МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет водного господарства та природокористування

Навчально-науковий інститут енергетики, автоматики та водного господарства

Кафедра геології та гідрології

Кваліфікаційна робота

на здобуття освітнього ступеня «бакалавр»

на тему:

«Конструктивно-географічний аналіз трансформації гідромережі басейну річки Прип'ять (в межах Рівненської області) в зонах видобутку мінеральних ресурсів за даними супутникового моніторингу»

Виконав:

студент IV курсу

спеціальності 106 «Географія

Брізицький Юрій Іванович

Науковий керівник:

к.геогр.н., доцент

Басюк Тетяна Олександрівна

Рівне – 2026

ЗМІСТ

ВСТУП 6
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ КОНСТРУКТИВНО-ГЕОГРАФІЧНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАНСФОРМАЦІЇ ГІДРОМЕРЕЖІ 9
1.1. Конструктивно-географічний підхід до вивчення впливу видобутку корисних копалин на водні об'єкти. 9
1.2. Використання даних відкритого супутникового моніторингу та хмарних платформ ДЗЗ у гідрологічних дослідженнях 14
1.3. Нормативно-правова база управління водними та мінеральними ресурсами в контексті надрокористування 18
Висновки до розділу 1..... 22
РОЗДІЛ 2. ФІЗИКО-ГЕОГРАФІЧНА ТА ГОСПОДАРСЬКА ХАРАКТЕРИСТИКА БАСЕЙНУ РІЧКИ ПРИП'ЯТЬ (В МЕЖАХ РІВНЕНСЬКОЇ ОБЛАСТІ) 24
2.1. Природно-географічні умови та ретроспективний стан гідромережі досліджуваного регіону..... 24
2.2. Просторова організація та структура видобутку мінеральних ресурсів у Рівненській області 29
2.3. Сучасне антропогенне навантаження на геосистеми басейну річки Прип'ять. 32
Висновки до розділу 2 .....
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ТРАНСФОРМАЦІЇ ГІДРОМЕРЕЖІ В ЗОНАХ ВИДОБУТКУ МІНЕРАЛЬНИХ РЕСУРСІВ ЗА ДАНИМИ СУПУТНИКОВОГО МОНІТОРИНГУ 38
3.1. Методика використання хмарних сервісів дистанційного зондування (на прикладі Copernicus Browser) для оцінки змін гідрологічних об'єктів 38
3.2. Просторово-часова динаміка трансформації русел, заплав та заболочених територій у районах відкритого видобутку. 44

3.3. Типологія та масштаби порушень гідромережі внаслідок легального та нелегального надрокористування. ……. 51
Висновки до розділу 3……. 55
РОЗДІЛ 4. КОНСТРУКТИВНО-ГЕОГРАФІЧНІ ЗАХОДИ З ОПТИМІЗАЦІЇ ТА УПРАВЛІННЯ ВОДНИМИ РЕСУРСАМИ РЕГІОНУ ……. 57
4.1. Оцінка екологічних наслідків трансформації гідромережі для басейнових геосистем. ……... 57
4.2. Напрями рекультивації та відновлення порушених водних об'єктів і прилеглих ландшафтів. …….. 59
4.3. Оптимізація системи моніторингу та управління водними ресурсами регіону …….. 63
Висновки до розділу 4…… 66
ВИСНОВКИ ……... 68
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……... 71

АНОТАЦІЯ

до кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» на тему: «Конструктивно-географічний аналіз трансформації гідромережі басейну річки Прип'ять (в межах Рівненської області) в зонах видобутку мінеральних ресурсів за даними супутникового моніторингу»

Метою даної роботи був комплексний конструктивно-географічний аналіз, ідентифікація просторово-часової динаміки та системне оцінювання масштабів і типів антропогенних порушень поверхневих і підземних водних об’єктів Рівненської області під впливом інтенсивного надрокористування з використанням сучасних технологій дистанційного зондування Землі.

Роботи включали наступні етапи: підготовчий та теоретико-методологічний; збір, систематизація та верифікація фондових і картографічних даних; лабораторно-аналітичний (хмарний ГІС-аналіз та обробка супутникових знімків); конструктивно-географічний (розробка рекомендацій та заходів з оптимізації).

Для виконання поставленої мети необхідно було виконати наступні завдання:

- узагальнити теоретико-методологічні засади дослідження антропогенної трансформації гідромережі в контексті інтегрованого басейного управління;
- охарактеризувати природно-географічні та геолого-субстратні умови формування водних ресурсів Рівненської області;
- обґрунтувати методику використання хмарного сервісу Copernicus Browser та можливості супутників Sentinel-2 для детектування змін водних об’єктів;
- дослідити просторово-часову динаміку трансформації русел, заплав і боліт на ключових тестових полігонах регіону за період 2016–2026 років;
- розробити науково обґрунтовану типологію порушень гідромережі внаслідок легального та нелегального надрокористування;

- оцінити каскадні екологічні наслідки деградації акваторій та запропонувати конструктивно-географічні заходи з оптимізації системи моніторингу й екологічного менеджменту.

