявлення й інтерпретації та валідація

Під геоекологічними параметрами та процесами розуміють характеристики просторово-часової динаміки та взаємодії природних і антропогенних компонентів у межах цілісних геосистем. Біофізичні показники, що відображають ці процеси, виступають індикаторами в оцінюванні геоекологічного стану басейнових систем.

З урахуванням спільних природних умов, характерних для території середніх річок лівобережжя Дніпра, структури землекористування та спектра найбільш поширених негативних процесів у межах методики запропоновано 10 геоекологічних процесів та параметрів, що характеризують геосистему (табл. 2.8). Кожен індикатор розглядається як складова інтегральної системи оцінювання геоекологічного стану, а не як ізольований показник. Перелік

індексів як індикаторів сформовано з урахуванням локальних особливостей території, що зумовило невикористання частини спектральних індексів, які на досліджуваній місцевості не проявляють інформативних ознак.

Таблиця 2.8

Інтеграція геоекологічних індикаторів у межах методики

Геоекологічні параметри і процеси	Інтерпретація	Перший індекс	Другий індекс	Третій індекс
Деградація рослинності	Втрата біомаси, пригнічення рослинності, стресові стани, оголення ґрунту	NDVI	SAVI	
Дефіцит вологи та посуха	Зменшення запасів вологи у ґрунті та рослинності, формування умов посушливості	NDMI	NDDI	
Зменшення площі водного дзеркала	Скорочення відкритих водних поверхонь, зміна водного балансу, пересихання або деградація водойм	NDWI	AWEI	
Заболочення	Формування надмірного зволоження, застій води, розвиток мілководдя та болотних процесів	NDPI	MNDWI	
Підтоплення	Підвищення рівня ґрунтових вод, періодичне або постійне затоплення поверхні, порушення дренажу	NDPI	MNDWI	
Збільшення антропогенного навантаження	Розширення площ забудови, посівних площ, зростання техногенного впливу	NDBI		
Ерозійні процеси	Розвиток площинної та лінійної ерозії, суфозійні процеси, порушення ґрунтового покриву	NDVI	NDMI (NDWI)	NDDI
Температурний режим	Просторово-часова динаміка температури поверхні, розрахунок річного приросту та середньостатистичних значень	LST	NDVI	
Теплове навантаження	Виявлення локального перегріву, розрахунок середньостатистичної температури	LST	NDVI	
Пожежонебезпечність	Аналіз ймовірності виникнення пожеж, оцінка умов, що сприяють займанню та поширенню вогню	NDVI	NDWI	NDDI, LST, ET

Деградація рослинності. Індикаторами цього процесу є динамічні показники (аналіз часових рядів) індексів **NDVI** та **SAVI**, що мають негативний тренд.

Дефіцит вологи та посуха. Індикаторами цього процесу є динамічні показники (аналіз часових рядів) **або** значення певного діапазону індексів **NDMI**

та NDDI. Для NDMI характерні негативна динаміка та від'ємні значення індексу, тоді як для NDDI – протилежні: позитивна динаміка та додатні значення.

Зменшення площі водного дзеркала. Індикаторами цього процесу є динамічні показники (аналіз часових рядів) індексів **NDWI та AWEI**, що мають негативний тренд.

Заболочення. Індикаторами цього процесу є динамічні показники (аналіз часових рядів) **або** значення індексів **MNDMI та NDPI** у відповідних діапазонах. Для обох характерною є позитивна динаміка, однак при фрагментарному аналізі корисні значення індексу MNDMI зосереджені в межах 0–0,2, тоді як для NDPI – у межах від -0,2 до 0,2. Заболочення відображає стійке накопичення вологи та формування перезволожених ділянок, що зумовлюють слабкий водний сигнал і відповідну поведінку індексів.

Підтоплення. Індикаторами цього процесу є динамічні показники (аналіз часових рядів) **або** значення індексів **MNDMI та NDPI** у відповідних діапазонах. Для MNDMI характерні позитивна динаміка та значення індексу в межах 0,2–0,5, тоді як для NDPI – негативна динаміка та від'ємні значення індексу. Це пов'язано з тим, що підтоплення відображає появу тимчасових поверхневих вод, які формують сильніший водний сигнал порівняно із заболоченням. Таким чином, попри використання тих самих індексів, процеси мають різну фізичну природу, динаміку та спектральні прояви, що обґрунтовує їхнє розмежування в межах методики.

Збільшення антропогенного навантаження. Індикаторами цього процесу є динамічні показники (аналіз часових рядів) **або** додатні значення індексу **NDBI**. Оскільки NDBI відображає ступінь урбанізованості та техногенної трансформації поверхні, його показники мають демонструвати високу кореляцію з інтегральним показником геоекологічної напруги, який узагальнює співвідношення дестабілізуючих і екостабілізуючих чинників у басейновій системі. Роль ПІГН у цьому процесі – бути контрольним критерієм достовірності індикатору, і кореляція між ними має бути високою.

Ерозійні процеси. Під ерозійними процесами розуміють лінійну (площинну) ерозію та суфозію. Індикаторами цього процесу є додатні значення індексу **NDVI** та негативні значення **NDWI (NDMI)** за емпірично визначеними порогоми. Достовірність даних забезпечують морфометричний аналіз DEM та проведення польових досліджень.

Морфометричний аналіз ЦММ виконується для визначення геоморфологічних умов розвитку процесів і пошуку потенційних форм ерозійних процесів для польових досліджень (*Tatariko et al., 2024*). Круті, дренавані та конвергентні ділянки інтерпретуються як потенційно небезпечні щодо лінійної ерозії, тоді як пологі зони акумуляції вологи – як можливі осередки суфозії. ЦММ використовується для встановлення морфодинамічного контексту, а не для детектування мікрорельєфу.

Спектральний аналіз мультиспектральних знімків високої просторової розрізненості з розрахунком вегетаційних і вологоіндикативних індексів (NDVI, NDWI тощо) слугує процедурою раннього виявлення ерозійних форм. Суфозія – внутрішня форма ерозії, коли вода вимиває дрібні частинки ґрунту, призводить до дисперсної структури порід, що осідають нерівномірно, а точково (*Khaksar & Faghihmaleki, 2016*). Суфозійні прояви ідентифікуються як аномалії зі стабільними відхиленнями індексів від фонового рівня, а лінійна ерозія – як видовжені смуги оголеного або деградованого покриву, просторово узгоджені з напрямком стоку. У літній період часу ці форми накопичують вологість і створюють сприятливі умови для розвитку вегетації порівняно з рівнинними територіями. Різночасовий аналіз дозволяє відокремити стабільні деградаційні прояви від тимчасових агротехнічних чи фенологічних змін. Виявлення суфозійних форм у межах орних земель ускладнюється регулярною оранкою та вирівнюванням поверхні, що маскує мікроморфологічні ознаки

Результати знімання БПЛА використовуються для ідентифікації та оцифрування контрольних об'єктів, підбору порогів, а точки польових вимірювань вологості й температури ґрунту зіставляються зі спектральними та морфометричними даними для підтвердження природи виявлених аномалій.

У межах дослідження пропонується використовувати два основні показники деградації орних земель: кількісний – площу виявлених деградованих ділянок, та якісний – тип встановленого процесу деградації (суфозія або лінійна ерозія).

Запропонований підхід має суттєвий недолік – фрагментацію посівних культур та культивування, якої можна уникнути шляхом виявлення аномальних зон для кожної окремої ділянки з урахуванням вологості та вегетації.

Температурний режим. Це сукупність закономірностей зміни температури в часі та просторі, що характеризує її середні, екстремальні, добові, сезонні та багаторічні коливання для певної території або об'єкта (*World Meteorological Organization, 1992*). Індикаторами цього процесу є динамічні показники (аналіз часових рядів) **середньостатистичних даних та річного приросту** за тривалий період знімання або кліматичну норму (30–40 років).

Для дослідження річного приросту необхідно застосувати регресійний аналіз. Для побудови просторового розподілу багаторічної динаміки отриманих температур використовується градієнт обчисленої регресії, або кутовий коефіцієнт, який за своєю фізичною суттю відображає середньорічний приріст значення показника. Використання лінійної регресії доцільно для відібраних часових рядів з піковими температурами, тобто термін зйомки кожного знімка припадає на липень–серпень; такий підхід уникає вплив сезонних коливань.

Найпоширенішим методом обчислення регресійної залежності є метод найменших квадратів, який зводить задачу до пошуку коефіцієнтів лінійної залежності, що мінімізують значення функції двох змінних – a та b . Тобто, для заданих даних a і b сума квадратів відхилень експериментальних значень від отриманої прямої буде найменшою. Лінійну одновимірну регресію можна подати у такому вигляді:

$$R(x, y) = x \cdot a + b, \quad (2.5)$$

де x – незалежна змінна (рік), y – залежна змінна (температурне значення), a – нахил (кутовий коефіцієнт), що відображає швидкість зміни показника, b – вільний член, який визначає початкове значення при нульовому році.

На прикладі розрахунку приросту температури (рис. 2.9) показано лінійну залежність температурних значень у часовому ряді. Обчислення виконується попіксельно, що дає змогу визначати приріст температури індивідуально для кожного пікселя на основі всіх доступних знімків (*сині точки*). *Червона лінія* відображає регресійну пряму, яка характеризує динаміку температури в часі; її кутовий коефіцієнт відповідає річному приросту показника. Застосування нелінійної регресії є можливим і більш доцільним, однак не входило до завдань цього дослідження.

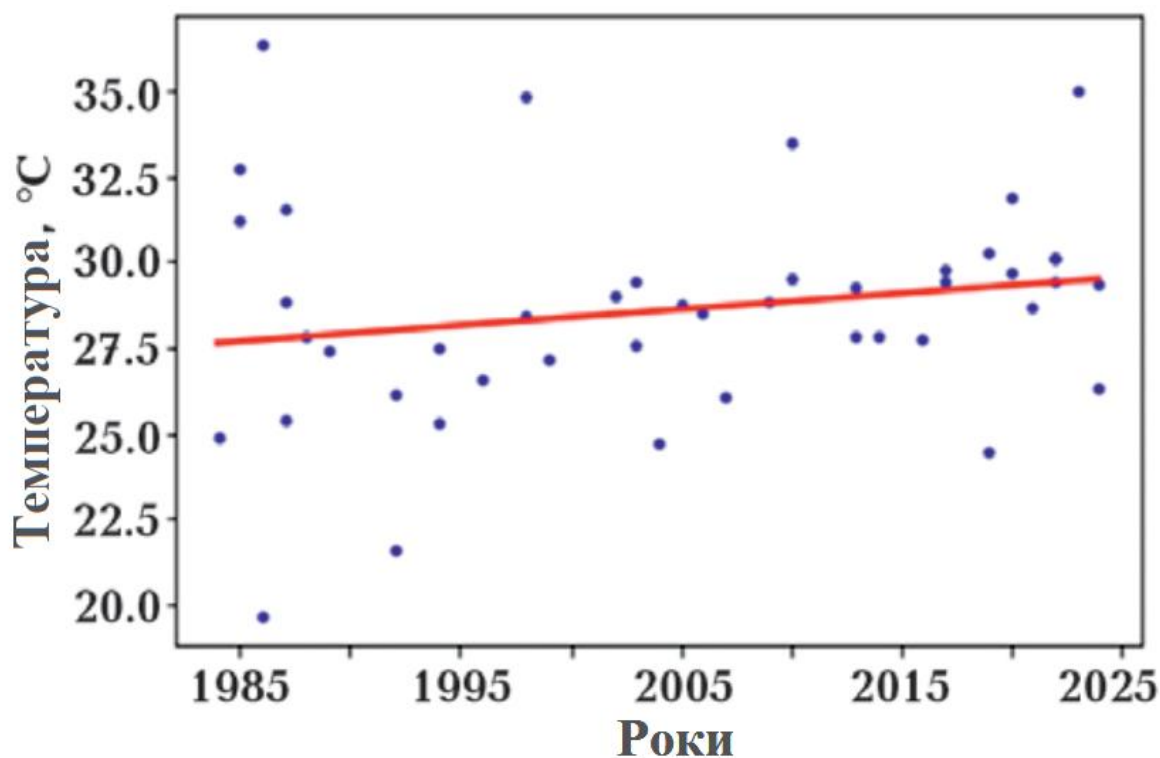


Рис. 2.9 Приклад регресійної залежності на основі часової послідовності значень показника температури за 40 років

Теплове навантаження. Це показник інтенсивності теплового впливу, який відображає ступінь теплового стресу геосистеми. Індикаторами цього процесу слугують аномальні значення актуального фрагментарного знімка температурного поля, отримані для конкретної пікової теплової події (липень-серпень).

Пожежонебезпечність. Індикаторами цього процесу є вміст вологості в ґрунті, стан рослинності, їх пропорції, а також температура поверхні та випаровування води через рослини та інші поверхні.

Пожежі належать до найвагоміших чинників деградації природних і агроландшафтів, що зумовлюють зміни у структурі рослинного покриву, вологості ґрунтів та мікрокліматичних умовах території. Особливо вразливими до таких впливів є водно-болотні угіддя, які виконують ключові регуляційні функції в екосистемах.

У контексті геоecологічного картографування пожежонебезпечність може розглядатися як індикатор порушення ecологічної рівноваги території, що проявляється через зниження вологості рослинності та ґрунтів, підвищення температури земної поверхні, скорочення площ природних водно-болотних угідь і деградацію рослинного покриву. Такі зміни фіксуються засобами дистанційного зондування Землі та можуть бути оцінені шляхом аналізу спектральних індексів, які характеризують стан рослинності, вологозабезпечення та тепловий режим території.

Параметр має відповідати кільком принципам: сухості рослинності, дефіциту вологи, стану зеленого покриву, теплового навантаження та випаровуваності.

Визначення релевантних індексів та змінних залежатиме від типу території (торфовища, ліси, сільськогосподарські, торфово-болотні угіддя). Для оцінювання території на ймовірність виникнення пожежі необхідно мати комплекс достатньої інформації для дослідження подій пожежоутворення, сформованих на їх основі вагові коефіцієнти та значення порогів для кожного з індикаторів, а саме:

- вологість ґрунтів (NDMI або NDWI),
- стан рослинності (NDVI),
- показники посушливості (NDDI),
- температура поверхні (LST),

- евапотранспірація (ET).

Формула індексу пожежонебезпечності (ІПН) має наступний вигляд:

$$\text{ІПН} = \sum w_i X_i, \quad (2.6)$$

де w – вагові коефіцієнти для індексів, X – нормовані значення LST, NDVI, NDWI, NDDI, ET.

Такий підхід відповідає сучасним методикам оцінки потенційної небезпеки займання, оскільки поєднує показники стану рослинності, поверхневої вологості, дефіциту вологи та температурного режиму, а ET виступає інтегральним індикатором водного балансу.

На відміну від індексу Fire Weather Index (FWI), що ґрунтується переважно на метеорологічних параметрах (*Fedorov et al., 2022*), ІПН ґрунтується на супутникових показниках стану земної поверхні та рослинного покриву, що безпосередньо відображають умови формування та поширення пожеж.

Для деяких індексів необхідно здійснити попередню обробку діапазону значень. Наприклад, для розрахунку пожежонебезпечності торфово-болотних угідь не потрібно брати весь діапазон значень NDVI, оскільки діапазон значень до 1 відповідає за воду, а це є шум для даного завдання. Вегетація в даному випадку розглядається як пальне, де чим вищий показник, тим він безпечніший. Для температури та інших задіяних індексів діяти за подібним принципом.

Запропонований ІПН представлено як **адаптовану індексну модель**, яка концептуально спирається на ту ж логіку, що FWI: пожежонебезпечність залежить не лише від погоди, а й від фактичного стану поверхні, вологості та рослинного покриву (*Ліщенко та ін., 2024a*).

Підбір вагових коефіцієнтів здійснюється емпірично на основі аналізу індексних показників зафіксованих локальних пожеж з урахуванням погодних умов і виявлення залежностей задіяних індексів за бінарним принципом небезпеки (*Філіпович & Маргес, 2025*). Для цього рекомендовано використання даних ERA5, оскільки вони забезпечують щоденні дані, які можуть стати

основою для коригування даних, враховуючи приріст. Перелік подій пожежоутворення забезпечується даними FIRMS.

Результатом застосування методики є карта просторового розподілу пожежонебезпечності територій, яка відображає ділянки з різним ступенем небезпеки та може бути використана для моніторингу, превентивного реагування і природоохоронного планування.

ІПН – це узагальнений показник, який поєднує декілька незалежних супутникових індикаторів, що відображають ключові фактори формування пожежонебезпечної ситуації: стан рослинності, поверхневу та ґрунтову вологість, дефіцит вологи, температурний режим та інтенсивність випаровуваності (евапотранспірації).

Валідація результатів є завершальним етапом методики супутникового геоecологічного аналізу і спрямована на перевірку достовірності отриманих обрахунків, картографічних моделей та виявлених просторових закономірностей. Її проведення забезпечує обґрунтованість інтерпретації супутникових індикаторів і підтверджує придатність розроблених підходів для аналізу геоecологічного стану басейнових систем.

Перевірка результатів здійснюється шляхом зіставлення супутниково отриманих оцінок із наземними спостереженнями, фотофіксацією, матеріалами безпілотного знімання, супутниковими зображеннями вищої просторової розрізненості, картографічними та архівними джерелами, а також офіційними екологічними і статистичними матеріалами. Такий підхід дає змогу оцінити відповідність дистанційно виявлених ознак реальному стану природних і природно-антропогенних геосистем (*Samoilenko et al., 2025*).

Валідація має як якісний, так і кількісний характер: з одного боку, перевіряється правильність інтерпретації виявлених аномалій і процесів, а з іншого – оцінюється точність просторового збігу, площинних характеристик і класифікаційних результатів.

Отже, валідація не є окремою допоміжною процедурою, а виступає невід’ємною складовою методики, яка забезпечує наукову обґрунтованість, відтворюваність та практичну придатність отриманих результатів.

2.3.3 Нормалізація, агрегація та формування карти потенційних геоекологічних небезпек

Після валідації результатів аналізу геоекологічних параметрів і процесів починається процес нормування значень результуючих даних для їх подальшої агрегації з метою формування карти потенційних геоекологічних небезпек.

Нормування здійснюється за усталеною науковою процедурою (min-max), що передбачає приведення значень до уніфікованого діапазону від 0 до 1. Такий підхід широко застосовується в екологічному моделюванні та геоінформаційному аналізі, оскільки забезпечує порівнюваність різнотипних індикаторів і коректність їх інтеграції в межах єдиної оцінювальної системи (Sinsomboonthong, 2022; Firmansyah, 2024). У окремих випадках попередньо виконується фільтрація значень з їх нормуванням або стандартне маскування. Після нормалізації даних наступним етапом є їх агрегація.

$$X_n = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (2.7)$$

де X_n – це нормоване значення масиву, $X_{\max}$ – це максимальне значення, $X_{\min}$ – це мінімальне значення.

Також застосовується реверсне нормування значень:

$$X_n = \frac{X_{\max} - X}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (2.8)$$

Агрегація результатів у даному дослідженні розуміється як процес поєднання нормалізованих індикаторів у спільний інтегральний масив. Кожен із десяти індикаторів попередньо приведено до єдиної шкали з максимальним значенням 1, що забезпечує їхню порівнянність та унеможливорює домінування будь-якого показника через різні одиниці виміру. Завдяки цьому агрегація реалізується шляхом простого адитивного підсумовування: у точках

просторового перетину значення індикаторів накопичуються, формуючи сумарний рівень потенційної геоекологічної небезпеки. Чим більше індикаторів досягають високих значень у певній локації, тим вищим є інтегральний показник, що відображає одночасну дію кількох несприятливих чинників. Такий підхід відповідає сучасним підходам до інтеграції просторової інформації (Zhang *et al.*, 2004).

Формування карти потенційних геоекологічних небезпек здійснюється шляхом віднесення отриманих інтегральних значень до відповідних класів оцінювання геоекологічного стану. Для цього застосовується порогова класифікація, у межах якої виділяються чотири градації: **безпечний** стан відповідає значенням агрегації до 2, **напружений** – до 3, **кризовий** – до 4 та **катастрофічний** – понад 5. Така система порогів забезпечує узгоджене інтерпретування сумарних індикаторних значень і дозволяє просторово окреслити території з різним рівнем потенційної геоекологічної небезпеки.

У цьому дослідженні потенційна геоекологічна небезпека трактується як просторове накопичення високих значень кількох індикаторів, що вказує на можливість розвитку небажаних геоекологічних процесів, але не означає їхню фактичну реалізацію. Такі зони можуть свідчити, зокрема, про інтенсивні урбанізаційні трансформації, що потребують обов'язкового посилення заходів із озеленення та формування екологічно стабільних елементів міського середовища або про несприятливі умови для ведення аграрного виробництва, пов'язані зі зниженням продуктивності культур через деградацію ґрунтів, порушення водного режиму.

Наведені приклади не є вичерпними: потенційна геоекологічна небезпека може також проявлятися у формі інших процесів, що свідчать про підвищену чутливість території до геоекологічних змін та потребують відповідного моніторингу й управлінських рішень.

Висновки до другого розділу

1. Розроблено комплексну методику супутникового геоecологічного аналізу басейнів середніх річок, що ґрунтується на басейновому принципі та передбачає послідовне виконання етапів від формування інформаційної бази і попередньої обробки супутникових даних до інтегрального оцінювання геоecологічного стану й побудови карт потенційних геоecологічних небезпек.

2. Обґрунтовано інформаційно-технологічне забезпечення методики, яке базується на комплексному використанні багатоспектральних, теплових, кліматичних, морфометричних і наземних даних різної просторової розрізненості. Запропоновано функціональний розподіл програмних середовищ, що забезпечує ефективну реалізацію окремих етапів аналізу та високу відтворюваність результатів.

3. Сформовано систему геоecологічних індикаторів, яка інтегрує показники стану рослинного покриву, водних ресурсів, ґрунтів, температурного режиму, клімато-ecологічних умов і антропогенного навантаження. Комплексне використання цих індикаторів забезпечує багатофакторне оцінювання просторово-часової динаміки геоecологічних процесів у межах річкових басейнів.

4. Удосконалено методичний підхід до інтеграції різнорідних супутникових показників шляхом їх нормування, просторового узгодження та агрегування в єдиній системі оцінювання, що забезпечує порівнюваність результатів незалежно від фізичної природи показників, їх діапазонів значень і джерел отримання.

5. Запропоновано авторські програмно-алгоритмічні рішення для автоматизації аналізу геопросторових даних, зокрема, плагін Anomalies to contours для QGIS, який реалізує автоматизоване статистичне виявлення, векторизацію та аналіз просторових аномалій растрових даних, що підвищує оперативність, об'єктивність і відтворюваність геоecологічних досліджень.

6. Розроблена методика має універсальний характер, оскільки орієнтована переважно на відкриті супутникові дані та програмне забезпечення, допускає використання комерційних джерел підвищеної просторової розрізненості за потреби та може бути адаптована для геоекологічного аналізу інших басейнів середніх річок зі схожими природними умовами.

РОЗДІЛ 3. АПРОБАЦІЯ МЕТОДИКИ СУПУТНИКОВОГО ГЕОЕКОЛОГІЧНОГО АНАЛІЗУ НА ПРИКЛАДІ БАСЕЙНУ РІЧКИ СУПІЙ

3.1 Характеристика басейну річки Супій як об'єкта апробації

Басейн річки Супій використано як модельну територію для апробації методики, оскільки він не тільки є найменшим за площею серед групи середніх річок лівобережжя Дніпра та слабо вивченим, а ще поєднує типові для них природні умови та спектр актуальних геоecологічних проблем: трансформацію заплав, меліорацію, значне сільськогосподарське освоєння, деградацію торфово-болотних комплексів, активні ерозійно-суфозійні процеси та просторово неоднорідний тепловий режим. Така комбінація чинників дозволяє перевірити методику не на ізолюваному процесі, а на комплексній природно-антропогенній басейновій системі, що дозволяє оцінити універсальність і практичну придатність розробленої методики.

Супій – це молода річка лівобережжя Дніпра із слабо розвинутими терасовими комплексами. Її довжина сягає 144 км. Бере свій початок з болота біля села Свидовець Чернігівської області, проходить територією Київської та Черкаської областей та впадає у Дніпро через р.Довгун (рис. 3.1). Загальний напрям течії – меридіональний. Характерно, що найвужчі ділянки долини приурочені до периферійної частини позитивної морфоструктури центрального типу (Дерій, 2007).

Долина річки Супій широка (від 2 до 2,6 км), з пологими схилами. У долині виділяються два терасні рівні: заплава і I (деснянська) надзаплавна тераса. Заплава двостороння, являє собою низове болото, шириною від 500 м до 3-3,5 км, висотою над урізом води від 0,5 до 1,0 м. Складена переважно торфом, ближче до схилів – супісками і суглинками заторфованими (Дерій, 2007).

Долину річки Супій, а саме територія від м.Яготин та до впадіння її у Дніпро, Корпачев (1949) охарактеризував як особливу з малою кількістю, і при

цьому вельми дрібних, приток. А дно річки суцільно виконано торфом. Вище по течії піски поступаються алювіальним суглинкам, передусім болотному мергелю, прикритим торф'яними відкладами потужністю 5–6 м.

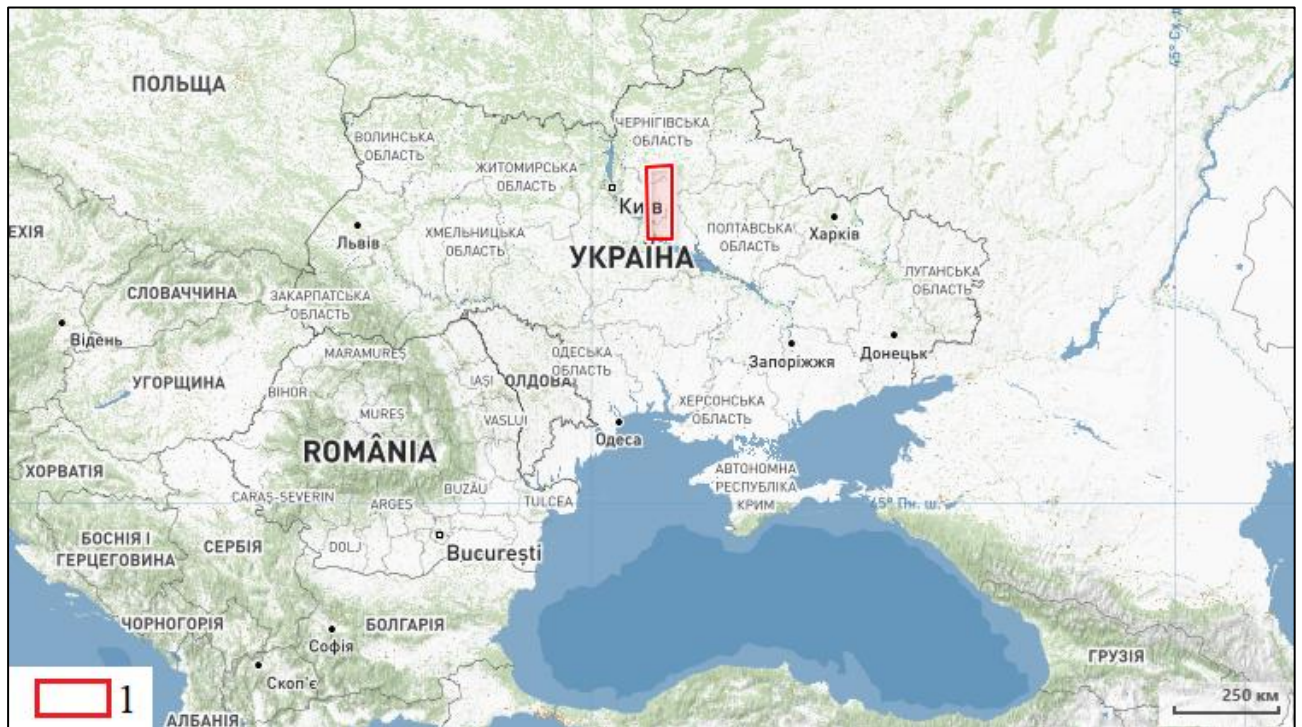


Рис. 3.1 Розташування басейну р.Супій в межах України

Умовні позначення: 1) територія дослідження.

Річище майже на всьому протязі каналізоване. Похил річки 0,35 м/км. Живлення мішане, основне – снігове. Замерзає наприкінці листопада, скресає у 2-й половині березня. Є водосховище (озеро Супій, м.Яготин). Використовується для водопостачання. Розподіл річки за основним видом її використання осушні меліорації, а південна частина також поділяє зрошення (*Швець та ін., 1957*).

Перше осушення долини Супою розпочалося з розчищення та поглиблення річища. Метою проведення меліоративних робіт було збільшення площі сінокісних угідь на заболочених землях. У «Щорічнику Музею Полтавського Губернського відомства. 1913 рік» зазначено, що «...з весни 1910 року розпочалося осушення заболочених річок Полтавської губернії. У першу чергу мали бути осушені річки Трубіж та Супій. Результатом осушення є поступова

зміна складу рослинності долин цих рік з повним вимиранням деяких видів рослин» (*Пшеничний & Семенов, 1957*).

За гідрологічним районуванням України басейн Супою відноситься до Лівобережної Дніпровської гідрологічної області достатньої водності, а саме: Трубіж-Супійської подової підобласті зниженої водності. Водонесний горизонт залягає на глибині 5 – 10 м (*Мізіна, 2023*).

На території басейну функціонує Супійська осушувально-зрошувальна система, яка є однією з найбільших осушувальних меліоративних систем у межах лівобережжя Середнього Дніпра і становить 10 400 га, а також Піщанська (3 700 га) (*Сарнавський та ін., 2024*).

Частково розміщуючись у межах Південно-західного борту ДЗЗ, характеризується відносно глибоким заляганням кристалічного фундаменту. У геологічній будові беруть участь кристалічні породи докембрія та осадові породи палеозойської, мезозойської та кайнозойської груп (*«Отчет по теме: Оценка условий водоснабжения...», 1970*).

Кам'яновугільні відклади (Палеозойська ератема) на території вивчені недостатньо. З усіх свердловин, пробурених до кристалічного фундаменту, тільки дві свердловини в районі м. Яготин (свр.328) і с. Бервиці (свр.2) розкрили відклади башкирського ярусу на глибинах 901 м та 751 м відповідно. Представлені світи чергуванням пісків, пісковиків і глин, з проверстками та лінзами вторинних каолінів. Глини світло-сірі, сірі, темно-сірі, щільні, каоліністі, в'язкі, рідко піскуваті, місцями з обвугленими рештками рослин. Потужність прошарків глин змінюється від декількох десятків сантиметрів до 20 м, частіше становить 3–6 м. Піски та пісковики світло-сірі, різнозерністі, дрібнозерністі, місцями гравелітисті, іноді з гравієм та дрібною галькою кварцу. Цемент у пісковиків здебільшого каолінистий. Потужність піщаних прошарків складає 1–20 м. Проверстки та лінзи вторинних білих, щільних, тонковідмучених каолінів мають потужність від 0,8 м до 4,4 м. Зустрінуті в свердловинах біля с.Помоклі (свр.4526, на гл.100,6м), м.Яготин (свр.405, на гл.182,7м) та смт.Згурівка (свр.409, на гл.334м). Мергелі та глини кийівської світи

характеризуються підвищеним рівнем гамма-випромінювання (в межах 8–10 мкР/год) і низьким рівнем електричного опору. Неогенові відклади на вивченій території Супою не збереглися. Вся площа досліджуваної території покрита чохлом континентальних четвертинних відкладів різних літолого-генетичних типів (Веклич, 1977). У комплексі відкладів району «Моренних терас» найбільш поширені субаквальні відклади нижнього та середнього плейстоцену, переважно алювіально-воднольодовикові, алювіальні, озерно-льодовикові. Крім того, широко представлені моренні утворення дніпровського льодовика, і всі вони перекриті потужною товщею (до 18 м) елювіальних та еолово-делювіальних середньо-, верхньоплейстоценових суглинків. Потужність відкладів становить в середньому 40–60 м. Болотні відклади (Завадівського кліматоліту) представлені, в основному, торфами коричневатобурими, різного ступеня розкладу болотної рослинності та мулистими суглинками і супісками темно-сірими, сизувато-сірими, сильно насиченими рештками тонкостінних прісноводних черепашок. В будові тераси беруть участь алювіальні відклади, представлені різнозернистими пісками, часто з лінзами і прошарками суглинків, торфу, супісків, загальною потужністю до 40 м. Залягають з розривом на алювіально-воднольодовикових пісках тилігульського часу. Перекриваються моренними суглинками, пісками і супісками дніпровського кліматоліту, на яких, в свою чергу, сформувалась субаеральна товща лесовидних суглинків з прошарками викопних ґрунтів, переважно верхнього плейстоцену (Дерій, 2007).

Згідно з фізико-географічним районуванням водозбірний басейн Супою повністю лежить в Північній лісостеповій області Дніпровської терасової рівнини (Фізико-географическое районирование УССР, 1968). Він перетинає фізико-географічні райони, починаючи з півночі, такі як Бобровицько-Лосиновський, Яготинсько-Гребенківський, Переяслав-Хмельницький, Чорнобаївський та Дніпровський заплавно-боровий (рис. 3.2). Ці фізико-географічні райони наближені до Носівсько-Линовицького, Яготинсько-Гребенківського, Бориспільсько-Баришівського, Золотонісько-Чорнобаївського

та Процівсько-Ліплявського відповідно (Маринич & Шищенко, 2003; Маринич та ін., 2003).

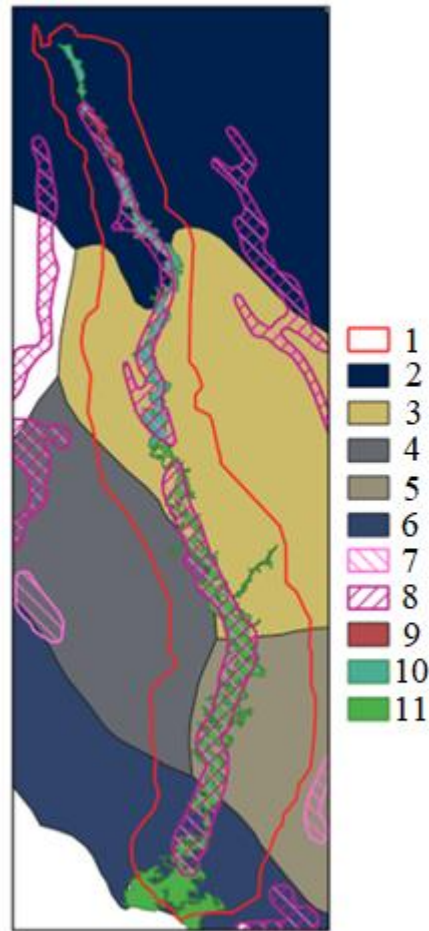


Рис. 3.2 Схема фізико-географічного районування та торфово-болотної системи річки Супій

Умовні позначення: 1) межі басейну; фізико-географічні райони – 2) Бобровицько-Лосиновський, 3) Яготинсько-Гребенківський, 4) Переяслав-Хмельницький, 5) Чорнобаївський, 6) Дніпровський заплавно-боровий; ґрунти – 7) болотні та торфувато-болотні, 8) торфовища низинні та торфово-болотні; території, що входять до смарагдової мережі – 9) болото «Свидовець»; територія, що входить до Смарагдової мережі – 10) «Заплава Супою» (UA0000237), 11) «Долина річки Супій» (UA0000302).

Фізико-географічне районування має велике значення для пізнання природних процесів, поглиблення уявлень про закономірності розвитку довкілля, а також для господарської та природоохоронної діяльності людини.

Лише встановивши чіткі межі природного комплексу, вивчивши його будову та внутрішні зв'язки, можна визначити науково обґрунтовані заходи щодо раціоналізації природокористування. Потрібен не фрагментарний підхід, тобто окремі цільові дослідження (*Верховцев & Спиця, 2019*), а комплексний.

Територія Бобровицько-Лосиновського району знаходиться в межах терасової рівнини середньоантропогенового віку. Терасові відклади алювіальних пісків і суглинків припадають на ранньочетвертинну товщу. Товща озерно-льодовикових палево-жовтих і зеленувато-сірих суглинків і пісків також відноситься до середнього антропогену. Відклади моренних валунних суглинків сильно розмиті, слабопотужні і розподіляються окремими масивами, які з поверхні покриті більш молодшими алювіальними пісками. Абсолютні висоти тераси не перевищують 140–160 м (рис. 3.3). Відносні коливання висот складають 10–15 м. Р. Супій бере початок з невеликої заболоченої улоговини, неподалік джерела святого Миколая. На поверхні тераси простежуються водно-льодовикові прохідні долини. Такі давнодолинні пониження з'єднують Супій та Трубіж. У давнодолинних і давньоозерних пониженнях поширені торф'яники, болотний мергель та мулуваті глини. Ґрунтовий покрив району відрізняється великою строкатістю. Закономірності розподілу ґрунтових відмінностей пов'язані з різницею у вологості різних за характером підстилаючих генетично неоднорідних супісків та суглинків.

Території низинних ділянок рівнини, давньоозерних впадин з близьким до поверхні заляганням підземних вод описуються релевантними процесами заболочення і засолення. У комплексі з чорноземно-луговими солончаковими ґрунтами широко поширені лугові содові солончаки, які виникають серед безстічних та слабо дренованих западин. Ділянки давніх прохідних долин з дуже слабким стоком, характеризуються переважно чорноземно-луговими ґрунтами разом з лугово-солончаковими. Широкі низинні давні долини часто заняті торф'яно-болотними ґрунтами. Територія потребує заходів по зменшенню засоленості та заболочення земель. Тут знаходиться тестова ділянка «Свидовець».

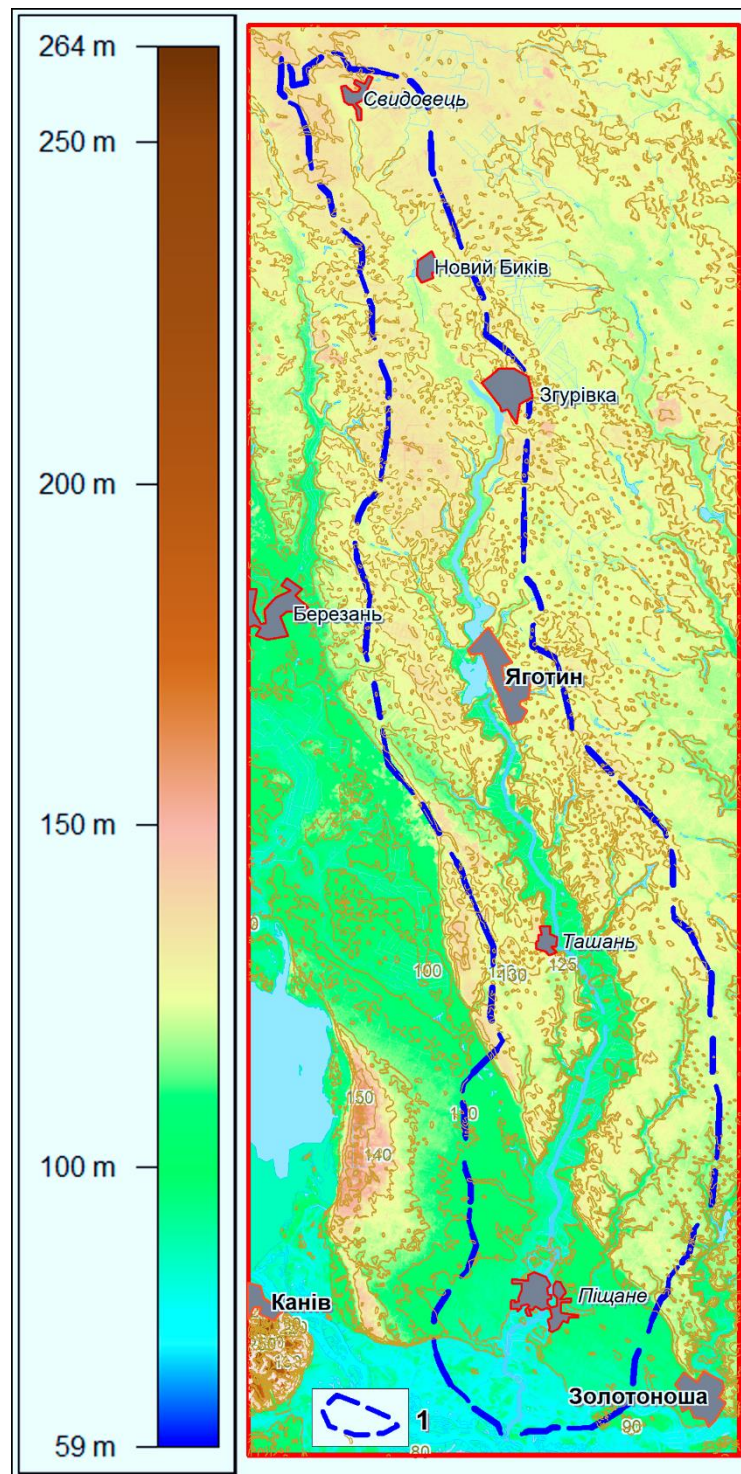


Рис. 3.3 Цифрова модель місцевості SRTM

Умовні позначення: 1) межі басейну р.Супій.

Яготинсько-Гребенківський район лесово-терасової рівнини з переважаючими малогумусними чорноземами розподілений в межах Згурівсько-Яготинської акумулятивної терасової рівнини. Поверхня тераси має однорідні

висоти від 130 до 140 м з вельми малими амплітудами. Для цього району характерна велика кількість улоговин і надпологих грядоподібних підвищень. Скрізь поширені дрібні западини. На цьому відтинку долина річки Супій представляє широку, добре розроблену, давню долину з плоским дном, місцями сильно заболоченим.

Переважає ландшафт надзаплавно-терасових рівнин, плоских, дрібнозападинних, слабодренованих. Поширені древні прохідні долини з лугово-солончаковими ґрунтами і солонцеватими чорноземами. По долинам Супою на піщаних відкладах вузькими смугами переважають борові типи з невеликими ділянками соснових лісів. Плоскорівнинні простори міжріч майже повністю розорані і засіваються кормовими і зерновими культурами. Долина ріки Супій з добре вираженими схилами і широко заболоченим днищем має потужні торф'яно-болотні відклади (до 4 метрів). Осушення долин річок і їх використання для розвитку сільськогосподарської діяльності становлять одну з важливих проблем району.

Східний кордон Переяслав-Хмельницького фізико-географічного району простягається по краю високої моренної тераси і по долині ріки Супій у Золотоніському районі. Тут розвинуті потужні малогумусні чорноземи на лесовидних, легких за механічним складом суглинках. Западини на поверхні тераси розміщуються ланцюгами в південно-східному напрямку і місцями переходять у вузькі суфозійні улоговини. Простежується послідовність борових і лесово-терасових місцин. Хвилястий характер терасової поверхні пов'язаний із численними великими улоговинами, давньодолинними пониженнями і напівзамкнутими западинами. Місцевість лесово-терасових рівнин має значно помітний западинний рельєф. Розвитку суфозійних процесів сприяли легкий механічний склад лесовидних суглинків і їх значна карбонатність. У ґрунтовому покриві западин глей поєднується з процесами інтенсивного засолення.

Основа тераси Чорнобаївського фізико-географічного району складена давньоалювіальними і водно-льодовиковими пісками, які підстилають товщі морени. Алювіальні піщані відклади долини Супою перекривають валунні

моренні суглинки. Лесовидні відклади повсюди покривають поверхню тераси і визначають родючість сформованих на них типових малогумусних чорноземів. Поверхня моренної тераси плоскорівнинна, в цілому дуже слабо дренована. У зв'язку з цим повсюди спостерігаються суфозійні западини. Майже скрізь западини розорюються. Весною в них довго застоюється вода, що нерідко призводить до вимокання озимих культур. Район погано забезпечений як поверхневими, так і підземними водами. Недостатня забезпеченість водою особливо проявилася у зв'язку з розширенням населених пунктів, переміщених з долини Дніпра при створенні Кременчуцького водосховища. Біля Супою розміщуються більш дреновані терасові місцевості з улоговинами стоку та вилуженими чорноземами.

Дніпровський заплавно-боровий фізико-географічний район характеризується закономірною послідовністю двох видів ландшафтів – заплавного і піщано-борового. Лугова рослинність у багатьох місцях має вторинне походження. У недалекому минулому заплава була зайнята переважно лісовою і чагарниковою рослинністю. Цим пояснюються ознаки опідзолювання лугових ґрунтів центральної заплави, які спостерігаються у більшості місць, а також залишкові масиви заплачних дібров із віковими дубами. Ландшафт борової тераси широко розповсюджений в долині Дніпра. Давньоалювіальні піски в нижній частині тераси мають чітко виражену горизонтальну шаруватість. Жовтуватого-сірий пісок слабо відсортований. Верхня частина відкладів тераси зазнавала довготривалої еолової переробки. У південній частині району (що перетинає Супій) поширені терасові рівнини з сірими опідзоленими ґрунтами з чорноземними і чорноземно-луговими ґрунтами на легкосуглинних лесових породах. Ці ділянки представляють собою найбільшу цінність як орні землі. Для централізованого водопостачання в цьому районі використовується водоносний горизонт еоценових відкладів. Води алювіальних відкладів басейну р. Супій, розташований у межах Дніпровського артезіанського басейну, має гідрокарбонатний кальцієво-магнієвий склад при мінералізації 520-600 мг/дм³ (Хільчевський та ін., 2007).

На гідрологічний режим р.Супій, як річку лісостепової зони, суттєвий вплив мають низовинно-перехідні болота. Водопілля на ній розтягнуте, згладжене, починається на початку другої декади березня. Середня тривалість водопілля на річці становить 50-55 діб. Середні багаторічні величини підвищення рівня весняного водопілля коливаються від 20 до 30 мм. В окремі роки сумарний весняний стік може перевищувати середню багаторічну величину у 2-3 рази (*Гребінь, 2010b*).

Проаналізувавши попередні дослідження, зазначу, що **досліджувана територія слабо вивчена**, саме тому вона потребує проведення комплексу досліджень з метою формування основи для екологічного моніторингу та пошуку інструментів досягнення цілей сталого розвитку методами ГІС та ДЗЗ.

Таким чином, басейн річки Супій використовується у роботі не як унікальний випадок, а як **репрезентативний приклад** середніх річкових басейнів лівобережжя Дніпра, що дозволяє обґрунтовано оцінити працездатність, універсальність і масштабованість запропонованої методики супутникового геоекологічного аналізу.

3.2 Тестові ділянки та їх роль у апробації методики

3.2.1 Вибір та просторове розміщення тестових ділянок

Апробація методики супутникового геоекологічного аналізу за басейновим принципом потребує використання тестових ділянок, що дозволяють перевірити її працездатність в умовах різної інтенсивності природних і антропогенних процесів. Такий підхід дозволяє порівнювати окремі частини басейну між собою, визначати ділянки концентрації негативних змін і встановлювати їх зв'язок із положенням у басейновій системі. З цією метою в межах басейну річки Супій було сформовано шість тестових ділянок, які репрезентують основні типи ландшафтних умов і геоекологічних ситуацій,

характерних для середніх річок лівобережжя Дніпра, а також водозбірні одиниці у вигляді основних приток (рис. 3.4).

Тестові ділянки не розглядаються як самостійні об'єкти дослідження, а використовуються як інструмент апробації методики, що дозволяє оцінити інформативність геоecологічних індикаторів, коректність їх просторової агрегації та стійкість інтегральних оцінок у межах різних функціональних зон басейну.

Розміщення ділянок уздовж русла забезпечує порівняльний аналіз функціонування геосистем у різних геоморфологічних умовах та дозволяє оцінити зміну інтенсивності геоecологічних процесів у напрямку від витoku до гирла.

Кожна з тестових ділянок охоплює частину басейну з відносно однорідними природними умовами та характером антропогенного впливу. Тестові ділянки розміщені в різних частинах басейну річки Супій і охоплюють верхню, середню та нижню ділянки водозбору. Таке просторове розташування дозволяє враховувати зміну геоecологічних умов у водозбірному басейні річки та аналізувати кумулятивний характер геоecологічних процесів.

Без деталізації результатів оцінювання, тестові ділянки можуть бути узагальнено охарактеризовані за домінуючими геоecологічними умовами, зокрема як:

- ділянки з переважанням природних або слабо трансформованих ландшафтів («Свидовець», «Усівський» та «Ташанський»);
- ділянки з інтенсивним сільськогосподарським використанням («Свидовець» та «Усівський», «Ташанський» та «Ковраєць»);
- ділянки з порушеним водним режимом і трансформованими заплавними комплексами («Озерна», «Бутовщина», «Ташанський» та «Ковраєць»);
- ділянки з підвищеним антропогенним навантаженням («Озерна» та «Ковраєць»).

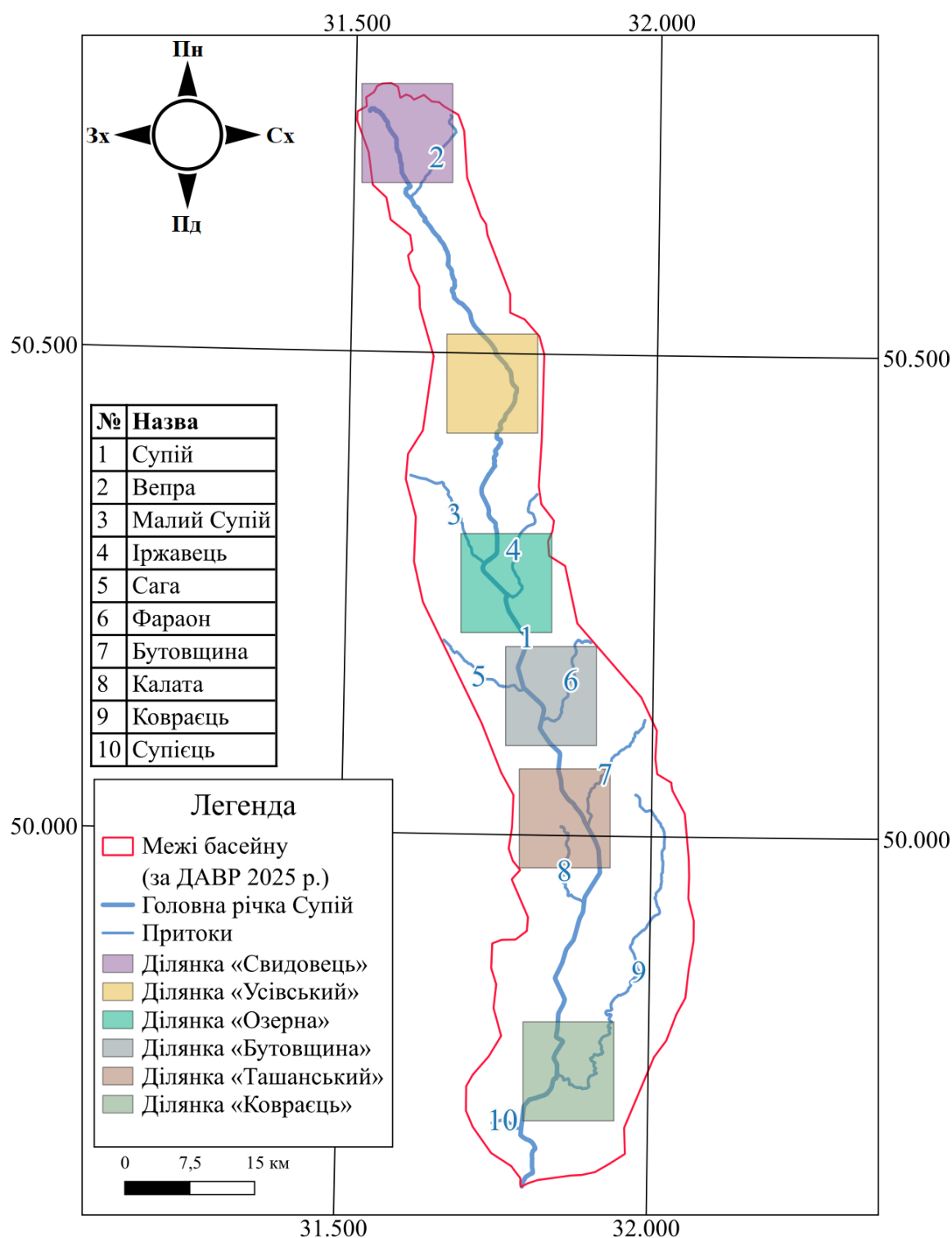


Рис. 3.4 Гідрологічна мережа та тестові ділянки басейну р.Супій

Ділянка «Свидовець» ($50^{\circ}43'38''$ пн. ш., $31^{\circ}35'6''$ сх. д.). Розташована у Ніжинському районі Чернігівської області. Назву присвоєно від назви заказника місцевого значення та населеного пункту. Площа ділянки $120,26 \text{ км}^2$.

Координати крайніх точок ділянки: північно-західна – 50°46'41" пн.ш., 31°30'33" сх.д.; південно-східна – 50°40'36" пн.ш., 31°39'40" сх.д.

Згідно з фізико-географічним районуванням, досліджувана територія повністю лежить в Північній лісостепній області Дніпровської терасової рівнини, а саме в Бобровицько-Лосиновському фізико-географічному районі. Абсолютні висоти тераси не перевищують 140–160 м. Відносні коливання висот складають 10–15 м. На поверхні тераси простежуються водно-льодовикові прохідні долини. Такі давнодолинні пониження з'єднують Супій та Трубіж.

Територія знаходиться в межах терасової рівнини середньоантропогенового віку. Терасові відклади алювіальних пісків і суглинків припадають на ранньочетвертинну товщу. Товща озерно-льодовикових палево-жовтих і зеленувато-сірих суглинків і пісків також відноситься до середнього антропогену. Відклади моренних валунних суглинків сильно розмиті, слабopotужні і розподіляються окремими масивами, які з поверхні покриті більш молодшими алювіальними пісками. У давнодолинних і давньоозерних пониженнях поширені торф'яники, болотний мергель та іловаті глини. Ґрунтовий покрив району відрізняється великою строкатістю. Закономірності розподілу ґрунтових відмінностей пов'язані з різного роду вологістю та характером підстилаючих генетично різнорідних супісків та суглинків.

Території низинних ділянок рівнини, давньоозерних впадин з близьким до поверхні заляганням підземних вод описуються релевантними процесами заболочення і засолення. У комплексі з чорноземно-луговими солончаковими ґрунтами широко поширені лугові содові солончаки, які ростуть серед безстічних та слабо дренованих западин. Ділянки давніх прохідних долин з дуже слабким стоком характеризуються переважно чорноземно-луговими ґрунтами разом з лугово-солончаковими. Широкі низинні давні долини часто зайняті торф'яно-болотними ґрунтами.

Типова рослинність для лісостепової зони. Чергування лісової і лучно-степової рослинності. Лісова рослинність приурочена до високих, добре дренованих територій місцевості і частково представлена дубовими і мішаними

дубово-грабовими (здебільшого на Правобережжі) та передусім дубово-кленово-липовими (дуже поширені на Лівобережжі). У заплавах річок ростуть берест, вільха, верба. Лучностепова рослинність приурочена до понижень і слабо дренажованих вододілів. Лучні степи тепер всі розорані, тому природна рослинність на них майже відсутня. Рослинність переважно водно-болотна.

Серед екзогенних геологічних процесів присутні осідання товщ порід з утворенням на поверхні псевдокарстових форм мікрорельєфу – замкнених знижень (лійок, блюдць, подів, котловин). Помітно заболочені ділянки з частковим замуленням.

Сільськогосподарські угіддя охоплюють понад 75% території.

Головною метою дослідження геоecологічного стану витоків р.Супій і відстеження негативних змін, як-от осушення, заболочування, замулення, вплив сільськогосподарської та фермерської діяльності, а також пошук шляхів відновлення водних джерел. Територія потребує заходів щодо зменшення засоленості та заболоченості земель.

Захоплює частину затвердженої території Смарагдової мережі України як «Заплава Супою» (UA0000237 – Zaplava Supoju). Витік річки неподалік джерела Св.Миколая.

Ділянка «Усівський» (50°28'6" пн. ш., 31°43'53" сх. д.). Розташована переважно в Броварському районі Київської області, частково перекриває Бориспільський та Ніжинський райони. Площа ділянки 120,26 км². Координати крайніх точок ділянки: північно-західна – 50°31'9" пн.ш., 31°35'12" сх.д.; південно-східна – 50°25'4" пн.ш., 31°48'23" сх.д.

Згідно з фізико-географічним районуванням, досліджувана територія лежить в межах Бобровицько-Лосиновського та Яготинсько-Гребенківського районів. Для першого абсолютні висоти тераси не перевищують 140–160 м, а відносні коливання висот складають 10–15 м. Для другого поверхні тераси має однорідні висоти від 130 до 140 м з вельми малими амплітудами.

Територія Бобровицько-Лосиновського району знаходиться в межах терасової рівнини середньоантропогенного віку. Тerasові відклади алювіальних пісків і суглинків припадають на ранньочетвертинну товщу. Товща озерно-льодовикових палево-жовтих і зеленувато-сірих суглинків і пісків також відноситься до середнього антропогену. Відклади моренних валунних суглинків сильно розмиті, слабopotужні і розподіляються окремими масивами, які з поверхні покриті більш молодшими алювіальними пісками. У давнодолинних і давньоозерних пониженнях поширені торф'яники, болотний мергель та іловаті глини. Ґрунтовий покрив району відрізняється великою строкатістю. Закономірності розподілу ґрунтових відмінностей пов'язані з різного роду вологістю та характером підстилаючих генетично різнорідних супісків та суглинків.

Території низинних ділянок рівнини, давньоозерних впадин з близьким до поверхні заляганням підземних вод описуються релевантними процесами заболочення і засолення. У комплексі з чорноземно-луговими солончаковими ґрунтами широко поширені лугові содові солончаки, які ростуть серед безстічних та слабо дренованих западин. Ділянки давніх прохідних долин з дуже слабким стоком, характеризуються переважно чорноземно-луговими ґрунтами разом з лугово-солончаковими. Широкі низинні давні долини часто зайняті торф'яно-болотними ґрунтами.

Яготинсько-Гребенківський район лесово-терасової рівнини з переважаючими малогумусними чорноземами розподілений в межах Згурівсько-Яготинської акумулятивної терасової рівнини.

Типова рослинність для лісостепової зони. Чергування лісової і лучно-степової рослинності. Лісова рослинність приурочена до високих, добре дренованих територій місцевості і частково представлена дубовими і мішаними дубово-грабовими (здебільшого на Правобережжі) та передусім дубово-кленово-липовими (дуже поширені на Лівобережжі). Лісоутворювальними породами зони є дуб, граб, бук, клен, липа. У заплавах річок ростуть берест, вільха, верба. На піщаних берегах, куди доходив язик давнього льодовика, острівцями ростуть

соснові ліси. Лучностепова рослинність приурочена до понижень і слабо дренованих вододілів. Лучні степи тепер всі розорані, тому природна рослинність на них майже відсутня. Рослинність переважно водно-болотна: очерет, рогіз, тілоріз, осока, частуха.

Хвилястий характер терасової поверхні досліджуваної території пов'язаний із численними великими улоговинами, давньодолинними пониженнями і напівзамкнутими впадинами. Місцевість лесово-терасових рівнин має значно помітний западинний рельєф. Розвитку суфозійних процесів сприяли легкий механічний склад лесовидних суглинків і їх значна карбонатність. У ґрунтовому покриві западин глей поєднується з процесами інтенсивного засолення.

Сільськогосподарські угіддя охоплюють понад 80% території. Долина ріки Супій з добре вираженими терасами і широко заболоченим днищем має потужні торф'яно-болотні відклади (до 4-х метрів). Особливу цікавість притягують давні прохідні долини водної системи Супою. Осушення долин річок і їх використання для розвитку сільськогосподарської діяльності становлять одну з важливих проблем району.

Головною метою дослідження геоекологічного стану торфово-болотних угідь р.Супій і відстеження негативних змін, як-от осушення, заболочування, замулення, вплив сільськогосподарської та фермерської діяльності, а також пошук шляхів відновлення водних джерел (рис. 3.5).

Охоплює Усівський гідрологічний заказник загальнодержавного значення («Усівський-1» та «Усівський-2»), парк-пам'ятку садово-паркового мистецтва загальнодержавного значення «Згурівський». Територія Смарагдової мережі України як «Заплава Супою» (UA0000237 – Zaplava Supoiu).



Рис. 3.5 Фото процесів замулення, заростання та заболочення об'єкту ПЗФ в селищі Згурівка (зроблено автором 8 січня 2021)

Ділянка «Озерна» ($50^{\circ}15'41''$ пн. ш., $31^{\circ}45'34''$ сх. д.) центрується на комплексі водосховищ (найбільше з них має назву «озеро Супій»), що знаходиться у єдиному місті, побудованому на Супої, – Яготині, Бориспільський район. Площа ділянки $120,26 \text{ км}^2$. Координати крайніх точок ділянки: північно-західна – $50^{\circ}18'43''$ пн.ш., $31^{\circ}41'4''$ сх.д.; південно-східна – $50^{\circ}12'38''$ пн.ш., $31^{\circ}50'4''$ сх.д.

Згідно з фізико-географічним районуванням, досліджувана територія лежить в межах Яготинсько-Гребенківського району. Поверхня тераси має однорідні висоти від 130 до 140 м з вельми малими амплітудами.

Тут розвинуті потужні малогумусні чорноземи на лесовидних, легких за механічним складом суглинках. Западини на поверхні тераси слідує ланкою в південно-східному напрямку. Простежується послідовність борових і лесово-терасових місцин. Хвилястий характер терасової поверхні пов'язаний із численними великими улоговинами, давньодолинними пониженнями і напівзамкнутими впадинами. Місцевість лесово-терасових рівнин має значно помітний западинний рельєф. Розвитку суфозійних процесів сприяли легкий механічний склад лесовидних суглинків і їх значна карбонатність. У ґрунтовому покриві западин глей поєднується з процесами інтенсивного засолення.

Озерно-болотні відклади приурочені до численних замкнутих заболочених западин. Представлені суглинками середніми, сірими, світло-сірими, голубувато-сірими та зеленувато-сірими, іноді мулами з домішками слабо розкладених решток болотної рослинності та черепашок прісноводних молюсків. Потужність становить 1,0–3,0 м.

Лісоутворювальними породами зони є дуб, граб, бук, клен, липа. У заплавах річок ростуть берест, вільха, верба. Рослинність переважно водно-болотна: очерет, рогіз, тілоріз, осока, частуха.

Хвилястий характер терасової поверхні досліджуваної території пов'язаний із численними великими улоговинами, давньодолинними пониженнями і напівзамкнутими впадинами. Місцевість лесово-терасових рівнин має значно помітний западинний рельєф.

Для поверхні району характерна наявність кількісних улоговин і надпологих грядоподібних підвищень. Скрізь поширені дрібні западини. Розвитку суфозійних процесів сприяли легкий механічний склад лесовидних суглинків і їх значна карбонатність. У ґрунтовому покриві западин глей поєднується з процесами інтенсивного засолення.

Сільськогосподарські угіддя охоплюють до 50% території. Спостерігається найбільше антропогенне навантаження порівняно з іншими тестовими ділянками.

Місто розділяє дві затверджені території Смарагдової мережі України (європейської мережі Emerald) як «Заплава Супою» (UA0000237 – Zaplava Supoiu) та «Долина річки Супій» (UA0000302 – Supiy river valley). У центрі міста розташований регіональний ландшафтний парк місцевого значення «Яготинський імені гетьмана Кирила Розумовського».

Головною метою є дослідження змін у конфігурації водойм та геоекологічного стану урбанізованих територій, оцінка техногенного навантаження, відстеження негативних змін, як-от осушення, заболочування, замулення, ерозія тощо.

Ділянка «Бутовщина» (50°8'41" пн. ш., 31°50'6" сх. д.) розташована у двох районах, Бориспільському та Золотоніському, Київської та Черкаської областей відповідно. Площа ділянки 120,26 км². Координати крайніх точок ділянки: північно-західна – 50°11'43" пн.ш., 31°45'36" сх.д.; південно-східна – 50°05'38" пн.ш., 31°54'34" сх.д.

Згідно з фізико-географічним районуванням, досліджувана територія лежить в межах Яготинсько-Гребенківського району. Поверхня тераси має однорідні висоти від 130 до 140 м з вельми малими амплітудами.

Яготинсько-Гребенківський район лесово-терасової рівнини з переважаючими малогумусними чорноземами розподілений в межах Згурівсько-Яготинської акумулятивної терасової рівнини. Території низинних ділянок рівнини, давньоозерних впадин з близьким до поверхні заляганням підземних вод описуються релевантними процесами заболочення і засолення. У комплексі з чорноземно-луговими солончаковими ґрунтами широко поширені лугові содові солончаки, які ростуть серед безстічних та слабо дренажованих западин. Ділянки давніх прохідних долин з дуже слабким стоком характеризуються переважно чорноземно-луговими ґрунтами разом з лугово-солончаковими. Широкі низинні давні долини часто зайняті торф'яно-болотними ґрунтами.

Типова рослинність для лісостепової зони. Чергування лісової і лучно-степової рослинності. Лісова рослинність приурочена до високих, добре дренованих територій місцевості і частково представлена дубовими і мішаними дубово-грабовими (здебільшого на Правобережжі) та передусім дубово-кленово-липовими (дуже поширені на Лівобережжі). Лісоутворювальними породами зони є дуб, граб, бук, клен, липа. У заплавах річок ростуть берест, вільха, верба. Лучностепова рослинність приурочена до понижень і слабо дренованих вододілів. Рослинність водно-болотна: очерет, рогіз, тілоріз, осока, частуха.

Хвилястий характер терасової поверхні досліджуваної території пов'язаний із численними великими улоговинами, давньодолинними пониженнями і напівзамкнутими впадинами. Місцевість лесово-терасових рівнин має значно помітний западинний рельєф. Розвитку суфозійних процесів сприяли легкий механічний склад лесовидних суглинків і їх значна карбонатність. У ґрунтовому покриві западин глей поєднується з процесами інтенсивного засолення.

Сільськогосподарські угіддя охоплюють понад 90% території. Осушення долин річок і їх використання для розвитку сільськогосподарської діяльності становлять одну з важливих проблем району. Для поверхні району характерна наявність кількісних улоговин і надпологих грядоподібних підвищень. Скрізь поширені дрібні западини.

Головною метою є дослідження геоекологічного стану витоків маловодних річок-струмків, процесів лінійної ерозії і деградації ґрунтів.

Ділянка «Ташанський» (50°1'4" пн. ш., 31°51'36" сх. д.) розташована у двох районах, Бориспільському та Золотоніському, Київської та Черкаської областей відповідно. Площа ділянки 120,27 км². Координати крайніх точок ділянки: північно-західна – 50°4'7" пн.ш., 31°47'8" сх.д.; південно-східна – 49°58'1" пн.ш., 31°56'4" сх.д.

Згідно з фізико-географічним районуванням досліджувана територія охоплює Переяслав-Хмельницький, Яготинсько-Гребенківський та Чорнобаївський райони.

У основі тераси Чорнобаївського району складені давньоалювіальними і водно-льодовиковими пісками, які підстилають товщі морени. Аллювіальні піщані відклади перекривають валунні моренні суглинки. Лесовидні відклади повсюди покривають поверхню тераси і визначають родючі ґрунти, що формуються на них, типові малогумусні чорноземи. Поверхня моренної тераси плоскорівнинна, в цілому дуже слабо дренована. У зв'язку з цим повсюди спостерігаються суфозні западини. Недостатня забезпеченість водою особливо відобразилася з розширенням населених пунктів, перекинутих з долини Дніпра при створенні Кременчуцького водосховища. Загалом ґрунтовий покрив у межах цих місцин представлений малогумусними чорноземами. Біля Супою розміщуються більш дреновані терасові з улоговинами стоку та вилуженими чорноземами.

А дно річки суцільно виконано з торфу. Літологічна будова заплавної частини Супою – дрібнозернисті піски, позбавлені торф'яного покриву. Вище по течії піски поступаються алювіальним суглинкам, передусім болотному мергелю, прикритому торф'яними відкладами потужністю 5–6 м.

Типова рослинність для лісостепової зони. Чергування лісової і лучно-степової рослинності. Лісова рослинність приурочена до високих, добре дренованих територій місцевості і частково представлена дубовими і мішаними дубово-грабовими (здебільшого на Правобережжі) та передусім дубово-кленово-липовими (дуже поширені на Лівобережжі). Лісоутворювальними породами зони є дуб, граб, бук, клен, липа. У заплавах річок ростуть берест, вільха, верба. На піщаних берегах, куди доходив язик давнього льодовика, острівцями ростуть соснові ліси. Лучностепова рослинність приурочена до понижень і слабо дренованих вододілів. Лучні степи тепер всі розорані, тому природна рослинність на них майже відсутня. Рослинність переважно водно-болотяна: очерет, рогіз, тілоріз, осока, частуха.

Тут розвинуті потужні малогумусні чорноземи на лесовидних, легких за механічним складом суглинках. Простежується послідовність борових і лесово-терасових місцин. Хвилястий характер терасової поверхні пов'язаний із

численними великими улоговинами, давньодолинними пониженнями і напівзамкнутими впадинами. Місцевість лесово-терасових рівнин має значно помітний западинний рельєф. Розвитку суфозійних процесів сприяли легкий механічний склад лесовидних суглинків і їх значна карбонатність. У ґрунтовому покриві западин глей поєднується з процесами інтенсивного засолення. Сільськогосподарські угіддя охоплюють понад 75% території. Майже скрізь западини розорюються. Весною в них довго застаюється вода, що нерідко призводить до вимокання озимих культур. Район погано забезпечений як поверхневими, так і підземними водами.

Головною метою є дослідження суфозійних явищ та різнотипної ерозії (рис. 3.6).



Рис. 3.6 Фото явища суфозії неподалік села Ташань (зроблено автором 8 травня 2025)

Цінність – парк-пам'ятка садово-паркового мистецтва загальнодержавного значення «Ташанський». Частина Супою, що є затвердженою територією Смарагдової мережі України як «Долина річки Супій» (UA0000302 – Supiy river valley).

Ділянка «Ковраєць» (49°45'17" пн. ш., 31°52'20" сх. д.) центрується навколо населеного пункту Піщане Черкаської області. Площа ділянки 120,27 км². Координати крайніх точок ділянки: північно-західна – 49°48'20" пн.ш., 31°47'53" сх.д.; південно-східна – 49°42'14" пн.ш., 31°56'46" сх.д.

Згідно з фізико-географічним районуванням, досліджувана територія лежить в межах Дніпровського заплавно-борового району. Висота тут не перевищує 110 м та поступово знижується до 75 м вздовж долини до впадіння в р.Дніпро.

Дніпровський заплавно-боровий район характеризується закономірною послідовністю двох видів ландшафтів – заплавного і піщано-борового. Лугова рослинність у багатьох місцях має вторинне походження. У недалекому минулому заплава була зайнята головним чином лісною та чагарниковою флорою. Це пояснюється ознаками опідзолювання лугових ґрунтів центральної заплави, які спостерігаються у більшості місць, а також залишеними масивами заплавних дібров із віковими дубами. Ландшафт борової тераси широко розповсюджений в долині Дніпра. Древньоалювіальні піски в нижній частині тераси мають ясно виражену горизонтальну шаруватість. Жовтуватого-сірого пісок слабо відсортований. Верхня частина відкладів тераси піддавалася довготривалій еоловій переробці. У південній частині району (що перетинає Супій) поширені терасові рівнини з сірими опідзоленими ґрунтами з чорноземними і чорноземно-луговими ґрунтами на легкосуглинистих лесових породах. Ці ділянки представляють собою найбільшу цінність як орні угіддя. На піщаних берегах, куди доходив язык давнього льодовика, островцями ростуть соснові ліси.

Поверхня моренної тераси плоскорівнинна, в цілому дуже слабо дренована. У зв'язку з цим повсюди спостерігаються суфозійні западини. Майже скрізь западини розорюються. Весною в них довго застаюється вода, що нерідко призводить до вимокання озимих культур. Загалом ґрунтовий покрив у межах цих місцин представлений малогумусними чорноземами. Біля Супою

розміщуються більш дренавані терасові з улоговинами стоку та вилуженими чорноземами.

Сільськогосподарські угіддя охоплюють понад 60% території. Район погано забезпечений як поверхневими, так і підземними водами. Недостатня забезпеченість водою особливо відобразилася з розширенням населених пунктів, перекинутих з долини Дніпра при створенні Кременчуцького водосховища. Спостерігається меліорація.

Помітна лінійна і площинна ерозія ґрунтів. Отже, головною метою є дослідження наслідків меліорації, розвитку лінійної і площинної ерозії ґрунтів та рекомендації, які сприятимуть якісному їх відновленню.

Частина Супою, що є затвердженою територією Смарагдової мережі України як «Долина річки Супій» (UA0000302 – Supiy river valley).

Кожна тестова ділянка характеризується специфічним поєднанням природних умов і форм землекористування, ландшафтними характеристиками, що створюють можливість порівняльного аналізу результатів апробації методики та виявлення відмінностей у прояві геоекологічних процесів.

Використання шести тестових ділянок дозволяє перевірити чутливість геоекологічних індикаторів до змін природних умов і антропогенного впливу, а також оцінити стабільність інтегральних показників при просторовій агрегації даних. Порівняння результатів, отриманих для різних ділянок, створює основу для аналізу сильних сторін методики та виявлення умов її ефективного застосування.

Таким чином, система тестових ділянок є ключовим елементом апробації методики і забезпечує можливість обґрунтованого переходу від теоретичного опису алгоритмів до аналізу практичних результатів супутникового геоекологічного аналізу басейну річки Супій.

3.2.2 Підготовка та попередня обробка даних ДЗЗ

Індексні показники за даними Sentinel-2 та Landsat обчислено в GEE. Індеси за даними PlanetScore обчислено вручну в SAGA GIS. Підбір знімків відбувався з урахуванням погодних умов, зокрема безхмарності.

Перекриття знімків для Sentinel-2 не дозволяє зробити один суцільний знімок на весь басейн, тому було побудовано мозаїку за середнім значенням. Знімки обиралися лише ті, які задовольняли умову хмарності менше 2% та пік вегетації, тобто липень-серпень 2025-го року.

Для формування набору індексів використовувалася хмарна платформа GEE, тому що забезпечує доступ до архіву супутникових даних Sentinel-2 та інструментів їх автоматизованої обробки (*Google Developers*). Розроблений скрипт виконує повний цикл підготовки даних: від відбору знімків до розрахунку спектральних індексів та експорту результатів для подальшого аналізу (рис. 3.7).

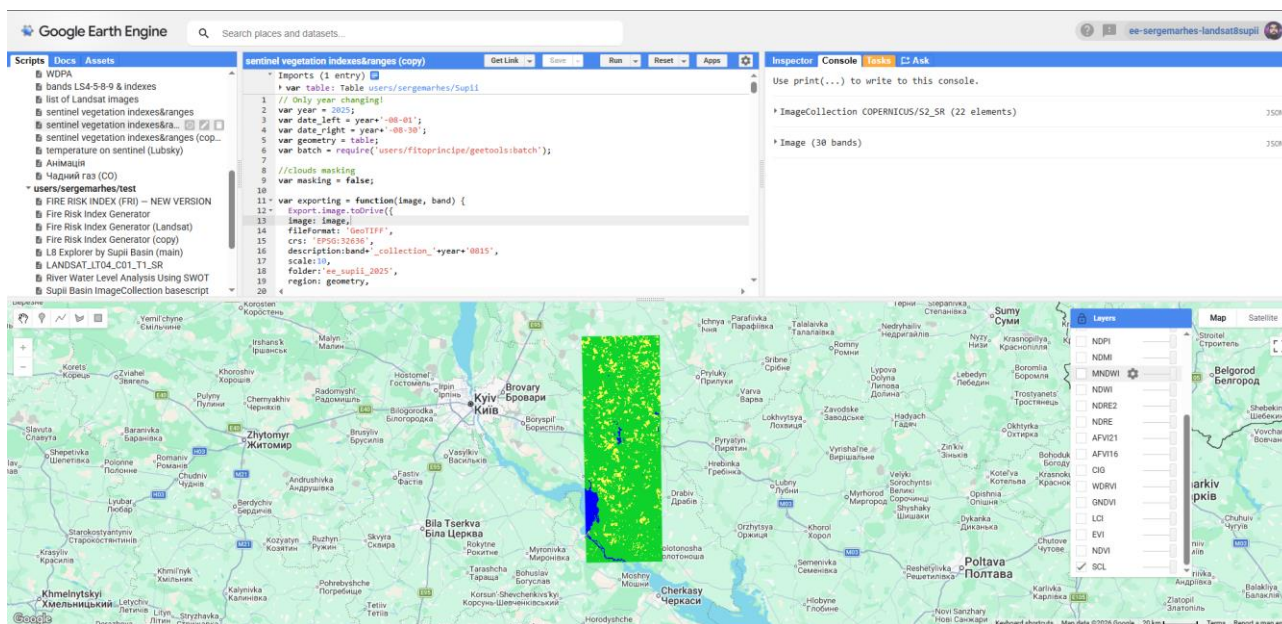


Рис. 3.7 Фрагмент середовища GEE з кодом для попередньої обробки супутникових даних Sentinel-2

На першому етапі задаються часові межі дослідження та просторові контури території, для якої здійснюється аналіз. Для кожного року формується вибірка супутникових знімків Sentinel-2 Surface Reflectance за визначений період

серпня. Додатково застосовується фільтр за рівнем хмарності сцени ($\text{CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE} < 2\%$), що дозволяє залучати лише знімки з мінімальним атмосферним впливом.

Для забезпечення коректності аналізу дані обрізаються відповідно до меж досліджуваної території та приводяться до відбивної здатності шляхом масштабування цифрових значень спектральних каналів. У зв'язку зі змінами у структурі колекції Sentinel-2 після 2022 року скрипт передбачає різні процедури нормалізації вихідних даних. За необхідності може додатково виконуватися маскування хмар, тіней та інших атмосферних артефактів на основі службових каналів класифікації сцени (SCL, QA60, MSK_CLASSI_OPAQUE, MSK_CLASSI_CIRRUS).

У подальшому формується мозаїка відібраних знімків шляхом сортування за відсотком хмарності та об'єднання окремих сцен у єдине зображення території дослідження. Такий підхід дозволяє отримати просторово безперервне покриття навіть у випадках, коли територія потрапляє до кількох супутникових сцен.

Для характеристики стану рослинності, вологості, водних об'єктів, забудови та інших властивостей земної поверхні обчислюється комплекс спектральних індексів. До набору показників включено індекси рослинності (NDVI, EVI, GNDVI, WDRVI, SAVI, OSAVI, NDRE, NDRE2, LCI, CIG, AFVI16, AFVI21), водні індекси (NDWI, MNDWI, AWEI1, AWEI2, NDPI), індекси вологості та посушливості (NDMI, NDDI), а також індекси забудованих територій і засоленості (NDBI, NDSI, SI). Використання широкого спектра індикаторів дозволяє комплексно охарактеризувати природні та антропогенно змінені ландшафти.

Окремо формується шар класифікації типів поверхні Sentinel-2 Scene Classification Layer (SCL), який використовується для контролю якості вхідних даних та візуальної перевірки результатів попередньої обробки.

Завершальним етапом є експорт кожного розрахованого індексу у форматі GeoTIFF з просторовою роздільною здатністю 10 м у проєкції UTM Zone 36N

(EPSG:32636). Отримані растрові шари надалі використовуються як вхідні змінні для побудови класифікаційних моделей та просторового аналізу.

Для уникнення помилкових значень пікселів, для актуальних знімків 2025 років було перераховано **температуру поверхні** на основі залежності NDVI (*Lubskyi et al., 2025b*). Таким чином, у методиці використано підхід до визначення випромінювальної здатності поверхні на основі залежності між emissivity та індексом NDVI, запропонованої Valor і Caselles (1996). Такий підхід дозволяє враховувати відмінності між відкритими ґрунтами, рослинним покривом і змішаними поверхнями під час розрахунку температури земної поверхні, що є важливим для коректної інтерпретації теплових аномалій у межах басейну.

Кутовий коефіцієнт лінійної регресії часових рядів температури поверхні інтерпретується як середньорічна швидкість її зміни (*Marhes et al., 2025*). Для аналізу використано дані продукту Landsat Collection 2 Level 2, який містить розраховані значення температури земної поверхні (LST). Вихідні значення сенсора були перетворені у температурні показники, виражені в градусах Цельсія, відповідно до алгоритмів обробки продукту. Відібрані за ознакою малошмарності (до 5%) з маскуванням спотворюючих пікселів.

Верифікація здійснена за рахунок порівняння отриманих даних з даними метеостанцій. Середні значення температури повітря (23.8 °C) за даними метеостанції (архів MeteoBlue) у м. Яготин та температури земної поверхні (32.5°C), визначеної за супутниковими даними для відповідного пікселя, суттєво відрізняються, що зумовлено різною фізичною природою цих показників. Температура земної поверхні характеризує радіаційний нагрів підстильної поверхні й зазвичай перевищує температуру повітря, виміряну на стандартній висоті 2 м. У зв'язку з цим пряме порівняння абсолютних значень і швидкостей зміни цих параметрів є методично некоректним, тому аналіз доцільно здійснювати на рівні трендів, кореляцій та відносних змін. Хоча статистичний зв'язок між рядами температури повітря та температури земної поверхні виявився відносно слабким, напрямок багаторічних змін залишається

узгодженим. Зокрема, обидва ряди демонструють тенденцію до зростання температурних показників у часі. При цьому оцінений річний приріст температури земної поверхні за супутниковими даними становив $0.32\text{ }^{\circ}\text{C}$ за рік, тоді як для температури повітря за даними метеостанції аналогічний показник був істотно нижчим і становив близько $0.0001\text{ }^{\circ}\text{C}$ за рік.

Пожежонебезпечність – це геоекологічний параметр, що запропонований використовуватися в методиці на рівні геоекологічних процесів, оскільки відображає інтегральну реакцію природних комплексів на поєднання кліматичних умов, стану рослинного покриву, рівня зволоження території та антропогенного навантаження. На відміну від багатьох інших процесів деградації, пожежна небезпека формується внаслідок одночасної дії кількох факторів середовища, тому її оцінювання дозволяє комплексно характеризувати поточний стан ландшафтів та їхню стійкість до зовнішніх впливів.

Особливого значення набуває можливість превентивного виявлення ділянок із підвищеним ризиком виникнення пожеж ще до настання критичних умов. У такому випадку пожежонебезпечність виступає не лише як характеристика поточного стану ландшафтів, а і як прогностичний показник, що може бути використаний для управління природними територіями, планування природоохоронних заходів та оцінки потенційних геоекологічних ризиків. Саме тому визначення просторового розподілу пожежонебезпечності є важливою складовою формування карти потенційних геоекологічних небезпек.

Сухі й спекотні весняно-осінні періоди сприяють виникненню тривалих пожеж саме на меліорованих торфовищах, де торфові відклади мають достатню потужність і низьку вологість ґрунту (*Ліщенко та ін., 2024а*).

До прикладу, 5 листопада 2019 року відбулась пожежа на території болотних угідь «Свидовець». Подібних пожеж багато, велика кількість трапляється через підпал. Недоліки FIRMS, що не всі пожежі можливо зафіксувати супутниками. Наприклад, за даними FIRMS відсутня пожежа на заболочених ділянках неподалік н.п. Новий Биків, однак близько 400 га в межах

гідрологічних заказників місцевого значення «Болото Супій» та «Свидовецький» було спалено (рис. 3.8).



Рис. 3.8 Знімок з БПЛА над вигорівшою ділянкою торфово-болотної системи р.Супій неподалік села Новий Биків (*Українська природоохоронна група, 2020*)

Для оцінки впливу пожежі на стан рослинності та поверхневу вологість використано супутникові індекси NDVI та NDWI по знімках PlanetScope з просторовою розрізненістю 3 м. Аналіз проводився шляхом порівняння значень індексів до та після пожежі для вибірки точок, розташованих у межах зони горіння (табл. 3.1). NDVI застосовано як показник біомаси та зеленості рослинного покриву, тоді як NDWI характеризує поверхневу вологість ґрунту.

Отримані результати демонструють протилежну динаміку індексів NDVI та NDWI: перший після пожежі зріс, що свідчить про швидке відновлення зеленого покриву або появу молодої рослинності. Водночас другий зменшився, що вказує на зниження поверхневої вологості та потенційне формування умов для повторного займання. Така комбінація є типовою для низових пожеж, які не знищують надземну біомасу, але суттєво висушують поверхневі горизонти.

Для NDVI критичним вважається рівень від 0.30 або зниження показника після пожежі, що свідчить про втрату біомаси. Для NDWI пожежонебезпечним є стан із NDWI менше -0.50 , що відповідає низькій поверхневій вологості, а також зменшення NDWI, яке вказує на суттєве висушення підстилки та ґрунту.

Таблиця 3.1

Показники індексів NDWI та NDVI до та після вигорання

Точка	NDVI до	NDVI після	NDWI до	NDWI після
1	0,453	0,534	-0,535	-0,65
2	0,434	0,579	-0,573	-0,677
3	0,412	0,556	-0,543	-0,639
4	0,419	0,662	-0,560	-0,749
5	0,464	0,516	-0,543	-0,660
6	0,458	0,589	-0,580	-0,666
7	0,449	0,523	-0,567	-0,606
8	0,440	0,493	-0,603	-0,629
9	0,395	0,581	-0,541	-0,696
10	0,451	0,558	-0,583	-0,643

3.2.3 Тематична інтерпретація супутникових індексів з урахуванням локальних умов

Апробація методики здійснювалася за послідовною схемою переходу від окремих супутникових індикаторів до узагальнених оцінок геоекологічного стану. На першому етапі було проаналізовано індикатори рослинного покриву та водного режиму, які характеризують вегетаційну активність, вміст хлорофілу, зволоженість поверхні, наявність відкритої води та потенційні ознаки трансформації водно-болотних комплексів.

Основу інтерпретації склали загальноприйняті інтерпретаційні підходи до аналізу спектральних індексів, однак уточнення діапазонів здійснювалося емпірично з урахуванням особливостей басейну Супою, типів земного покриву, сезонності знімання та розподілу значень на досліджуваних ділянках. Ці межі корелюються на основі емпіричного досвіду, гістограм конкретних досліджуваних ділянок або статистичного аналізу великих масивів даних. Найточніший спосіб – це провести власну кластеризацію або градацію за аналізом індексу у регіоні. У агроєкології: пороги визначаються за допомогою

біофізичних вимірювань рослин або продуктивності; у екологічному моніторингу використовують гістограми NDRE для встановлення діапазонів здорової та стресованої рослинності. Тому наведені діапазони слід розглядати не як універсальні порогові значення, а як локально адаптовану шкалу інтерпретації, придатну для апробації методики в межах конкретної території.

Згідно з Планом управління річковим басейном Дніпра, розробленим Водною ініціативою плюс Європейського Союзу для країн Східного партнерства (2021), обмежене поширення, слабе поповнення водою водоносного горизонту та низька якість підземних вод, висока уразливість і незахищеність від дифузного забруднення продуктами сільськогосподарської діяльності ставлять його в ряд непридатних не тільки для централізованого водопостачання, а й для водопостачання індивідуальних господарств.

Інтенсивна сільськогосподарська діяльність та меліораційні заходи сприяють подальшій деградації торфовищ і формуванню значних площ легкозаймистих поверхонь. Загальне потепління клімату та тривалі посушливі періоди стали провідними факторами у виникненні торф'яних пожеж.

Природні умови водозбірному басейну Супою визначаються поєднанням лесових і лесоподібних відкладів з поверхні, що зумовлює підвищену чутливість територій до ерозійних і суфозійних процесів. Значна частина басейну зазнала антропогенної трансформації внаслідок сільськогосподарського освоєння, меліорації та регулювання стоку, що вплинуло на стан заплавно-болотних комплексів і природну структуру ландшафтів.

Тому сучасний геоекологічний стан басейну формується під впливом поєднання природних чинників і антропогенних процесів, що проявляється у зміні водного режиму, трансформації рослинного покриву, деградації ґрунтів і формуванні теплових аномалій. Такі умови створюють сприятливі передумови для апробації методики, орієнтованої на комплексну оцінку геоекологічного стану територій у просторово-часовому вимірі.

Важливою особливістю басейну Супою як об'єкта апробації є наявність різноманітних ландшафтних і функціональних зон, що дозволяє перевірити

роботу методики в умовах різного ступеня антропогенного навантаження та різної інтенсивності геоекологічних процесів. Це забезпечує можливість оцінювання ефективності індикаторів і алгоритмів інтеграції, розроблених у межах методики (табл. 3.2, додаток Б, рис.Б.2).

Таблиця 3.2

Інтерпретація значень індексу NDBI

Діапазон	Інтерпретація	Категорія
-1,0 – 0,0	вода, заболочення, вологі поверхні, вологий ґрунт, рослинність	водні та перезволожені зони, природні поверхні
0,0 – 1,0	суха рослинність, оголений ґрунт, сухий ґрунт, дороги, промислові майданчики, бетон, асфальт, будівлі	перехідні зони, слабо урбанізовані, урбанізовані поверхні

Класифікація земного покриття та типів угідь використана як базовий шар для інтерпретації результатів супутникового аналізу. Вона дозволила просторово зіставити значення геоекологічних індикаторів із домінуючими формами землекористування та визначити, які типи територій формують основний внесок у геоекологічну напруженість басейну. У межах апробації цей шар виконує допоміжну функцію, оскільки забезпечує зв'язок між дистанційно визначеними показниками та фактичною структурою природно-антропогенних ландшафтів. Support Vector Machine за даними наявних спектральних каналів.

В основу дослідження басейну увійшли знімки супутників Landsat 4, 5, 8 та 9 протягом 1986–2023 рр. з усіма наявними каналами. На їх основі попередньо створено класифікацію поверхні (рис.3.10), яка включає: деревну рослинність, чагарники, пасовища, посіви (орні землі), забудову, відкриту поверхню або з розрідженою рослинністю, постійні водойми та трав'янисті водно-болотні угіддя. Знімки класифіковано за допомогою

Для оцінювання точності результатів виконано порівняння з автоматичною класифікацією Sentinel (рис. 3.11 та 3.12). Наведений розподіл типів земного покриття відповідає офіційній класифікації продуктів WorldCover місії Sentinel, що формується автоматизованими алгоритмами обробки супутникових даних у межах програми Copernicus.

Класи визначаються на основі стандартизованих процедур машинного навчання та спектрального аналізу, які забезпечують уніфіковане, повторюване та незалежне від суб'єктивних оцінок картографування поверхні. Усі категорії – від покриття деревною рослинністю до водно-болотних угідь – генеруються автоматично за єдиними правилами, затвердженими Європейським космічним агентством, що гарантує їхню сумісність та наукову коректність всюди.