У кваліфікаційній роботі проаналізовано сучасні підходи до моніторингу річкових басейнів із використанням Big Data та Big Query інструментів космічного моніторингу. На основі мультиспектральних даних супутника Sentinel-2 (MSI) з просторовою розрізненістю 10 метров здійснено глибокий ретроспективний аналіз антропогенного пресингу на гідромережу суббасейну річки Прип'ять у межах трьох тестових полігонів. На прикладі Клесівського вузла досліджено специфіку деструктивного впливу нелегального гідромеханічного видобутку бурштину, що призвів до руйнування русла р. Веселуха та формування унікального явища вторинного техногенного заболочення. За допомогою Нормалізованого диференційного водного індексу (NDWI) та інструменту Time Series Analysis математично доведено прогресуюче зростання площ обводнених старательських копаней за десятирічний період. Досліджено гідродинамічний вплив глибоких базальтових кар'єрів Івано-Долинського родовища на перехоплення стоку річки Горинь та лінійно-площинне виснаження водно-акумулюючої здатності промислових торфовищ «Чемерне».

Обґрунтовано каскадні екологічні наслідки деформації гідромережі для басейнових геосистем (утворення депресійних лійок, критичне замулення, втрата біорізноманіття). Розроблено комплекс конструктивно-географічних заходів, що передбачає розгортання двокомпонентної системи екологічного контролю (поєднання супутникового скринінгу Copernicus Browser кожні 5–10 діб та наземних IoT-датчиків онлайн-моніторингу), створення відкритого геопорталу «Водні ресурси Рівненщини», впровадження механізму «гідрологічного страхування» для ліцензіатів та формування басейнових рад малих річок для переходу до стратегії екологічної ренатуралізації ландшафтів Полісся.

Ключові слова: гідромережа, басейн Прип'яті, Рівненська область,

надрокористування, супутниковий моніторинг, індекс NDWI, видобуток бурштину, базальтові кар'єри, торфовища, ренатуралізація ландшафтів.

ВСТУП

Актуальність теми. Протягом багатьох десятиліть природокористування у межах Українського Полісся відбувалося переважно за екстенсивною моделлю, орієнтованою на інтенсивне залучення мінерально-сировинних та земельних ресурсів. Це призвело до значного виснаження річкових систем, деградації унікальних водно-болотних угідь та загального погіршення стану гідрологічної мережі басейну річки Прип'ять [1]. Довгий час в управлінні водним фондом не враховувалися природні межі водозборів та ландшафтна специфіка регіону, а система моніторингу спиралася лише на локальні санітарно-хімічні показники, які не відображали реальних масштабів просторової трансформації гідромережі під впливом як промислового, так і нелегального надрокористування [2].

Сьогодні ситуація в Рівненській області додатково ускладнюється кумулятивним ефектом від багаторічного видобутку корисних копалин (відкритої розробки торфовищ, кар'єрів будівельних матеріалів та масштабного гідропомпового видобутку бурштину), а також антропогенним навантаженням внаслідок військової агресії, що спричиняє фізичні деформації русел і порушення гідравлічного зв'язку між річками та їхніми заплавами [3]. Водночас євроінтеграційний курс України зумовив докорінне реформування водоохоронної галузі відповідно до Водної рамкової директиви ЄС (2000/60/ЄС). Практичним механізмом її реалізації стало затвердження Планів управління річковими басейнами (ПУРБ) на 2025–2030 роки, зокрема для суббасейну Прип'яті [4].

Впровадження ПУРБ та відкриття масивів просторових даних актуалізували потребу в науковій систематизації та конструктивно-географічному аналізі цих матеріалів [5]. З огляду на значну площу лісоболотних комплексів Полісся та важкодоступність багатьох порушених ділянок, традиційні наземні методи досліджень виявилися недостатніми. Виникає гостра необхідність інтеграції офіційних матеріалів водного менеджменту із сучасними технологіями дистанційного зондування

Землі (ДЗЗ) та ГІС-аналізу [6]. Потреба у комплексному оцінюванні просторово-часової динаміки трансформації водних об'єктів для обґрунтування заходів із їхнього екологічного відновлення визначає безперечну актуальність обраної теми кваліфікаційної роботи.

Мета дослідження полягає у конструктивно-географічному аналізі просторово-часової трансформації гідромережі басейну річки Прип'ять (в межах Рівненської області) у зонах інтенсивного видобутку мінеральних ресурсів на основі інтеграції даних супутникового моніторингу для обґрунтування рекомендацій щодо її екологічної оптимізації.

Відповідно до мети, у роботі поставлено та вирішено такі **завдання**:

1. Узагальнити теоретико-методологічні та нормативно-правові засади конструктивно-географічних досліджень впливу надрокористування на гідрологічні об'єкти.
2. Схарактеризувати природно-географічні умови та просторову структуру видобутку мінеральних ресурсів у басейні Прип'яті в межах Рівненської області.
3. Дослідити сучасне антропогенне навантаження на геосистеми регіону за матеріалами Планів управління річковими басейнами.
4. Обґрунтувати методику використання відкритих даних супутникового моніторингу для ідентифікації просторово-часових змін гідромережі.
5. Проаналізувати динаміку трансформації русел, заплав та заболочених територій у зонах відкритого видобутку за даними ДЗЗ.
6. Запропонувати конструктивно-географічні заходи з рекультивації порушених водних об'єктів та оптимізації системи управління водними ресурсами регіону.

Об’єкт дослідження – процес просторово-часової трансформації гідромережі басейну річки Прип'ять (в межах Рівненської області) під впливом гірничодобувної діяльності.

Предмет дослідження – закономірності антропогенних змін русел, заплав

та заболочених ділянок у зонах видобутку мінеральних ресурсів (бурштину, торфу, базальтів) за даними супутникового моніторингу Sentinel та матеріалами ПУРБ.

Методи дослідження. У роботі використано конструктивно-географічний та системно-басейновий підходи. Для вирішення поставлених завдань застосовано комплекс методів: аналітичний та ретроспективний (опрацювання фахової літератури та нормативно-правової бази); дистанційного зондування Землі (візуальне та автоматизоване дешифрування знімків, розрахунок спектральних індексів NDVI, NDWI у Copernicus Browser); картографічний та ГІС-моделювання (просторова візуалізація деградації русел); статистичний (аналіз кількісних параметрів стану водних масивів).

Наукова новизна одержаних результатів полягає у спробі комплексного узагальнення новітніх масивів даних затвердженого ПУРБ Дніпра (суббасейну Прип'яті) на 2025–2030 роки та їх інтеграції з аерокосмічними даними високої роздільної здатності. Вперше на рівні кваліфікаційного дослідження здійснено детальну просторово-часову диференціацію та великомасштабне картографування трансформації гідромережі Рівненського Полісся у зонах видобутку бурштину та торфу з розробкою конструктивно-географічних рекомендацій щодо відновлення геосистем.

Практичне значення отриманих результатів. Систематизовані аналітичні матеріали та створені карти супутникового моніторингу можуть слугувати інформаційною базою для фахівців БУВР річки Прип'ять та Державної екологічної інспекції Поліського округу під час фіксації порушень надрокористування та коригування Програм заходів ПУРБ. Окремі положення роботи доцільно використовувати у навчальному процесі під час викладання дисциплін «Конструктивна географія», «Дистанційне зондування Землі» та «ГІС в гідрології».

Структура роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, 4 розділів, висновків та списку використаних джерел. Кваліфікаційна робота містить: 75 сторінок, 8 рисунків, 11 таблиць. Опрацьовано 47 джерел.

РОЗДІЛ 1
ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ КОНСТРУКТИВНО-ГЕОГРАФІЧНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАНСФОРМАЦІЇ ГІДРОМЕРЕЖІ

1.1. Конструктивно-географічний підхід до вивчення впливу видобутку корисних копалин на водні об'єкти

Становлення конструктивної географії як методологічної основи оптимізації природокористування зумовлене об'єктивною потребою переходу від констатуючого й описового ландшафтознавства до цілеспрямованого проектування екологічно збалансованих, стійких та антропогенно оптимізованих геосистем. Фундаментальні принципи прикладного ландшафтознавства, типізації природно-територіальних комплексів (ПТК) та оцінювання їхніх антропогенних модифікацій, закладені у працях П. Г. Шищенка [7], сформували базис для дослідження зворотних реакцій довкілля на інтенсивний господарське навантаження. У сучасній ландшафтній екології ці ідеї трансформувалися у концепцію функціональної стійкості ландшафтів. Зокрема, М. Д. Гродзинський [8] обґрунтовує, що саме просторова організація та топологічна структура ландшафту визначають його інваріантність і здатність протистояти зовнішнім збуренням. Порушення латеральних зв'язків між морфологічними частинами ландшафту неминуче запускає каскадні деструктивні процеси, які поширюються далеко за межі первинного епіцентру впливу.

З огляду на суспільно-географічну парадигму О. Г. Топчієва [9], будь-який вид екстенсивного природокористування, насамперед гірничодобувна діяльність, виступає потужним техногенним фактором, що докорінно переформатовує як компонентну, так і територіальну структуру регіону, перетворюючи природні системи на геотехсистеми. У цьому контексті гідрографічна мережа розглядається як своєрідна «кровоносна система» ландшафту, що забезпечує речовинно-енергетичний обмін між ПТК. Тому

оцінювання стану водних об'єктів у районах надрокористування потребує залучення інтегрального конструктивно-географічного аналізу, який дозволяє органічно поєднати природні гідродинамічні закономірності розвитку водозборів із просторово-часовою специфікою антропогенного навантаження.

Важливий внесок у розуміння механізмів трансформації водних об'єктів під впливом гірничих робіт зробила вітчизняна школа антропогенного ландшафтознавства, очолювана Г. І. Денисиком [10]. Згідно з цим концептуальним підходом, водні екосистеми в зонах тривалого та інтенсивного видобутку мінеральної сировини поступово втрачають свій первинний природний статус і переходять до категорії антропогенних аквальних комплексів, еволюція яких визначається поєднанням природних та суто техногенних чинників. Досліджуючи генезис та структуру річищ і заплав українських річок, Г. І. Денисик та О. Д. Лаврик [11] довели, що грубе механічне втручання у морфологію берегової зони та ложа водотоків зумовлює формування нових парагенетичних ландшафтних систем. Динаміка цих систем підпорядковується спотвореним, штучно зміненим законам руслоформування та седиментації.