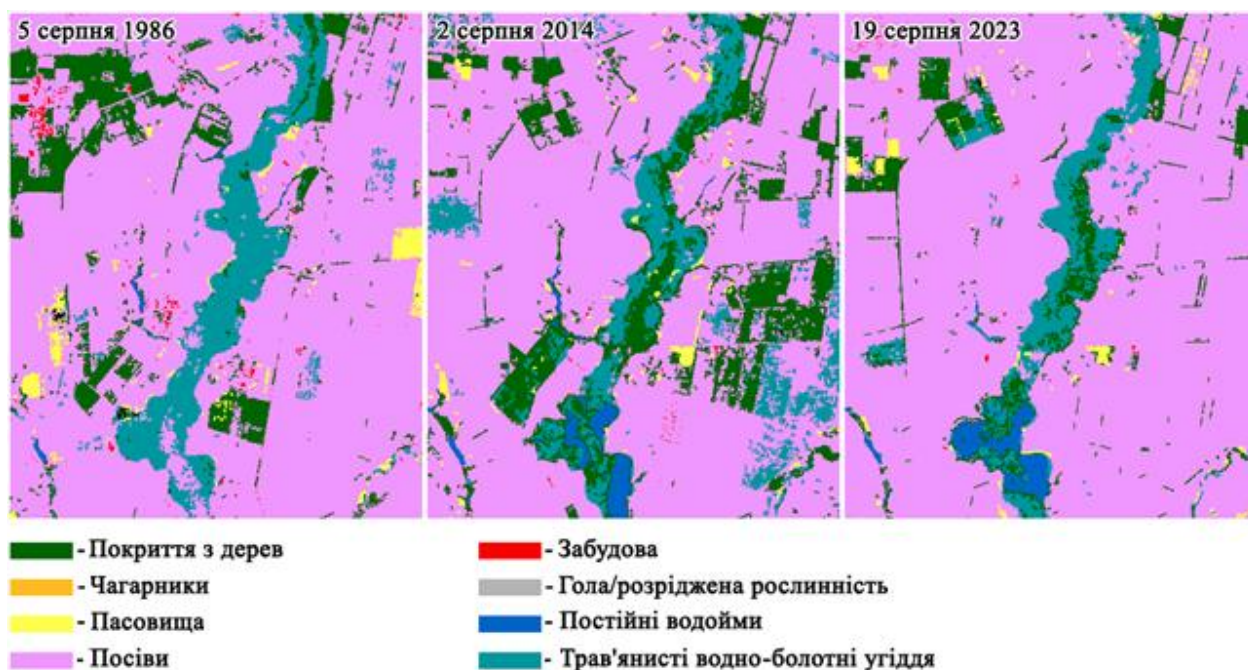


Рис. 3.10 Фрагмент класифікованих знімків Landsat (Смарагдова мережа, ПЗФ «Усівський-2»)

Для оцінювання рівня антропогенного навантаження та ступеня освоєння території було виконано класифікацію супутникових знімків на основі Sentinel із застосуванням методу Binary Encoding Classification за підготовленими 273 полігонами (Regions Of Interest). Отримані результати дали змогу визначити просторову структуру земного покриву та виділити основні типи використання земель, які були застосовані в подальшому дослідженні. Додатково, шляхом накладання меж населених пунктів та меж заповідних територій (гідрологічних заказників), у їхніх контурах було здійснено корекцію результатів: класи, віднесені алгоритмом до категорії Посіви, були замінені на класи Забудова та Трав'янисті водно-болотні угіддя. Також шляхом накладання меж заповідних

територій. Оцінки точності проводилися по 273 точках, розкиданих по всьому басейну, і становлять 0,91%. Такий підхід дозволив підвищити точність класифікації та краще відобразити реальний характер антропогенного освоєння території в даному масштабі і використовувати результати в подальшій роботі (додаток Б, рис.Б.1).

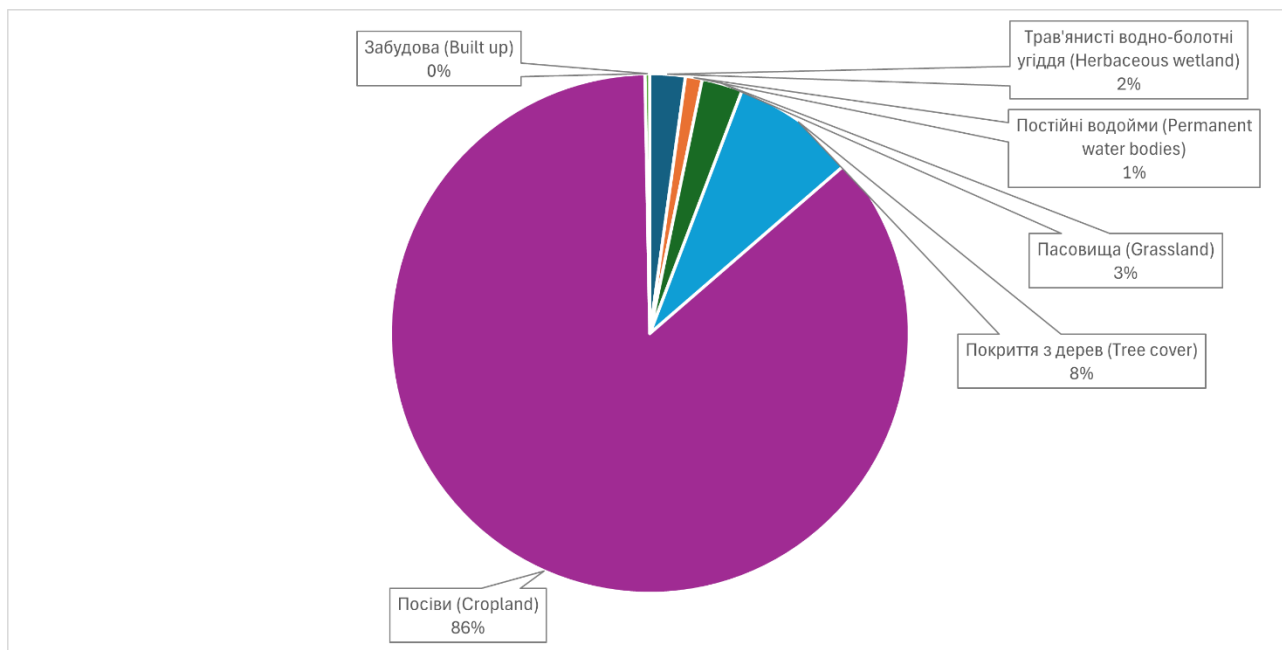


Рис. 3.11 Класифікація басейну за даними Landsat як результат дослідження

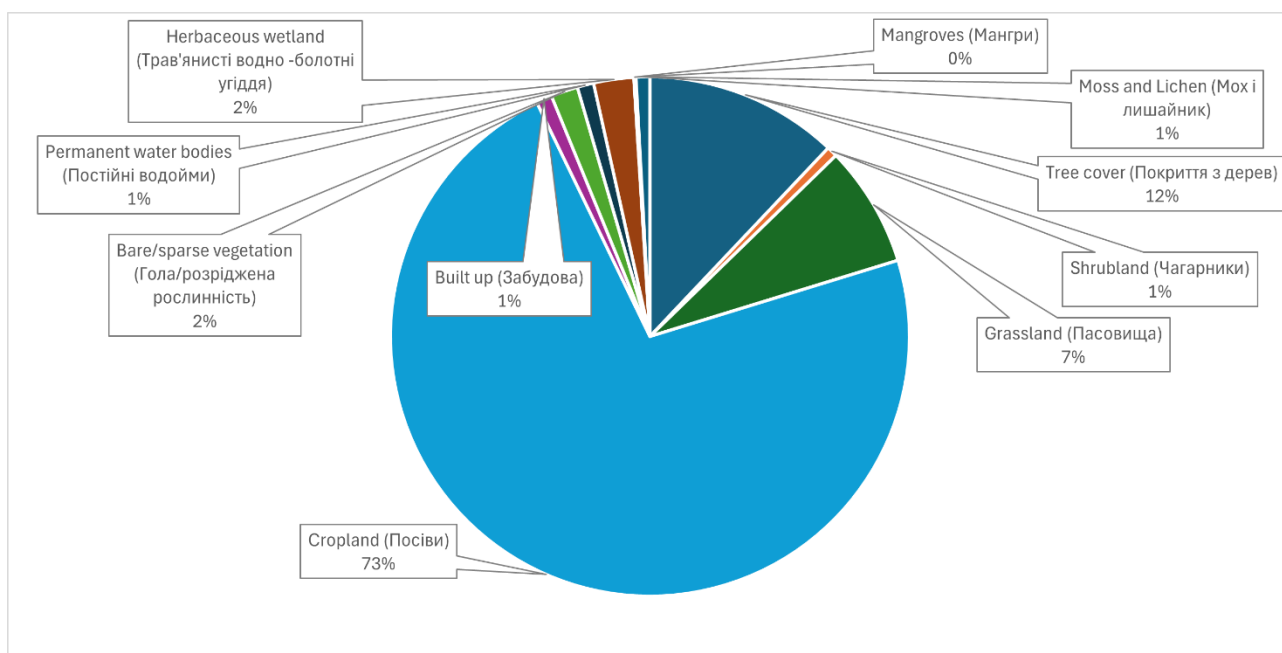


Рис. 3.12 Земний покрив басейну річки Супій за даними ESA WorldCover

NDVI відображає стан рослин: високі значення (понад 0,5) свідчать про густу, здорову рослинність, а низькі або від’ємні – про її відсутність чи поганий стан (табл. 3.3, додаток Б, рис.Б.3) (*NASA Earthdata, 2026*).

Таблиця 3.3

Інтерпретація значень індексу NDVI

Діапазон	Опис	Стан рослинності
-1,0 – 0,1	Вода, сніг, хмари	Без рослинності
0,1 – 0,25	Деградовані землі, рілля	Дуже розріджена рослинність
0,25 – 0,45	Пасовища, мозаїчні ландшафти	Помірна рослинність
0,45 – 0,65	Поля, луки, сади, активні посіви	Густа рослинність
0,65 – 1,0	Ліси, вологі екосистеми	Дуже густа, активна рослинність

GNDVI чутливіший до вмісту хлорофілу в листі, ніж NDVI, і краще відображає фізіологічний стан рослин, особливо на ранніх стадіях стресу (наприклад, через нестачу азоту або води) (табл. 3.4, додаток Б, рис.Б.4).

Таблиця 3.4

Інтерпретація значень індексу GNDVI

Діапазон	Інтерпретація	Стан рослинності
-1,0 – 0,0	Вода, хмари, сніг	Без рослинності
0,0 – 0,2	Грунт, урбанізовані площі	Відсутня або деградована
0,2 – 0,4	Пасовища, рілля, стресована вегетація	Слабка рослинність
0,4 – 0,6	Луки, молоді посіви, сади	Помірна, середня рослинність
0,6 – 0,8	Густі посіви, ліси	Висока продуктивність
0,8 – 1,0	Вологі ліси, рослинність	Дуже густа, насичена хлорофілом

LCI використовує NIR, RE, RED відповідно. Як альтернативна адаптована формула, що використовує NIR, RED, BLUE відповідно. Такий варіант запропоновано у ряді прикладних робіт, зокрема у точному землеробстві (Haboudane et al., 2004) та для моніторингу азоту в листках (*Tian et al., 2011*) (табл. 3.5, додаток Б, рис.Б.5).

LCI високочутливий до вмісту хлорофілу в листі, особливо у випадках помірного до сильного стресу. На відміну від NDVI або GNDVI, він краще працює з гіперспектральними або вузькоспектральними даними.

Таблиця 3.5

Інтерпретація значень індексу LCI

Діапазон	Інтерпретація	Стан рослинності
-1,0 – 0,0	Вода / сніг / тіні	Без рослинності
0,0 – 0,2	Ґрунт / мертва або стресова зелень	Деградоване покриття
0,2 – 0,5	Ранній ріст, Середній вміст хлорофілу	Помірна продуктивність, проростання
0,5 – 0,7	Високий хлорофіл	Активна фаза росту, здорова маса
0,7 – 1,0	Дуже високий хлорофіл	Густа зелень, часто надлишкова

EVI був створений як альтернатива NDVI, менш чутлива до атмосферних аерозолів, насичення при високій біомасі, впливу фонових ґрунтів (табл. 3.6, додаток Б, рис.Б.6).

Таблиця 3.6

Інтерпретація значень індексу EVI

Діапазон	Інтерпретація	Стан рослинності
-1,0 – 0,0	Хмари, сніг, вода	Без рослинності
0,0 – 0,1	Ґрунт, урбанізовані території	Відсутня або дуже слабка рослинність
0,1 – 0,2	Деградовані або сухі зони	Слабка рослинність
0,2 – 0,4	Сільськогосподарські угіддя	Помірна рослинність
0,4 – 0,6	Поля в активній фазі росту	Густа рослинність
0,6 – 1,0	Вологі ліси	Надзвичайно густа рослинність

AFVI є більш стійким до атмосферних перешкод (аерозолів), ніж NDVI, і краще підходить для моніторингу рослинного покриву в посушливих регіонах або під час пилових бур (табл. 3.7, додаток Б, рис.Б.7).

Таблиця 3.7

Інтерпретація значень індексу AFVI

Діапазон AFVI _{1.6}	Діапазон AFVI _{2.1}	Інтерпретація	Стан рослинності
-1,0 – 0,0	-1,0 – 0,05	Вода, спалена рослинність	Відсутня, зруйнована рослинність
0,0 – 0,1	0,05-0,05	Ґрунт, деградовані території	Дуже слабка рослинність
0,1 – 0,2	0,05-0,15	Сухі трави, пастбища	Слабка рослинність
0,2 – 0,3	0,15-0,25	Рілля, чагарники	Помірна рослинність
0,3 – 0,5	0,25-0,4	Сади, сільське господарство	Густа рослинність
0,5 – 1,0	0,4 – 1,0	Ліси, вологі екосистеми	Дуже густа, здорова рослинність

SWIR 2190 нм глибше проникає та краще розрізняє вологість і глибоку структуру, тоді як 1610 нм більш чутливий до зовнішньої частини рослин (табл. 3.8, додаток Б, рис.Б.8). Однак такий діапазон знімання, як SWIR,

наприклад, відсутній, на знімках PlanetScope, що унеможливлює використання цих даних для розрахунку індексу AFVI.

Таблиця 3.8

Відмінність каналів SWIR 1 та SWIR 2 для індексу AFVI

Параметр	AFVI _{1.6} (B11)	AFVI _{2.1} (B12)
Довжина хвилі	1610 нм	2190 нм
Глибина проникнення	Менша (поверхневий шар листа)	Більша (структура, вміст вологи)
Чутливість	До структури крони	До вологи рослин, ґрунту
Стійкість до аерозолів	Висока	Ще вища
Спектральне насичення	Рідше – сильніше насичується	Більш стабільний

NDRE є чутливішим до вмісту хлорофілу в щільній рослинності, ніж NDVI (особливо у фазі покриття > 60–70%) і краще підходить для моніторингу врожайності (зернових, винограду, кукурудзи, садів, особливо в середині вегетації), азотного забезпечення та стресових станів на пізніх фазах росту (табл.3.9, додаток Б, рис.Б.9).

Таблиця 3.9

Інтерпретація значень індексу NDRE

Діапазон NDRE _{B5}	Діапазон NDRE _{B6}	Інтерпретація	Стан рослинності
-1,0 – 0,0	-1,0 – 0,0	Вода	Без рослинності
0,0 – 0,1	0,0 – 0,08	Ґрунт, асфальт, мертва рослинність	Відсутня, деградована зелень
0,1 – 0,2	0,08 – 0,18	Стрес, низький хлорофіл	Слабка рослинність
0,2 – 0,3	0,18 – 0,28	Помірна вегетація, середній вміст хлорофілу	Задовільна продуктивність
0,3 – 0,5	0,28 – 0,45	Густа зелена маса, активна фаза росту	Висока продуктивність
0,5 – 0,0	0,45 – 0,0	Насичена зелень, висока біомаса	Дуже густа, здорова рослинність

NDRE з B5 (705 нм):

- Більш чутливий до поверхневого хлорофілу,
- Значення NDRE вище в молодих або менш густих рослин,
- Часто показує вищі NDRE у ранній вегетації.

NDRE з B6 (740 нм) (табл. 3.10, додаток Б, рис.Б.10):

- Чутливий до глибшої структури листя та вологи.

- Значення NDRE трохи нижчі, але стабільніші в пізніх фазах росту.
- Менш схильний до насичення.

Таблиця 3.10

Відмінність каналів RE 1 та RE 2 для індексу NDRE

Параметр	RE 1 (B5)	RE 2 (B6)
Центр спектру	705 нм	740 нм
Ширина спектру	15 нм	15 нм
Чутливість до	Поверхневий хлорофіл, молоді пагони	Глибша зелена маса, зрілі рослини
Переваги	Ранні стадії росту, легше вловлює зміни	Менше насичується, стабільніший у щільній рослинності
Недоліки	Може бути чутливий до фону	Менше чутливий до слабкої рослинності

Інтерпретація значень WDRVI наведено в таблиці 3.11 та зображено у додатку Б, рис.Б.11.

Таблиця 3.11

Інтерпретація значень індексу

Діапазон	Інтерпретація	Стан рослинності
-0,0 – -0,3	Вода, сніг, хмари	Без рослинності
-0,3 – -0,1	Грунт, мертва рослинність	Відсутність зеленої біомаси
-0,1 – 0,4	Помірна активність	Початкова вегетація, здорова рослинність
0,4 – 0,7	Висока активність, щільна зелена маса	Інтенсивна вегетація
0,7 – 0,0	Надзвичайно густа зелень, зрошення	Високопродуктивні культури

CIG чутливо реагує на рівень хлорофілу в листі, що робить його корисним для оцінки фотосинтетичної активності та стресу рослин (табл.3.12, додаток Б, рис.Б.12).

Таблиця 3.12

Інтерпретація значень індексу CIG

Діапазон	Інтерпретація	Стан рослинного покриву
-1,0 – -0,85	Вода, сніг, хмари	Без рослинності
-0,85 – -0,6	Голий ґрунт, суха трава	Низький вміст хлорофілу
-0,6 – -0,4	Розріджена, молода рослинність	Початкова стадія росту
-0,4 – 0,0	Помірна зелена маса	Активна вегетація
0,0 – 0,5	Висока концентрація хлорофілу	Здорова щільна рослинність
0,5 – 1,0	Надзвичайно густа або зрошена зелень	Високопродуктивні культури

NDWI ефективно виділяє відкриту воду, оскільки вода добре поглинає в NIR і відбиває в зеленому. Значення > 0 зазвичай відповідають водним поверхням (табл. 3.13).

Таблиця 3.13

Інтерпретація значень індексу NDWI

Діапазон	Інтерпретація	Стан поверхні
-1,0 – -0,5	Дуже сухі / штучні поверхні	Асфальт, бетон, пустелі
-0,5 – -0,3	Відносно сухі території	Напівпосушливі, міські зони
-0,3 – -0,1	Сухі або зволожені території	Рослинність, розорані поля
-0,1 – 0,0	Потенційно волога поверхня	Зволожений ґрунт, низинні луки
0,0 – 1,0	Висока вологість, наявність води	Відкрита вода, болота, заплава

MNDWI зменшує плутанину між водою, забудовою та рослинністю, покращуючи виділення дрібних і міських водних тіл у порівнянні з NDWI (McFeeters, 1996) (табл. 3.14, додаток Б, рис.Б.14).

Таблиця 3.14

Інтерпретація значень індексу MNDWI

Діапазон	Інтерпретація	Категорія
-1,0 – -0,4	Асфальт, суха земля, села	Несприйнятливі поверхні
-0,4 – 0,0	Ґрунт, рослинність, вологий ґрунт	Нерегулярна волога
0,0 – 0,2	Волога поверхня, заболочені зони	Потенційна вода, заболочення
0,2 – 0,5	Відкрита вода, дрібні водойми	Поверхнева вода
0,5 – 1,0	Глибока, чиста вода	Інтенсивно водонасичені площі

NDMI чутливий до вмісту води в рослинному покриві, використовується для моніторингу посух, стану посівів, лісових пожеж та зволоженості ґрунту (табл. 3.15, додаток Б, рис.Б.15).

Таблиця 3.15

Інтерпретація значень індексу NDMI

Діапазон	Інтерпретація	Категорія
-1,0 – -0,2	Сухий ґрунт, урбанізовані території	Несприйнятливі поверхні
-0,2 – 0,0	Помірна вологість, деградовані ґрунти	Слабо зволожені ділянки
0,0 – 0,2	Вологий ґрунт, рідка рослинність	Потенційно волога зона
0,2 – 0,4	Активна рослинність, добрий стан вологи	Задовільна вологість
0,4 – 1,0	Надмірна вологість, заболочення	Висока вологість, насичення

NDPI відокремлює ставки та менші водойми від навколишньої рослинності, забезпечуючи точніше картографування та моніторинг водно-

болотних угідь. Особливо корисний у регіонах з густою рослинністю, де традиційні методи можуть бути неефективними для розрізнення води та землі (табл. 3.16, додаток Б, рис.Б.16).

Таблиця 3.16

Інтерпретація значень індексу NDPI

Діапазон	Інтерпретація	Категорія
-1,0 – -0,2	Вода, ставки, болотисті ділянки	Відкрита вода, водойма
-0,2 – 0,0	Волога поверхня, заболочення	Потенційно водонасичені зони
0,0 – 0,2	Волога рослинність, заболочені поля	Вологі зони
0,2 – 0,4	Суха рослинність, сільськогосподарські	Висушені, деградовані зони
0,4 – 1,0	Сухий ґрунт, урбанізовані поверхні	Несприйнятливі поверхні

Позитивні значення NDDI вказують на посушливі або зневоднені умови; негативні – на вологі або стабільні екосистеми. Індекс чутливий до динаміки ґрунтової вологи та рослинного покриву, а також ефективний для сільського господарства тощо (додаток Б, рис.Б.17).

AWEI забезпечує високу точність в автоматичному виокремленні води, особливо в міських, лісових і гірських районах, де тіні часто плутаються з водою (табл. 3.17).

Таблиця 3.17

Інтерпретація значень індексу AWEI

Діапазон	Інтерпретація	Категорія
$-\infty$ – 0,1	Шум, урбанізоване	Урбанізовані / затінені
0,1 – 1,5	Сухі ґрунти, рослини	Неводна поверхня
1,5 – 1,9	Перехідна зона	Волога поверхня / змішане
1,9 – ∞	Вірогідна вода	Вода

SAVI та OSAVI – вегетаційні індекси, які зменшують вплив ґрунту, але OSAVI сильніше коригує цей вплив, тому краще працює на ділянках із розрідженою рослинністю. Через це в OSAVI межа дуже густої рослинності зазвичай починається вже від 0,6, тоді як у SAVI – від 0,7 (табл. 3.18, додаток Б, рис.Б.18–19).

Результати оцінювання вегетаційної активності слугують не лише окремими тематичними картами, а й оглядовими для обмеження використовуваних діапазонів значень у розроблених методиках. Наприклад, для

розрахунку пожежонебезпечності торфово-болотних угідь не потрібно брати весь діапазон значень NDVI, оскільки діапазон значень до 1 відповідає за воду, а це є шум для даного завдання.

Таблиця 3.18

Інтерпретація значень індексу SAVI

Діапазон SAVI	Діапазон OSAVI	Інтерпретація	Категорія
-1,0 – 0,0	-1,0 – 0,0	Вода або шум	Вода, відсутність покриву
0,0 – 0,1	0,0 – 0,1	Голий ґрунт, міські поверхні	Відсутність рослинності
0,1 – 0,25	0,1 – 0,25	Рідка, деградована рослинність	Низька рослинність
0,25 – 0,7	0,25 – 0,6	Активна рослинність	Помірна рослинність
0,7 – 1,0	0,6 – 1,0	Надзвичайно густа рослинність	Дуже висока рослинність

Оцінювання стану ґрунтового покриву та теплового режиму земної поверхні є важливим етапом апробації методики, оскільки ці компоненти відображають як довготривалі тенденції трансформації ландшафтів, так і сучасний вплив природних та антропогенних чинників.

BSI більш чутливий до яскравих сухих ґрунтів і урбанізованих поверхонь; MBI краще відсікає вологість і рослинність (табл. 3.19). Індекси добре корелюють із вмістом солей у верхньому шарі ґрунту, особливо в посушливих регіонах. Значення NDSI, що наближаються до 1, асоціюються з високим рівнем солоності землі.

Таблиця 3.19

Інтерпретація значень індексу BSI та MBI

Діапазон BSI	Діапазон MBI	Інтерпретація	Категорія
-1,0 – -0,2	-1,0 – -0,2	Вода або щільна волога рослинність	Вода / відсутність оголеного ґрунту
-0,2 – 0,0	-0,2 – 0,0	Щільна рослинність	Дуже низька оголеність
0,0 – 0,15	0,0 – 0,2	Помірна рослинність, частково закритий ґрунт	Низька оголеність
0,15 – 0,3	0,2 – 0,35	Розріджена рослинність, відкриті ділянки	Помірна оголеність
0,3 – 0,5	0,35 – 0,55	Переважно відкритий ґрунт, агроландшафти	Висока оголеність
0,5 – 1,0	0,55 – 1,0	Голий ґрунт, деградовані території, кар'єри	Дуже висока оголеність

Класичні індекси засоленості ґрунтуються на використанні червоного та ближнього інфрачервоного діапазонів, однак сучасні дослідження демонструють доцільність використання SWIR-каналів, що підвищує чутливість до мінералізованих та сухих ґрунтів (Nawar et al., 2014).

Індекс NDSI відображає потенційну засоленість ґрунтів, однак потребує інтерпретації у поєднанні з індексами вологості та рослинного покриву (Chen, 2004). SI доцільно використовувати як допоміжний індикатор засолення у поєднанні з NDSI, NDMI та індексами рослинності (Nguyen et al., 2021).

У межах тестових ділянок простежуються відмінності у рівні деградації ґрунтів, що відображають специфіку землекористування та особливості водного режиму. Отримані просторові закономірності підтверджують чутливість застосованих індикаторів до змін ґрунтового покриву та їх придатність для порівняльного аналізу в межах басейну.

Підвищені значення NDSI, зафіксовані над окремими водоймами, зумовлені насамперед високою каламутністю води та значною концентрацією завислих наносів, які збільшують відбиття у червоному спектральному діапазоні (табл. 3.20, додаток Б, рис.Б.20). Тому для водних об'єктів значення NDSI не інтерпретувалися як показник засолення, а аналіз індексу проводився лише в межах суходолу.

Таблиця 3.20

Інтерпретація значень індексу NDSI

Діапазон NDSI	Інтерпретація	Категорія
-1,0 – -0,2	Вода або щільна волога рослинність	Ймовірно без засолення
-0,2 – 0,0	Добре зволожені ґрунти, густа рослинність	Дуже низька ймовірність засолення
0,0 – 0,15	Помірна рослинність, слабка мінералізація	Низька ймовірність засолення
0,15 – 0,3	Частково оголені ґрунти, можливе засолення	Можливе засолення
0,3 – 0,5	Слабко-рослинні або деградовані ґрунти	Висока ймовірність засолення
0,5 – 1,0	Солончаки, сильно деградовані території	Дуже висока ймовірність засолення

Інтегральний показник **пожежонебезпечності** отримано шляхом агрегації NDMI (з ваговим коефіцієнтом 0,15), NDDI (0,20), NDVI (0,15), LST (0,30) та ET (0,20), що відображають відповідні принципи ймовірного виникнення пожеж.

NDVI використовується як індикатор наявності зеленого покриву, що знижує ймовірність виникнення пожеж. Для уникнення хибної інтерпретації водних поверхонь, тіней та інших невегетованих ділянок, значення NDVI нижче 0,1 приводилися до нуля, оскільки такі поверхні не мають відношення до оцінки пожежонебезпечності. При цьому застосовано реверсне нормування таким чином, щоб показники здорової рослинності приймали значення ближче до 0, у той час як суха рослинність наближалася до 1.

Для індексу NDMI застосовано інверсне лінійне нормування, оскільки зниження NDMI відповідає зменшенню вологості та зростанню пожежонебезпечності. Значення NDMI було приведено до діапазону, де 0 відповідає максимальній вологості, а 1 – мінімальній.

Індекс NDDI використовувався у вигляді бінарної маски, оскільки його абсолютні значення можуть бути нестабільними та виходити за фізично обґрунтовані межі. NDDI, більші за 0, позначалися як пожежонебезпечні, що дозволяє коректно врахувати факт дефіциту води.

Температуру поверхні (LST) було приведено до діапазону пожежонебезпечних значень 20–50 °C шляхом обмеження вихідних даних:

$$T' = \min(\max(T, 20), 50), \quad (3.1)$$

Подальше нормування зведено до значень, близьких до 0, які відповідають низькій пожежонебезпечності, а значення, близькі до 1, – високій.

Випаровуваність нормована в діапазоні від 0 до 1 з урахуванням того, що низькі значення (ET) відповідають сухому стану поверхні та високій пожежонебезпечності. Використано дані MODIS, а саме Terra Net Evapotranspiration.

3.3 Геоекологічний аналіз тестових ділянок за методикою

3.3.1 Аналіз тестової ділянки «Свидовець»

Результати аналізу тестової ділянки «Свидовець» представлено на рис. 3.13.

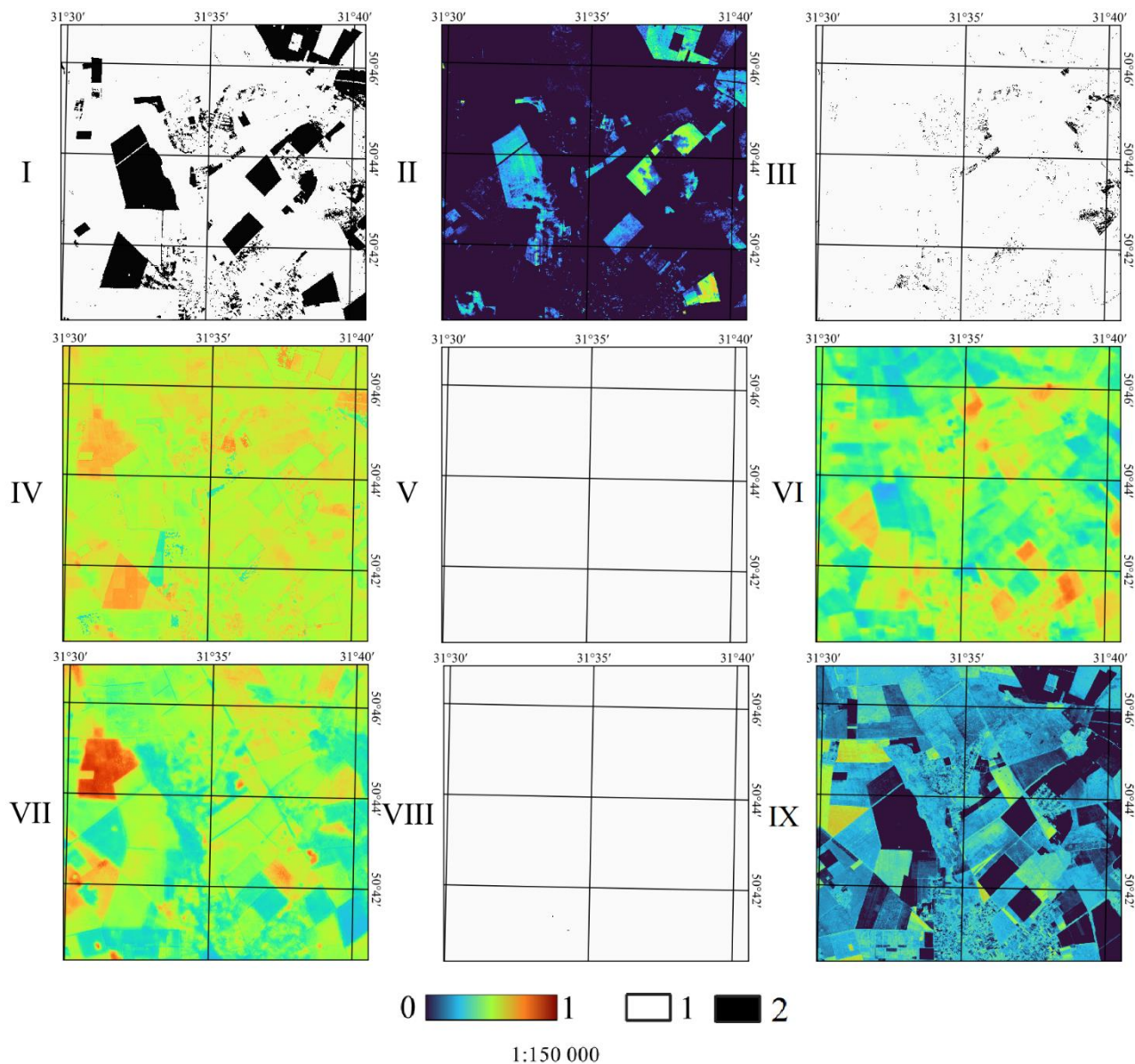


Рис. 3.13 Результати аналізу геоєкологічних процесів та параметрів на тестовій ділянці «Свидовець»

Умовні позначення: геоєкологічні процеси та параметри – I) збільшення антропогенного навантаження, II) деградація рослинності, III) дефіцит вологи та посуха, IV) пожежонебезпечність, V) підтоплення, VI) температурний режим, VII) теплове навантаження, VIII) заболочення, IX) зменшення площі водного дзеркала; 1) межі текстових ділянок; 2) значення 1 для I, III, V та VIII.

3.3.2 Аналіз тестової ділянки «Усівський»

Результати аналізу тестової ділянки «Усівський» представлено на рис. 3.14.

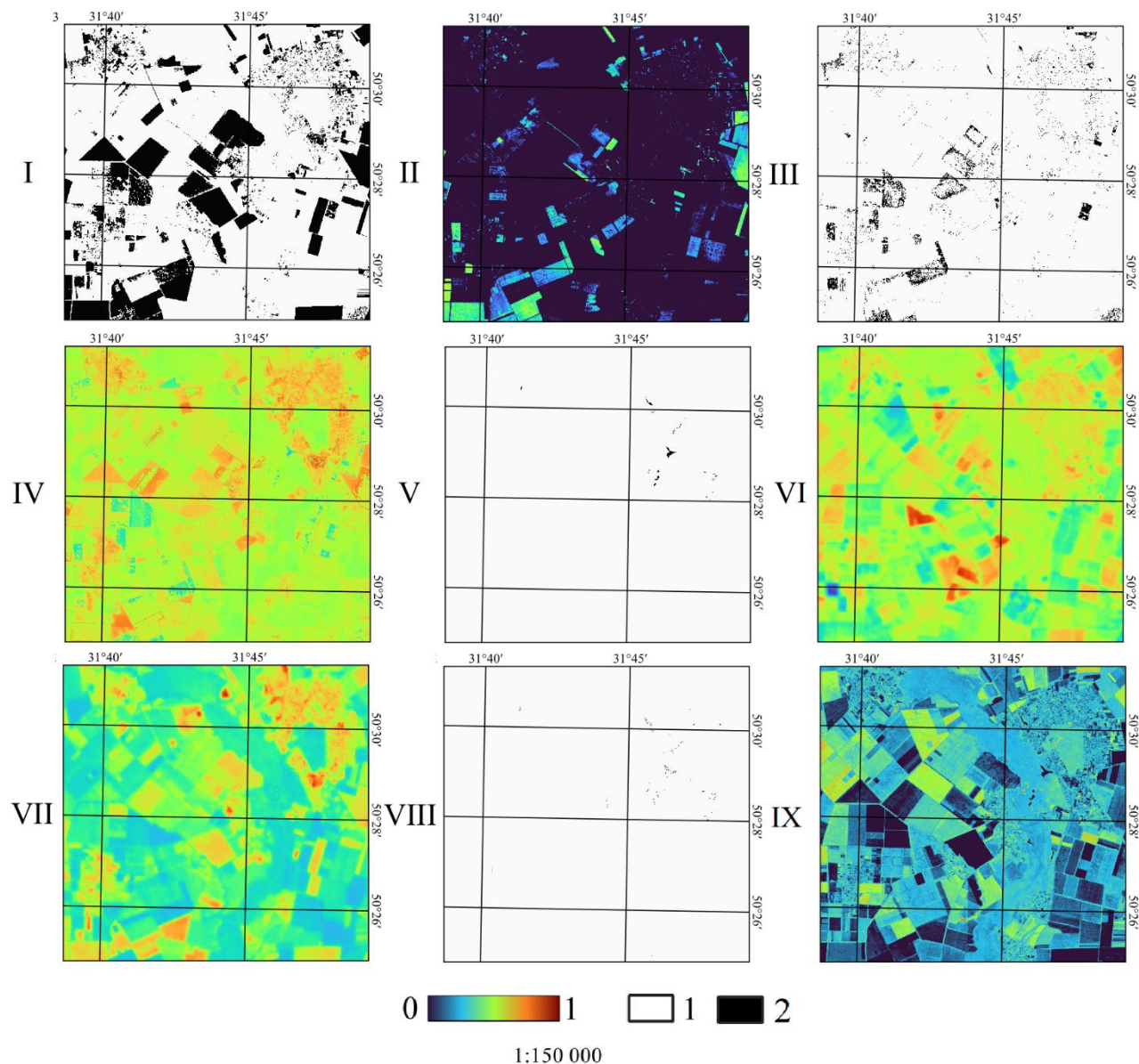


Рис. 3.14 Результати аналізу геоєкологічних процесів та параметрів на тестовій ділянці «Усівський»

Умовні позначення: геоєкологічні процеси та параметри – I) збільшення антропогенного навантаження, II) деградація рослинності, III) дефіцит вологи та посуха, IV) пожежонебезпечність, V) підтоплення, VI) температурний режим, VII) теплове навантаження, VIII) заболочення, IX) зменшення площі водного дзеркала; 1) межі текстових ділянок; 2) значення 1 для I, III, V та VIII.

3.3.3 Аналіз тестової ділянки «Озерна»

Результати аналізу тестової ділянки «Озерна» представлено на рис. 3.15.

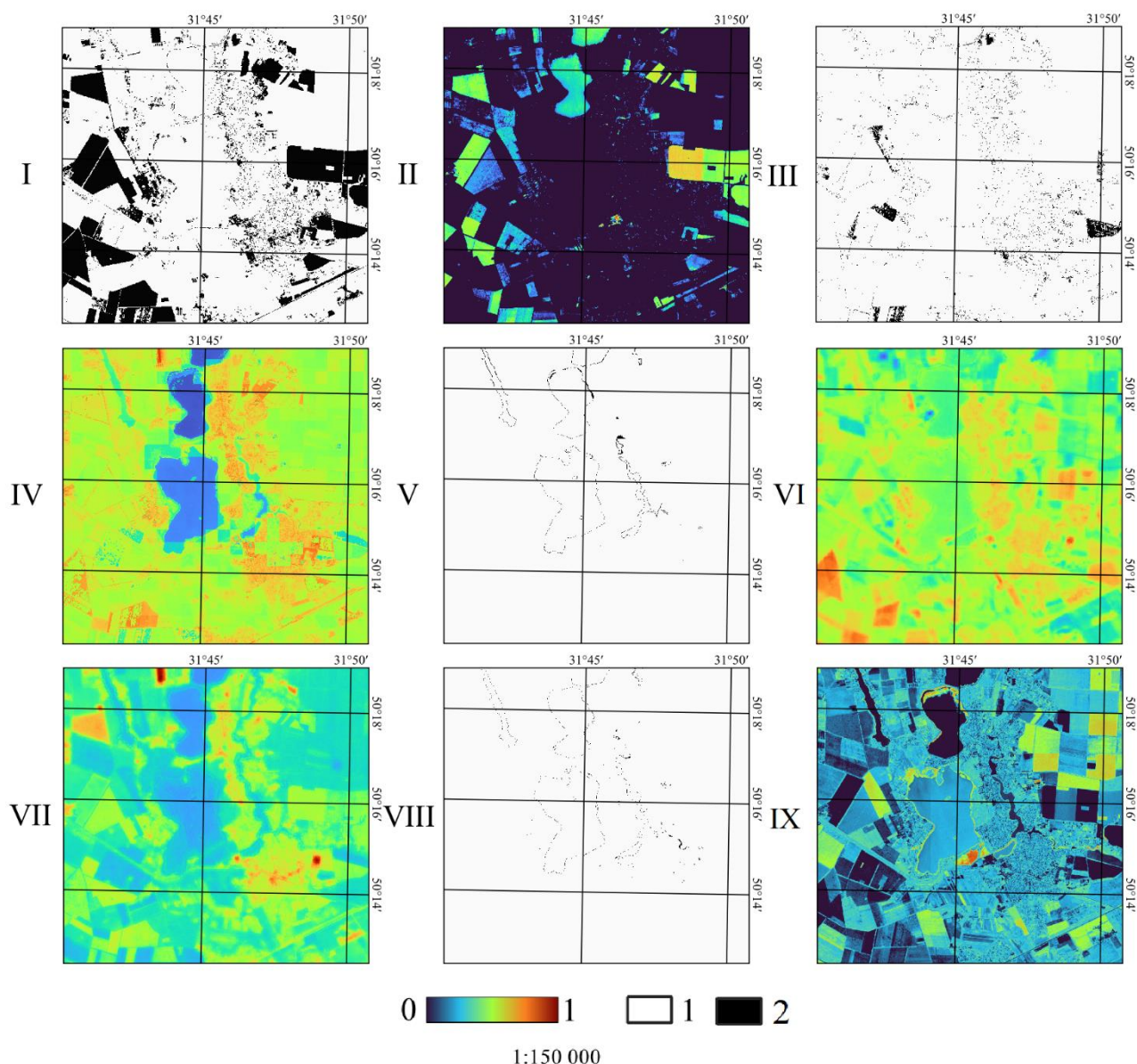


Рис. 3.15 Результати аналізу геоєкологічних процесів та параметрів на тестовій ділянці «Озерна»

Умовні позначення: геоєкологічні процеси та параметри – I) збільшення антропогенного навантаження, II) деградація рослинності, III) дефіцит вологи та посуха, IV) пожежонебезпечність, V) підтоплення, VI) температурний режим, VII) теплове навантаження, VIII) заболочення, IX) зменшення площі водного дзеркала; 1) межі текстових ділянок; 2) значення 1 для I, III, V та VIII.

3.3.4 Аналіз тестової ділянки «Бутовщина»

Результати аналізу тестової ділянки «Бутовщина» представлено на рис. 3.16.

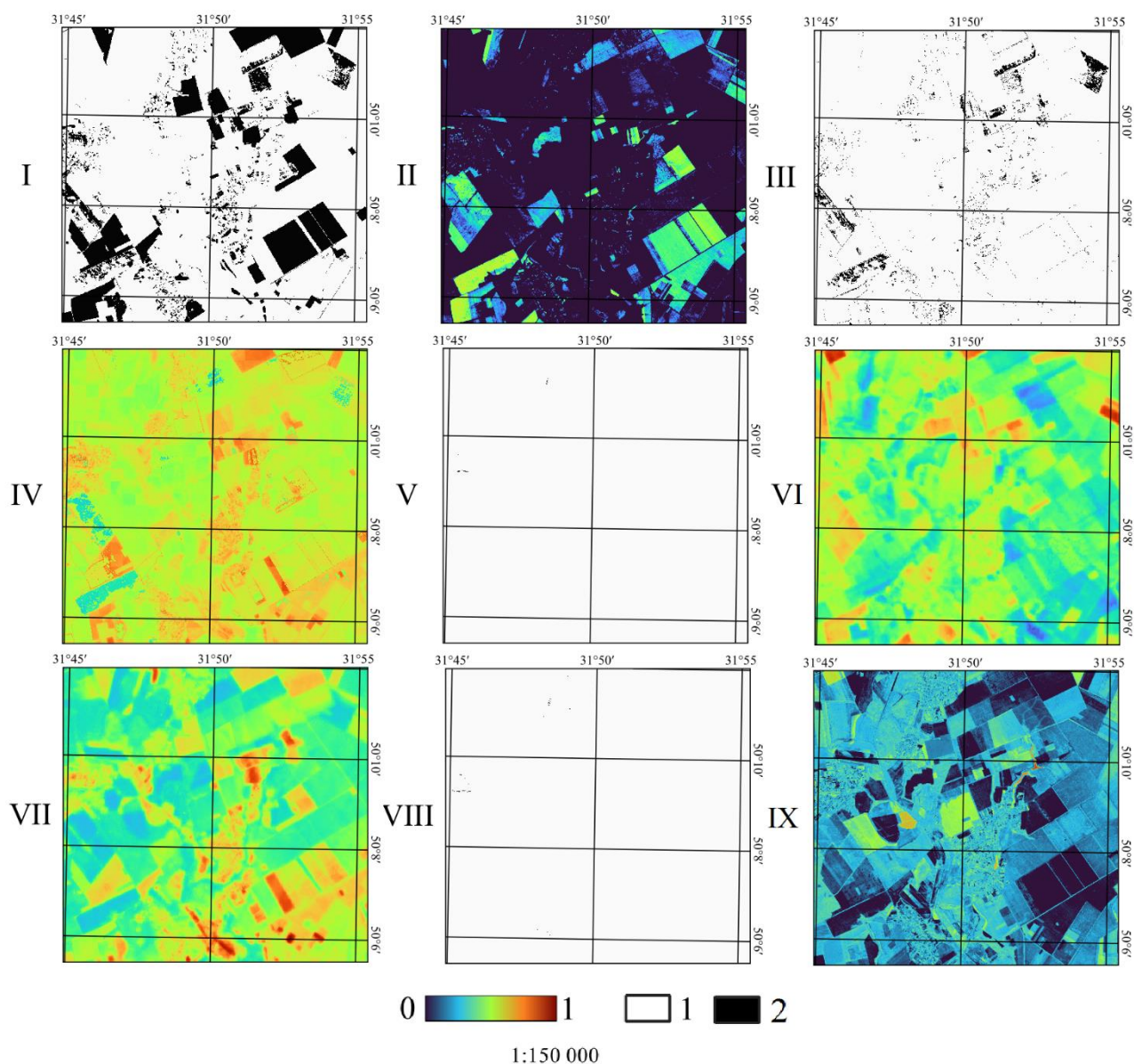


Рис. 3.16 Результати аналізу геоєкологічних процесів та параметрів на тестовій ділянці «Бутовщина»

Умовні позначення: геоєкологічні процеси та параметри – I) збільшення антропогенного навантаження, II) деградація рослинності, III) дефіцит вологи та посуха, IV) пожежонебезпечність, V) підтоплення, VI) температурний режим, VII) теплове навантаження, VIII) заболочення, IX) зменшення площі водного дзеркала; 1) межі текстових ділянок; 2) значення 1 для I, III, V та VIII.

3.3.5 Аналіз тестової ділянки «Ташанський»

Результати аналізу тестової ділянки «Ташанський» представлено на рис. 3.17.

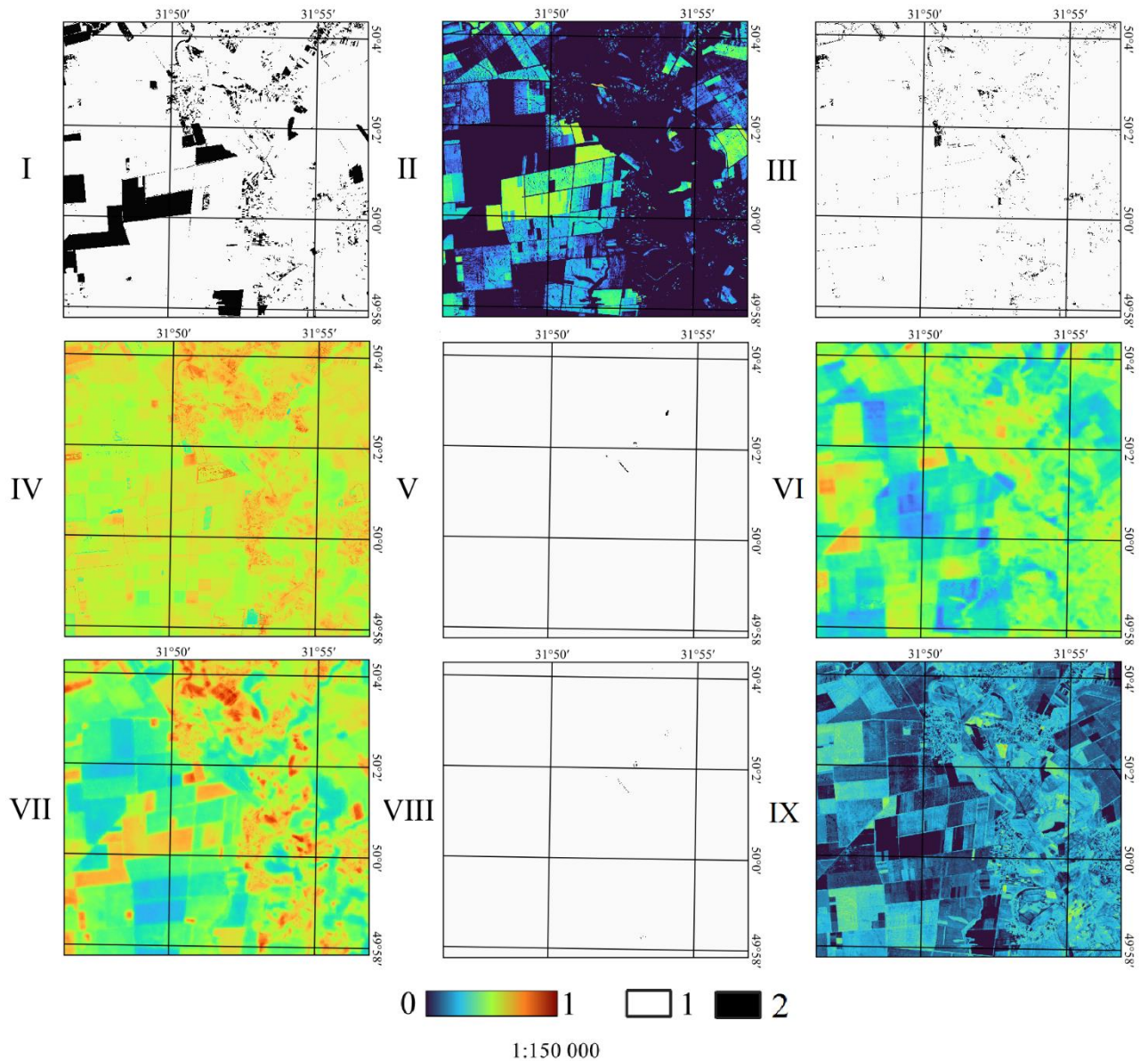


Рис. 3.17 Результати аналізу геоєкологічних процесів та параметрів на тестовій ділянці «Ташанський»

Умовні позначення: геоєкологічні процеси та параметри – I) збільшення антропогенного навантаження, II) деградація рослинності, III) дефіцит вологи та посуха, IV) пожежонебезпечність, V) підтоплення, VI) температурний режим, VII) теплове навантаження, VIII) заболочення, IX) зменшення площі водного дзеркала; 1) межі текстових ділянок; 2) значення 1 для I, III, V та VIII.

3.3.6 Аналіз тестової ділянки «Коврасць»

Результати аналізу тестової ділянки «Коврасць» представлено на рис. 3.18.

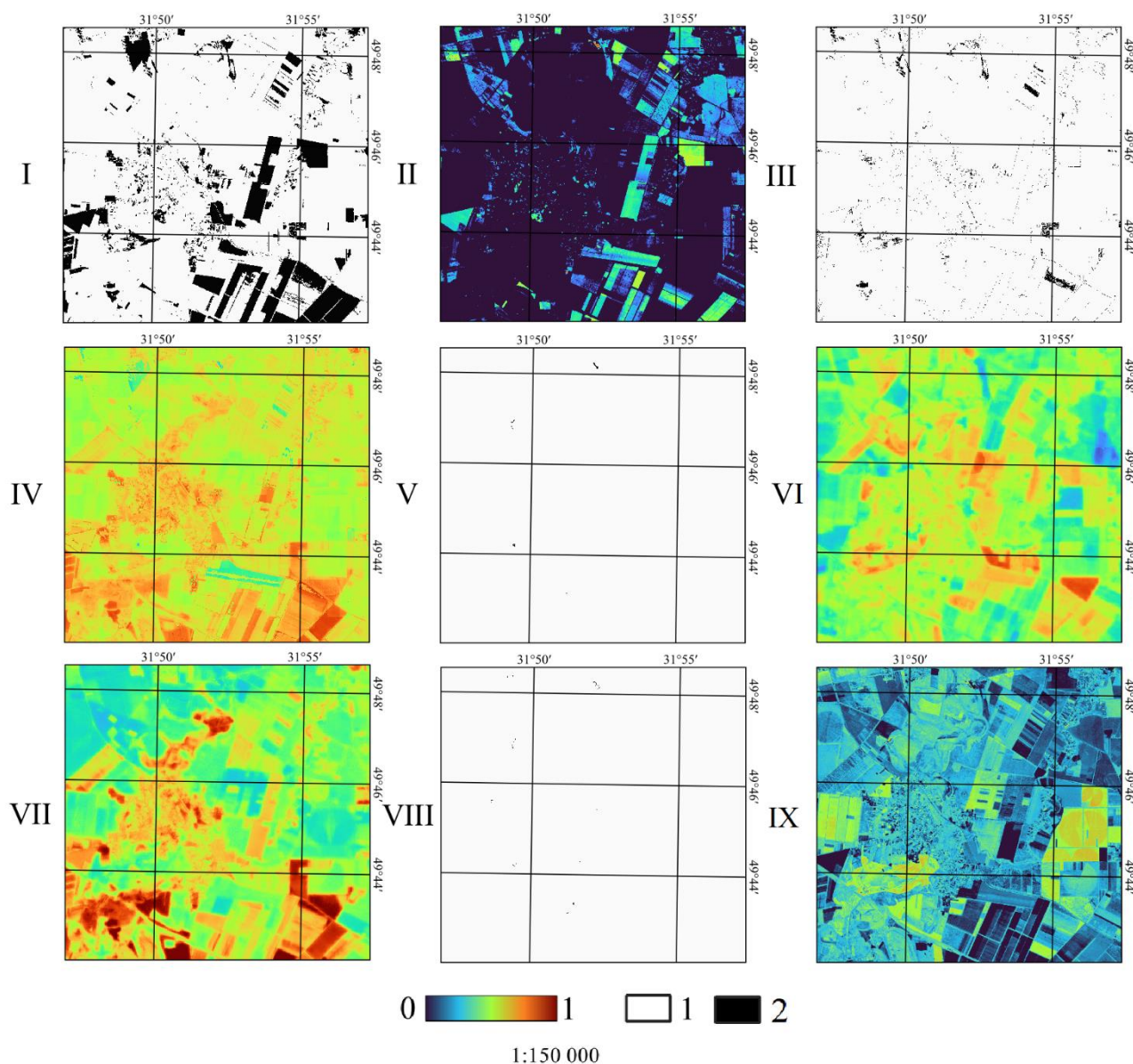


Рис. 3.18 Результати аналізу геоєкологічних процесів та параметрів на тестовій ділянці «Коврасць»

Умовні позначення: геоєкологічні процеси та параметри – I) збільшення антропогенного навантаження, II) деградація рослинності, III) дефіцит вологи та посуха, IV) пожежонебезпечність, V) підтоплення, VI) температурний режим, VII) теплове навантаження, VIII) заболочення, IX) зменшення площі водного дзеркала; 1) межі текстових ділянок; 2) значення 1 для I, III, V та VIII.

3.4 Потенційна геоекологічна небезпека в межах басейну р.Супій

За результатами дослідження тестові ділянки мають середні показники потенційної геоекологічної небезпеки 1.95, 1.99, 1.90, 1.95, 1.85, 2.12, що робить «Ковраєць» найвразливішою, а «Ташанський» відносно безпечною (рис. 3.19).

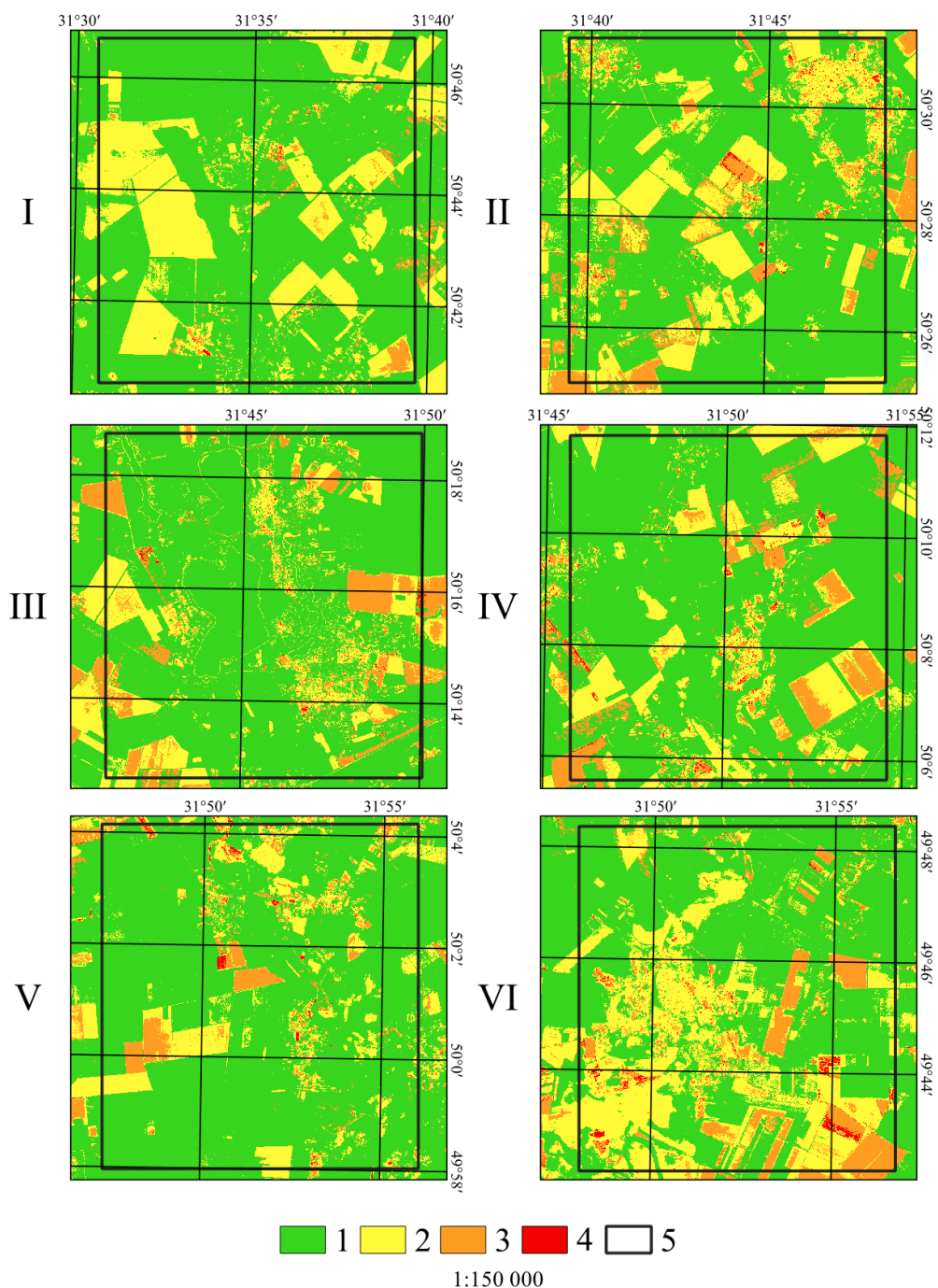


Рис. 3.19 Карта геоекологічного стану басейну р.Супій щодо потенційної геоекологічної небезпеки за методикою

Умовні позначення: тестові ділянки – I) «Свидовець», II) «Усівський», III) «Озерна», IV) «Бутовщина», V) «Ташанський», VI) «Ковраєць»; Класи стану геосистеми щодо потенційної геоекологічної небезпеки – 1) безпечний, 2) напружений, 3) кризовий, 4) критичний; 5) межі текстових ділянок.

Слід врахувати, що за методикою фігурують 10 геоекологічних процесів та параметрів. Проте фактичний розрахунок по всьому басейну охоплює 9 із них (додаток Г). Враховуючи складний процес виявлення суфозійних та ерозійних форм на території басейну, для досягнення поставлених цілей було обрано тестову ділянку «Ташанський». На ній же проведено польові вимірювання для валідації результатів інтерпретації.

Результати оцінювання ерозійної небезпеки ґрунтів у межах басейну річки Супій свідчать про нерівномірний розподіл потенційно вразливих територій. Ділянки з підвищеною ерозійною небезпекою приурочені переважно до схилових поверхонь і зон інтенсивного сільськогосподарського використання, де поєднуються морфометричні передумови розвитку ерозійних процесів і знижений рівень захисної функції рослинного покриву.

Польові вимірювання вологості ґрунту дозволили підтвердити доцільність використання цих індексів. На одній із дослідних ділянок значення вологості змінювалися в межах 9–20 %, що свідчить про мозаїчний характер зволоження та наявність локальних зон пересушення ґрунтів; на іншій – в межах 18–22 %, що відповідає відносно стабільному стану орного шару. Отримані результати (табл. 3.21) підтвердили наявність локальних зон підвищеної та зниженої вологості, які потенційно можуть бути пов’язані з підповерхневими гідрогеологічними процесами.

Таблиця 3.21.

Заміри вологості

Точки	C1	C2	C3	C4	C5	ЛЕ1	ЛЕ2	ЛЕ3	ЛЕ4
Середня вологість	9,3	9,2	9,8	9,3	9,0	8,2	9,2	9,0	8,7

Морфологічний вираз виявлених аномалій чітко видно на панорамних зображеннях БПЛА (рис. 3.20), де в мікрорельєфі видно лінійні заглиблення та локалізовані ознаки просідання.

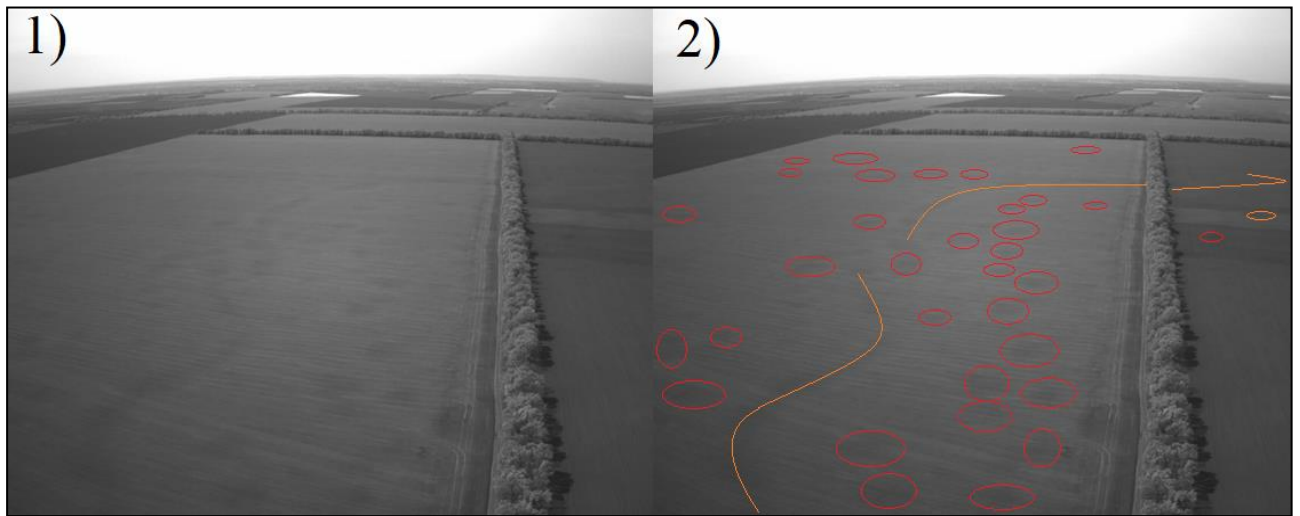


Рис. 3.20 Морфологічні прояви деградаційних процесів на перспективному знімку з БПЛА (*Marhes & Filipovych, 2026*)

1) Вихідне зображення. 2) Зображення з виділенням лінійних понижень і локальних просідань поверхні.

Аналіз мультиспектральних знімків PlanetScope (*Planet Team, 2020*) показав, що ділянки з потенційними проявами суфозії характеризуються специфічними спектральними особливостями. Сезонне порівняння показує, що навесні (квітень) аномалія характеризується зниженим NDVI та відносно вищими значеннями NDWI, тоді як влітку (серпень) те саме місце демонструє підвищені та знижені значення NDWI, показані на рис. 3.21. Через різницю у просторовій розрізненості між PlanetScope (3 м) і Sentinel-2 (10 м) профілі відображають узагальнені сезонні тенденції, а не порівняння пікселів між пікселями.

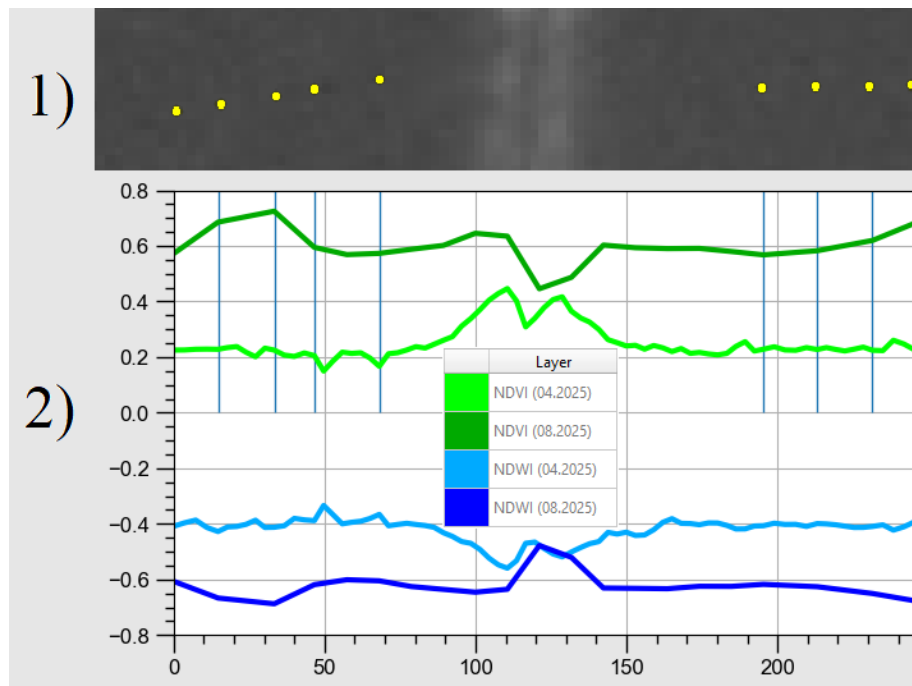


Рис. 3.21 Сезонна мінливість профілів спектральних індексів у межах аномалії, пов'язаної із суфозійними процесами

1) Супутникове зображення тестової ділянки з місцями відбору ґрунтових зразків, позначеними жовтими точками. 2) Профілі спектральних індексів для весняного періоду (квітень 2025 р., дані PlanetScore) та літнього періоду (серпень 2025 р., дані Sentinel-2); вертикальні сині лінії позначають проекційне положення точок відбору ґрунтових зразків уздовж профілю згідно табл.3.21.

Компактні темні плями переважно приурочені до ділянок із підвищеною поверхневою вологістю і слабо вираженим мікрорельєфом. Видовжені аномалії здебільшого орієнтовані вздовж напрямку максимального схилу та збігаються з лініями поверхневого стоку. Інтеграція морфометричних параметрів рельєфу, спектральних індикаторів та польових даних дозволила побудувати карту потенційної схильності території до розвитку суфозійних процесів і лінійної ерозії.

Отримана карта демонструє просторову диференціацію зон потенційної геоекологічної небезпеки. Зони підвищеної схильності здебільшого збігаються з ділянками підвищеної вологості, конвергенції поверхневого стоку та стабільних спектральних аномалій (рис. 3.22).

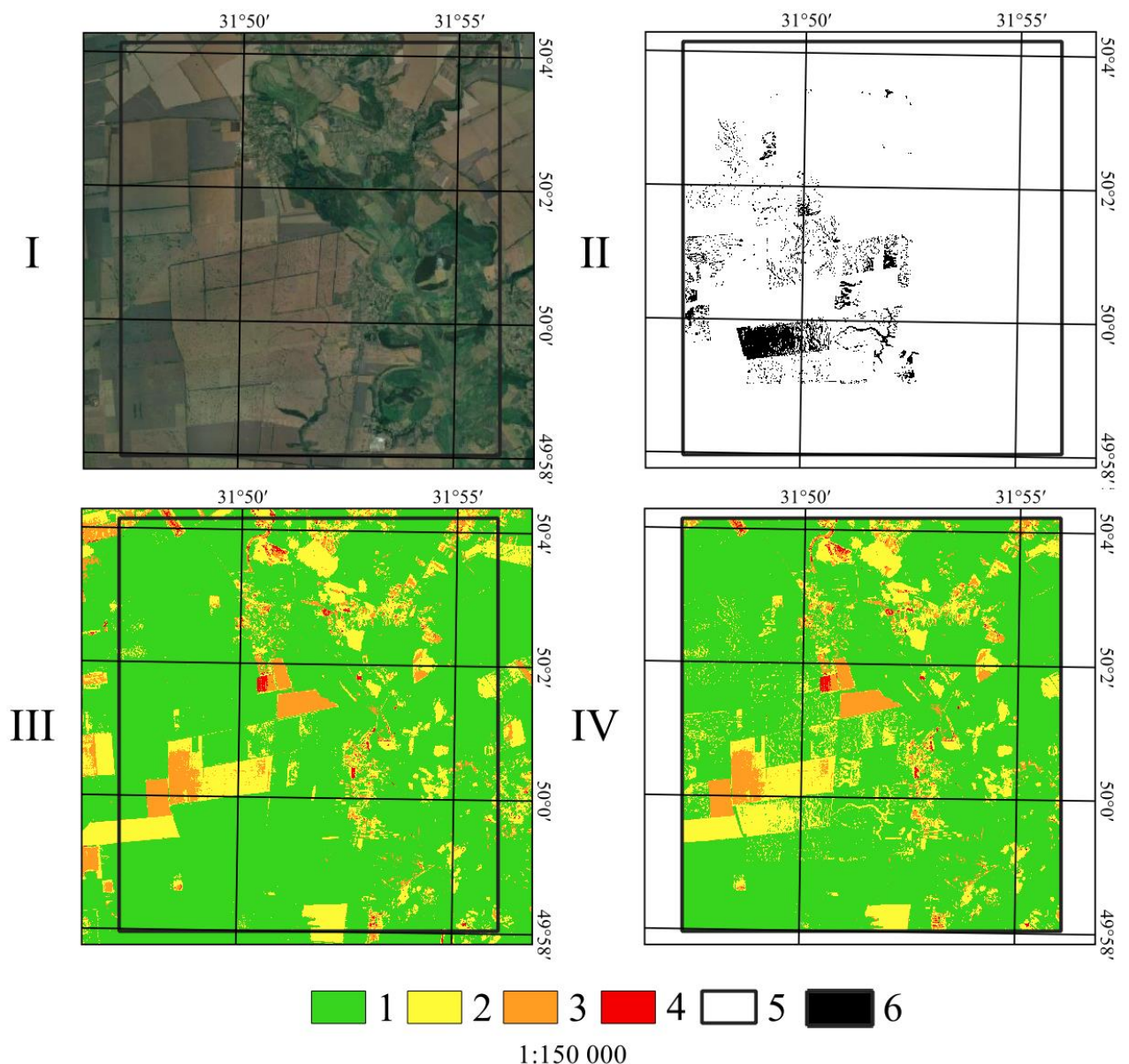


Рис. 3.22 Просторовий розподіл виявлених проявів лінійної ерозії та суфозії та вплив на оцінювання геоекологічного стану згідно методики

Умовні позначення: I) космознімок Махар, II) ідентифіковані ерозійні форми, III) геоекологічний стан за 9 різними показниками, IV) геоекологічний стан за 10 різними показниками; класи стану геосистеми щодо потенційної геоекологічної небезпеки – 1) безпечний, 2) напружений, 3) кризовий, 4) критичний; 5) межі текстової ділянки.

Загалом ЦММ ідентифікує вже сформовані деградаційні форми. Але роль супутникового аналізу у ідентифікації проявів лінійної ерозії та потенційних суфозійних просадків на ранніх етапах.

3.5 Переваги та обмеження методики

Апробація методики супутникового геоекологічного аналізу за басейновим принципом на прикладі басейну річки Супій дозволила оцінити її ефективність, інформативність і практичну придатність, а також визначити умови її застосування для аналізу геоекологічного стану територій.

До основних **переваг методики** належать:

- *Комплексність оцінювання*, що забезпечується інтеграцією індикаторів стану рослинного покриву, водних ресурсів, ґрунтового покриву, теплового режиму, клімато-екологічних показників та антропогенного впливу в межах єдиної басейнової структури через геоекологічні процеси та параметри.
- *Просторово-часовий характер аналізу*, який дозволяє виявляти не лише поточний стан геоекологічних процесів, а й тенденції їх змін на основі багаторічних даних ДЗЗ.
- *Багаторівневість інтерпретації*, що дозволяє розмежовувати актуальний стан території, короткострокові зміни, накопичені трансформації та довготривалі тенденції геоекологічних процесів
- *Масштабованість і універсальність*, що забезпечують можливість адаптації методики до аналізу інших басейнів середніх річок лівобережжя Дніпра та регіонів з подібними природними умовами.
- *Відтворюваність результатів*, обумовлена використанням формалізованих алгоритмів обробки даних і стандартних супутникових продуктів.
- *Практична орієнтованість*, яка полягає у можливості використання інтегральних оцінок і карт зон потенційної геоекологічної небезпеки для моніторингу стану територій і підтримки управлінських рішень.

- *Можливість районування територій за рівнем потенційної геоекологічної небезпеки, що дозволяє визначати пріоритетні ділянки для польової перевірки, моніторингу та подальшого природоохоронного або управлінського реагування.*

Разом з тим, апробація методики дозволила окреслити низку аспектів та **обмежень**, які визначають умови її застосування:

- *Чутливість результатів до просторової розрізненості вхідних даних ДЗЗ, що потребує врахування масштабів дослідження при інтерпретації отриманих оцінок.*
- *Залежність індикаторів від природних сезонних коливань, що зумовлює необхідність використання багаторічних часових рядів для зменшення впливу короткочасних аномалій.*
- *Потреба адаптації порогових значень індикаторів при застосуванні методики в регіонах з іншими природно-кліматичними умовами.*
- *Умовність інтерпретаційних діапазонів супутникових індексів, які мають розглядатися як локально калібровані параметри, а не як універсальні константи для всіх типів територій.*
- *Доповнювальний характер методики щодо наземних досліджень, оскільки супутниковий аналіз не замінює детальних польових спостережень, а підсилює їх у межах регіонального та басейнового аналізу.*
- *Демонстраційний характер блоку оцінювання пожежонебезпечності, який потребує подальшої перевірки за даними фактичних пожеж, метеорологічних умов і польових спостережень за станом торфово-болотних угідь.*

Зазначені обмеження не знижують інформативності методики, а визначають рамки її коректного використання та інтерпретації результатів.

Загалом, результати апробації методики на прикладі басейну річки Супій підтверджують її ефективність для комплексного супутникового аналізу

геоекологічного стану територій за басейновим принципом. Поєднання різнотипних індикаторів у межах єдиної інтеграційної схеми дозволяє отримати узагальнені просторові оцінки, придатні для аналізу потенційної геоекологічної небезпеки, моніторингу змін природно-антропогенних систем і визначення пріоритетних ділянок подальшого дослідження. Водночас апробація показала, що методика потребує локальної адаптації порогових значень, урахування сезонності та обов'язкового залучення матеріалів польової або візуальної верифікації для коректної інтерпретації результатів.

Висновки до третього розділу

1. Проведена апробація розробленої методики підтвердила її ефективність для комплексного геоекологічного аналізу басейну річки Супій. Послідовне застосування багатоспектральних супутникових даних, системи спектральних індексів та інтегрованого просторового аналізу забезпечило виявлення сучасного стану, просторової неоднорідності й основних тенденцій трансформації природно-антропогенних геосистем басейну.

2. Удосконалено тематичну інтерпретацію супутникових індексів шляхом адаптації їхніх діапазонів значень до природних умов басейну річки Супій та сучасних можливостей супутникових систем Sentinel-2 і PlanetScope. Це забезпечило більш обґрунтоване розмежування станів рослинного покриву, водних об'єктів, ґрунтів і деградаційних процесів, а також підвищило достовірність дешифрування результатів дистанційного зондування.

3. Встановлено інформативність різних спектральних індексів щодо окремих компонентів геоекологічного стану басейнових геосистем. Показано доцільність їх комплексного використання, оскільки окремі індекси характеризують вегетаційну активність, хлорофільний стан, вологість ґрунтів і рослинності, розвиток водно-болотних комплексів та особливості ґрунтового покриву, що у сукупності забезпечують багатofакторне оцінювання геоекологічних процесів.

4. Обґрунтовано доцільність переходу від аналізу окремих супутникових показників до їх інтегрованої інтерпретації. Комплексне використання

багаточасових супутникових даних дозволяє виявляти території з підвищеною ймовірністю розвитку деградаційних процесів, визначати пріоритетні ділянки моніторингу та формувати інформаційну основу для подальшого інтегрального оцінювання геоекологічної напруженості басейну.

5. Отримані результати підтвердили практичну придатність розробленої методики для картографування геоекологічного стану, моніторингу деградаційних процесів і формування тематичних карт, які можуть бути використані як інформаційна основа для природоохоронного планування та управління басейновими геосистемами.

РОЗДІЛ 4. УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ МЕТОДИКИ

4.1 Узагальнення результатів супутникового геоecологічного аналізу та ключові висновки апробації

Результати, отримані в межах дисертаційного дослідження, свідчать про ефективність розробленої методики супутникового геоecологічного аналізу за басейновим принципом для комплексної оцінки стану природно-антропогенних систем. Узагальнення результатів апробації методики дозволяє сформулювати цілісне уявлення про закономірності просторової організації та динаміки геоecологічних процесів у межах басейнів середніх річок лівобережжя Дніпра.

Проведений аналіз підтвердив, що геоecологічний стан басейну формується внаслідок взаємодії кількох ключових компонентів, зокрема рослинного покриву, водного режиму, ґрунтового покриву, теплових характеристик поверхні, клімато-ecологічних чинників та антропогенного впливу. Кожен з цих компонентів проявляється у вигляді просторово диференційованих індикаторів, які в сукупності визначають загальний рівень геоecологічної напруженості територій.

Узагальнення просторових результатів свідчить про наявність чіткої диференціації геоecологічного стану в межах басейнів, що зумовлена як природними умовами (рельєф, зволоженість, типи ландшафтів), так і характером землекористування та рівнем антропогенного навантаження. Території зі збереженими природними комплексами, як правило, характеризуються відносно стабільним геоecологічним станом, тоді як зони інтенсивного господарського використання та трансформовані заплави демонструють підвищену геоecологічну напруженість.

Аналіз просторово-часової динаміки геоecологічних індикаторів дозволив виявити не лише сучасний стан територій, а й тенденції їх змін у багаторічному вимірі. Отримані результати свідчать про наявність ділянок зі стабільним

функціонуванням геосистем, а також територій, для яких характерне поступове зростання небезпеки. Це підтверджує доцільність використання багаторічних даних ДЗЗ для моніторингу стану річкових басейнів.

Інтеграція окремих геоекологічних індикаторів у межах єдиної методичної схеми забезпечила можливість переходу від аналізу окремих компонентів до формування узагальнених оцінок геоекологічного стану. Інтегральні показники дозволяють ідентифікувати зони з різним рівнем геоекологічної напруженості та просторово локалізувати ділянки потенційної небезпеки деградації природних комплексів.

Таким чином, узагальнення результатів супутникового геоекологічного аналізу підтверджує, що розроблена методика є ефективним інструментом для комплексної оцінки геоекологічного стану басейнів середніх річок. Отримані результати створюють наукову основу для подальшого використання методики в системах геоекологічного моніторингу, обґрунтування управлінських і природоохоронних рішень, а також для оцінювання потенційної небезпеки надзвичайних ситуацій.

Результати геоекологічних досліджень басейну річки Супій можуть бути цікавими та корисними для різних груп:

1. ***Науковці та дослідники:***

- Географи, екологи, гідрологи, біологи, які вивчають стан водних екосистем, біорізноманіття та зміни ландшафтів.
- Фахівці з геоінформаційних систем (GIS), які аналізують просторові дані для картографування екологічних проблем.

2. ***Екологічні організації та природоохоронні установи:***

- Державні структури (Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, Держекоінспекція).
- Громадські екологічні організації та фонди, що займаються захистом природи та збереженням водних ресурсів.
- Локальні ініціативи (наприклад, екологічна станція "Супій" та активісти).

3. ***Аграрний сектор:***

- Фермерські господарства та агрохолдинги, які використовують воду річки для зрошення.
- Водокористувачі, які зацікавлені в збереженні якості води та запобіганні її забрудненню агрохімікатами.

4. *Місцева влада та громади:*

- Органи місцевого самоврядування, які розробляють програми екологічного розвитку регіону.
- Жителі прилеглих населених пунктів, які залежать від стану річки як джерела води та рекреаційної зони.

5. *Бізнес та промисловість:*

- Підприємства, що займаються рибництвом, туристично-рекреаційною діяльністю, видобутком природних ресурсів (піску, глини тощо).
- Водопостачальні компанії, які забезпечують населення питною водою.

6. *Освітні установи:*

- Університети, школи та природничі гуртки, які можуть використовувати результати досліджень для навчання та екологічного виховання.

Комплексний геоecологічний аналіз басейну річки Супій може допомогти у розробці природоохоронних заходів, екологічного моніторингу та сталого використання водних ресурсів.

4.2 Рекомендації щодо застосування методики для моніторингу та управління басейновими геосистемами

Між комплексними багатофакторними підходами та практичними потребами управління територіями існує важлива взаємодоповнюваність. Хоча запропонована методика передбачає інтеграцію значної кількості показників, які характеризують різні аспекти функціонування ландшафтів, окремі параметри можуть мати самостійне прикладне значення. Зокрема, аналіз одного індикатора здатний виявляти просторові закономірності, важливі для оцінки екологічного стану територій, визначення пріоритетних напрямів природоохоронних заходів,

планування землекористування та підтримки прийняття управлінських рішень. Одним із таких показників є температура земної поверхні (LST), яка інтегрує вплив властивостей земного покриву, рівня зволоження, рослинного покриву та ступеня антропогенної трансформації ландшафтів. Тому навіть фрагментарний аналіз температурного режиму, тобто просторово-часового аналізу температури, дозволяє отримати цінну інформацію про просторову організацію природних і антропогенно змінених територій.

Аналіз поверхневої температури в межах басейну річки Супій виявив чітку просторову диференціацію температурного режиму, зумовлену особливостями земного покриву, зволоженості та антропогенної трансформації територій. Підвищені значення поверхневої температури характерні для ділянок із переважанням відкритих ґрунтів, розораних територій, штучних поверхонь і зниженою поверхневою вологістю. Натомість нижчі температурні значення приурочені до заплавних, зволжених і добре вегетованих територій. Це підтверджує доцільність використання LST як інтегрального індикатора, що відображає взаємодію земного покриву, вологи, рослинності та антропогенного впливу. Результатом є просторовий розподіл середньої температури земної поверхні та річний приріст температури поверхні землі за період в 40 років.

Поєднання даних про середню температуру з річними приростами (додаток Б, рис.Б.21-22) за період із 1984 по 2024 рік дає змогу глибше зрозуміти просторово-часову динаміку кліматичних змін на локальному рівні. Середнє значення температури відображає загальний тепловий стан території, тоді як річний приріст вказує на швидкість і напрямок змін, що є особливо важливим для виявлення тенденцій до потепління або локальних аномалій.

Середні значення температури повітря (23,8 °C) за даними метеостанції MeteoBlue у м. Яготин та температура земної поверхні (32,5 °C), визначена за супутниковими даними для відповідного пікселя, суттєво відрізняються, що зумовлено різною фізичною природою цих показників. Температура земної поверхні характеризує радіаційний нагрів підстильної поверхні й зазвичай перевищує температуру повітря, виміряну на стандартній висоті 2 м. У зв'язку з

цим пряме порівняння абсолютних значень і швидкостей зміни цих параметрів є методично некоректним, тому аналіз доцільно здійснювати на рівні трендів, кореляцій та відносних змін. Хоча статистичний зв'язок між рядами температури повітря та температури земної поверхні виявився відносно слабким, напрямок багаторічних змін залишається узгодженим. Зокрема, обидва ряди демонструють тенденцію до зростання температурних показників у часі. При цьому оцінений річний приріст температури земної поверхні за супутниковими даними становив $0,32\text{ }^{\circ}\text{C}$ за рік, тоді як для температури повітря за даними метеостанції аналогічний показник був істотно нижчим і становив близько $0,0001\text{ }^{\circ}\text{C}$ за рік.

Результати були отримані внаслідок дворівневої обробки. На першому етапі здійснювалися підготовка та аналіз растрових даних за допомогою хмарної платформи GEE. Ключовою перевагою цього середовища є можливість автоматичного експорту геоприв'язаних даних у форматі GeoTIFF із вбудованою датою знімання в назву файлу.

Це забезпечило автоматизацію другого етапу – обчислення річного приросту температури поверхні землі шляхом регресійного аналізу з використанням Python-скрипту.

Міські та сільські населені пункти, представлені в табл. 4.1 демонструє позитивні температурні тренди. Це підкреслює важливість озеленення міського середовища – процесу збільшення площі рослинного покриву шляхом висаджування трав, дерев та інших рослин. Ініціативи з озеленення можуть відігравати ключову роль у пом'якшенні ефекту міського теплового острова та підвищенні кліматичної стійкості територій.

Наприклад, у Згурівці наявність великого національного парку та незначна кількість промислових об'єктів сприяють найнижчому середньому значенню річного приросту температури поверхні землі (LST).

Інші населені пункти вздовж річки Супій демонструють різний ступінь зростання температури поверхні, що відображає відмінності у використанні земель, інтенсивності урбанізації та рослинному покриві. Зокрема, Козацьке та Піщане мають найвищі середні річні прирости LST (відповідно $0,251\text{ }^{\circ}\text{C}$ і

0,250 °C), що свідчить про інтенсифіковане нагрівання поверхні, ймовірно пов'язане зі зменшенням рослинності або збільшенням частки штучних поверхонь.

Таблиця 4.1

Характеристики приросту температури в межах н.п.

Населений пункт	Макс.	Середнє	Мін.	Діапазон
Згурівка	0,392	0,112 ± 0,129	0,000	0,392
Петрівка	0,354	0,121 ± 0,125	-0,137	0,491
Ташань	0,268	0,177 ± 0,045	0,017	0,251
Горбані	0,288	0,183 ± 0,056	-0,007	0,295
Нехайки	0,308	0,184 ± 0,056	-0,018	0,326
Фарбоване	0,359	0,196 ± 0,067	-0,150	0,509
Свидовець	0,307	0,207 ± 0,050	-0,018	0,325
Вороньки	0,365	0,213 ± 0,058	-0,066	0,431
Демки	0,347	0,213 ± 0,056	0,043	0,304
Ничипорівка	0,348	0,217 ± 0,052	-0,006	0,355
Веприк	0,362	0,219 ± 0,051	0,027	0,336
Капустинці	0,368	0,224 ± 0,055	-0,007	0,375
Безпальче	0,402	0,227 ± 0,058	0,053	0,349
Новий Биків	0,369	0,229 ± 0,073	-0,077	0,445
Безбородьки	0,483	0,234 ± 0,056	0,067	0,415
Яготин	0,501	0,244 ± 0,054	-0,133	0,634
Гельмязів	0,374	0,244 ± 0,047	-0,044	0,418
Піщане	0,537	0,250 ± 0,060	-0,018	0,554
Козацьке	0,479	0,251 ± 0,055	0,019	0,460

Яготин, як найбільший міський центр у басейні, демонструє значний максимальний приріст – 0,501 °C – та широкий температурний діапазон у 0,634 °C. Така мінливість свідчить про наявність як щільно забудованих зон, так і ділянок із рослинністю або водоймами, що пом'якшують загальне середнє значення попри наявність локальних аномалій.

Села Безбородьки та Новий Биків також демонструють відносно високі середні прирости (0,234 °C та 0,229 °C відповідно) і широкі діапазони, що вказують на значну просторову неоднорідність, імовірно зумовлену змішаним землекористуванням, включаючи сільське господарство та інфраструктуру.

Такі населені пункти, як Ташань, Горбані та Нехайки, демонструють помірні прирости з меншими стандартними відхиленнями, що вказує на більш

однорідну термічну поведінку – ймовірно, через стабільний тип землекористування та обмежене розширення забудови.

Цікаво, що в селах Петрівці та Фарбованому зафіксовано деякі негативні мінімальні значення ($-0,137^{\circ}\text{C}$ та $-0,150^{\circ}\text{C}$), що може свідчити про зони з підвищеним рослинним покривом або сезонними водоймами, які створюють охолоджувальний ефект. Водночас їхні великі діапазони та високі стандартні відхилення вказують на наявність локальних гарячих ділянок, можливо, пов'язаних із нераціональним використанням земель або оголеним ґрунтом.

Ці результати підкреслюють необхідність диференційованих стратегій управління землями, особливо в населених пунктах, де термодинаміка вказує на нестале використання ресурсів або вразливі екосистеми. Інтеграція температурних даних із нормалізованими індексами вегетації чи вологості може підвищити точність таких оцінок і сприяти досягненню Цілей сталого розвитку (ЦСР), пов'язаних із кліматичною дією, сталими містами та нейтралізацією деградації земель.

Нерегулярні коливання у результатах регресійного аналізу (піки приростів поза межами урбанізованих територій) пов'язані з сільськогосподарською діяльністю та змінами типів культур. Нестале землекористування – часто в найгарячіших ділянках – призводить до деградації ґрунтів.

Особливу занепокоєність викликають торфовища, які стають усе більш вразливими через підвищений ризик займання. Ця вразливість зумовлена інтенсивною евапотранспірацією за умов високих температур повітря. Подальші дослідження цих зон сприятимуть розробці більш точних рекомендацій з адаптації та управління (Ліщенко та ін., 2024a).

Хмарність суттєво не вплинула на результати, оскільки всі пікселі, позначені як хмари або тіні від хмар, були попередньо виключені з регресійного аналізу за допомогою маскування.

Узагальнені результати супутникового геоекологічного аналізу можуть використовуватися для інформаційної підтримки управлінських рішень, пов'язаних з плануванням природокористування та охороною довкілля в межах

річкових басейнів. Інтегральні карти геоекологічного стану та зон потенційної небезпеки дозволяють ідентифікувати території, що потребують підвищеної уваги в контексті екологічного контролю та регулювання антропогенного навантаження.

Результати супутникового геоекологічного аналізу можуть бути інтегровані в геоінформаційні системи різного рівня – від локальних до регіональних. Це забезпечує можливість візуалізації просторових закономірностей геоекологічного стану, порівняльного аналізу різних ділянок басейну та використання результатів у поєднанні з іншими видами просторової інформації. ГІС-орієнтований характер методики підвищує її практичну цінність та спрощує адаптацію результатів до потреб екологічного моніторингу й планування.

Таким чином, результати супутникового геоекологічного аналізу можуть бути використані як універсальний інструмент для підтримки систем геоекологічного моніторингу та інформаційного забезпечення управлінських рішень у межах басейнів середніх річок. Методика забезпечує комплексний підхід до оцінювання стану територій і створює передумови для своєчасного виявлення негативних геоекологічних тенденцій.

4.3 Рекомендації щодо застосування методики для природно-заповідного фонду, Смарагдової мережі та водоохоронних зон

Результати супутникового геоекологічного аналізу, отримані в межах дисертаційного дослідження, можуть бути використані як науково обґрунтована інформаційна база для визначення та уточнення територій природно-заповідного фонду, їх стану, підсвічування зон потенційної небезпеки, а також для обґрунтування режимів водоохоронних і прибережних захисних зон у межах річкових басейнів. Комплексний характер методики дозволяє враховувати просторову структуру та динаміку геоекологічних процесів, що є ключовим для ефективної охорони природних територій.

Територія басейну річки Супій охоплює низку об'єктів природно-заповідного фонду України, які представляють різні категорії охорони – від гідрологічних заказників до парків-пам'яток садово-паркового мистецтва (рис. 4.1) (Грачов, 2010). Це відображає високу природну та культурну цінність долини річки.

Гідрологічні заказники. «Свидовецький» (893 га, створений у 1979 р., Ніжинський район) – охороняє болотні угіддя у витоках річки, важливі для регулювання водного режиму. «Болото Супій» (209 га, 1979 р., Ніжинський район) – комплекс із цінними болотними екосистемами, що формують унікальний водно-болотний масив. «Усівський» (2000 га, 1980 р., Броварський район) – заказник загальнодержавного значення, найбільший у басейні, має ключове значення для збереження водно-болотних угідь і біорізноманіття. За результатами дослідження об'єкти мають здебільшого безпечний стан потенційної геоecологічної небезпеки, і лише при населених пунктах оцінено як напружений. Без рекомендацій.