Зазначений погляд тісно корелює із теоретичними засадами водогосподарської екології А. В. Яцика [12], де обґрунтовано принцип абсолютної гідрографічної та ландшафтної нерозривності басейнової системи. Будь-яке локальне пошкодження літогенної основи чи зміна гідродинамічних умов у верхніх ланках водозбору миттєво відбивається на гідрохімічному режимі [13] та загальному гідроморфологічному стані [3] водотоків нижчих порядків. Професор О. Г. Ободовський [3] наголошує, що руслові процеси є надзвичайно чутливим індикатором антропогенного навантаження: несанкціоноване вилучення алювіальних відкладів, зрізання заплавних терас, штучне обвалування чи зміна локального базису ерозії порушують гідравлічний зв'язок між річкою та заплавою, запускаючи ланцюгову реакцію деградації, обміління та замулення всієї річкової мережі.

Просторова диференціація мінерально-сировинного потенціалу

Українського Полісся загалом і Рівненської області зокрема характеризується значною дисперсністю та мозаїчністю залягання родовищ корисних копалин [14]. Освоєння цих ресурсів відбувається у високочутливих, екологічно вразливих умовах, де в структурі геосистем просторово домінують поліські лісові ландшафти [1], а дренажну функцію виконує густа, але маловодна мережа малих річок та струмків суббасейну Прип'яті. З позицій регіонального еколого-геоморфологічного аналізу І. П. Ковальчука [15], відкритий спосіб розробки надр (видобуток паливного торфу, будівельних пісків, високоміцних базальтів та гранітів) призводить до радикальної перебудови морфоструктури рельєфу. Цей процес супроводжується повним знищенням ґрунтово-рослинного покриву, утворенням глибоких техногенних виробок (кар'єрів) та відвалів розкривних порід. Як наслідок, відбувається перехоплення підземного стоку, деформація ліній вододілів і повна руйнація природного гідравлічного зв'язку між поверхневими, ґрунтовими та глибокими підземними водоносними горизонтами.

Взаємозв'язок між геодинамічними змінами літогенної основи ландшафту та трансформацією водної підсистеми відображено на концептуальній схемі дослідження (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Концептуальна схема конструктивно-географічного аналізу взаємодії видобутку мінеральних ресурсів та гідромережі басейну Прип'яті *(розроблено автором)*

Окремим, безпрецедентним за масштабами деструктивного екологічного впливу чинником сучасної ландшафтної кризи в Поліському регіоні став нелегальний кустарний видобуток бурштину-сукциніту. Як зазначають В. Г. Мельничук та М. В. Криницька у профільному довіднику [2], специфіка неконтрольованого гідропомпового методу полягає у розмиві продуктивних бурштиновмісних горизонтів потужними струменями води під високим тиском. Вода для помп безсистемно вилучається безпосередньо з прилеглих малих річок, природних озер та меліоративних каналів. Таке агресивне втручання повністю руйнує ґрунтовий профіль і четвертинні відклади до глибини 8–10 метрів, перетворюючи колись стабільні лісоболотні та заплавні комплекси на антропогенні бедленди («бурштинові марсіанські пейзажі») із повністю деградованою, розірваною гідромережею (табл.1.1).

Сучасний етап оптимізації та реформування системи управління водними ресурсами України, законодавчо закріплений у Плані управління річковим басейном (ПУРБ) Дніпра [4], жорстко спирається на імплементацію екологічних стандартів Водної рамкової директиви ЄС (ВРД ЄС). Відповідно до офіційних матеріалів ПУРБ суббасейну Прип'яті, значні гідроморфологічні зміни річкових русел, спричинені прямим фізичним втручанням та видобутком корисних копалин, визнані одними з головних факторів ризику, через які масиви поверхневих вод можуть не досягти «доброго» екологічного стану.

За таких умов конструктивно-географічний підхід має розвиватися у напрямі випереджаючого ландшафтного планування територій. Спираючись на методологічні засади Л. Г. Руденка [17], ландшафтне планування розглядається як єдиний ефективний географічний інструмент і просторовий механізм, здатний узгодити жорсткі економічні інтереси гірничовидобувної галузі з імперативами збереження природних гідрологічних функцій басейнових систем.

Зважаючи на колосальні площі лісоболотних масивів Рівненського Полісся, мозаїчний характер порушень та фізичну важкодоступність багатьох нелегальних об'єктів промислу, традиційні експедиційні чи стаціонарні гідрометричні методи є малоефективними для оперативного моніторингу просторово-часової динаміки руйнувань. Інструментом об'єктивного та точного конструктивно-географічного аналізу тут стають сучасні методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ).