Заповідні урочища. «Галаганове» (170 га, 1972 р., Броварський район) – зберігає характерні лісові екосистеми середньої течії Супою. Знаходиться за офіційними межами водозбору р.Супій, без рекомендацій.

Парки-пам'ятки садово-паркового мистецтва. «Згурівський» (309 га, 1972 р., Броварський район) – об'єкт загальнодержавного значення, що поєднує природний ландшафт і історико-культурні насадження. «Ташанський» (статус загальнодержавного значення) – об'єкт загальнодержавного значення, парк із цінними дендрологічними та декоративними насадженнями. Стабільний стан з незначними проявами напруженості. Корисним буде проведення детального аналізу по місцю.

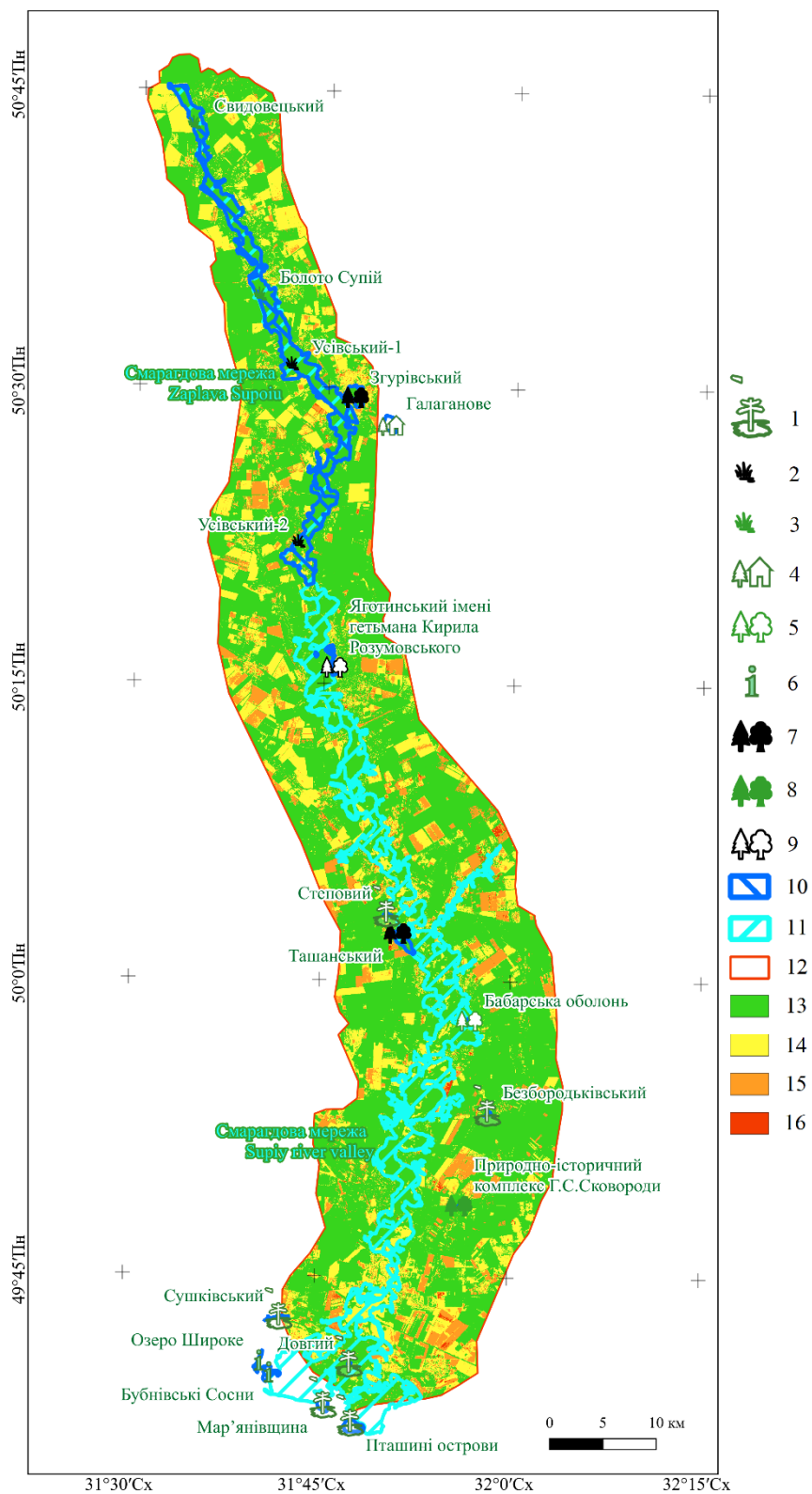


Рис. 4.1. Карта геоекологічного стану басейну р.Супій на територіях ПЗФ і Смарагдової мережі

Умовні позначення: об'єкти природно-заповідного фонду – 1) ботанічний заказник місцевого значення, 2) гідрологічний заказник загальнодержавного

значення, 3) гідрологічний заказник місцевого значення, 4) заповідне урочище, 5) ландшафтний заказник місцевого значення, 6) орнітологічний заказник місцевого значення, 7) парки-пам'ятки садово-паркового мистецтва загальнодержавного значення, 8) парки-пам'ятки садово-паркового мистецтва місцевого значення, 9) регіональний ландшафтний парк; 10) межі природно-заповідних територій; 11) територія, яка включена до Смарагдової мережі; 12) межі басейну; геоекологічний стан басейну річки Супій щодо потенційної геоекологічної небезпеки – 13) безпечний, 14) напружений, 15) кризовий, 16) катастрофічний.

Регіональні ландшафтні парки, ландшафтні заказники місцевого значення, орнітологічні заказники місцевого значення, ботанічні заказники місцевого значення тощо – це локальні території з високим туристичним потенціалом, що потребують детального дослідження для потреб збереження і відновлення природного середовища.

Крім того, долина річки Супій є частиною Смарагдової мережі – пан'європейської системи екологічних територій, яка створена для збереження природних оселищ, рідкісних видів флори і фауни та підтримання екологічної рівноваги. На території басейну виділено кілька ділянок мережі, серед яких «Заплава Супою» (UA0000237) та «Долина річки Супій» (UA0000302). Їхня охоронна цінність визначається як збереженими водно-болотними комплексами так і мозаїчністю середовищ – від заболочених луків і заплавних лісів до агроєкосистем.

Сумарно басейн Супою має 13,8 тис.га ПЗФ, що відповідає приблизно **6,4%** площі басейну. Така частка свідчить, що природоохоронні території займають помітне, однак просторово обмежене положення в межах водозбору, тому їх екологічний стан значною мірою залежить не лише від режиму охорони в межах самих об'єктів, а й від стану прилеглих територій, характеру землекористування, вологості ґрунту, рослинного покриву та антропогенного навантаження. У зв'язку з цим, природно-заповідний фонд, території

Смарагдової мережі та водоохоронні зони доцільно розглядати як ключові просторові одиниці практичного застосування методики супутникового геоecологічного аналізу. Для об'єктів ПЗФ методика забезпечує оцінювання стану рослинного покриву, водно-болотних угідь і заплавних комплексів; для територій Смарагдової мережі – просторову деталізацію стану оселищ та виявлення ділянок потенційного порушення їх екологічної цілісності; для водоохоронних зон – аналіз змін землекористування, збереженості прибережних смуг і проявів трансформації водно-заплавних екосистем.

Результати супутникового геоecологічного аналізу, карти геоecологічного стану та зон потенційної небезпеки можуть бути використані для уточнення режимів охорони природних територій з урахуванням потенційних небезпек. Такий підхід дозволяє враховувати не лише сучасний стан територій, а й оцінювати його в перспективі за допомогою часово-просторового аналізу.

Супутниковий геоecологічний аналіз за басейновим принципом забезпечує можливість інтеграції результатів у процеси природоохоронного планування та оцінювання ефективності існуючих режимів охорони. Просторова узгодженість результатів дозволяє враховувати кумулятивний вплив природних і антропогенних чинників та підвищує обґрунтованість рішень у сфері охорони природних територій.

Методика також може бути розширена до детального аналізу територій ПЗФ, де висока розрізненість супутникових даних забезпечує виявлення локальних геоecологічних змін і порушень. Для демонстрації обрано фрагмент заповідної території на тестовій ділянці «Усівський».

Вхідними даними для реалізації методики є багаточасові супутникові знімки PlanetScore із просторовою розрізненістю 3 м, тобто, площа базової комірки становить 9 м², і які забезпечують детальне відображення дрібномасштабних геоecологічних процесів; усі допоміжні шари приведено до цієї сітки (*Planet Team, 2020*). Дані знімки гармонізовано із Sentinel-2, що дозволяє використовувати такі ж методи попередньої обробки. Аналіз виконано для періоду 2020–2025 рр. з використанням літніх знімків, які відповідають

піковому стану вегетації. Висока просторова розрізненість даних дає змогу виявляти локальні порушення рослинного покриву, характерні для природних і напівприродних територій. Для оцінювання температурного чинника залучено багаторічні тренди температури поверхні за даними Landsat.

Об'єктом апробації дослідження є територія природно-заповідного фонду в Київській області, а саме Згурівський парк-пам'ятка садово-паркового мистецтва загальнодержавного значення, а також Галаганове заповідне урочище місцевого значення. Також частково охоплює гідрологічний заказник «Усівський».

Оцінювання динаміки геоєкологічного стану здійснювалося на двох взаємодоповнювальних часових рівнях. *Довгострокова динаміка* аналізувалася за коефіцієнтами лінійної регресії вегетаційних і водних індексів та різницею їх значень за п'ятирічний період, що дозволяє ідентифікувати системні деградаційні або відновлювальні процеси. Слід зазначити, що п'ятирічний період не охоплює повних кліматичних циклів, тому результати інтерпретуються як середньострокові екосистемні зміни, а не як кліматично зумовлені довготривалі тенденції. *Короткострокова динаміка* оцінювалася за річними різницями та показниками актуального стану, які відображають швидкі локальні порушення, не завжди виражені в багаторічних трендах. Поєднання цих часових масштабів забезпечує розмежування накопичених змін і поточних подій, а також знижує ризик помилкової інтерпретації одиничних аномалій.

Для коректної інтерпретації динаміки використано фенологічну класифікацію типів рослинного покриву на основі сезонних супутникових показників (весна – літо – осінь). Класифікація виконувалася методом кластерного аналізу в SAGA (Conrad et al., 2015) з подальшою експертною інтерпретацією та незалежною валідацією (рис. 4.2).

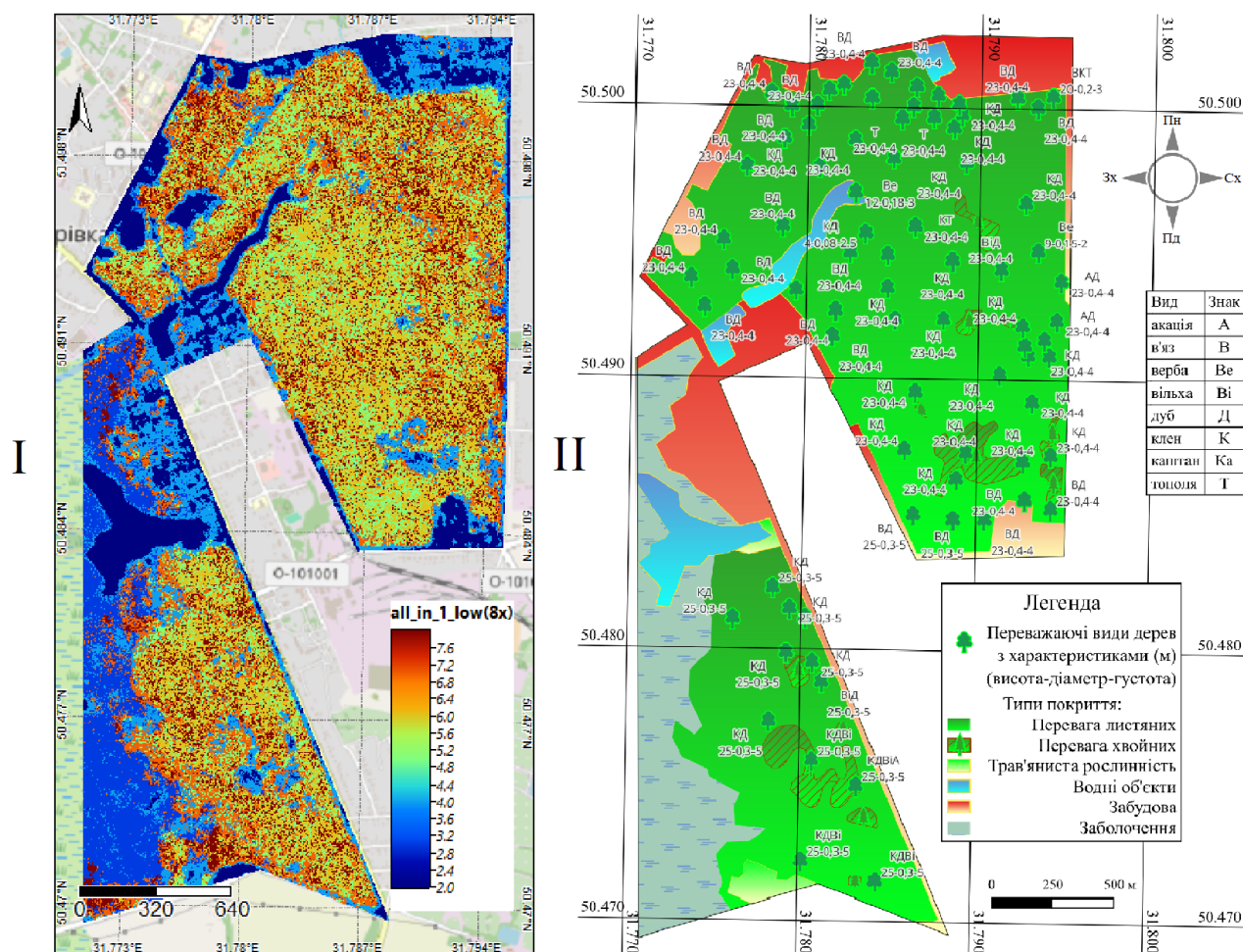


Рис. 4.2 Результати попередньої автоматизованої класифікації за 8 індексами (I) та схема типів покриття на основі класифікації та візуальної інтерпретації (II)

Температурний чинник розглядається як один із кліматичних модульовальних чинників. Для цього використано багаторічні тренди температури поверхні (Marhes et al., 2025), що дає змогу оцінювати просторову узгодженість зон деградації рослинності з ділянками підвищеного теплового навантаження. Поєднання температурних трендів із багаточасовими похідними вегетаційних індексів підвищує надійність ідентифікації зон підвищеної небезпеки (Bilous et al., 2023). Водночас чинник вологості враховано через аналіз водних спектральних індексів (NDWI та похідних), які інтегровані в оцінювання як п'ятирічної, так і річної динаміки, забезпечуючи врахування гідрологічного компонента потенційної небезпеки.

Формування зон домінантних геоекологічних процесів здійснювалося шляхом просторової інтеграції показників різних часових масштабів (різницевий аналіз за 1 рік та часові ряди за 5 років) із використанням концепції статистичної аномальності (Гудак та ін., 2025).

До інтегрованої оцінки включено результати аналізу довгострокових трендів, накопичених змін, короткострокових порушень та актуального стану рослинного покриву і водно-болотних систем. Такий підхід дає змогу одночасно виділяти зони стійкої деградації, ділянки з прихованими накопиченими змінами та осередки активних поточних порушень. Підсумковим результатом є карта переважаючих геоекологічних процесів, придатної для використання в системах моніторингу та підтримки управлінських рішень (рис. 4.3).

Практичне використання карт небезпек в межах ПЗФ доцільно реалізовувати як компонент регулярного моніторингу: виділення «зон потенційної небезпеки» як пріоритетів польових обстежень; порівняння міжсезонних, міжрічних змін індикаторів у межах однотипних фенологічних класів; фіксація зон, де небезпека стабільно повторюється в багаторічному аналізі, як ділянок підвищеної уваги для природоохоронних заходів. Отримані результати є інструментом підтримки рішень і не заміняють регламентних процедур оцінювання, але дають змогу об'єктивізувати просторові пріоритети моніторингу та планування виїзних перевірок.

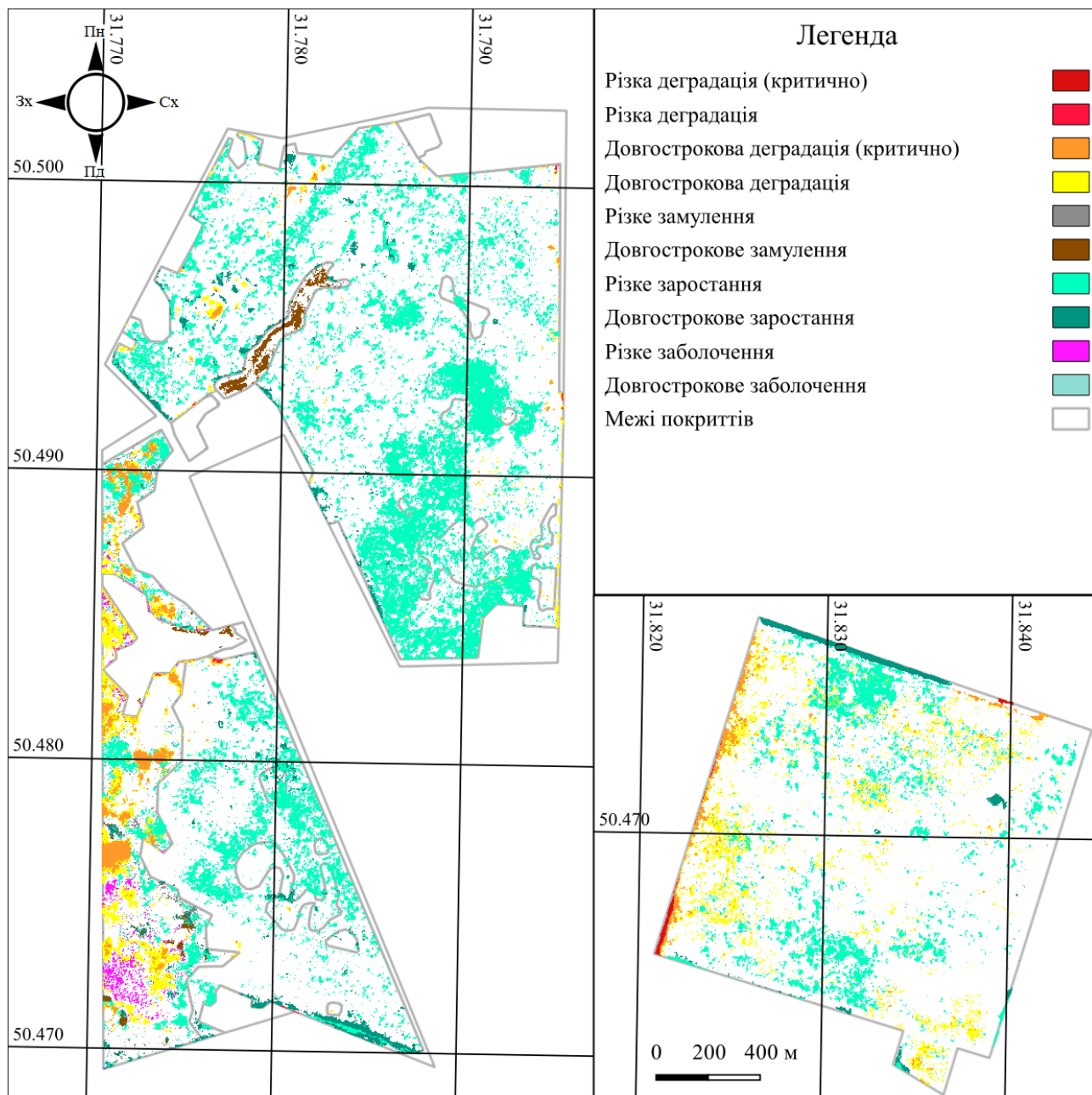


Рис. 4.3 Переважаючі геоекологічні процеси, які спостерігаються за останні 5 років на території ПЗФ «Згурівський» та «Галаганове»

4.4 Рекомендації щодо застосування методики для інших басейнів середніх річок Лівобережжя Дніпра

Розроблена методика супутникового геоекологічного аналізу за басейновим принципом має потенціал застосування не лише для басейну річки Супій, а й для інших басейнів середніх річок лівобережжя Дніпра, які

характеризуються подібними природними умовами, значною часткою сільськогосподарського землекористування, наявністю заплавних, лучно-болотних, лісових і водоохоронних комплексів. До таких басейнів належать річки групи 1. Їх об'єднує спільний історичний контекст формування та трансформації гідромереж, незважаючи на відмінності геолого-геоморфологічних умов, складу четвертинних відкладів і ґрунтового покриву (Веклич, 1982; Веклич & Герасименко, 1988). Для прикладу наведено зміни гідромереж Лівобережжя Середнього Дніпра у XIX–XX ст. (рис. 4.4).

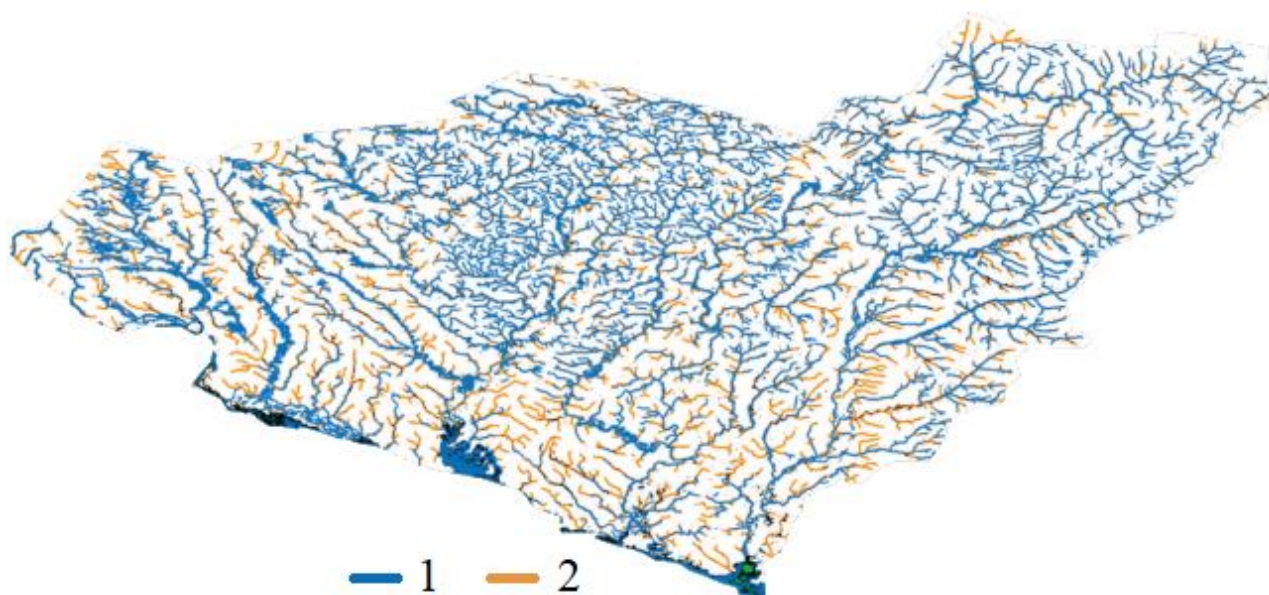


Рис. 4.4 Зміни гідромереж Лівобережжя Середнього Дніпра у XIX–XX ст. (Sarnavskiy & Grebin, 2025)

Умовні позначення: 1) гідромережа у XX ст., 2) елементи гідрографічної мережі, втрачені протягом XIX–XX ст.

Незважаючи на відмінності у літологічній будові, складі четвертинних відкладів, особливостях ґрунтового покриву та сучасній структурі землекористування, більшість рівнинних гідромереж лісостепової та поліської зон зазнала схожих антропогенних впливів. До таких належать осушувальна меліорація, регулювання русел малих річок, трансформація заплав, зміна лісистості та інтенсивне сільськогосподарське освоєння територій.

Особливо перспективним є використання підходу в межах басейнів, де у XX ст. були створені масштабні меліоративні системи (табл. 4.2, рис. 4.5). Саме меліоративні роботи стали одним із ключових чинників перебудови природної структури поверхневого стоку, зміни конфігурації руслової мережі та скорочення площ природних водно-болотних угідь. Поєднання ретроспективного аналізу картографічних матеріалів різних часових зрізів із сучасними геоінформаційними технологіями дозволяє простежити як природні тенденції еволюції гідромереж, так і наслідки цілеспрямованого інженерного втручання.

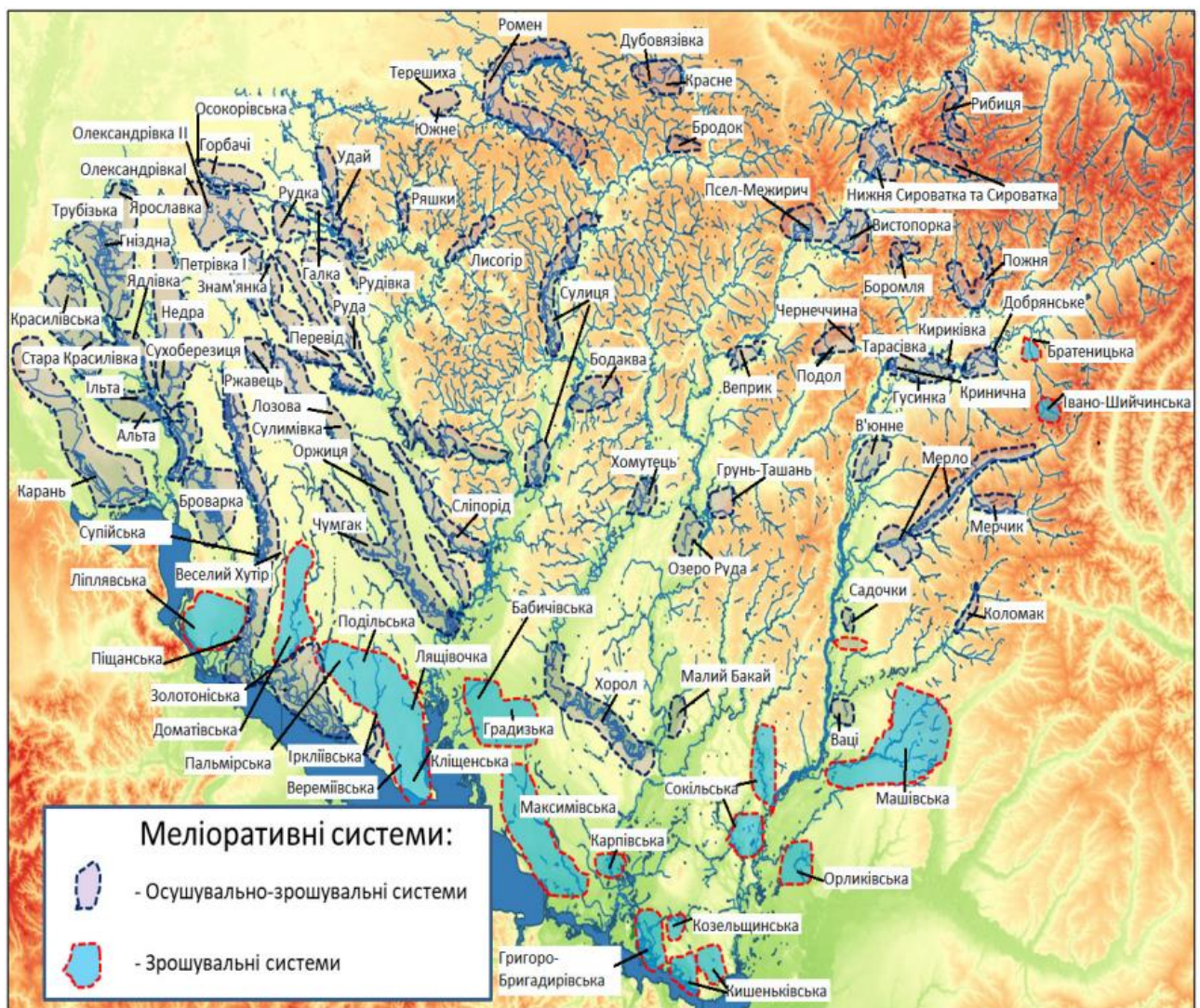


Рис. 4.5 Ареал території для використання розробленої методики з використанням карти меліоративних систем басейнів Лівобережжя Середнього Дніпра. (Сарнавський та ін., 2024)

Зміни гідромережі річок групи I у XIX–XX ст.

Басейн	Довжина в XIX ст., км	Довжина в XX ст., км	Скорочення довжини, км	Втрата, %	Кількість зниклих річок	Площа басейну, км ²
Трубіж	1004,3	736	268,3	26,7	46	4700
Супій	630,6	480	150,6	23,9	32	2165
Сула	4875,5	4304	571,5	11,7	108	19600
Псел	7370,5	6305	1065,5	14,5	206	22800
Ворскла	4218,2	3484	734,2	17,4	129	14700

Загалом втрачено близько 15,4% довжини річкової мережі в межах цих п'яти басейнів між XIX та XX століттями. Найбільші відносні втрати стосуються Трубіжу – 26,7% та Супою – 23,9%.

Важливо, що методика ґрунтується не на абсолютній подібності природних умов, а на спільності історії господарського освоєння територій та характері антропогенних перетворень. Тому відмінності у ґрунтах, геоморфологічній будові чи потужності четвертинних відкладів не є перешкодою для її застосування. Навпаки, зіставлення результатів, отриманих для різних басейнів, створює можливість оцінити роль локальних природних факторів у стійкості або вразливості гідромереж до меліоративних та інших антропогенних впливів.

Таким чином, розроблений підхід може використовуватися як універсальний інструмент для дослідження історичної динаміки гідромереж і оцінки наслідків меліоративного освоєння в різних регіонах України, забезпечуючи порівнянність результатів між територіями зі спільною історією розвитку водогосподарських систем.

Можливість перенесення методики на інші басейни зумовлена тим, що її основою є не локальні характеристики окремої території, а універсальна послідовність аналізу: визначення меж водозбору, формування системи просторових одиниць, добір супутникових і допоміжних даних, розрахунок геоекологічних індикаторів, нормалізація показників, інтеграція результатів і просторове виділення зон геоекологічної напруженості. Такий алгоритм може

бути адаптований до різних басейнових систем за умови коригування набору індикаторів відповідно до природних умов, структури землекористування та провідних деградаційних процесів.

За офіційними матеріалами Плану управління річковим басейном Дніпра, у межах суббасейну Середнього Дніпра зони, які підлягають охороні, займають близько 18 % його території та включають 1189 зон, серед яких 38 об'єктів Смарагдової мережі, 925 питних водозаборів і 226 офіційно визначених місць рекреації. У суббасейні Нижнього Дніпра такі зони охоплюють близько 15 % території та представлені 899 зонами, зокрема 21 об'єктом Смарагдової мережі, 832 питними водозаборами і 46 місцями рекреації. Загалом у двох суббасейнах визначено 2088 зон, які підлягають охороні, з них 59 об'єктів Смарагдової мережі, 1757 питних водозаборів і 272 офіційно визначені місця рекреації.

Отже, басейн Супою може розглядатися як модельна територія для апробації методики, тоді як її подальше застосування до інших басейнів середніх річок дозволить здійснювати порівняльне оцінювання геоекологічного стану лівобережних приток Дніпра, визначати спільні та специфічні чинники деградації, а також формувати узгоджені підходи до моніторингу, природоохоронного планування та управління водозбірними територіями.

Таким чином, розроблена методика може бути використана для комплексного оцінювання потенційної небезпеки надзвичайних ситуацій у межах подібних річкових басейнів. Поєднання супутникових індикаторів у межах інтегральної схеми дозволяє виявляти просторові закономірності вразливості територій і створює наукову основу для організації геоекологічного моніторингу в умовах потенційної небезпеки.

4.5 Перспективи розвитку та вдосконалення методики

Розроблена методика супутникового геоекологічного аналізу за басейновим принципом має потенціал подальшого розвитку та вдосконалення, зумовлений як розширенням можливостей даних ДЗЗ, так і зростанням потреб у

комплексному аналізі геоекологічного стану територій. Перспективи розвитку методики пов'язані з підвищенням точності оцінок, розширенням набору індикаторів і вдосконаленням алгоритмів інтеграції результатів.

Одним з основних напрямів розвитку методики є розширення спектра використовуваних даних ДЗЗ, зокрема шляхом залучення знімків з вищою просторовою та часовою розрізненістю, а також використання нових сенсорів оптичного, теплового та радіолокаційного діапазонів. Це дозволить підвищити детальність аналізу та покращити інтерпретацію геоекологічних процесів у межах річкових басейнів.

Подальший розвиток методики передбачає можливість розширення та уточнення системи геоекологічних індикаторів з урахуванням специфіки різних природних умов і типів землекористування. Інтеграція додаткових індикаторів може підвищити чутливість методики до ранніх стадій деградаційних процесів та покращити оцінювання потенційної геоекологічної небезпеки.

Перспективним напрямом є подальша автоматизація процедур обробки супутникових даних і розрахунку геоекологічних індикаторів, зокрема шляхом використання програмних інструментів геоінформаційних систем і хмарних платформ. Автоматизація аналізу сприятиме підвищенню відтворюваності результатів і спрощенню застосування методики в системах регулярного геоекологічного моніторингу.

Подальший розвиток методики може бути пов'язаний з інтеграцією супутникового геоекологічного аналізу з результатами наземних спостережень, статистичними даними та іншими методами просторового аналізу. Поєднання різних джерел інформації дозволить поглибити інтерпретацію результатів і підвищити достовірність оцінок геоекологічного стану територій.

Перспективи розвитку методики також пов'язані з її застосуванням для аналізу інших типів територій і природно-антропогенних систем, а також для вирішення ширшого кола наукових і прикладних завдань. Застосування методики в різних регіональних умовах сприятиме подальшій перевірці її універсальності та адаптивності.

Таким чином, розроблена методика супутникового геоекологічного аналізу за басейновим принципом є відкритою до подальшого розвитку та вдосконалення. Запропоновані напрями розвитку не змінюють її базових положень, а спрямовані на підвищення ефективності, інформативності та практичної цінності методики в умовах зростаючих викликів геоекологічної безпеки.

Висновки до четвертого розділу

1. Апробація розробленої методики супутникового геоекологічного аналізу підтвердила її ефективність для комплексного оцінювання стану басейнових геосистем. Поєднання багаточасових супутникових даних, спектральних індексів, температурних характеристик, морфометричних параметрів і показників антропогенного навантаження забезпечує виявлення просторових закономірностей розвитку геоекологічних процесів та їх інтегральне оцінювання.

2. Встановлено, що інтеграція результатів довгострокових трендів, накопичених змін, короткострокової динаміки та сучасного стану компонентів довкілля дозволяє формувати карти потенційної геоекологічної небезпеки, придатні для раннього виявлення деградаційних процесів, визначення пріоритетних територій моніторингу та інформаційного забезпечення управлінських рішень.

3. Обґрунтовано можливість практичного використання методики під час організації геоекологічного моніторингу, планування природоохоронних заходів, оцінювання стану природно-заповідного фонду, територій Смарагдової мережі та водоохоронних зон, а також для підтримки прийняття управлінських рішень у межах річкових басейнів.

4. Доведено універсальність запропонованого методичного підходу, яка забезпечується використанням басейнового принципу, уніфікованої

послідовності аналізу та адаптивного добору геоекологічних індикаторів. Це створює можливість перенесення методики на інші басейни середніх річок після коригування набору показників відповідно до природних умов і домінуючих деградаційних процесів.

5. Визначено перспективи подальшого розвитку методики, що полягають у розширенні спектра використовуваних супутникових даних, інтеграції наземних спостережень, застосуванні засобів автоматизації, хмарних технологій і методів машинного навчання для підвищення точності, відтворюваності та оперативності геоекологічного аналізу.

6. Розроблена методика забезпечує перехід від аналізу окремих супутникових показників до інтегрованого просторово-часового оцінювання геоекологічного стану басейнових геосистем, що дозволяє одночасно враховувати природні та антропогенні чинники формування геоекологічної напруженості й підвищує обґрунтованість просторового прогнозування потенційних небезпечних процесів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано теоретико-методологічні підходи до геоекологічного аналізу річкових басейнів, охарактеризовано природні передумови формування геоекологічних проблем у басейнах середніх річок лівобережжя Дніпра та обґрунтовано вибір басейну річки Супій.

2. Розроблено методику супутникового геоекологічного аналізу за басейновим принципом, що передбачає ієрархічну просторову організацію дослідження, поєднання піксельного аналізу з агрегацією результатів за тестовими ділянками.

3. Сформовано систему геоекологічних індикаторів і те, як вони між собою поєднуються в методиці для оцінювання геоекологічної напруженості.

4. Виконано просторово-часовий і багаторівневий аналіз геоекологічного стану басейну, що дозволив розмежувати актуальний стан території, короткострокові зміни, накопичені трансформації та довготривалі тенденції.

5. Виділено зони підвищеної геоекологічної напруженості та оцінено можливості застосування методики для моніторингу, природоохоронного планування, аналізу природно-заповідного фонду, територій Смарагдової мережі, водоохоронних зон і в надзвичайних ситуаціях.

Список використаних джерел

Apitz, S. E., Elliott, M., Fountain, M., & Galloway, T. S. (2006). European Environmental Management: Moving to an ecosystem approach. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2(1), 80–85.

Barnes, E. M., Clarke, T. R., Richards, S. E., Colaizzi, P. D., Haberland, J., Kostrzewski, M., Waller, P., Choi, C., Riley, E., & Thompson, T. (2000). *Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground based multispectral data*. In *Proceedings of the Fifth International Conference on Precision Agriculture* (pp. 1619–1629).

Bilous, L., Samoilenko, V., Havrylenko, O., & Kandii, M. (2023). The Use of Landsat 8.9 Satellite Data for Monitoring the Ecosystem Service of Temperature Regulation (On the Example of Green Zones in Kyiv Urbogeosystem). *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520022>

Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 893–903. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>

Chen, W., Liu, L., Zhang, C., Wang, J., Wang, J., & Pan, Y. (2004). *Monitoring the seasonal bare soil areas in Beijing using multi-temporal TM images*. In *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2004)* (Vol. 5, pp. 3379–3382). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2004.1370429>

Chorley, R. J. (1972). *Introduction to physical geography and the environment* (2nd ed.). Methuen.

Chorley, R. J. (1962). Geomorphology and general systems theory. *Professional Paper*. <https://doi.org/10.3133/pp500b>

Chorley, R. J., & Kennedy, B. A. (1971). *Physical geography: A systems approach*. Prentice-Hall. <https://archive.org/details/physicalgeograph0000chor>

Cleveland, W. S. (1993). *Visualizing data*. Hobart Press.
https://openlibrary.org/books/OL1751771M/Visualizing_data

Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., & Böhner, J. (2015). System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development*, 8(7), 1991–2007. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>

Datt, B. (1999). Visible/near infrared reflectance and chlorophyll content in Eucalyptus leaves. *International Journal of Remote Sensing*, 20(14), 2741–2759. <https://doi.org/10.1080/014311699211778>

Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. (2020). *Landsat 8–9 Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor Level-2, Collection 2* [Dataset]. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.5066/P9OGBGM6>

European Environment Agency. (2020). *The European environment – State and outlook 2020: Knowledge for transition to a sustainable Europe*. <https://www.eea.europa.eu/soer>

Fedorov, O., Kussul, N., Zyelyk, Y., Pidgorodetska, L., Kolos, L., Yailymov, B., Yailymova, H., & Shelestov, A. (2022). Improved Fire Weather Index Assessment Based on the Satellite Weather Data and Soil Moisture Deficit. *16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580239>

Feizhou Zhang, Huan Wu, Xiuwan Chen, Min Sun, & Yuanhua Luo. (2004). Spatial information integration modes and its key technologies. *IEEE International IEEE International IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS '04. Proceedings. 2004, 4, 2571-2574*. <https://doi.org/10.1109/igarss.2004.1369822>

Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R. (2014). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>

Firmansyah, M. R. (2024). Stroke Classification Comparison with KNN through Standardization and Normalization Techniques. *Advance Sustainable Science*, 212

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). *The state of the world's land and water resources for food and agriculture – Systems at breaking point*. <https://www.fao.org/3/cb7654en/cb7654en.pdf>

Gao, B.-C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)

Gitelson, A. A. (2004). Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. *Journal of Plant Physiology*, 161(2), 165–173. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-01176>

Gitelson, A. A., Gritz, Y., & Merzlyak, M. N. (2003). Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal of Plant Physiology*, 160(3), 271–282. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-00887>

Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., & Merzlyak, M. N. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 289–298. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00072-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7)

Google Developers. (n.d.). *Earth Engine Data Catalog*. <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog>

Gu, Y., Brown, J. F., Verdin, J. P., & Wardlow, B. (2007). A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. *Geophysical Research Letters*, 34(6), L06407. <https://doi.org/10.1029/2006GL029127>

Gu, Y., Hunt, E., Wardlow, B., Basara, J. B., Brown, J. F., & Verdin, J. P. (2007).

Haboudane, D., Miller, J. R., Pattey, E., Zarco-Tejada, P. J., & Strachan, I. B. (2004). *Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture*. *Remote Sensing of Environment*, 90(3), 337–352. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.12.013>

Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56(3), 275–370. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56%5B275:EDOSAT%5D2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56%5B275:EDOSAT%5D2.0.CO;2)

Hudak, V., Marhes, S., Zatserkovnyi, V., & De Donatis, M. (2025). Methodology for the automated detection of anomalous geospatial zones in satellite imagery using statistical analysis and a custom QGIS plugin. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 110(3), 117–126. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.110.13>

Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295–309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1–2), 195–213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)

Hutchinson, G. E. (1957). Concluding Remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 22(0), 415–427. <https://doi.org/10.1101/sqb.1957.022.01.039>

International meteorological vocabulary (2nd ed.). (1992). World Meteorological Organization.

Japan Aerospace Exploration Agency. (2021). ALOS World 3D 30 m DEM (Version 3.2) [Data set]. OpenTopography. <https://doi.org/10.5069/G94M92HB>

Karnieli, A., Kaufman, Y. J., Remer, L., & Wald, A. (2001). AFRI—Aerosol free vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 77(1), 10–21. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00190-0](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00190-0)

Khaksar Najafi, E., & Faghihmaleki, H. (2016). *The Effect of Suffusion Phenomenon in the Increasing of Land Subsidence Rate*. *Civil Engineering Journal*, 2(7), 316–323. <https://doi.org/10.28991/cej-2016-00000036>

Khan, N. M., Rastoskuev, V. V., Sato, Y., & Shiozawa, S. (2005). Assessment of hydrosaline land degradation by using a simple approach of remote sensing

indicators. *Agricultural Water Management*, 77(1–3), 96–109.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.09.038>

Krainiukov, O. M., & Timchenko, V. D. (2019). *Methodological principles of the construction geography on the study of the state and protection of natural landscapes. Man and Environment. Issues of Neoecology*, 31, 6–15.
<https://doi.org/10.26565/1992-4224-2019-31-01>

Lacaux, J. P., Tourre, Y. M., Vignolles, C., Ndione, J. A., & Lafaye, M. (2007). Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal. *Remote Sensing of Environment*, 106(1), 66–74.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.07.012>

Lischenko, L., Pazynych, N., & Filipovych, V. (2017). *Satellite monitoring of landslide development in the Pridnieprovskia zone of Kyiv*. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 15, 11–22. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2017.15.111>

Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic information systems and science (4th ed.)*. Wiley.
<https://archive.org/details/geographicinform0000long>

Lubskyi, M. S., Khyzhniak, A. V., Orlenko, T. A., & Holubov, S. I. (2025). Modeling the biophysical condition of the Ukrainian steppe zone using remote sensing data. *Kosmična nauka i tehnologiâ*, 31(2), 20–31.
<https://doi.org/10.15407/knit2025.02.020>

Lubskyi, M., Khyzhniak, A., Piestova, I., & Orlenko, T. (2025). Land Surface Emissivity Estimation Technique Based on NDVI/ASTER GED Data Correlation. *18th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510040>

Marhes, S., & Filipovych, V. (2026). Methodology for assessing arable land degradation through the analysis of suffosion and linear erosion using satellite data. *19th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 2026, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202655064>

Marhes, S., & Hudak, V. (2025). *Anomalies to Contours* (Version 0.2) [QGIS plugin]. QGIS Plugins Repository.
<https://plugins.qgis.org/plugins/anomalies2contours/>

Marhes, S., & Hudak, V. (2025, November 10–12). *A GIS-based open-source tool for experimental detection of geospatial anomalies in geology*. In *Proceedings of the 20th International Conference "Mathematical and Simulation Modeling of Systems (MODS 2025)"* (pp. 91–94). Chernihiv Polytechnic National University.

Marhes, S., Filipovych, V., & Lubskyi, M. (2025). Spatiotemporal analysis of surface temperature dynamics in the Supii River basin using regression methods. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 47(5). <https://doi.org/10.24028/gj.v47i5.333289>

McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>

Meng, C., Wang, Y., Zhang, X., Mandal, A., Zhong, W., & Ma, P. (2017). Effective statistical methods for big data analytics. In *Advances in computational intelligence and robotics* (pp. 280–299). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-2498-4.ch014>

Meteoblue. (n.d.). *Historical weather data download*.
<https://www.meteoblue.com/en/weather/archive/>

Methodological Principles of The Construction Geography on the Study of the State and Protection of Natural Landscapes. (2019). *Man and Environment. Issues of Neoecology*(31). <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2019-31-01>

Mychak, A., & Filipovich, V. (2010). An express geo-information technology to control urbanized areas environment based on multiband and hyperspectral data analysis. *9th EAGE International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201402813>

NASA Earthdata. (2026). *Normalized difference vegetation index (NDVI)*.
<https://www.earthdata.nasa.gov/topics/land-surface/normalized-difference-vegetation-index-ndvi>

NASA Jet Propulsion Laboratory. (2013). *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Global* [Digital elevation model]. OpenTopography. <https://doi.org/10.5069/G9445JDF>

National Park Service. (2001). *Geologic resource monitoring*. <https://www.nature.nps.gov/grd/geology/monitoring/>

Nawar, S., Buddenbaum, H., Hill, J., & Kozak, J. (2014). Modeling and Mapping of Soil Salinity with Reflectance Spectroscopy and Landsat Data Using Two Quantitative Methods (PLSR and MARS). *Remote Sensing*, 6(11), 10813-10834. <https://doi.org/10.3390/rs61110813>

Nguyen, C. T., Chidthaisong, A., Kieu Diem, P., & Huo, L. (2021). A Modified Bare Soil Index to Identify Bare Land Features during Agricultural Fallow-Period in Southeast Asia Using Landsat 8. *Land*, 10(3), 231. <https://doi.org/10.3390/land10030231>

Odum, E. P. (1969). The Strategy of Ecosystem Development. *Science*, 164(3877), 262-270. <https://doi.org/10.1126/science.164.3877.262>

Pazynych, N. (2017). *Research and forecasting of landslide phenomena of the Dniپر zone of Kyiv based on the remote sensing data and geomorphological studies*. Ukrainian Journal of Remote Sensing, 13. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2017.13.104>

Planet Team. (2020). *PlanetScope product*. Planet Labs PBC. <https://www.planet.com>

Rani, A., Kumar, N., Sinha, N. K., & Kumar, J. (2022). Identification of salt-affected soils using remote sensing data through random forest technique: A case study from India. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(5), 381. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09682-3>

Rondeaux, G., Steven, M., & Baret, F. (1996). Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 55(2), 95–107. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00186-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00186-7)

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1973). *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*. In *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium* (Vol. 1, pp. 309–317)

Samoilenko, V., Bilous, L., Dibrova, I., Grynova, M., & Vishnikina, L. (2025). Geospatial Model Assessment of Anthropization Extent for Aquatic-Terrestrial Landscapes. *18th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510031>

Sarnavskyi, S. P., & Grebin, V. V. (2025). The Hydrographic Network of the Left Bank of the Middle Dnipro: Historical Dynamics and Current State. *18th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510113>

Sellers, R. W. (1997). *Preserving nature in the national parks: A history*. Yale University Press. <http://www.georgewright.org/sellers.pdf>

Sinsomboonthong, S. (2022). Performance Comparison of New Adjusted Min-Max with Decimal Scaling and Statistical Column Normalization Methods for Artificial Neural Network Classification. *International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences*, 2022, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2022/3584406>

Strahler, A. N. (1952a). Dynamic basis of geomorphology. *Geological Society of America Bulletin*, 63(9), 923–938. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63%5B923:DBOG%5D2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63%5B923:DBOG%5D2.0.CO;2)

Strahler, A. N. (1952b). Dynamic structure of landscapes. *Geologische Rundschau*, 41(1), 470–478.

Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(6), 913-920. <https://doi.org/10.1029/tr038i006p00913>

Tansley, A. G. (1935). The Use and Abuse of Vegetational Concepts and Terms. *Ecology*, 16(3), 284-307. <https://doi.org/10.2307/1930070>

Tarariko, O. H., Iliencko, T. V., Kuchma, T. L., Vlasova, O. V., Solokha, M. O., Zubov, A. O., & Bilokin, O. A. (2024). Remote sensing monitoring of erosion-degraded agricultural landscapes: Scientific-methodical and practical recommendations. *Agrarna nauka*. <https://doi.org/10.31073/978-966-540-605-1>

Tian, Y. C., Yao, X., Yang, J., Cao, W. X., Hannaway, D. B., & Zhu, Y. (2011). *Assessing newly developed and published vegetation indices for estimating rice leaf nitrogen concentration with ground- and space-based hyperspectral reflectance. Field Crops Research*, 120(2), 299–310.

Turner, M. G., Gardner, R. H., & O'Neill, R. V. (2001). *Landscape ecology in theory and practice: Pattern and process*. Springer.

U.S. Geological Survey. (2020). *Landsat Collection 2 surface temperature*. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-surface-temperature>

United Nations Convention to Combat Desertification. (2021). *Good practice guidance: SDG indicator 15.3.1: Proportion of land that is degraded over total land area* (Version 2.0). <https://www.unccd.int/resources/manuals-and-guides/good-practice-guidance-sdg-indicator-1531-proportion-land-degraded>

United Nations Environment Programme. (2011). *Integrated river basin management: Planning and implementation guidance*.

United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. <https://sdgs.un.org/2030agenda>

Valor, E., & Caselles, V. (1996). *Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas. Remote Sensing of Environment*, 57(3), 167–184. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(96\)00039-9](https://doi.org/10.1016/0034-4257(96)00039-9)

Vörösmarty, C. J., Green, P., Salisbury, J., & Lammers, R. B. (2000). Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth. *Science*, 289(5477), 284–288.

Wouters, P., Vinogradov, S., Allan, A., Jones, P., & Rieu-Clarke, A. (2014). *Sharing transboundary waters: An integrated assessment of equitable entitlement*. (треба уточнювати, бо у 2014 є кілька праць Wouters)

Wulder, M. A., Coops, N. C., Roy, D. P., White, J. C., & Hermosilla, T. (2018). Land cover 2.0. *International Journal of Remote Sensing*, 39(12), 4254–4284. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1452075>

Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>

Yu, X., Guo, X., & Wu, Z. (2014). Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 TIRS—Comparison between Radiative Transfer Equation-Based Method, Split Window Algorithm and Single Channel Method. *Remote Sensing*, 6(10), 9829–9852. <https://doi.org/10.3390/rs6109829>

Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24(3), 583–594. <https://doi.org/10.1080/01431160304987>

Андрейчук, Ю. М. (2012). *Геоінформаційне моделювання басейнових систем (на прикладі притоки Дністра – річки Коронець)* (Автореф. дис. ... канд. геогр. наук). Львів.

Андрейчук, Ю., Безручко, Л., Біланюк, В., та ін. (2021). *Геоєкологія Львівської області* (Є. Іванов, ред.). Простір-М.

Атлас природных условий и естественных ресурсов Украинской ССР. (1978). ГУГК.

Бачинський, Г. О. (2003). *Екологічний моніторинг*. Либідь.

Веклич, В. М. (1977). *Стратиграфія четвертинних відкладів України*. Наукова думка.

Веклич, В. М. (1982). *Палеогеографія України*. Наукова думка.

Веклич, В. М., & Герасименко, Н. П. (1988). *Палеогеографічні умови формування рельєфу України*. Наукова думка.

Веліканов, В. А., Гожик, П. Ф., & Педанюк, Г. І. (2007). *Національний атлас України*.

Верховна Рада України. (1995). *Водний кодекс України* (Кодекс України № 213/95-ВР від 6 червня 1995 року). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80>

Верховна Рада України. (2016). *Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо впровадження інтегрованих підходів в управлінні водними*

ресурсами за басейновим принципом (Закон України № 1641-VIII від 4 жовтня 2016 року). <https://zakon.rada.gov.ua/go/1641-19>

Верховцев, В. Г. (Наук. кер.), & Спиця, Р. О. (Відп. вик.). (2019). *Звіт про виконання науково-дослідних робіт за темою: «Сейсмотектонічна обстановка в районі ділянки реконструкції газокompресорної станції за адресою: Київська область, Яготинський район, с. Ничипорівка, вул. Богдана Хмельницького, будинок 40/5» (у рамках договору № 10/2019).*

Вишневський, В. І. (2003). *Антропогенний вплив на річки України* (Дис. ... д-ра геогр. наук).

Водна ініціатива плюс Європейського Союзу для країн Східного партнерства. (2021). *План управління річковим басейном Дніпра. Частина 1 (2025–2030).*

Возгрин, В. Д., & Гожик, П. Ф. (2007). *Національний атлас України.*

Вознюк, Н. М. (2006). *Оцінка екологічного стану української частини басейну ріки Західний Буг* (Автореф. дис. ... канд. с.-г. наук). Державний агроекологічний університет.

Габчак, Н. Ф. (2008). Інтегральний показник геоекологічної напруги як основа комплексного еколого-геоморфологічного районування Закарпатської області. *Регіональні проблеми ландшафтознавства та геоморфології*, 24, 106–111.

Гавриленко, О. П. (2008). *Екогеографія України*. Знання.

Геоінформ України. (б. р.). *Державна геологічна карта України масштабу 1:200 000 (Серія М-200)* [Карта].

Гожик, П. Ф., & Педанюк, Г. І. (2007). *Геоморфологічна карта України* [Карта]. У *Національний атлас України*. ДНВП «Картографія».

Гожик, П. Ф., Герасименко, Н. П., & Бортник, С. Ю. (2019). *Основи четвертинної геології*. Наукова думка.

Грачов, А. П. (2010). *Атлас об'єктів природно-заповідного фонду України*. <https://pzfs.land.kiev.ua>

Гребінь, В. В. (2010). *Ландшафтно-гідрологічний аналіз річкових басейнів України*. Ніка-Центр.

Гребінь, В. В. (2010). *Сучасний водний режим річок України: Ландшафтно-гідрологічний аналіз*. Ніка-Центр.

Гребінь, В. В. (2013). Ландшафтно-гідрологічний підхід до оцінки річкових басейнів України. *Український географічний журнал*, 4, 32–39.

Гродзинський, М. Д. (1993). *Основи ландшафтної екології*. Либідь.

Гродзинський, М. Д. (2005). *Пізнання ландшафту: Місце і простір* (Т. 1–2). Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет».

Гродзинський, М. Д. (2014). *Ландшафтна екологія*. Знання.

Гудак, В., Маргес, С., & Зацерковний, В. (2025). Розробка інтерактивного інструменту для виявлення й аналізу геопросторових аномалій у QGIS на основі супутникових даних. *Географічний часопис Волинського національного університету імені Лесі Українки*, 6, 124–133.
<https://doi.org/10.32782/geochasvnu.2025.6.13>

Данильченко, О. С. (2019). *Річкові басейни Сумської області: Геоекологічний аналіз*. СумДПУ імені А. С. Макаренка.

Демчишин, М. Г. (1991). Геологическая среда Киева. *Геологічний журнал*, 2, 14–24.

Денисик, Г. І. (1998). *Антропогенні ландшафти України*. Екоцентр.

Денисик, Г. І. (2001). *Ландшафтознавство*. ВДПУ.

Денисик, Г. І. (2003). *Природокористування та ландшафтна структура території*. Екоцентр.

Державне агентство водних ресурсів України. (б. р.). *Державний водний кадастр за розділом «Поверхневі води» у частині обліку поверхневих водних об'єктів* [Набір даних]. Портал відкритих даних України. Отримано 20 квітня 2025 року з <https://data.gov.ua/dataset/cadastre-surface-water>

Дерій, М. М. (2007). *Звіт про геологічне довивчення надр. Геологічна будова та корисні копалини межиріччя Трубіжжя та Супою* (Кн. 1).

Дерій, М. М. (2012). *Геоекологічна оцінка басейнових систем України*. Ніка-Центр.

ДНВП «Картографія». (2007). *Національний атлас України*.

Дугін, С. С. (2017). *Обґрунтування вибору тестових ділянок для наземної верифікації даних космічного геомоніторингу території України* [Дисертація]. <https://www.casre.kiev.ua/images/files/paper-dugin.pdf>

Жуков, М. П. (2008). *Математична статистика та обробка геологічних даних*. Вища школа.

Кирилюк, О. В., & Кирилюк, С. М. (2023). *Геогідроморфологічне обґрунтування методики оцінки стану басейнових систем малих річок (на прикладі річок Гукова, Дерелюю та Виженки)*. Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича.

Клименко, М. О., & Статник, І. І. (2012). *Методологія покращення екологічного стану річок Західного Полісся: На прикладі р. Горинь*. НУВГП.

Ковальчук, А. І. (2018). *Атласне картографування річково-басейнових систем = Atlas mapping of river-basin systems* (І. П. Ковальчук, наук. ред.). Простір-М.

Ковальчук, І. (2008). Географічні дослідження річок і річкових долин в Україні: Стан, проблеми, перспективи. *Історія української географії*, 17, 56–64.

Ковальчук, І. П. (1997). *Регіональний еколого-геоморфологічний аналіз*. Львів: Інститут українознавства НАН України.

Ковальчук, І. П., & Павловська, Т. С. (2008). *Річково-басейнова система Горині: Структура, функціонування, оптимізація*. РВВ «Вежа» Волинського національного університету імені Лесі Українки.

Ковальчук, І., & Петровська, М. (2003). *Геоекологія Розточчя: монографія*. Львів: Видавничий центр Львівського національного університету імені Івана Франка.

Корпачев. (1949). *Инженерно-геологическая характеристика долины р. Супой на участке от г. Яготин до впадения ее в реку Днепр*.

Кошик, Ю. А., Тимофєєв, В. М., Комлев, А. А., та ін. (1987). Новые аспекты истории развития рельефа Южного Полесья в антропогене. У *Стратиграфия и корреляция морских и континентальных отложений Украины* (с. 134–143). Наукова думка.

Круглов, І. (2004). Геоекологія та географія. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка*. Серія: Географія, 2, 49–55.
<http://dspace.tnpu.edu.ua/bitstream/123456789/25606/1/Kruhlov.pdf>

Круглов, І. (2020). *Трансдисциплінарна геоекологія*. ЛНУ імені Івана Франка.

Круглов, І. С. (2003). *Геоекологія гірських геосистем Українських Карпат*.

Ліщенко, Л. П., Філіпович, В. Є., & Маргес, С. В. (2024). Методико-технологічний комплекс супутникового моніторингу торфовищ з метою оцінки їх пожежонебезпечного стану. У *Актуальні проблеми та інноваційні технології у сфері цивільного захисту та екологічної безпеки для повоєнного відновлення України: Збірник наукових праць Міжнародної науково-практичної конференції*.

Ліщенко, Л. П., Філіпович, В. Є., & Маргес, С. В. (2024). Супутниковий геоекологічний моніторинг наслідків руйнування Каховської ГЕС. У *Природа в окупації – 10 років російської військової агресії проти довкілля. Перспективи відновлення природоохоронних територій України: Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції* (с. 115–120). Центр екологічної освіти та інформації.

Лялько, В. І., & Попов, М. О. (Ред.). (2006). *Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування*. Наукова думка.

Маргес, С. В. (2025). Методика геоекологічного аналізу басейнів середніх річок Лівобережжя Дніпра на основі даних аерокосмічного моніторингу і наземних досліджень (на прикладі басейну річки Супій). У *Інноваційні методи в дистанційному зондуванні Землі: Матеріали III науково-практичного семінару пам'яті академіка НАН України Вадима Івановича Лялька*.

Маринич, О. М. (1985). *Природа Української РСР: Фізико-географічна характеристика*. Наукова думка.

Маринич, О. М., & Пархоменко, Г. О. (1986). *Ландшафти України*. Вища школа.

Маринич, О. М., & Шищенко, П. Г. (2003). *Фізико-географічне районування України*. Знання.

Маринич, О. М., Пархоменко, Г. О., Петренко, О. М., & Шищенко, П. Г. (2003). Удосконалена схема фізико-географічного районування України. *Український географічний журнал*, 1, 16–20.

Мичак, А. Г., & Філіпович, В. Є. (2010). Експрес-контроль екологічного стану урботериторій за матеріалами багатозональної космічної зйомки. У *Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях: Збірник наукових праць IX Міжнародної науково-практичної конференції* (с. 210–221).

Мичак, А. Г., Філіпович, В. Є., Приходько, В. Л., та ін. (2010). *Аерокосмічні дослідження геологічного середовища*. Державна геологічна служба.

Мізіна, С. К. (2023). *Трубізька водогосподарська ландшафтно-технічна система* (Дис. д-ра філософії, Вінницький державний педагогічний університет імені Михайла Коцюбинського).

Нестерчук, І. (2011). Геоекологічна оцінка території та схема геоекологічного районування як передумова регіонального управління розвитком територій. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Географія*, 59, 18–23.

Николаенко, Б. А. (2007). К вопросу о постгляциальных условиях формирования бассейна Днепра. *Київський географічний щорічник*, 7, 205–209.

Олішевська, Ю. А. (2014). Історія геоекологічних досліджень. *Геополитика и экогеодинамика регионов*, 10(2), 164–168.

Отчет по теме: Оценка условий водоснабжения крупных населенных пунктов УССР (Киевская область). Книга 20. Экспертное заключение по определению эксплуатационных запасов подземных вод г. Яготина. (1970).

Пазинич, В. Г. (2004). *Подніпров'я в перигляціалі. Зміни водності річок* (Вип. 2, ч. 1). Українське географічне товариство.

Пазинич, В. Г. (2007). *Геоморфологічний літопис Великого Дніпра*. Гідромакс.

Пилипович, О. В., & Ковальчук, І. П. (2017). *Геоєкологія річково-басейнової системи верхнього Дністра*. ЛНУ імені Івана Франка.

Плічко, Л. В., Хільчевський, В. К., & Зацерковний, В. І. (2026). *Оцінка стану водних об'єктів з використанням ДЗЗ* (В. К. Хільчевський, ред.). ДІА.

Попов, В. П., Маринич, А. М., & Ланько, А. И. (Ред.). (1968). *Физико-географическое районирование УССР*. Киевский университет.

Пшеничний, Н. І., & Семенов, К. С. (1957). *Осушення і освоєння заплави річки Трубіж*.

Рудько, Г. І., & Гошовський, В. С. (2009). *Екологічна безпека техноприродних геосистем адміністративних областей: На прикладі Львівської області*. Академпрес.

Самойленко, В. М., & Діброва, І. О. (2019). *Природничо-географічне моделювання*. Ніка-Центр.

Самойленко, В. М., Вішнікіна, Л. П., & Діброва, І. О. (2022). Природничо-географічне моделювання як аналітично-технологічний інструмент сучасної ландшафтної екології. *Ландшафтознавство*, 2(2), 84–101. <https://doi.org/10.31652/2786-5665-2022-2-84-101>

Самойленко, В. М., Діброва, І. О., & Пласкальний, В. В. (2018). *Антропоізація ландшафтів*. Ніка-Центр.

Сарнавський, С. П., Гребінь, В. В., & Єрмаков, В. В. (2024). Особливості використання водних ресурсів лівих приток Середнього Дніпра для потреб гідроенергетики та меліорації. *Acta Academiae Beregsasiensis: Geographica et Recreatio*, 3, 81–91. <https://doi.org/10.32782/2786-5843/2024-3-9>

Сташук, В. А., Мокін, В. Б., Гребінь, В. В., & Чунарьов, О. В. (2014). *Наукові засади раціонального використання водних ресурсів України за басейновим принципом* (В. А. Сташук, ред.). Грінь Д. С.

Стецюк, В. В., Романчук, С. В., Щур, Ю. В., та ін. (2001). *Київ як екологічна система: Природа – людина – виробництво – екологія*. Центр екологічної освіти та інформації.

Українська природоохоронна група. (2020). *Розорювання заказників на Чернігівщині*. <https://uncg.org.ua/rozoriuvannia-zakaznykiv/>

Федоровский, А. Д., & Лищенко, Л. П. (2003). Ландшафтно-системный подход при оценке геоэкологической ситуации в регионе. *Доповіді Національної академії наук України*, 11, 126–131.

Філіпович, В., & Маргес, С. (2025). Алгоритм аналізу пожежонебезпечності ландшафтів за супутниковими індексами: Демонстрація на прикладі пожежі у водно-болотних угіддях басейну річки Супій із використанням знімків PlanetScore. У *Різноманіття ландшафтних різноманіть: Збірник матеріалів науково-прикладного семінару, приуроченого до 25-річчя підписання Європейської ландшафтної конвенції* (с. 89–93). <https://geo.knu.ua/wp-content/uploads/2025/12/zvedeni-materialy-01.12.2025.pdf>

Хільчевський, В. К., Ромась, І. М., Ромась, М. І., Гребінь, В. В., Шевчук, І. О., & Чунарьов, О. В. (2007). *Гідролого-гідрохімічна характеристика мінімального стоку річок басейну Дніпра* (В. К. Хільчевський, ред.). Ніка-Центр.

Цись, П. М. (1962). *Геоморфологія УРСР*. Видавництво Київського університету.

Черваньов, В. І. (1995). *Морфоструктурний аналіз території України*. Логос.

Черваньов, В. І. (2002). *Геоморфологія України*. Вища школа.

Черваньов, В. І., & Кравчук, Я. С. (2001). *Геоморфологічне районування України*. Видавництво ЛНУ.

Швець, Г. І., Дрозд, Н. І., & Левченко, С. П. (1957). *Каталог річок України*. Видавництво АН УРСР.

Шищенко, П. Г., & Гавриленко, О. П. (2017). *Геоєкологія України*. ДП «Прінт Сервіс».

Шищенко, П. Г., & Гавриленко, О. П. (2020). *Прикладна геоекологія*. ПВТП «LAT&K».

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Акт впровадження результатів дослідження та пояснювальна записка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України»
член-кореспондент НАН України

Михайло ПОПОВ

«03» серпня 2026 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Центр вивчення і збереження природи, культури і архітектури «Озеро Супій»

Євген ДОВГАЛЮК

«03» серпня 2026 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

(приймання-передачі матеріалів науково-дослідних розробок)

Ми, що нижче підписалися, провідний науковий співробітник ДУ «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України» (ЦАКДЗ), к.геол.н., с.н.с. В.Є. Філіпович та аспірант ЦАКДЗ С.В. Маргес, з одного боку, та засновник Центру вивчення і збереження природи, культури і архітектури «Озеро Супій», з іншого боку, склали цей акт про те, що ЦАКДЗ передає, а Центр вивчення і збереження природи, культури і архітектури «Озеро Супій» приймає «Карту стану басейну р. Супій щодо потенційної геоекологічної небезпеки» з пояснювальною запискою до неї (автори: к.геол.н., с.н.с. В.Є. Філіпович, аспірант С.В. Маргес), яка була створена при проведенні дисертаційного дослідження аспіранта С.В. Маргеса на тему «Методика геоекологічного аналізу басейнів середніх річок Лівобережжя Дніпра на основі даних аерокосмічного моніторингу і наземних досліджень (на прикладі басейну річки Супій)».

«Карта стану басейну р. Супій щодо потенційної геоекологічної небезпеки» та пояснювальна записка до неї використовуватиметься громадськими природоохоронними організаціями у своїй діяльності.

Від Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України»

Пров.н.с., к.геол.н.

Володимир ФІЛІПОВИЧ

Аспірант

Сергій МАРГЕС

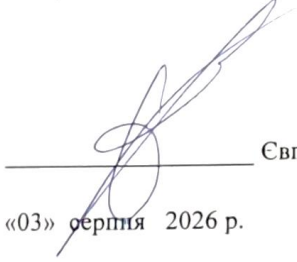
Від Центру вивчення і збереження природи, культури і архітектури «Озеро Супій»

Євген ДОВГАЛЮК

Національна академія наук України
Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі
Інституту геологічних наук
Національної академії наук України»

ПОГОДЖЕНО

Центр вивчення і збереження природи,
культури і архітектури «Озеро Супій»



Свген ДОВГАЛЮК

«03» серпня 2026 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Державної установи «Науковий
центр аерокосмічних досліджень Землі
Інституту геологічних наук Національної
академії наук України»
член-кореспондент НАН України

_____ Михайло ПОПОВ

«03» серпня 2026 р.

КАРТА СТАНУ БАСЕЙНУ Р. СУПІЙ ЩОДО ПОТЕНЦІЙНОЇ ГЕОЕКОЛОГІЧНОЇ
НЕБЕЗПЕКИ
масштаб 1:200 000
та пояснювальна записка
(автори: к.геол.н., с.н.с. В.Є. Філіпович, С.В. Маргес).

КИЇВ 2026

Пояснювальна записка

Територія: Київська область, долина р. Супій.

Карта є результатом застосування методики геоecологічного аналізу басейнів середніх річок Лівобережжя Дніпра на основі даних аерокосмічного моніторингу і наземних досліджень, розроблена у результаті дисертаційного дослідження, проведеного С.В. Маргесом у 2022-2026 рр.

Розроблено методику супутникового геоecологічного аналізу за басейновим принципом, яка охоплює визначення меж басейну та тестових ділянок, формування інформаційної бази, розрахунок системи геоecологічних індикаторів, їх нормалізацію та агрегацію, просторово-часову інтерпретацію та валідацію результатів. У межах методики визначено основні тематичні блоки аналізу – стан рослинного покриву, водних ресурсів, ґрунтів, теплового режиму, клімато-ecологічних небезпек та антропогенного впливу – для яких підібрано відповідні супутникові індикатори, визначено їхню змістову інтерпретацію, можливості застосування та обмеження.

Здійснено апробацію розробленої методики на прикладі басейну річки Супій. Надано загальну характеристику басейну як об'єкта геоecологічного аналізу, визначено його природні умови, особливості землекористування, гідрологічну структуру, просторове положення природоохоронних територій і тестових ділянок. У межах апробації виконано оцінювання стану рослинного покриву, водних ресурсів, ґрунтового покриву та теплового режиму. На основі багаторічних супутникових даних проаналізовано просторову диференціацію вегетаційних показників, а також індикатори, що дозволяють виявляти відкриті водні поверхні, перезволожені ділянки, зони зниження вологості та потенційного замулення або заростання водойм тощо.

За результатами апробації сформовано інтегральну оцінку геоecологічного стану та виділено зони потенційної геоecологічної небезпеки, де поєднуються несприятливі значення кількох індикаторів: зниження стану рослинності, дефіцит вологи, підвищена поверхнева температура, ознаки деградації ґрунтів, ерозійно-суфозійні прояви, заболочування, замулення або інтенсивне антропогенне навантаження. Поєднання різних індикаторів забезпечує

уникнення однобічної інтерпретації та підвищує надійність виділення проблемних ділянок.

Запропонований підхід може бути використаний для моніторингу геоекологічного стану басейнів середніх річок, виділення зон потенційної геоекологічної небезпеки, визначення ділянок, які потребують першочергової польової перевірки, обґрунтування природоохоронних заходів і підтримки управлінських рішень у сфері басейнового природокористування. Окремим напрямом апробації стало оцінювання стану природоохоронних територій у межах басейну річки Супій, де показано важливість аналізу не лише внутрішнього стану природних комплексів, а й впливу прилеглих територій, характеру землекористування, динаміки поверхневого зволоження, теплового режиму та просторової близькості до зон антропогенної трансформації, що дозволяє розглядати природоохоронні території як складові басейнової геосистеми.

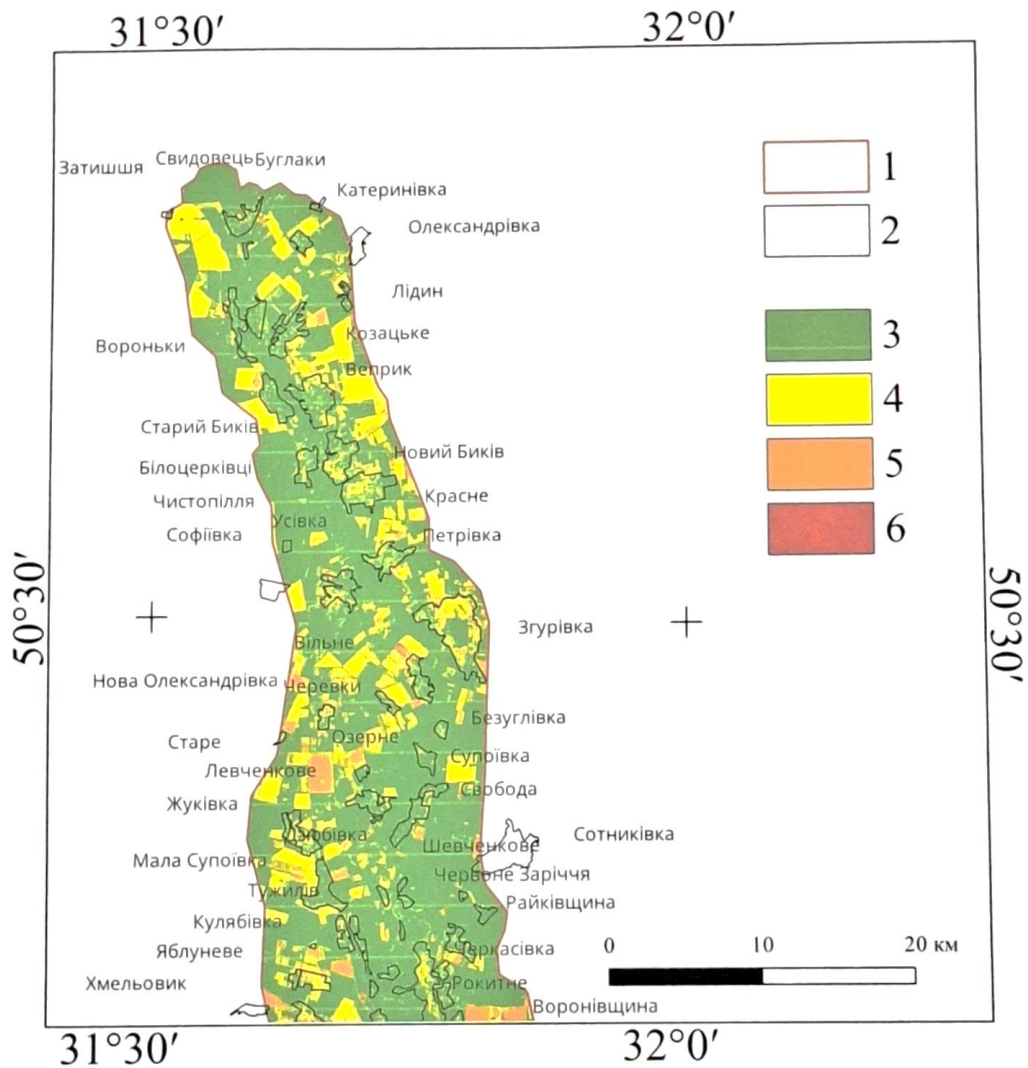


Рисунок 1. Карта стану північної частини басейну р.Супій щодо потенційної геоекологічної небезпеки за методикою
 Умовні позначення: 1) межі басейну; 2) межі населених пунктів; геоекологічний стан басейну річки Супій щодо потенційної геоекологічної небезпеки – 3) безпечний, 4) напружений, 5) кризовий; 6) катастрофічний.

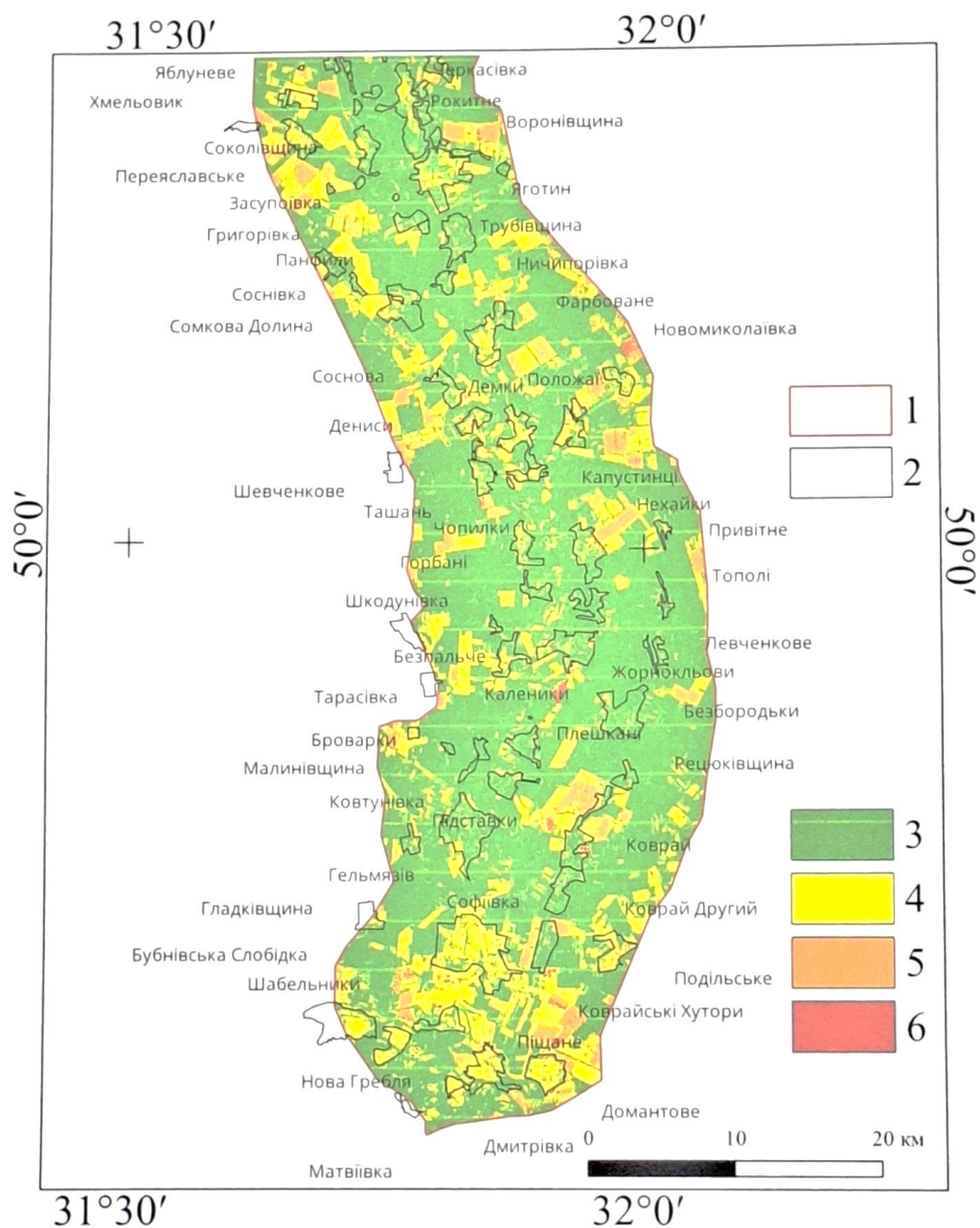


Рисунок 2. Карта стану південної частини басейну р.Супій щодо потенційної геоекологічної небезпеки за методикою
 Умовні позначення: 1) межі басейну; 2) межі населених пунктів; геоекологічний стан басейну річки Супій щодо потенційної геоекологічної небезпеки – 3) безпечний, 4) напружений, 5) кризовий; 6) катастрофічний.

ДОДАТОК Б

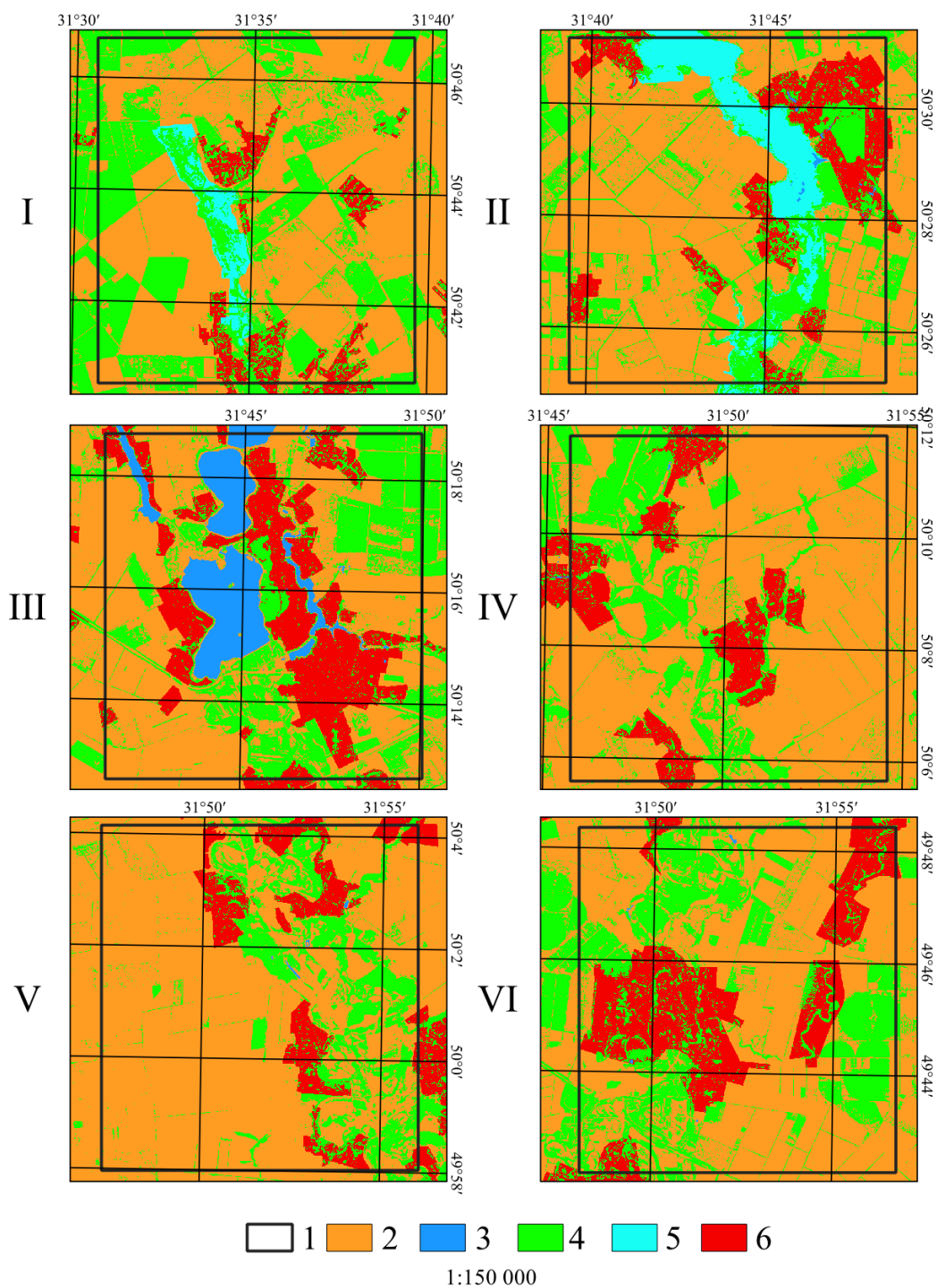


Рис. Б.1 Результат бінарної класифікації угідь на тестових ділянках з коригуванням кількох класів

Умовні позначення: 1) межі текстових діляно; класи угідь – 2) посіви, 3) відкриті водойми, 4) ліси та чагарники, 5) трав'яні водно-болотні угіддя; 6) забудова.

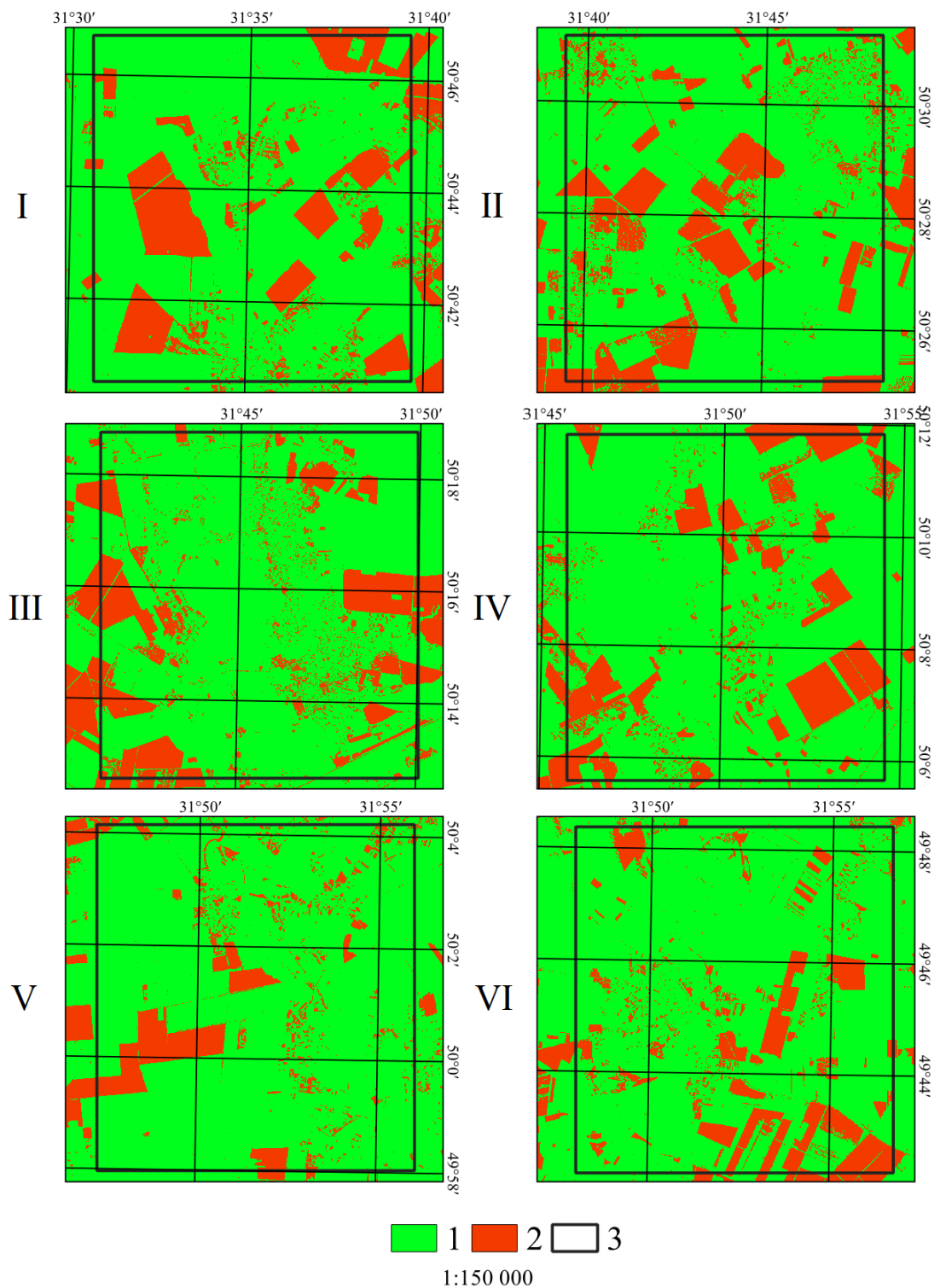


Рис. Б.2 Класифікація тестових ділянок за NDBI

Умовні позначення: тестові ділянки – I) «Свидовець», II) «Усівський», III) «Озерна», IV) «Бутовщина», V) «Ташанський», VI) «Коврасць»; Класи інтерпретації індексу – 1) природні поверхні, 2) урбанізовані поверхні; 3) межі текстових ділянок

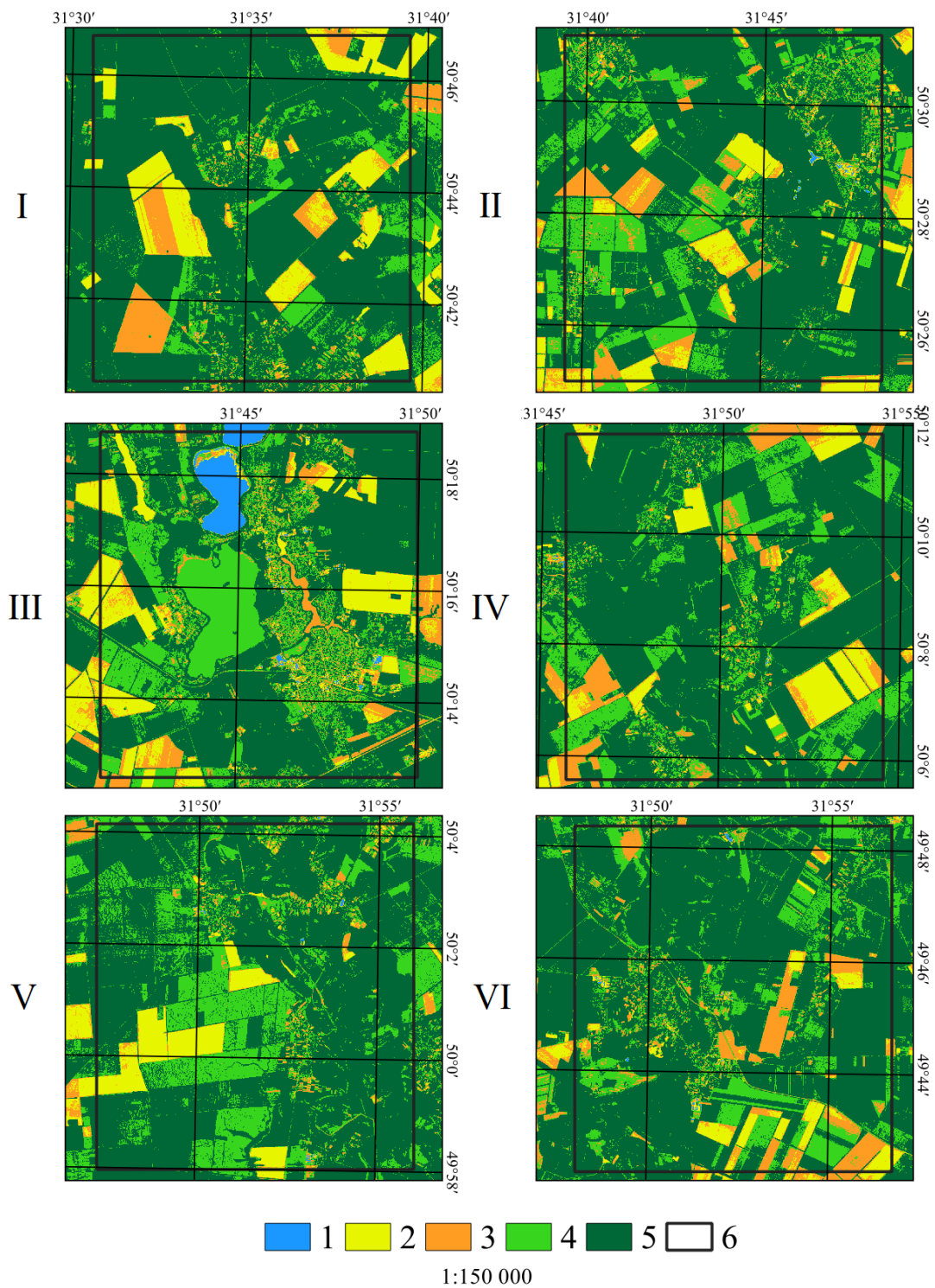


Рис. Б.3 Класифікація тестових ділянок за NDVI

Умовні позначення: тестові ділянки – I) «Свидовець», II) «Усівський», III) «Озерна», IV) «Бутовщина», V) «Ташанський», VI) «Ковраєць»; Класи інтерпретації індексу – 1) вода, відсутність рослинності, 2) голий ґрунт, 3) розріджена рослинність, 4) помірна рослинність, 5) густа рослинність; 6) межі тестових ділянок.