Таблиця 1.1

Систематизація факторів впливу відкритого надрокористування на гідрологічний та гідроморфологічний стан басейнових систем Рівненського Полісся *(складено автором на основі [2, 3, 15])*

Тип мінеральної сировини	Основний спосіб видобутку на Поліссі	Механізм втручання у літогенну основу та водозбір	Гідроморфологічні та геоекологічні наслідки для гідромережі
Бурштин-сукциніт	Гідропомповий (кустарний розмив вміщуючих порід під високим тиском)	Тотальне руйнування ґрунтового профілю та четвертинних відкладів (до глибини 10 м), хаотичний безповоротний забір поверхневих вод	Катастрофічна кольматація річищ піщано-глинистою пульпою, замулення і зникнення дрібних водотоків, морфологічна деградація заплав
Торф та сапропель	Відкритий (екскаваторний, вилучення за допомогою земснарядів)	Зняття вологоємкого торфового шару, прокладання глибокої осушувальної мережі, руйнування структури донних відкладів	Локальне і регіональне зниження дзеркала ґрунтових вод, деградація боліт як регуляторів стоку, виснаження межені малих річок
Базальти, граніти	Кар'єрний (із застосуванням буровибухових технологій)	Створення глибоких виробок нижче місцевого базису ерозії, вилучення блоків кристалічного фундаменту	Формування депресійних лійок, гідродинамічне перехоплення підземного стоку, утворення глибоких техногенних озер

У наукових працях фахівців з аерокосмічного моніторингу С. М. Бабійчук та О. В. Томченко [16] переконливо доведено, що інтеграція багатоспектральних супутникових даних із алгоритмами геоінформаційних систем (ГІС) дозволяє з високою просторовою точністю фіксувати втрату площі

водного дзеркала, оцінювати динаміку заростання, деградацію прибережних захисних смуг та розробляти математично обґрунтовані моделі відновлення гідромережі на постмайнінгових етапах розвитку ландшафтів.

1.2. Використання даних відкритого супутникового моніторингу та хмарних платформ ДЗЗ у гідрологічних дослідженнях

Сучасний етап розвитку гідрологічної науки та геоекологічного моніторингу характеризується стрімкою цифровізацією та інтеграцією методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) у класичні схеми басейнових досліджень. Традиційні гідрометричні спостереження, попри їхню високу точність, мають виражений локальний характер і не спроможні забезпечити безперервну просторово-часову дискретизацію процесів трансформації гідромережі на великих площах. Натомість аерокосмічні методи, теоретико-методологічний фундамент яких закладено у фундаментальних працях В. І. Лялька та М. О. Попова [18], відкривають безпрецедентні можливості для ретроспективного аналізу, оперативного картування та прогнозування динаміки поверхневих вод під впливом антропогенних чинників.

Переломним моментом у практичному застосуванні ДЗЗ у гідрології стало відкриття вільного некомерційного доступу до глобальних архівів космічних знімків у межах міжнародних космічних програм, насамперед Landsat (спільний проект геологічної служби США USGS та NASA) та Copernicus (Європейське космічне агентство, ESA). Як зазначає Г. Р. Байрак [19], використання відкритої мультиспектральної інформації дозволило нівелювати високу вартість аерокосмічних даних, яка раніше стримувала масштабні регіональні геоекологічні дослідження.

Для моніторингу малих річок та заплавних комплексів Рівненського Полісся, що зазнають інтенсивного навантаження внаслідок видобутку мінеральної сировини, критично важливим параметром є просторова та радіометрична розрізненість оптико-електронної апаратури супутників. Якщо системи сімейства Landsat 8/9 забезпечують зйомку з деталізацією 30 метрів у

видимих та інфрачервоних каналах, то супутники Sentinel-2A та Sentinel-2B (мультиспектральний прилад MSI) дозволяють отримувати дані з просторовою розрізненістю 10 та 20 метрів при високій часовій частоті прольоту (до 5 діб на екваторі). Це робить дані Sentinel-2 базовим інструментом для ідентифікації навіть малорозмірних техногенних порушень гідромережі — від невеликих нелегальних кар'єрів та бурштинових копанок до локальних замулених ділянок річищ. Технічні та спектральні параметри каналів основних супутникових систем, що залучаються до гідрологічного аналізу, систематизовано в табл.1.2.

Таблиця 1.2

Спектральні канали супутників Sentinel-2 (MSI) та Landsat 8/9 (OLI), що використовуються для розрахунку гідрологічних індексів та виділення водної поверхні *(сформовано автором на основі [6, 16, 19])*

Супутникова система / Сенсор	Назва та номер каналу	Центральна довжина хвилі (мкм)	Просторова розрізненість (м)	Сфера цільового застосування в басейнових дослідженнях
Sentinel-2 / MSI	Band 3 – Green (зелений)	0,560	10	Фіксація відбивальної здатності води, базовий канал для розрахунку індексів NDWI та MNDWI
Sentinel-2 / MSI	Band 8 – NIR (ближній ІЧ)	0,842	10	Максимальне поглинання випромінювання чистою водою; виділення меж «вода–суша» в класичному NDWI
Sentinel-2 / MSI	Band 11 – SWIR-1 (короткохвильовий ІЧ)	1,610	20	Індикація вологості оголеного ґрунту; придушення шумів від піщаних субстратів та забудови в індексі MNDWI
Landsat 8/9 / OLI	Band 3 – Green (зелений)	0,533–0,590	30	Розрахунок класичного та модифікованого нормованих відносних водних індексів для довгострокових трендів
Landsat 8/9 / OLI	Band 5 – NIR (ближній ІЧ)	0,851–0,879	30	Картування контурів великих дзеркал водних об'єктів та оцінювання стану прибережної

				вегетації
Landsat 8/9 / OLI	Band 6 – SWIR-1 (короткохвильовий ІЧ)	1,566–1,651	30	Аналіз динаміки вологості ландшафтів, виділення перезволожених земель на посттехногенних територіях

Фізичною основою дешифрування об'єктів гідромережі за мультиспектральними космічними знімками є унікальний характер спектральної відбивальної здатності води. У посібнику С. С. Кохана та Є. Б. Востокова [20] детально описано, що чиста вода має відносно високе відбивання у синьо-зеленій зоні видимого спектра і практично повністю поглинає електромагнітне випромінювання у ближньому (NIR) та короткохвильовому інфрачервоному (SWIR) діапазонах. На противагу воді, здорова зелена рослинність та сухі ґрунти демонструють інтенсивне відбивання в інфрачервоному спектрі. Саме цей різкий контраст дозволяє математично ізолювати водні об'єкти від навколишнього ландшафтного фону за допомогою спектральних індексів.