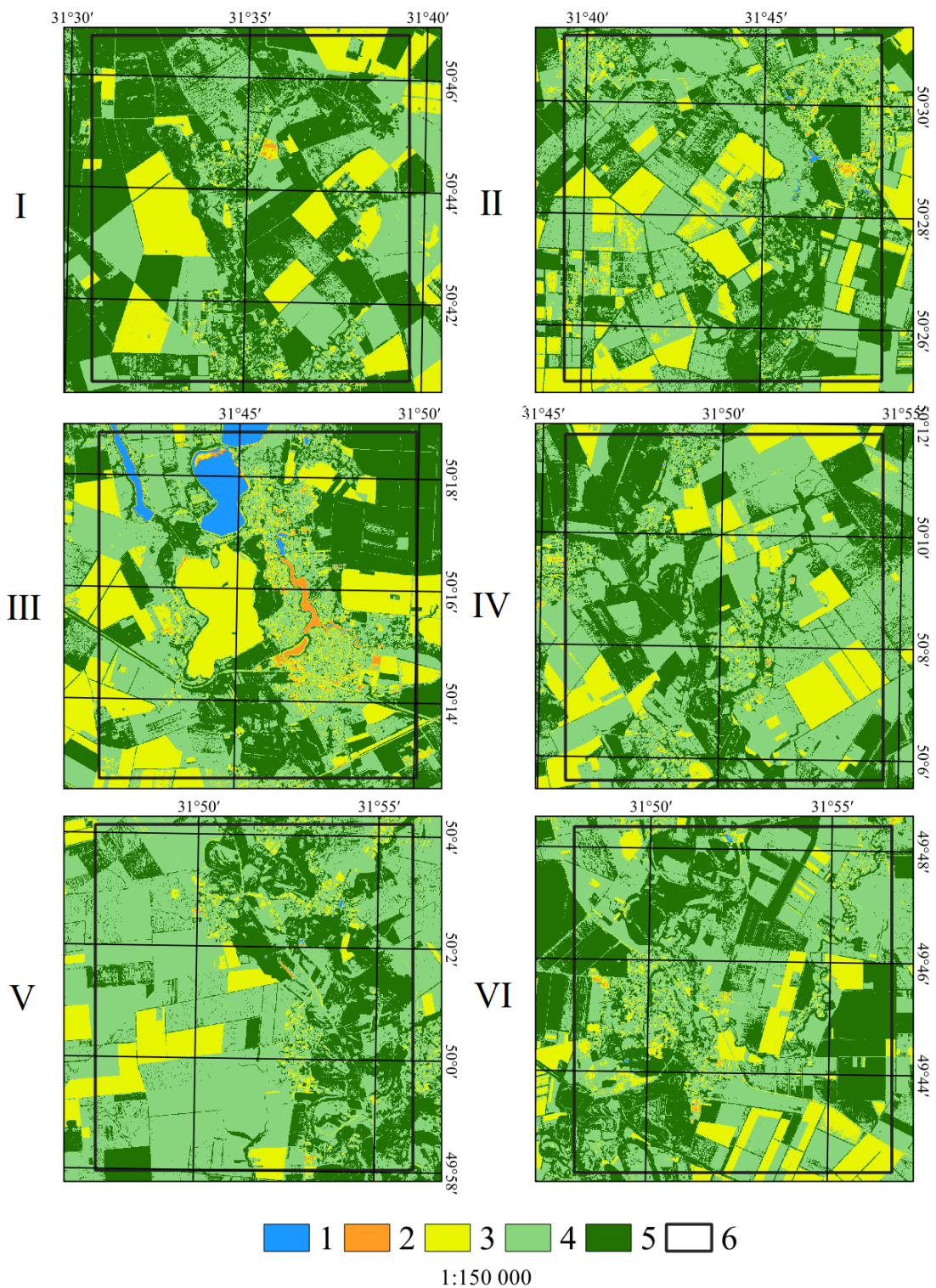


Рис. Б.4 Класифікація тестових ділянок за GNDVI

Умовні позначення: тестові ділянки – I) «Свидовець», II) «Усівський», III) «Озерна», IV) «Бутовщина», V) «Ташанський», VI) «Ковраєць»; Класи інтерпретації індексу – 1) вода, відсутність рослинності, 2) голий ґрунт, 3) розріджена рослинність, 4) помірна рослинність, 5) густа рослинність; 6) межі текстових ділянок

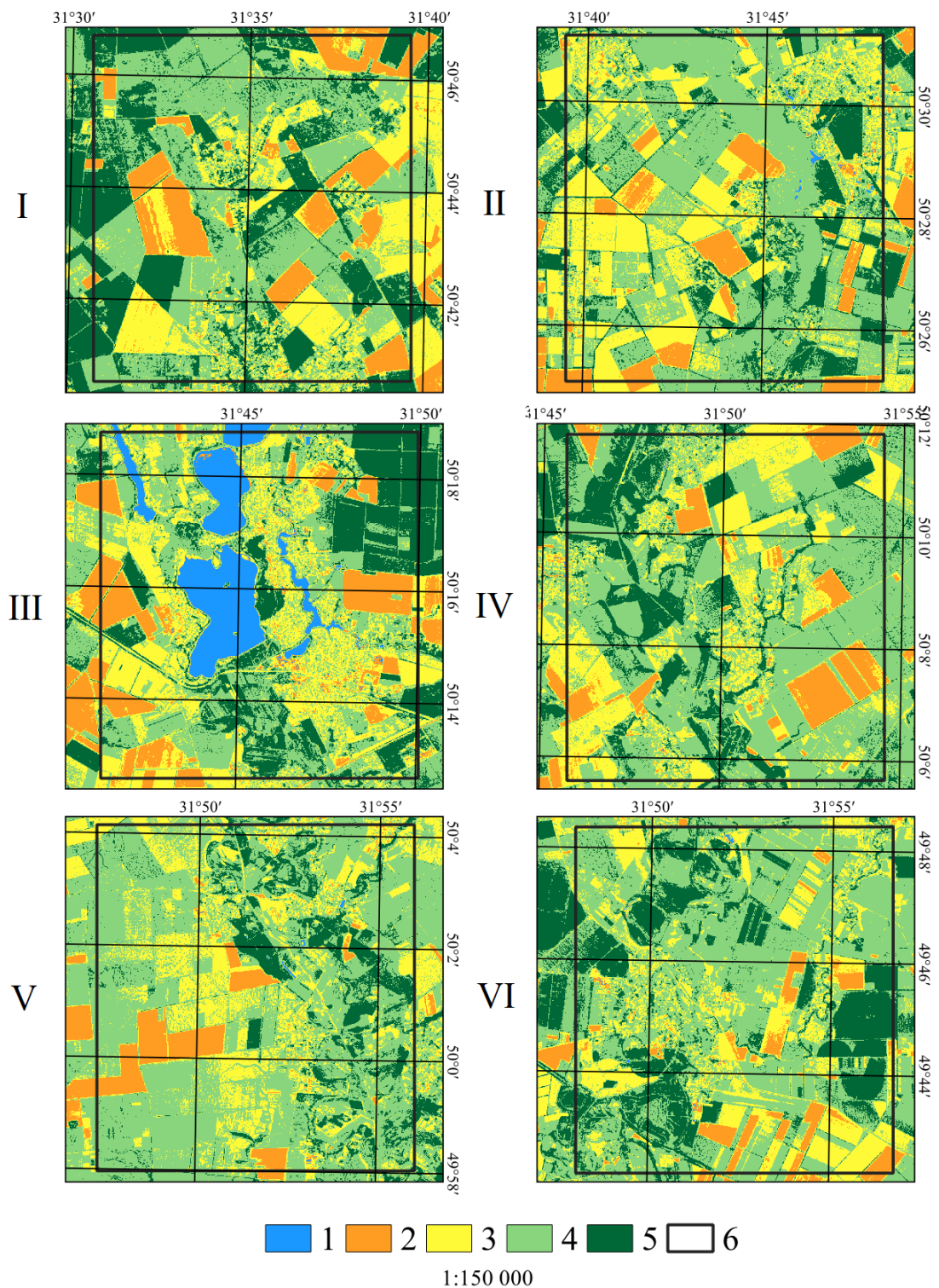


Рис. Б.5 Класифікація тестових ділянок за LCI

Умовні позначення: тестові ділянки – I) «Свидовець», II) «Усівський», III) «Озерна», IV) «Бутовщина», V) «Ташанський», VI) «Ковраєць»; Класи інтерпретації індексу – 1) вода, відсутність рослинності, 2) голий ґрунт, 3) розріджена рослинність, 4) помірна рослинність, 5) густа рослинність; 6) межі тестових ділянок.

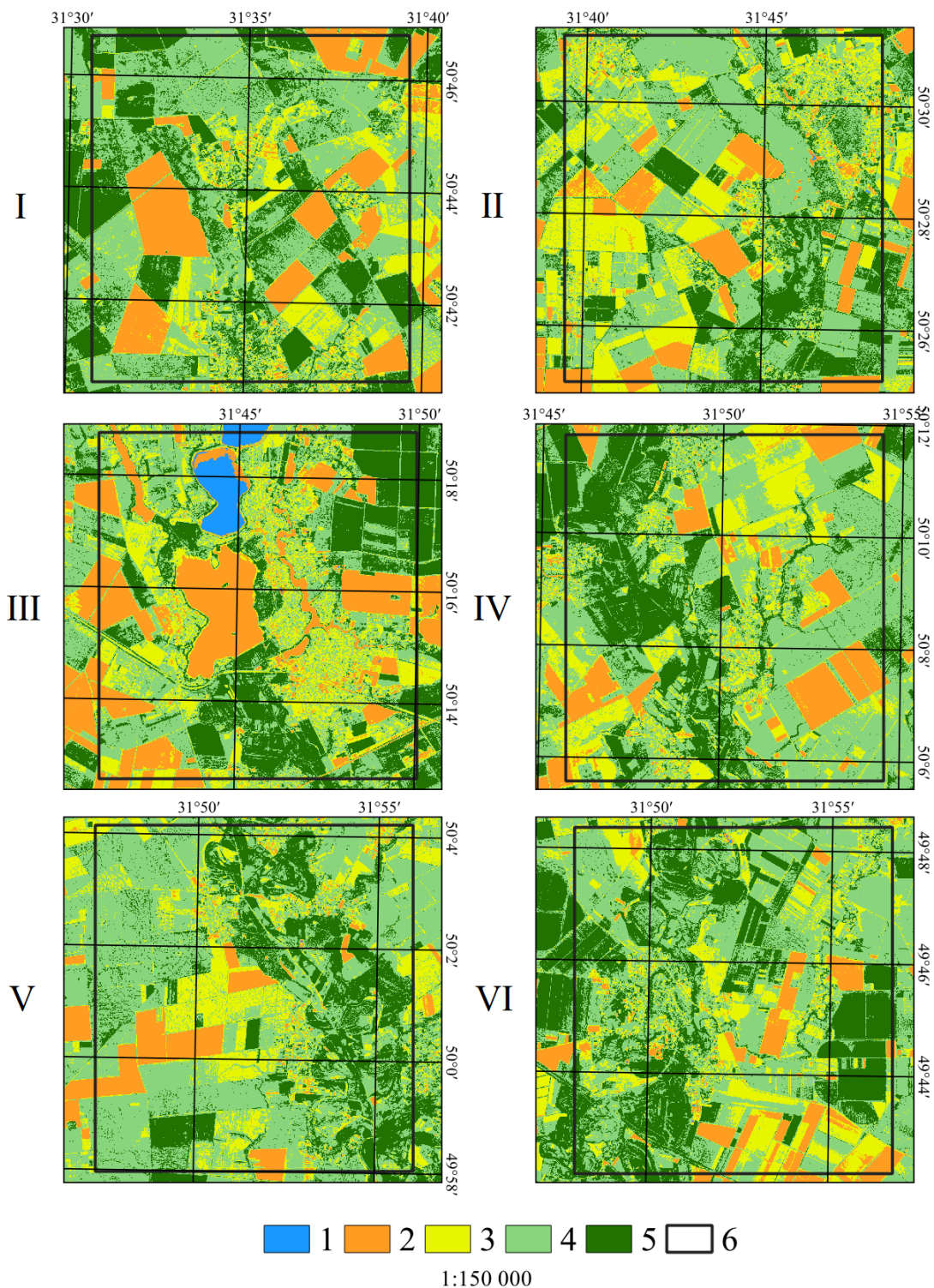


Рис. Б.6 Класифікація тестових ділянок за EVI

Умовні позначення: тестові ділянки – I) «Свидовець», II) «Усівський», III) «Озерна», IV) «Бутовщина», V) «Ташанський», VI) «Ковраєць»; Класи інтерпретації індексу – 1) вода, відсутність рослинності, 2) голий ґрунт, 3) розріджена рослинність, 4) помірна рослинність, 5) густа рослинність; 6) межі текстових ділянок

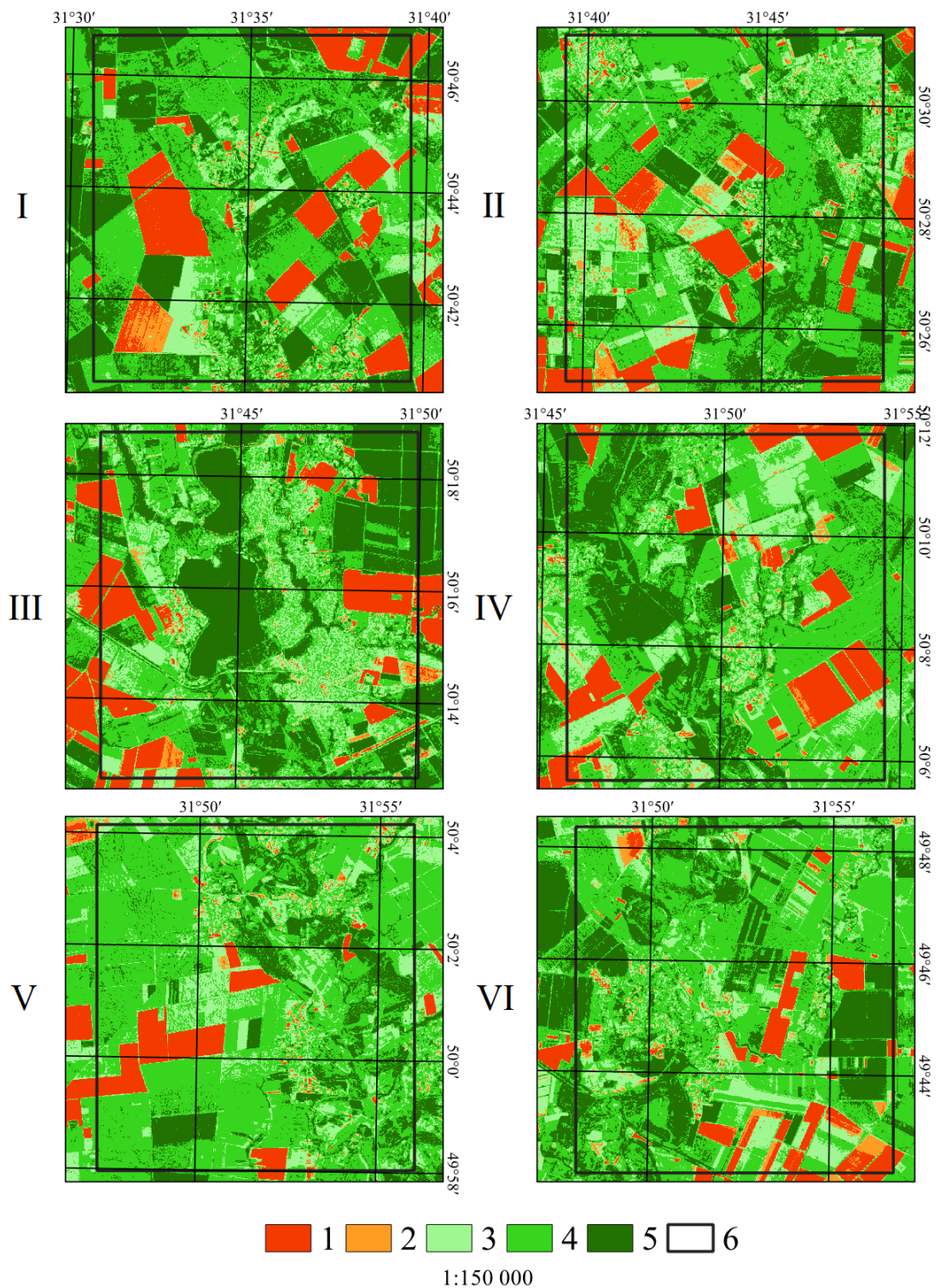


Рис. Б.7 Класифікація тестових ділянок за $AFVI_{1.6}$

Умовні позначення: тестові ділянки – I) «Свидовець», II) «Усівський», III) «Озерна», IV) «Бутовщина», V) «Ташанський», VI) «Ковраєць»; Класи інтерпретації індексу – 1) вода, відсутність рослинності, 2) голий ґрунт, 3) розріджена рослинність, 4) помірна рослинність, 5) густа рослинність; 6) межі текстових ділянок

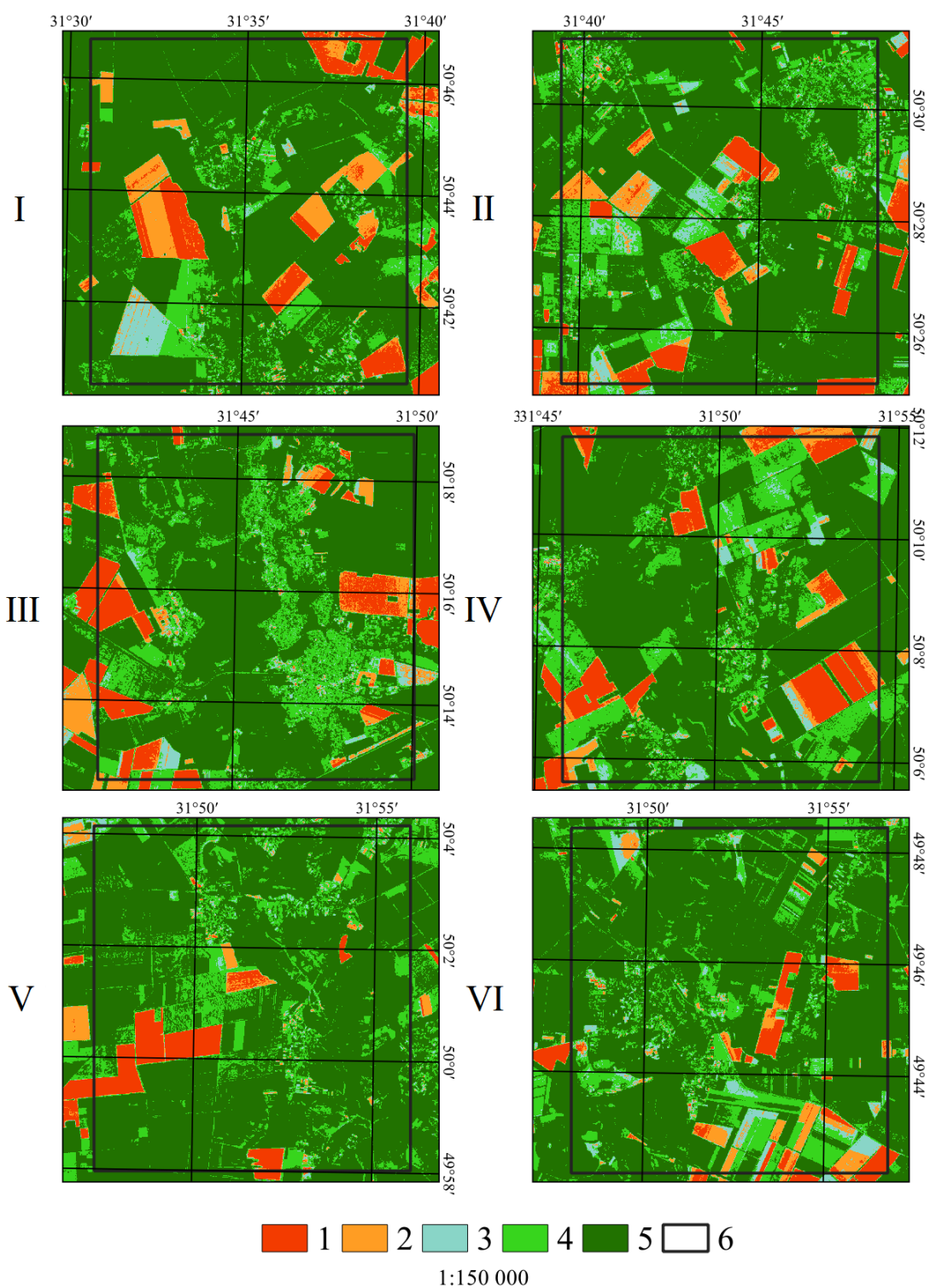


Рис. Б.8 Класифікація тестових ділянок за $AFVI_{2.1}$

Умовні позначення: тестові ділянки – I) «Свидовець», II) «Усівський», III) «Озерна», IV) «Бутовщина», V) «Ташанський», VI) «Ковраєць»; Класи інтерпретації індексу – 1) вода, відсутність рослинності, 2) голий ґрунт, 3) розріджена рослинність, 4) помірна рослинність, 5) густа рослинність; 6) межі текстових ділянок

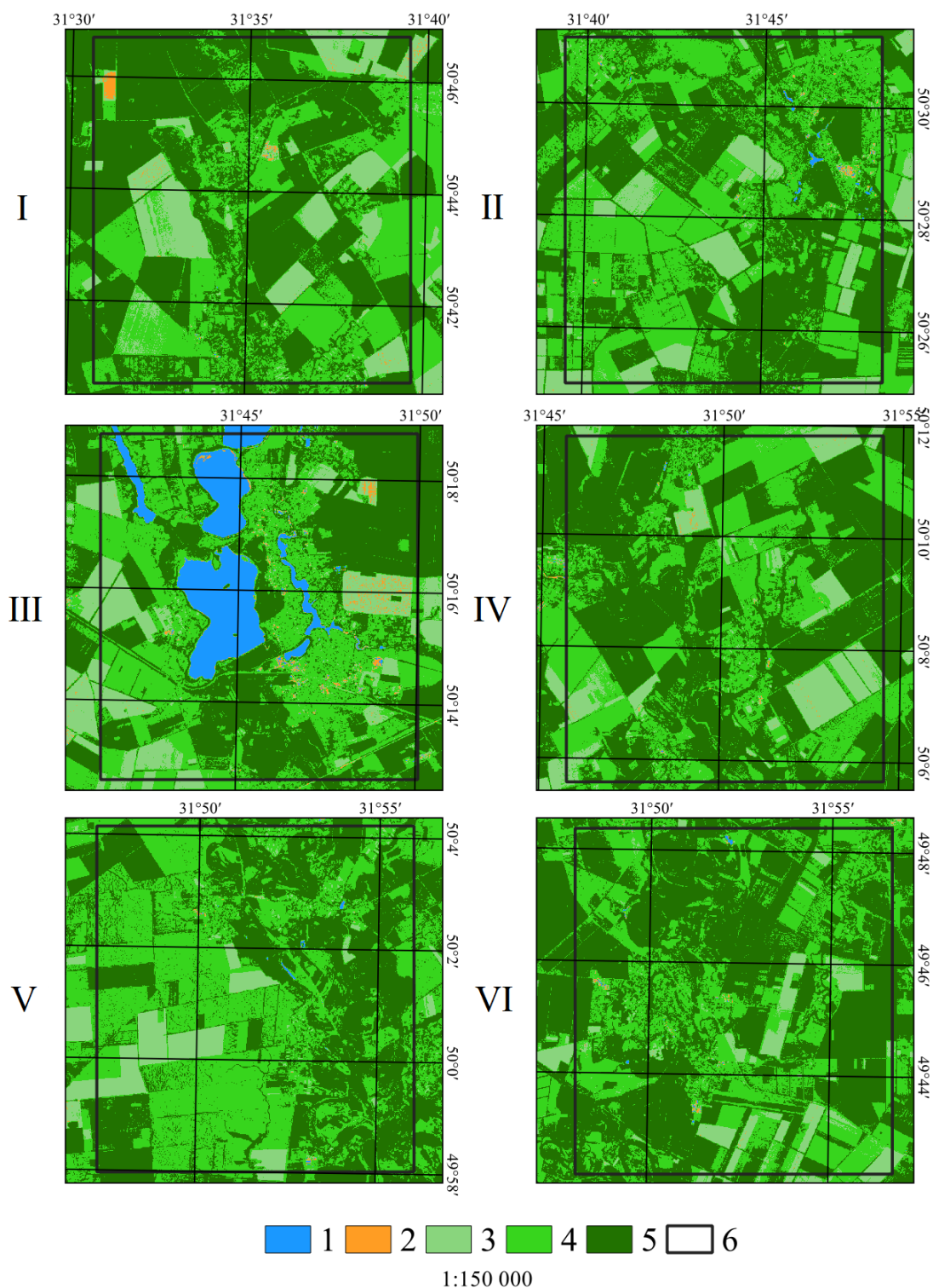


Рис. Б.9 Класифікація тестових ділянок за NDRE (B5)

Умовні позначення: тестові ділянки – I) «Свидовець», II) «Усівський», III) «Озерна», IV) «Бутовщина», V) «Ташанський», VI) «Ковраєць»; Класи інтерпретації індексу – 1) вода, відсутність рослинності, 2) голий ґрунт, 3) розріджена рослинність, 4) помірна рослинність, 5) густа рослинність; 6) межі тестових ділянок.

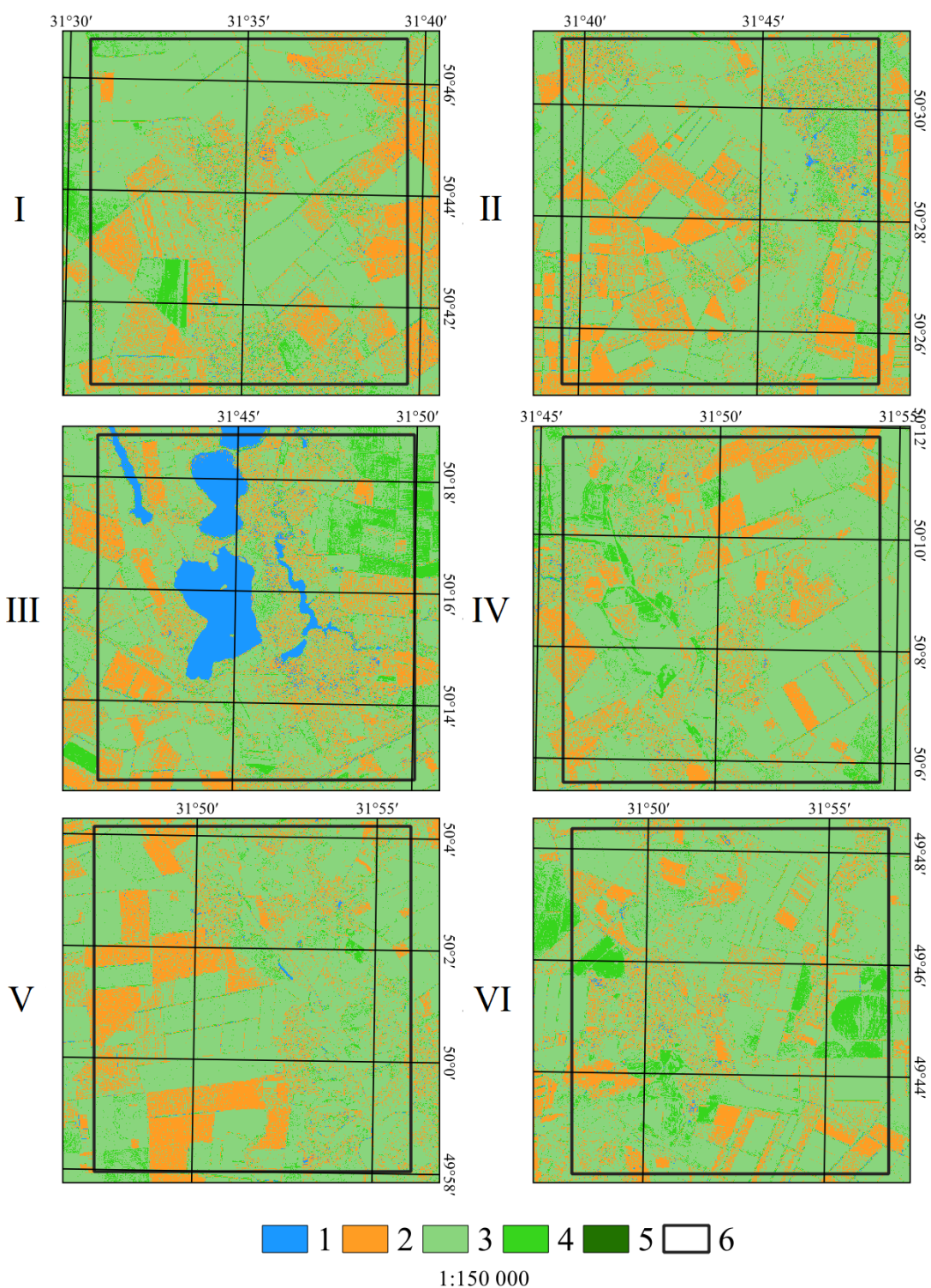


Рис. Б.10 Класифікація тестових ділянок за NDRE (B6)

Умовні позначення: тестові ділянки – I) «Свидовець», II) «Усівський», III) «Озерна», IV) «Бутовщина», V) «Ташанський», VI) «Ковраєць»; Класи інтерпретації індексу – 1) вода, відсутність рослинності, 2) голий ґрунт, 3) розріджена рослинність, 4) помірна рослинність, 5) густа рослинність; 6) межі тестових ділянок.

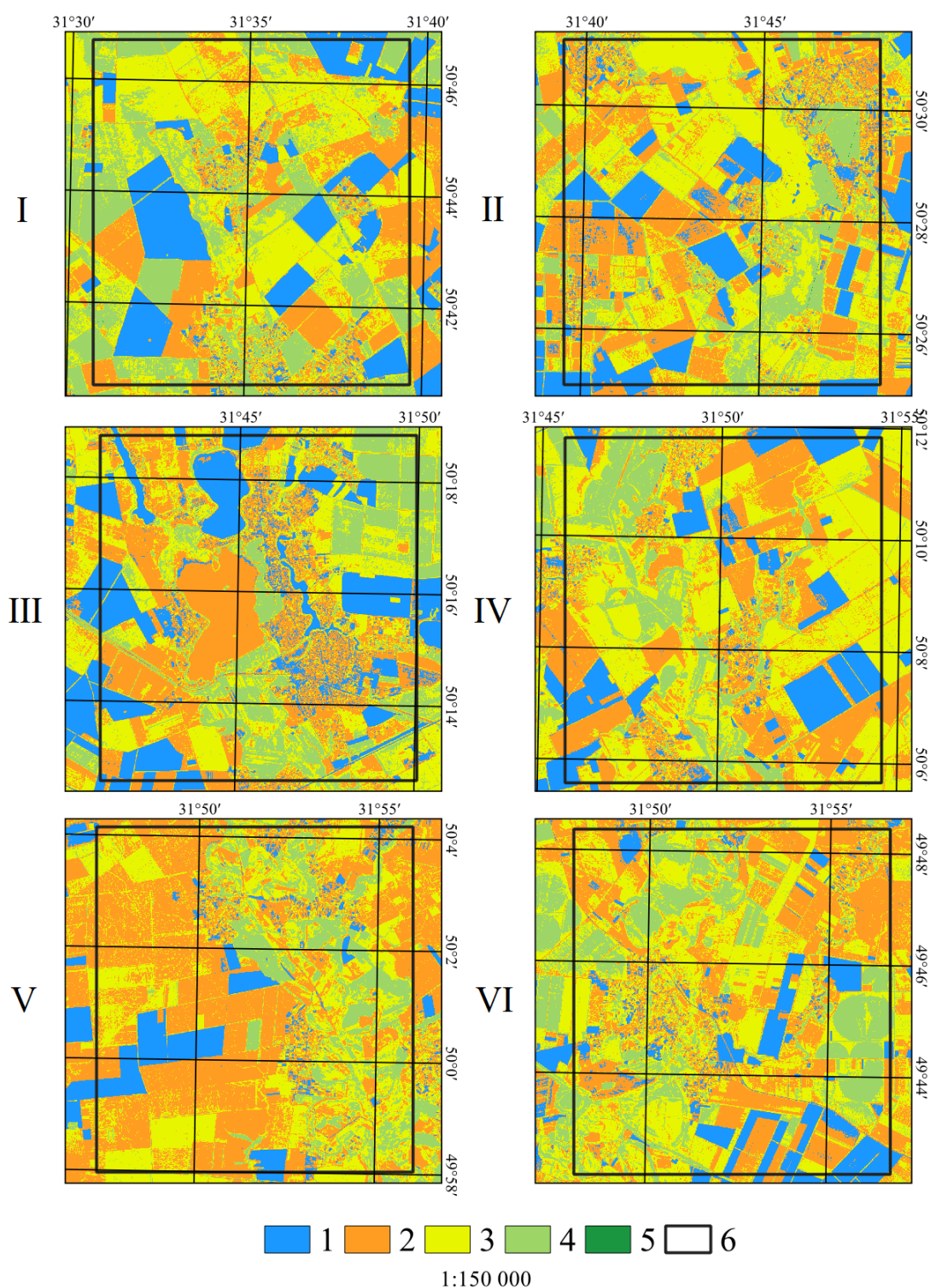


Рис. Б.11 Класифікація тестових ділянок за WDRVI

Умовні позначення: тестові ділянки – I) «Свидовець», II) «Усівський», III) «Озерна», IV) «Бутовщина», V) «Ташанський», VI) «Ковраєць»; Класи інтерпретації індексу – 1) вода, відсутність рослинності, 2) голий ґрунт, 3) розріджена рослинність, 4) помірна рослинність, 5) густа рослинність; 6) межі тестових ділянок.

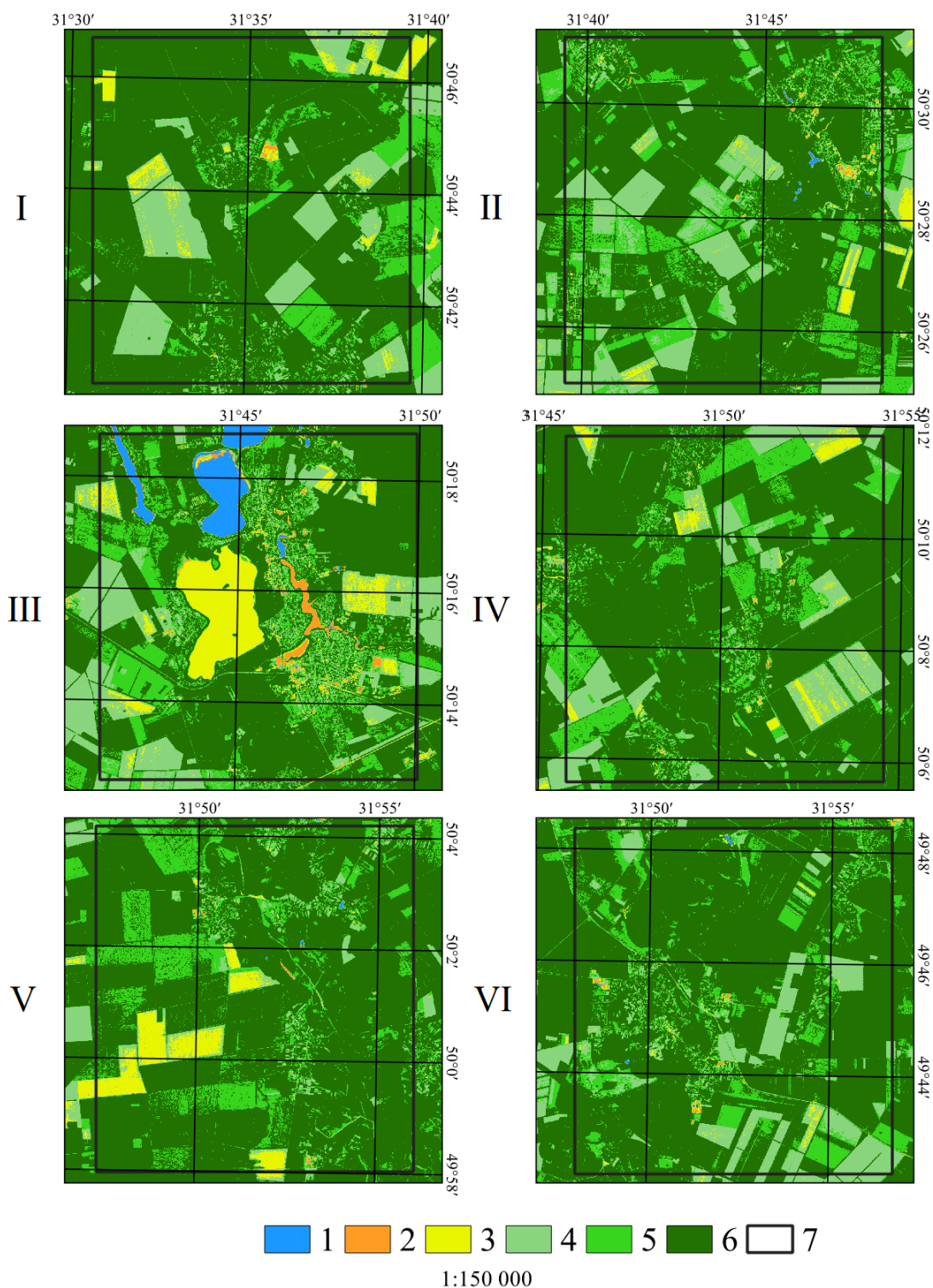


Рис. Б.12 Класифікація тестових ділянок за СІГ

Умовні позначення: тестові ділянки – I) «Свидовець», II) «Усівський», III) «Озерна», IV) «Бутовщина», V) «Ташанський», VI) «Ковраєць»; Класи інтерпретації індексу – 1) вода, відсутність рослинності, 2) голий ґрунт, 3) розріджена рослинність, 4) помірна рослинність, 5) напівгуста рослинність, 6) густа рослинність; 7) межі текстових ділянок.

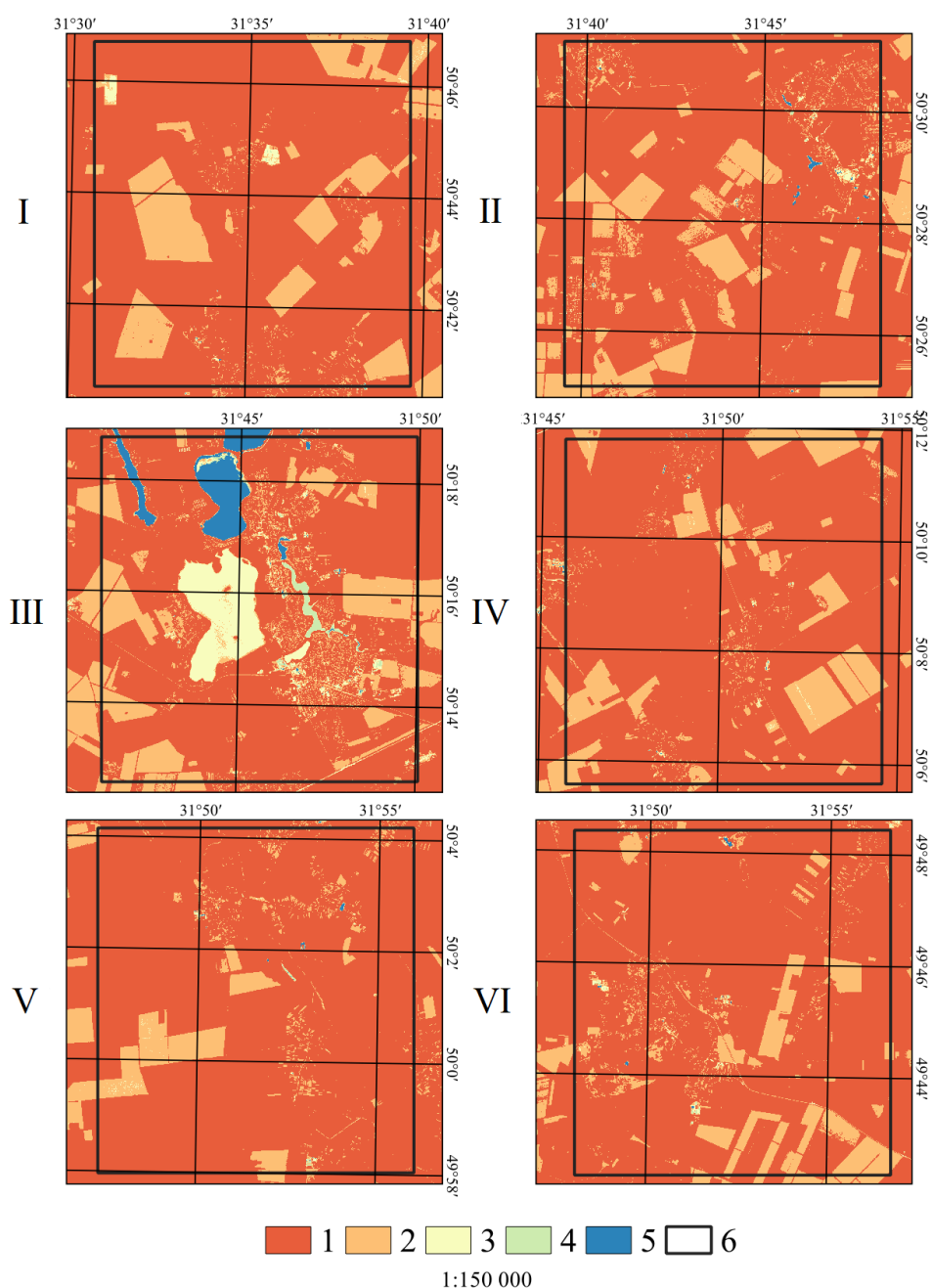


Рис. Б.13 Класифікація тестових ділянок за NDWI

Умовні позначення: тестові ділянки – I) «Свидовець», II) «Усівський», III) «Озерна», IV) «Бутовщина», V) «Ташанський», VI) «Ковраєць»; класи інтерпретації індексу – 1) штучні поверхні, 2) низька вологість, 3) помірна вологість, 4) підвищена вологість, заболочення, 5) відкрита вода; 6) межі текстових ділянок.

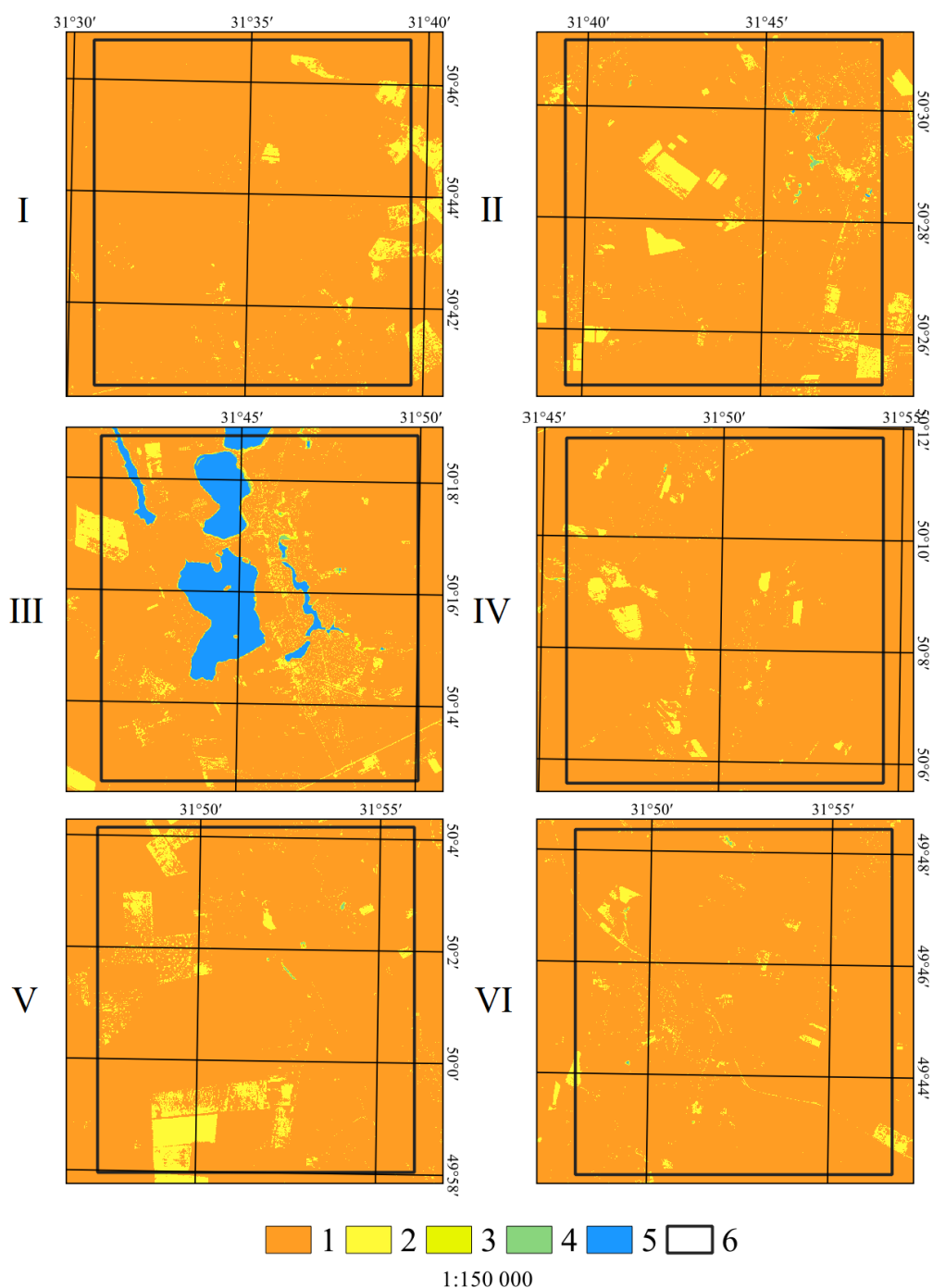


Рис. Б.14 Класифікація тестових ділянок за MNDWI

Умовні позначення: тестові ділянки – I) «Свидовець», II) «Усівський», III) «Озерна», IV) «Бутовщина», V) «Ташанський», VI) «Ковраєць»; класи інтерпретації індексу – 1) штучні поверхні, 2) низька вологість, 3) помірна вологість, 4) підвищена вологість, заболочення, 5) відкрита вода; 6) межі текстових ділянок.