Найбільш поширеним у світовій практиці інструментом автоматизованого виділення відкритих водних поверхонь є нормований відносний водний індекс NDWI (*Normalized Difference Water Index*), запропонований С. МакФітерсом [21]. Розрахунок індексу базується на нормованому співвідношенні зеленого та ближнього інфрачервоного каналів:

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \quad (1.1)$$

Індекс NDWI оптимізований для максимізації відбивної здатності води та мінімізації впливу рослинного покриву. Проте, у специфічних умовах Рівненського Полісся, де видобуток корисних копалин (особливо бурштину та торфу) супроводжується оголенням великих площ кварцових пісків, суглинків та техногенних відвалів, класичний NDWI часто дає похибки через високу відбивальну здатність сухих антропогенних поверхонь у NIR-діапазоні.

Для усунення цього недоліку Х. Сюй [22] запропонував модифікований індекс MNDWI (*Modified Normalized Difference Water Index*), де замість ближнього інфрачервоного каналу використовується короткохвильовий

інфрачервоний (SWIR-1):

$$\text{M}NDWI = \frac{Green-SWIR}{Green+SWIR} \quad (1.2)$$

Заміна спектральної зони дозволяє значно ефективніше пригнічувати фонові шуми від оголених ґрунтів, піщаних розмивів та елементів штучної інфраструктури (доріг, споруд), оскільки коефіцієнт відбивання субстратів у SWIR-діапазоні значно вищий, ніж у NIR. Для умов порушених земель Полісся використання індексу MNDWI є пріоритетним конструктивно-географічним рішенням.

Поряд із якісними спектральними даними, сучасні просторово-часові дослідження висувають жорсткі вимоги до потужності обчислювальних засобів. Традиційні настільні ГІС-пакети (ArcGIS, QGIS) вимагають значних часових та апаратних ресурсів для завантаження, геометричної корекції та мозаїкування сотень багатогігабайтних космічних знімків. Сучасна методологія ДЗЗ розв'язує цю проблему за допомогою хмарних платформ обробки великих геопросторових даних (*Big Geospatial Data*), лідером серед яких є Google Earth Engine (GEE). Як обґрунтовує Н. Горелік [23], архітектура GEE базується на багатопроцесорних суперкомп'ютерних кластерах і надає прямий доступ за допомогою API (JavaScript/Python) до всього світового архіву Landsat та Sentinel, що дозволяє виконувати розрахунки безпосередньо на серверах Google.

Типовий алгоритм обробки та аналізу багатоспектральної інформації у хмарному середовищі GEE для завдань басейнового моніторингу представлено у вигляді блок-схеми (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Алгоритмічна блок-схема автоматизованої обробки багатоспектральних супутникових знімків у хмарній платформі Google Earth Engine для моніторингу гідромережі *(розроблено автором)*

Реалізація даного алгоритму (рис. 1.2) дозволяє повністю автоматизувати рутинні операції. Програмне маскування атмосферних завад і хмарності виконується за допомогою вбудованих каналів якості (QA60) або передових алгоритмів типу Cloud Score+, що гарантує високу чистоту вибірки. Важливим етапом є автоматичне визначення порогового значення індексу за методом Отсу (*Otsu thresholding*), що мінімізує суб'єктивізм оператора при переведенні індексного зображення у бінарну маску «вода / суша».

Таким чином, інтеграція відкритого супутникового моніторингу Sentinel-2/Landsat та інструментів Google Earth Engine формує надійний теоретико-методологічний каркас для наскрізного аналізу трансформацій русел, заплав і боліт Полісся. Це дозволяє перейти від точкового опису порушень до об'єктивного математично обґрунтованого картографування гідроекологічного стану річкових систем у межах Рівненської області.

1.3. Нормативно-правова база управління водними та мінеральними ресурсами в контексті надрокористування

Конструктивно-географічний аналіз трансформації річкових басейнів неможливий без глибокого розуміння інституційного середовища, яке безпосередньо формує вектори природокористування. Управління гідрологічними системами в зонах розробки мінеральної сировини в Україні спирається на складну, багато в чому дисонуючу систему нормативно-правових актів. Ця система історично намагається збалансувати дві принципово різні парадигми: інтенсивну експлуатацію літогенної основи ландшафту та екологічну охорону водного фонду. Теоретичні засади правового забезпечення екологічної безпеки територій детально розкриваються у працях фахівців з екологічного права, зокрема А. П. Гетьмана [24], які обґрунтовують гостру необхідність пріоритезації екосистемного підходу над суто ресурсним.

Базовим документом, що регламентує охорону та використання гідромережі, виступає Водний кодекс України [25]. Відповідно до статті 89 Кодексу, з метою охорони поверхневих водних об'єктів від забруднення і засмічення та збереження їхньої водності вздовж річок, морів і навколо озер виділяються прибережні захисні смуги (ПЗС). У межах ПЗС суворо забороняється розорювання земель, а також проведення будь-яких гірничих, бурових чи вибухових робіт. Просторовий статус цих територій додатково закріплюється Земельним кодексом України [28], який відносить їх до земель водного фонду з обмеженим режимом господарювання. Проте, практика землекористування на Рівненському Поліссі засвідчує масштабну системну проблему: кадастрові межі земельних ділянок часто встановлюються без урахування реальних геоморфологічних меж заплав та русел малих річок.

З іншого боку, порядок геологічного вивчення та експлуатації родовищ суворо регламентується Кодексом України про надра [26] та Гірничим законом України [29]. Десятиліттями видача спеціальних дозволів на користування надрами (ліцензій) та оформлення гірничих відводів відбувалися за суто геометричним або геологічним принципом, без належного просторового узгодження з межами річкових суббасейнів. Це сформувало фундаментальний інституційний конфлікт: гірничодобувне підприємство отримувало легальне

право на розробку торфовища чи базальтового кар'єру, контури якого фізично накладалися на гідрологічно вразливі заболочені комплекси або місця формування підземного живлення місцевої гідромережі.

Спробою вирішити цей просторовий конфлікт та гармонізувати законодавство стало прийняття Закону України «Про оцінку впливу на довкілля» (ОВД) [27]. Згідно з новими нормами, будь-який проект відкритого видобутку корисних копалин підлягає обов'язковій екологічній експертизі до початку робіт. Саме на етапі ОВД суб'єкт господарювання зобов'язаний розрахувати радіус депресійної лійки від майбутнього кар'єру, оцінити обсяги вилученого поверхневого та підземного стоку і, що найважливіше з позицій конструктивної географії, спроєктувати етапи інженерної та біологічної рекультивації порушених земель (відповідно до ст. 52 Гірничого закону [29]).

Окремим прецедентом правового регулювання для досліджуваного регіону став Закон України «Про державне регулювання видобутку, реалізації та рятування бурштину», прийнятий наприкінці 2019 року [30]. Цей акт мав на меті вивести з тіні масовий старательський промисел шляхом спрощення процедури продажу дозволів на невеликі ділянки (до 10 га). Однак, як слушно наголошують В. Г. Мельничук та М. В. Криницька [2], процедури ОВД та легалізації є безсилими проти наслідків багаторічного нелегального гідропомпового видобутку, який вже встиг знищити понад 80% порушених земель Полісся. Тіньовий сектор розвивався поза будь-яким правовим полем, тотально ігноруючи режими водоохоронних зон і залишаючи після себе деградовані території, рекультивація яких не передбачена жодними корпоративними зобов'язаннями.

Докорінні зміни у філософії управління водними ресурсами розпочалися з ратифікацією Угоди про асоціацію з ЄС та імплементацією Водної рамкової директиви ЄС (2000/60/ЄС) [31]. Євроінтеграційний вектор безальтернативно закріпив перехід від радянського адміністративно-територіального до сучасного гідрографічного (басейнового) принципу просторового управління. Практичним інструментом реалізації цього підходу є План управління річковим басейном

(ПУРБ) Дніпра [4]. Відповідно до методології ПУРБ, порушення вільної течії, розмив русел, гідропомповий видобуток та екскавація донних відкладів офіційно класифікуються як критичні гідроморфологічні зміни. Саме вони визнаються одним з основних антропогенних навантажень, що перешкоджають масивам поверхневих вод суббасейну Прип'яті досягти «доброго екологічного стану» (табл. 1.3).

Таким чином, сучасна нормативно-правова база України має достатній декларований потенціал для регулювання легального сектору гірничої економіки. Однак, розрізненість кадастрової та водоохоронної інформації, а також масштабні деградаційні процеси від тіньового надрокористування свідчать про кризу класичних інструментів нагляду. Це безапеляційно обґрунтовує необхідність залучення дистанційного аерокосмічного моніторингу як єдиного об'єктивного засобу просторової фіксації трансформації гідромережі та порушень природоохоронного законодавства.

Таблиця 1.3

Структура нормативно-правового забезпечення управління водними та мінеральними ресурсами басейну Прип'яті *(складено автором)*

Нормативно-правовий акт	Об'єкт регулювання в контексті дослідження	Конструктивно-географічні та екологічні обмеження / недоліки
Водний кодекс України [25], Земельний кодекс України [28]	Режими прибережних захисних смуг (ПЗС), водоохоронних зон, статус земель водного фонду	Розбіжність кадастрових меж ділянок із реальними геоморфологічними межами заплав річок; слабкість механізму покарання за руйнування ПЗС
Кодекс України про надра [26]	Порядок надання гірничих відводів, ліцензування видобутку копалин	Просторове планування гірничих відводів часто здійснюється без урахування топології водозборів малих річок
Закон України «Про оцінку впливу на	Прогнозування та мінімізація гідроекологічних	Поширюється виключно на легальних надрокористувачів; моделювання змін гідромережі