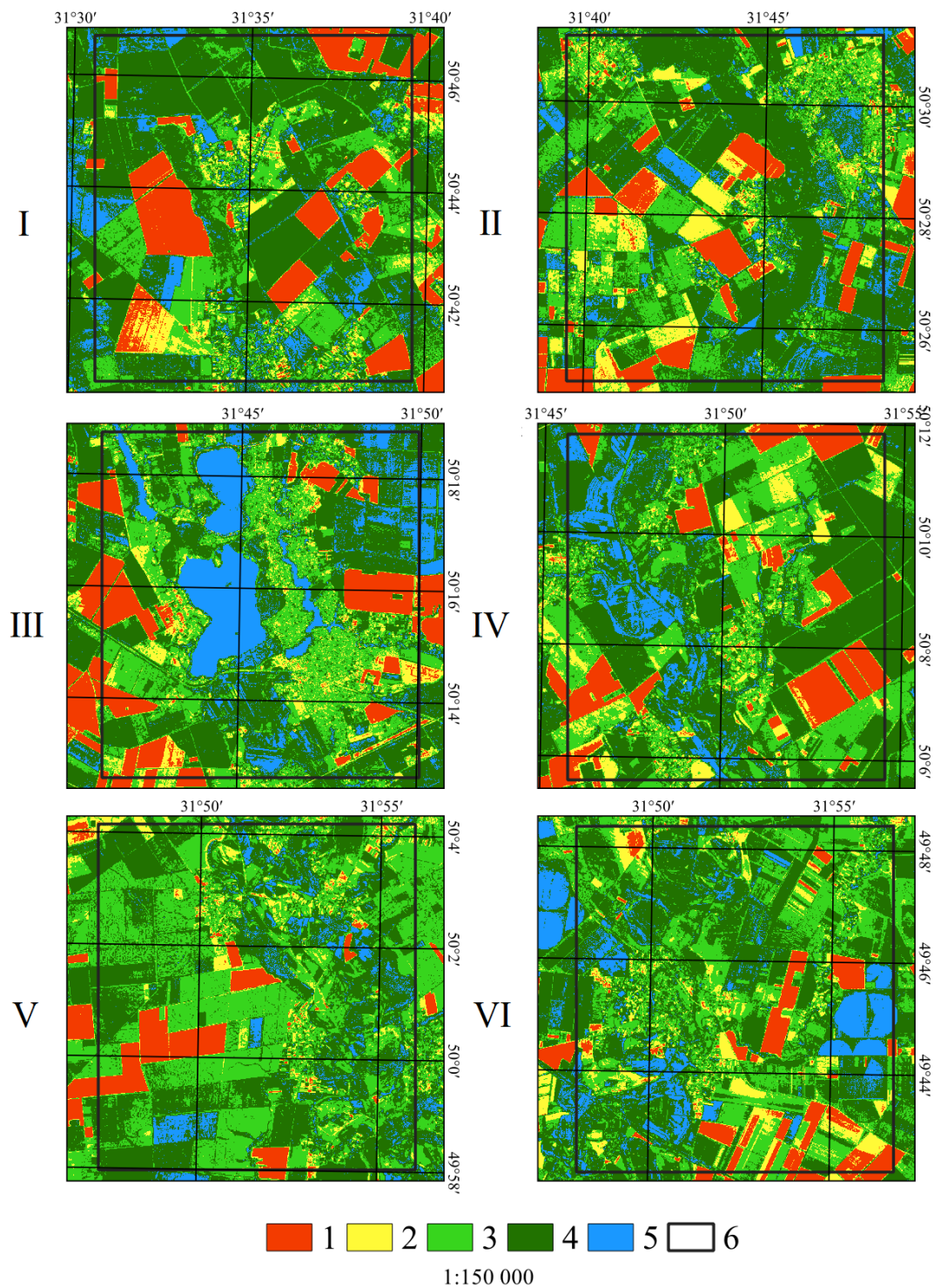


Рис. Б.15 Класифікація тестових ділянок за NDMI

Умовні позначення: тестові ділянки – I) «Свидовець», II) «Усівський», III) «Озерна», IV) «Бутовщина», V) «Ташанський», VI) «Ковраєць»; класи інтерпретації індексу – 1) штучні поверхні, 2) низька вологість, 3) помірна вологість, 4) підвищена вологість, заболочення, 5) відкрита вода; 6) межі тестових ділянок.

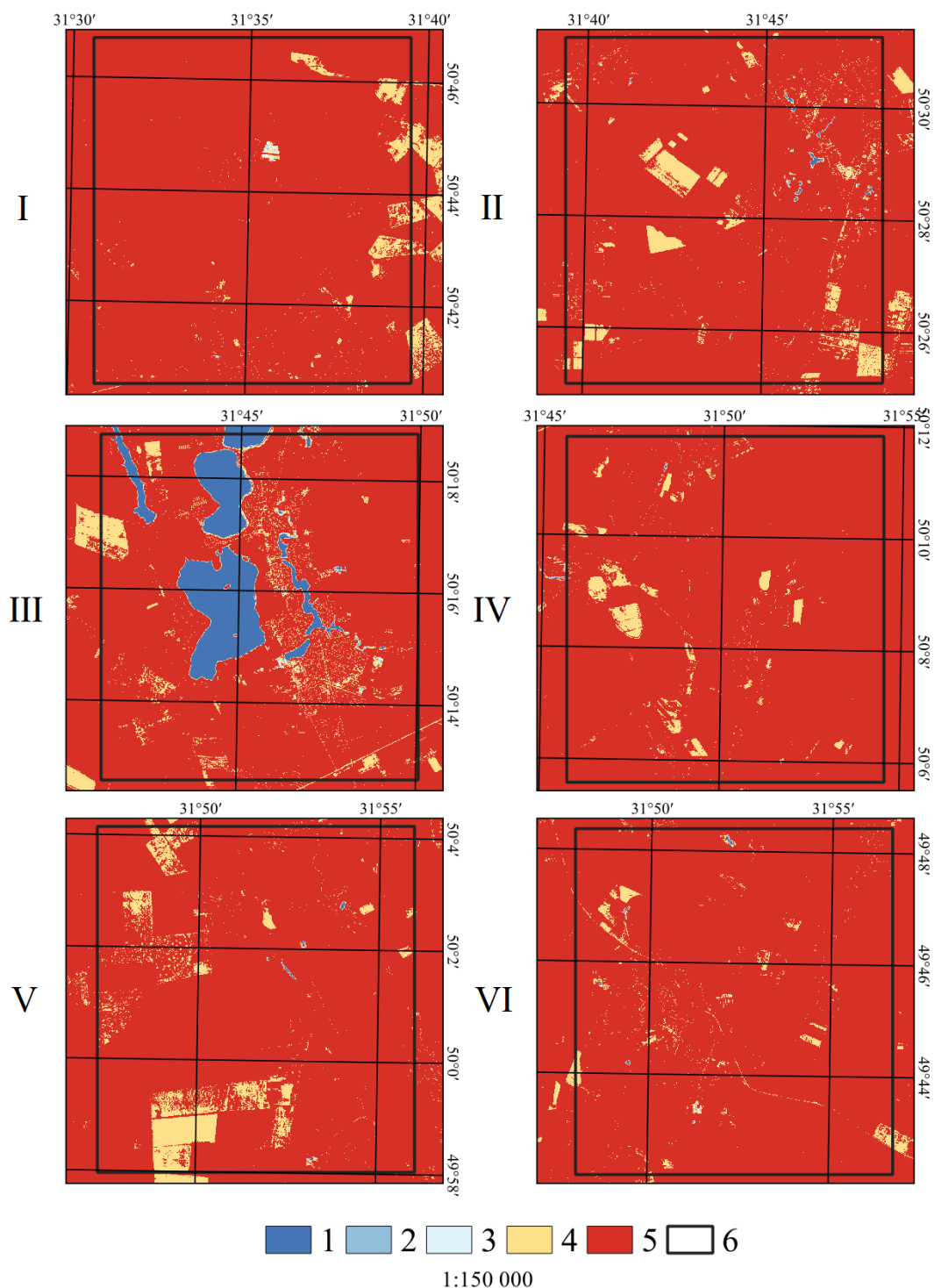


Рис. Б.16 Класифікація тестових ділянок за NDPI

Умовні позначення: тестові ділянки – I) «Свидовець», II) «Усівський», III) «Озерна», IV) «Бутовщина», V) «Ташанський», VI) «Ковраєць»; класи інтерпретації індексу – 1) відкрита вода, 2) підвищена вологість, заболочення, 3) помірна вологість, 4) низька вологість, 5) *посушливі* поверхні; 6) межі текстових ділянок.

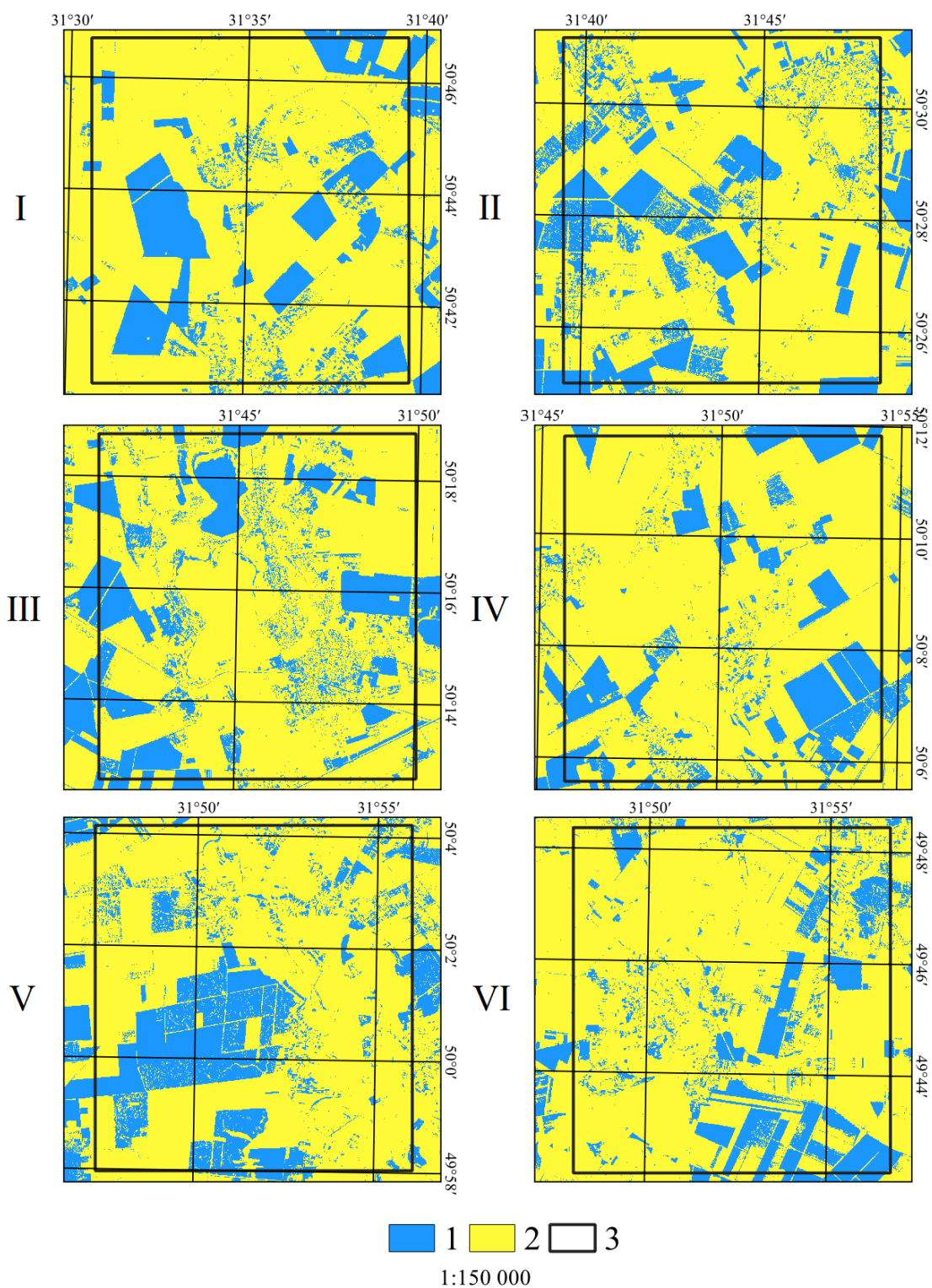


Рис. Б.17 Класифікація тестових ділянок за NDDI

Умовні позначення: тестові ділянки – I) «Свидовець», II) «Усівський», III) «Озерна», IV) «Бутовщина», V) «Ташанський», VI) «Ковраєць»; класи інтерпретації індексу – 1) вологі або стабільні екосистеми, 2) посушливі або зневоднені екосистеми, 3) межі текстових ділянок.

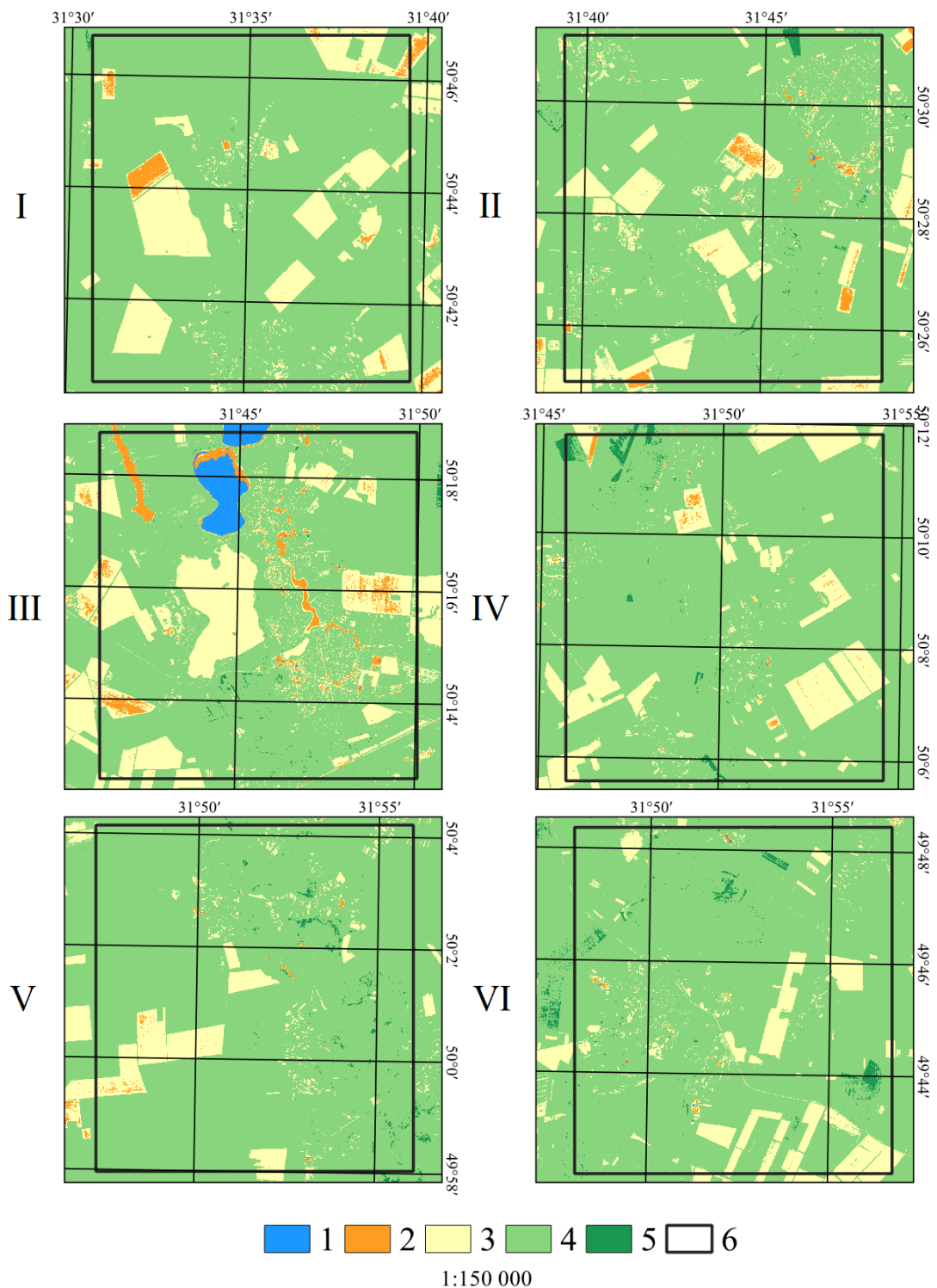


Рис. Б.18 Класифікація тестових ділянок за SAVI

Умовні позначення: тестові ділянки – I) «Свидовець», II) «Усівський», III) «Озерна», IV) «Бутовщина», V) «Ташанський», VI) «Ковраєць»; Класи інтерпретації індексу – 1) вода, відсутність рослинності, 2) голий ґрунт, 3) розріджена рослинність, 4) помірна рослинність, 5) густа рослинність; 6) межі тестових ділянок.

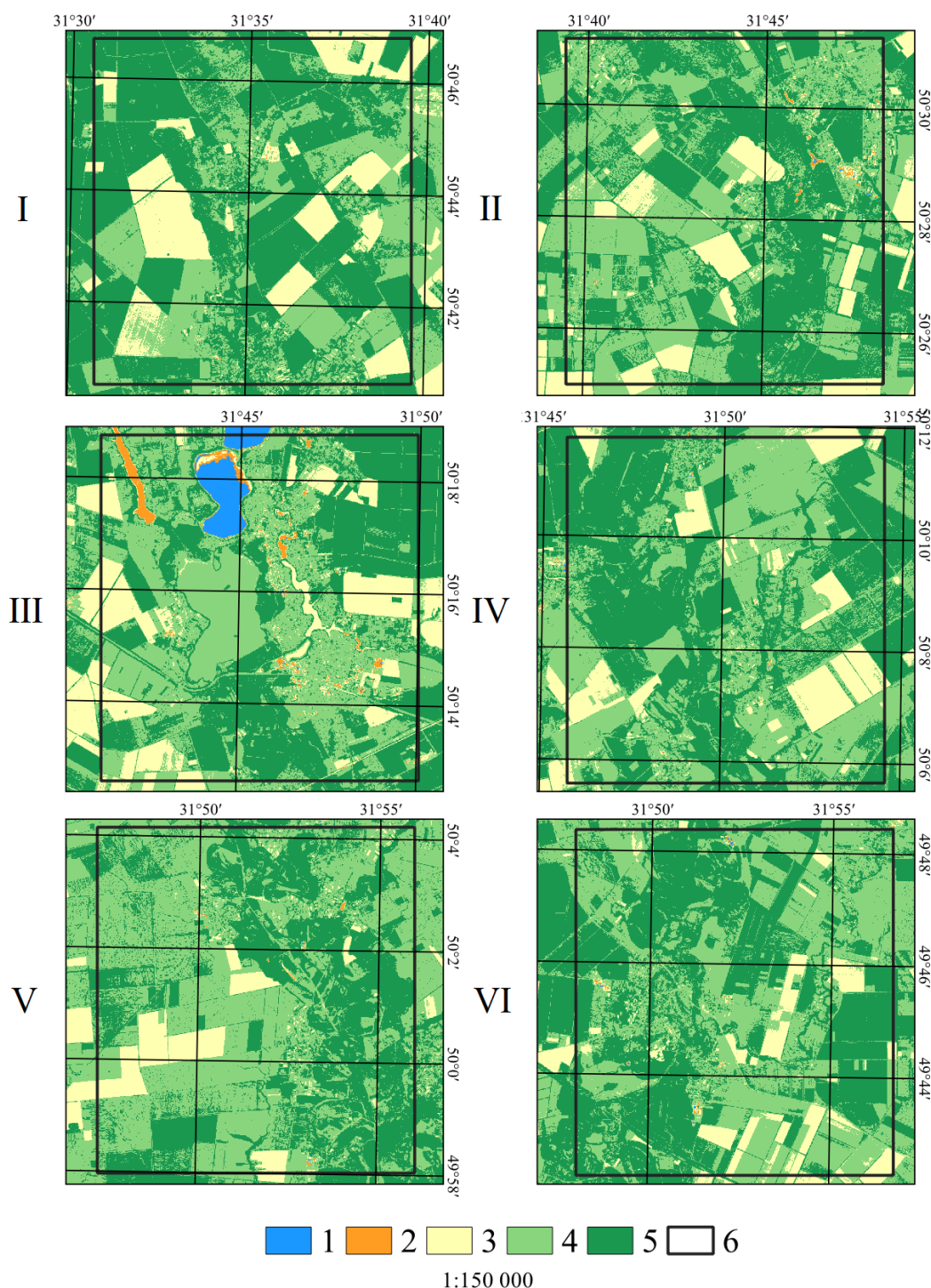


Рис. Б.19 Класифікація тестових ділянок за OSAVI

Умовні позначення: тестові ділянки – I) «Свидовець», II) «Усівський», III) «Озерна», IV) «Бутовщина», V) «Ташанський», VI) «Ковраєць»; Класи інтерпретації індексу – 1) вода, відсутність рослинності, 2) голий ґрунт, 3) розріджена рослинність, 4) помірна рослинність, 5) густа рослинність; 6) межі текстових ділянок.

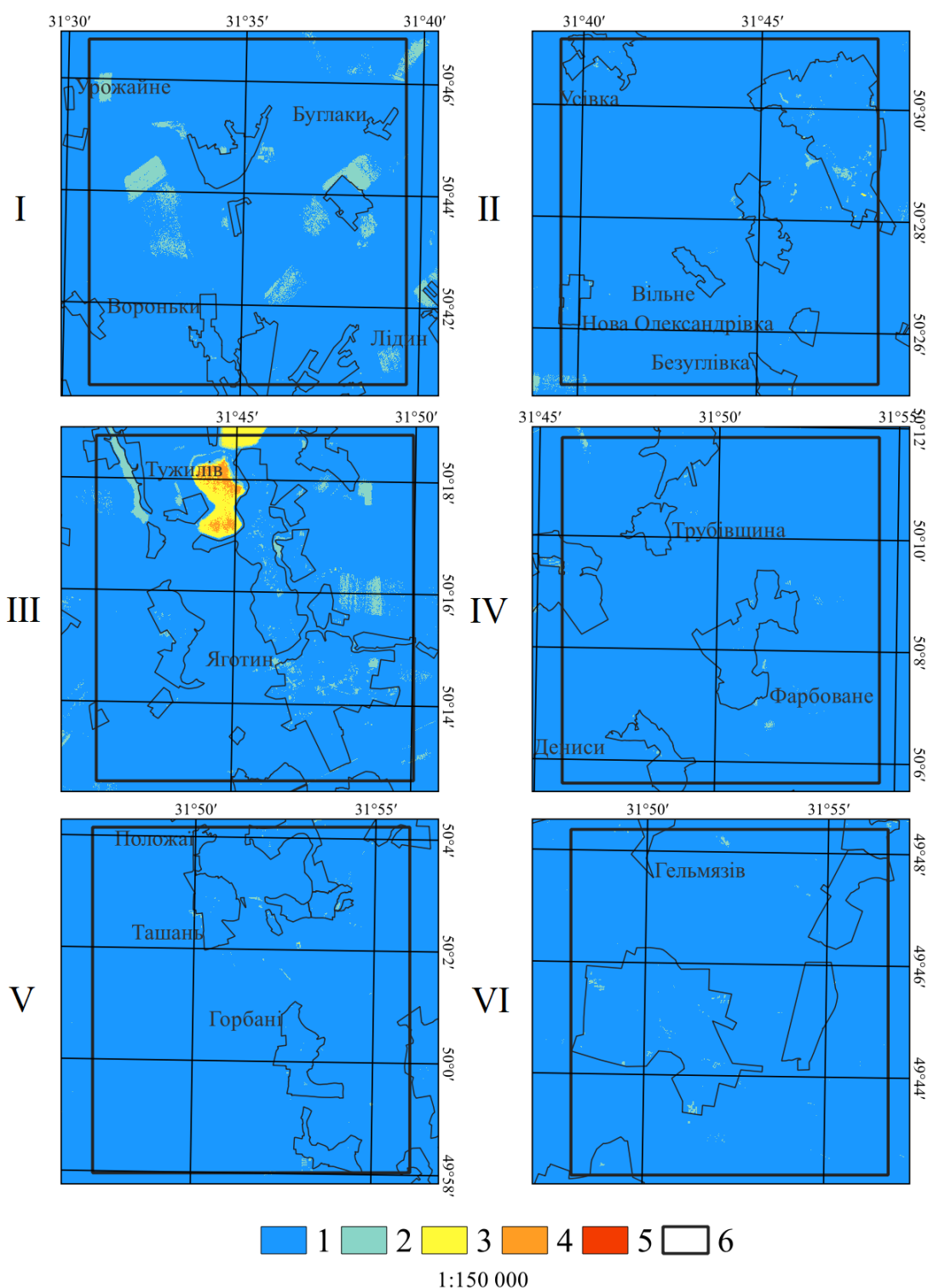


Рис. Б.20 Класифікація тестових ділянок за NDSI

Умовні позначення: тестові ділянки – I) «Свидовець», II) «Усівський», III) «Озерна», IV) «Бутовщина», V) «Ташанський», VI) «Ковраєць»; Класи інтерпретації індексу – 1) ймовірно без засолення, 2) низька ймовірність засолення, 3) можливе засолення, 4) висока ймовірність засолення, 5) дуже висока ймовірність засолення; 6) межі текстових ділянок.

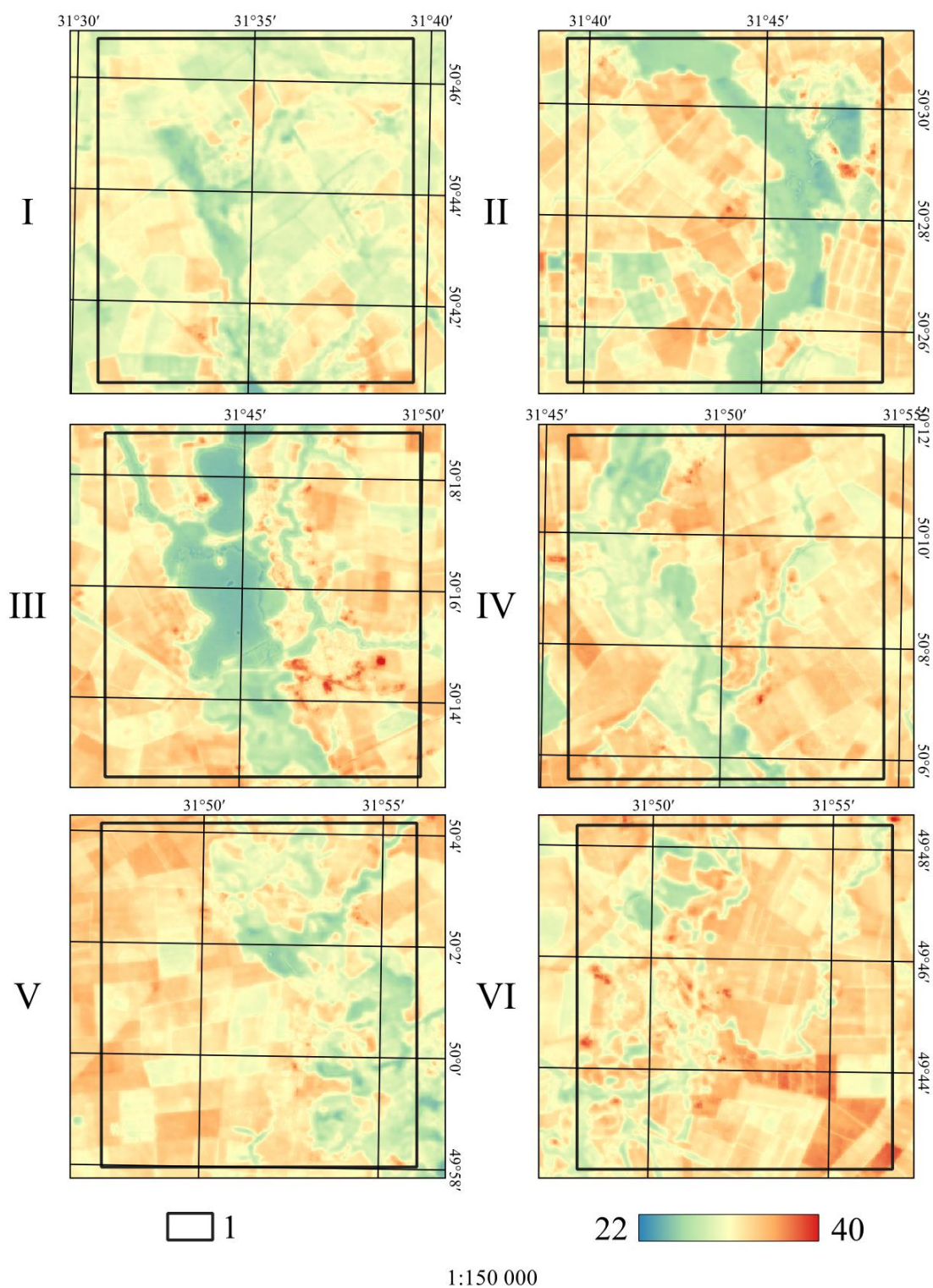


Рис. Б.21 Показники середньої температури за період з 1984 по 2024 рік (°C)

Умовні позначення: тестові ділянки – I) «Свидовець», II) «Усівський», III) «Озерна», IV) «Бутовщина», V) «Ташанський», VI) «Ковраєць»; Класи інтерпретації індексу – 1) межі текстових ділянок.

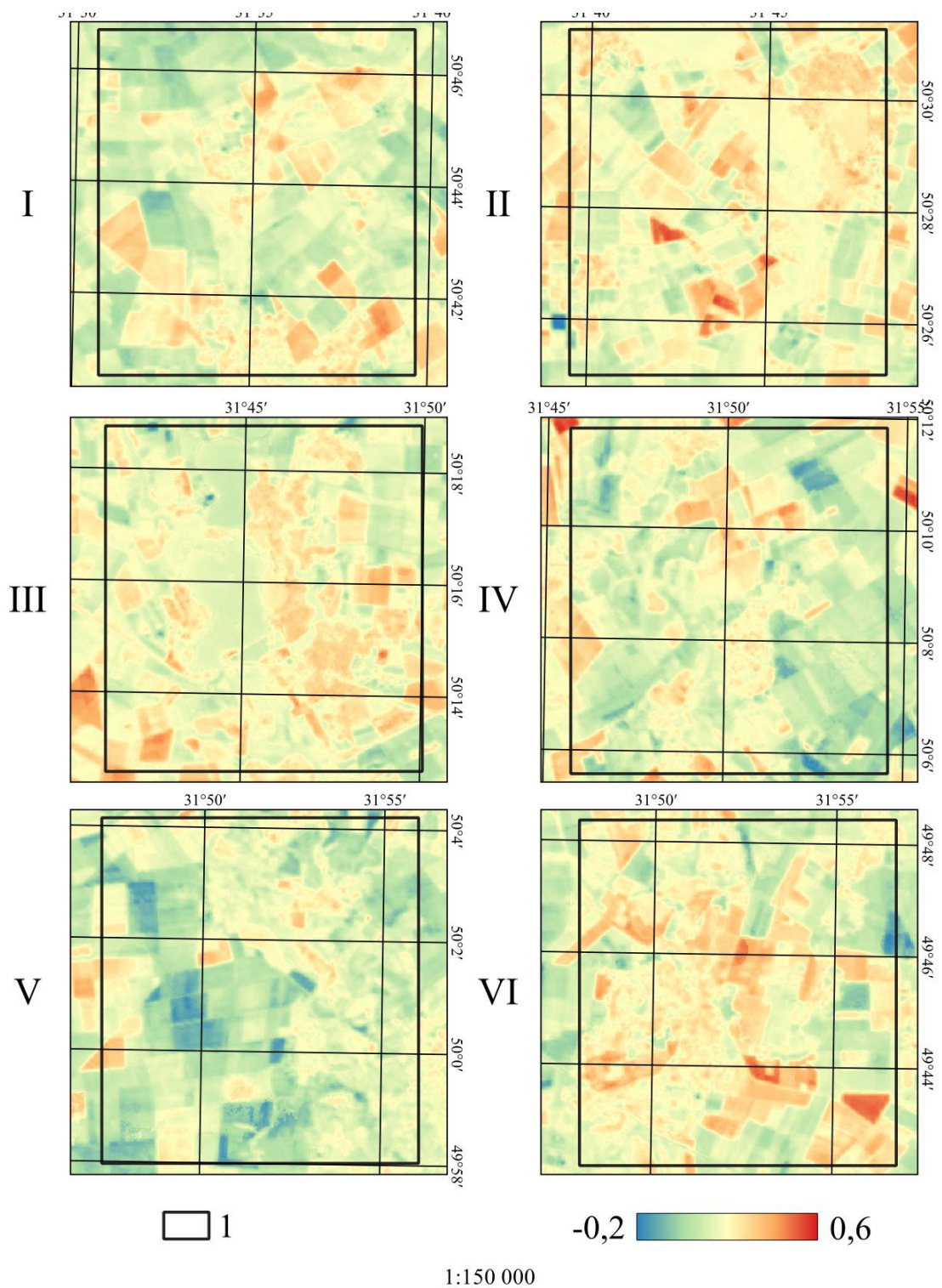


Рис. Б.22 Показники річного приросту температури за період з 1984 по 2024 рік (°C)

Умовні позначення: тестові ділянки – I) «Свидовець», II) «Усівський», III) «Озерна», IV) «Бутовщина», V) «Ташанський», VI) «Ковраєць»; Класи інтерпретації індексу – 1) межі текстових ділянок.

ДОДАТОК В

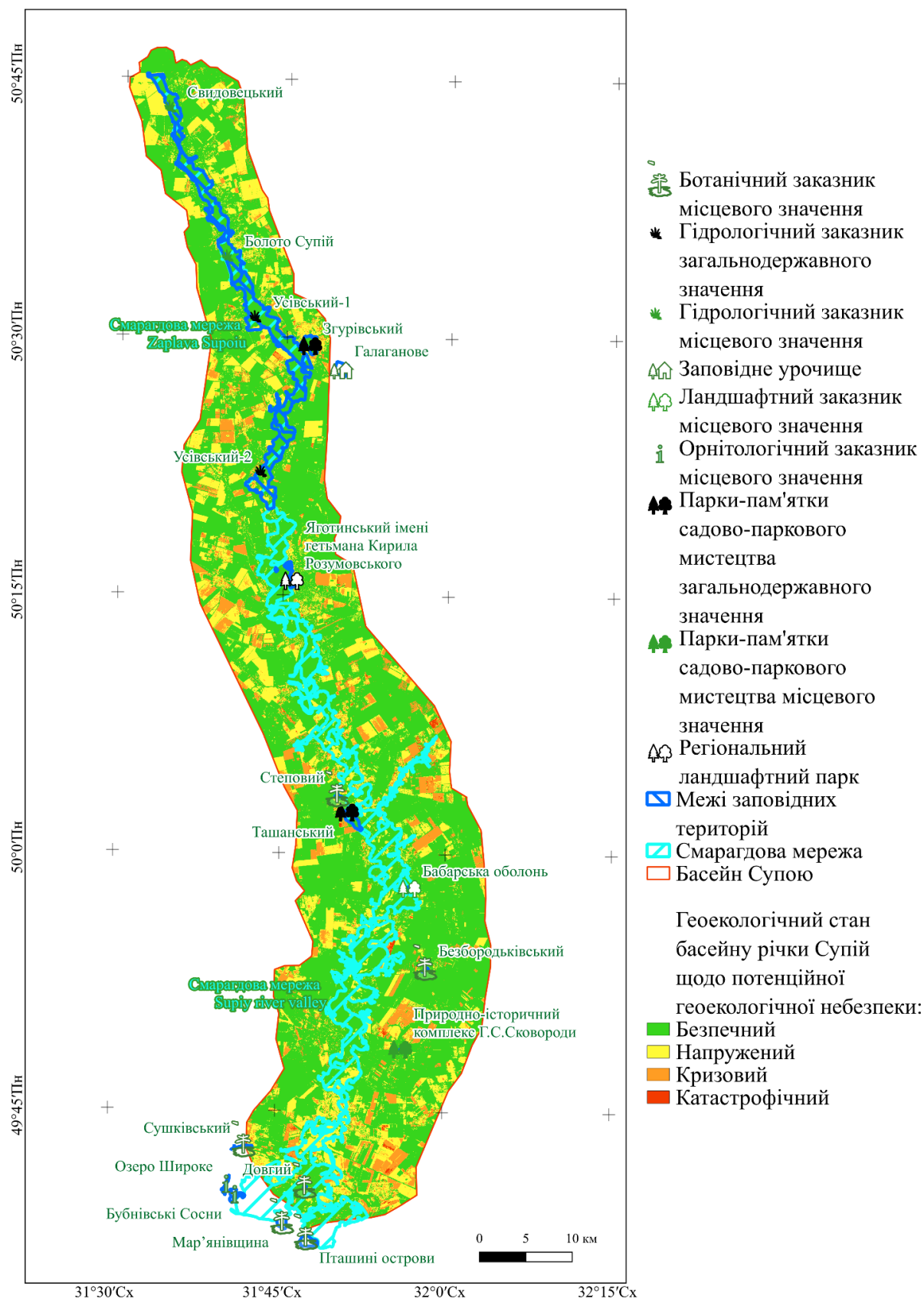


Рис. В.1. Карта геоєкологічного стану басейну р.Супій на територіях ПЗФ і Смарагдової мережі

ДОДАТОК Г

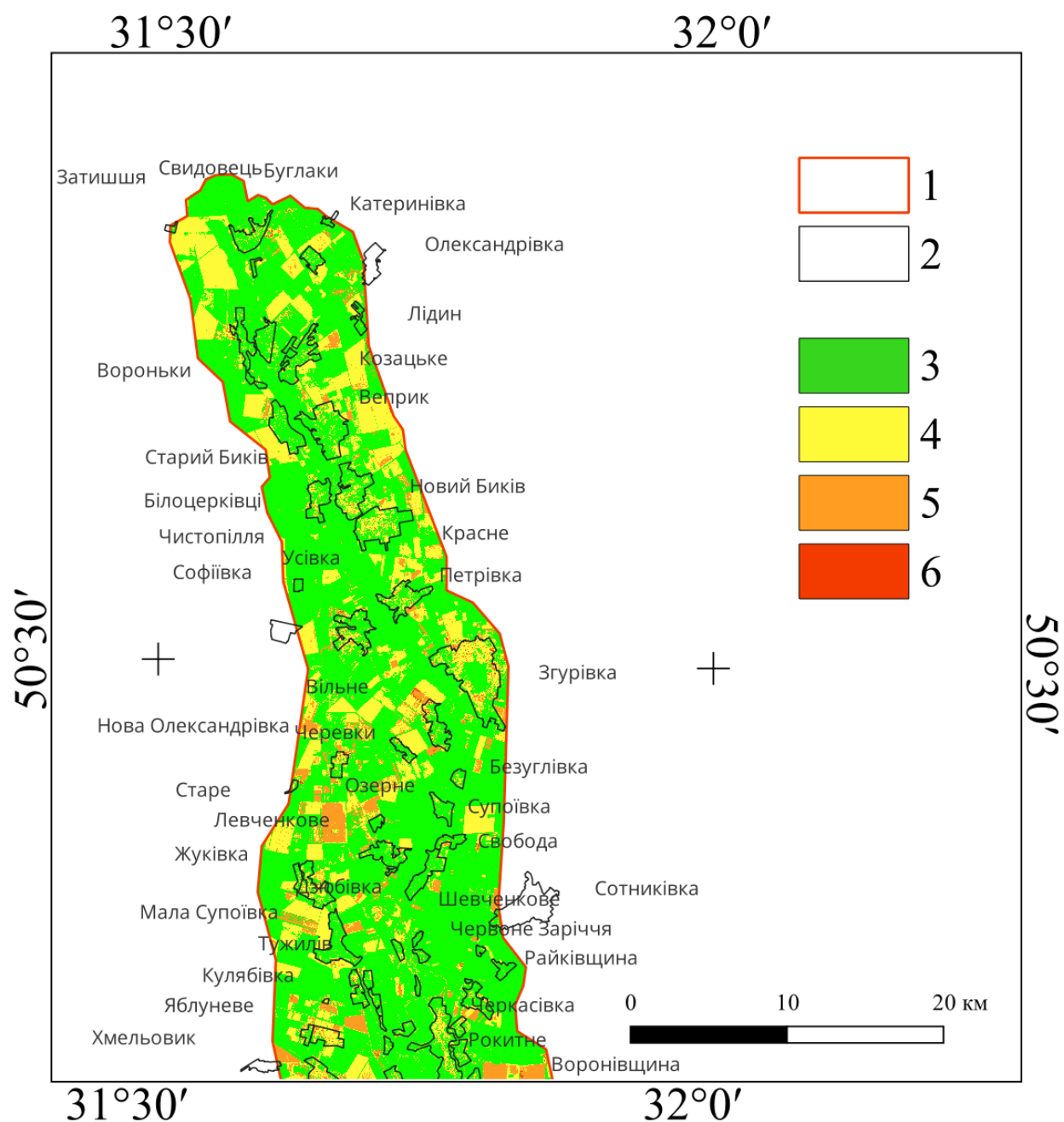


Рис. Г.1 Карта геоекологічного стану північної частини басейну р.Супій
визначеного за розробленою методикою

Умовні позначення: 1) межі басейну; 2) межі населених пунктів; геоекологічний стан – 3) безпечний , 4) напружений, 5) кризовий; 6) катастрофічний.

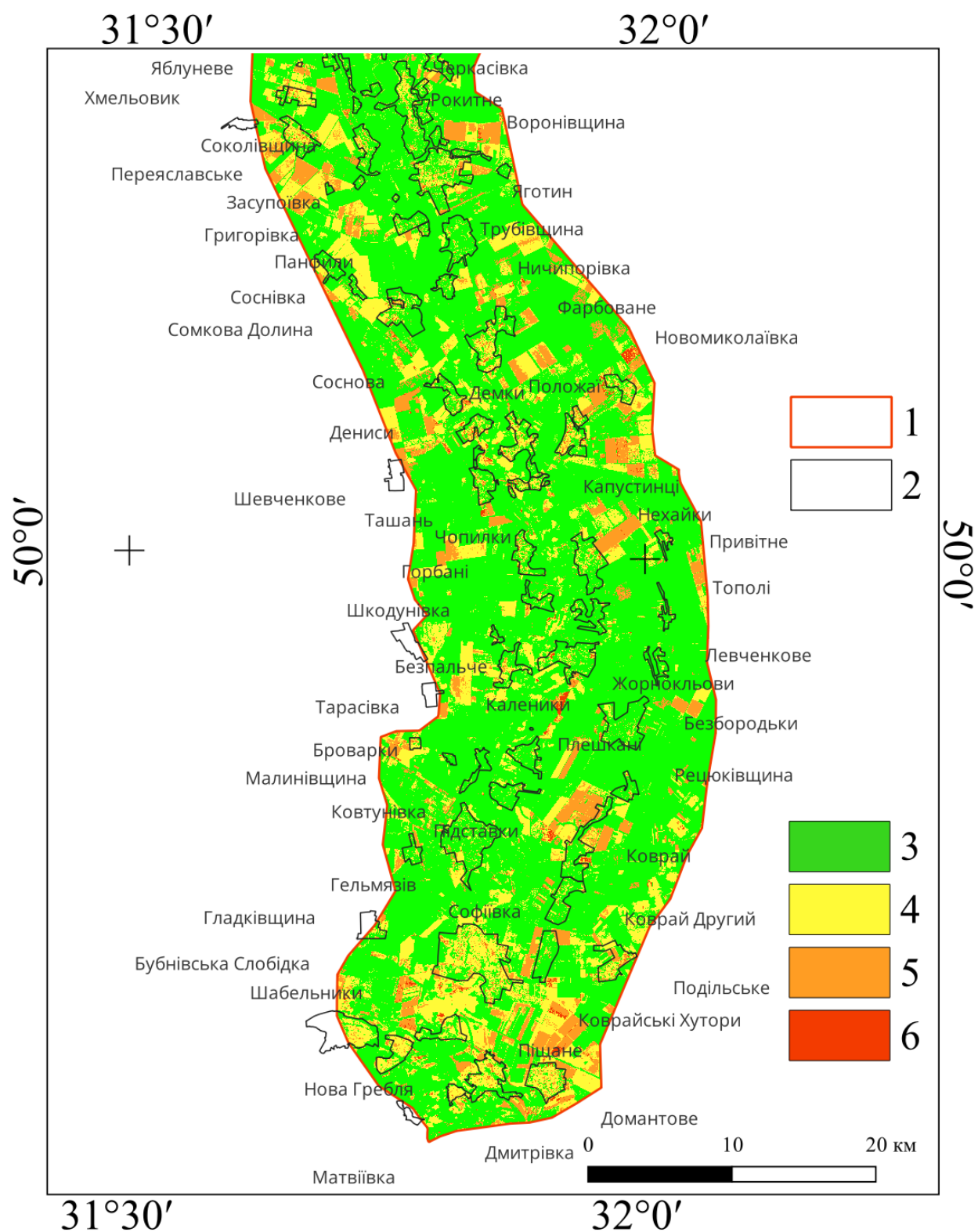


Рис. Г.2 Карта геоекологічного стану південної частини басейну р.Супії визначеного за розробленою методикою

Умовні позначення: 1) межі басейну; 2) межі населених пунктів; геоекологічний стан – 3) безпечний , 4) напружений, 5) кризовий; 6) катастрофічний.