довкілля» [27]	збитків на етапі проектування кар'єру	часто носить формальний характер
Закон України про регулювання видобутку бурштину [30]	Легалізація видобутку на порушених ділянках (до 10 га) через аукціони	Не вирішує проблеми покинутих "місячних ландшафтів" і замулених річок, де видобуток завершився до 2019 року
Водна рамкова директива ЄС [31] та ПУРБ Дніпра [4]	Досягнення «доброго екологічного стану» водних масивів до 2030 року (басейновий підхід)	Потребує інтеграції з даними супутникового моніторингу для ефективного контролю важкодоступних поліських екосистем

Висновки до розділу 1

Конструктивно-географічний аналіз трансформації гідромережі в районах інтенсивного видобутку корисних копалин базується на інтеграції ландшафтно-екологічного та басейнового підходів. Гірничодобувна діяльність, зокрема відкрита розробка торфовищ, базальтів та масовий нелегальний гідропомповий видобуток бурштину, виступає потужним деструктивним фактором антропогенного морфогенезу. Втручання в літогенну основу ландшафту призводить до незворотних руслових деформацій, руйнування гідравлічного зв'язку між річками та їхніми заплавами, а також катастрофічного замулення водотоків, перетворюючи природні поліські екосистеми на деградовані антропогенні аквальні комплекси.

Зважаючи на високу мозаїчність, фізичну важкодоступність та значні площі уражених лісоболотних масивів Рівненського Полісся, традиційні експедиційні та стаціонарні гідрометричні методи моніторингу виявляються недостатніми для об'єктивної оцінки збитків. Оптимальним інструментом просторово-часової фіксації порушень є методи дистанційного зондування Землі. Теоретико-методологічний апарат дослідження спирається на використання багатоспектральних космічних знімків середньої просторової розрізненості (насамперед місії Sentinel-2), розрахунок модифікованого нормованого водного індексу (MNDWI) для мінімізації оптичних похибок від піщаних відвалів та застосування хмарних обчислювальних платформ (Google Earth Engine) для автоматизованого картування динаміки водного дзеркала.

Практична реалізація конструктивно-географічних рішень ускладнюється наявністю стійкого інституційного конфлікту між водоохоронним та гірничим законодавством України. Просторова невідповідність меж гірничих відводів топології річкових водозборів та масовий розвиток тіньового надрокористування поза межами процедур ОВД нівелюють ефективність класичного екологічного контролю. Водночас імплементація стандартів Водної рамкової директиви ЄС та затвердження Плану управління річковим басейном

(ПУРБ) Дніпра вимагають обов'язкового врахування гідроморфологічних змін при оцінці стану водних масивів. Сформований у розділі теоретичний та ГІС-методологічний базис створює необхідне підґрунтя для переходу до детального фізико-географічного аналізу суббасейну Прип'яті та практичної ідентифікації порушень гідромережі на конкретних тестових ділянках.

РОЗДІЛ 2
ФІЗИКО-ГЕОГРАФІЧНА ТА ГОСПОДАРСЬКА ХАРАКТЕРИСТИКА БАСЕЙНУ РІЧКИ ПРИП'ЯТЬ (В МЕЖАХ РІВНЕНСЬКОЇ ОБЛАСТІ)

2.1. Природно-географічні умови та ретроспективний стан гідромережі досліджуваного регіону

Конструктивно-географічне дослідження антропогенної трансформації поверхневих водних об'єктів вимагає детального аналізу природно-географічного фону, який виступає просторово-часовою матрицею для формування, функціонування та еволюції гідромережі. Басейн річки Прип'ять у межах Рівненської області територіально охоплює фізико-географічну область Рівненського Полісся, що належить до Поліської провінції мішаних лісів [32]. Цей регіон характеризується унікальним поєднанням геолого-геоморфологічних, кліматичних та гідрологічних умов, які історично зумовили формування густої, сильно заторфованої та морфологічно розгалуженої річкової мережі.

У геологічному відношенні досліджувана територія розташована на стику великих тектонічних структур: північного схилу Українського кристалічного щита (Волинський кристалічний масив) та південного борту Прип'ятського прогину [2]. Кристалічний фундамент, складений докембрійськими гранітами, гнейсами, мігматитами та базальтами, поступово занурюється у північному напрямку під товщу осадового чохла. Осадовий комплекс представлений переважно відкладами верхньої крейди (крейда, мергелі маастрихтського ярусу), палеогену (еоценові кварцово-глауконітові піски обухівської та харківської свит, що містять промислові поклади бурштину) та неогену.

Четвертинний покрив має вирішальне значення для сучасного гідроморфогенезу і представлений флювіогляціальними (водно-льодовиковими), моренними та алювіальними відкладами дніпровського зледеніння. Переважно піщаний та супіщаний механічний склад поверхневих відкладів зумовлює високу інфільтраційну здатність ландшафтів, що безпосередньо впливає на

процеси підземного живлення річок. Особливості залягання основних водоносних комплексів, їхній стратиграфічний розподіл та зв'язок із геологічною структурою літогенної основи Рівненського Полісся детально відображено на рис. 2.1.

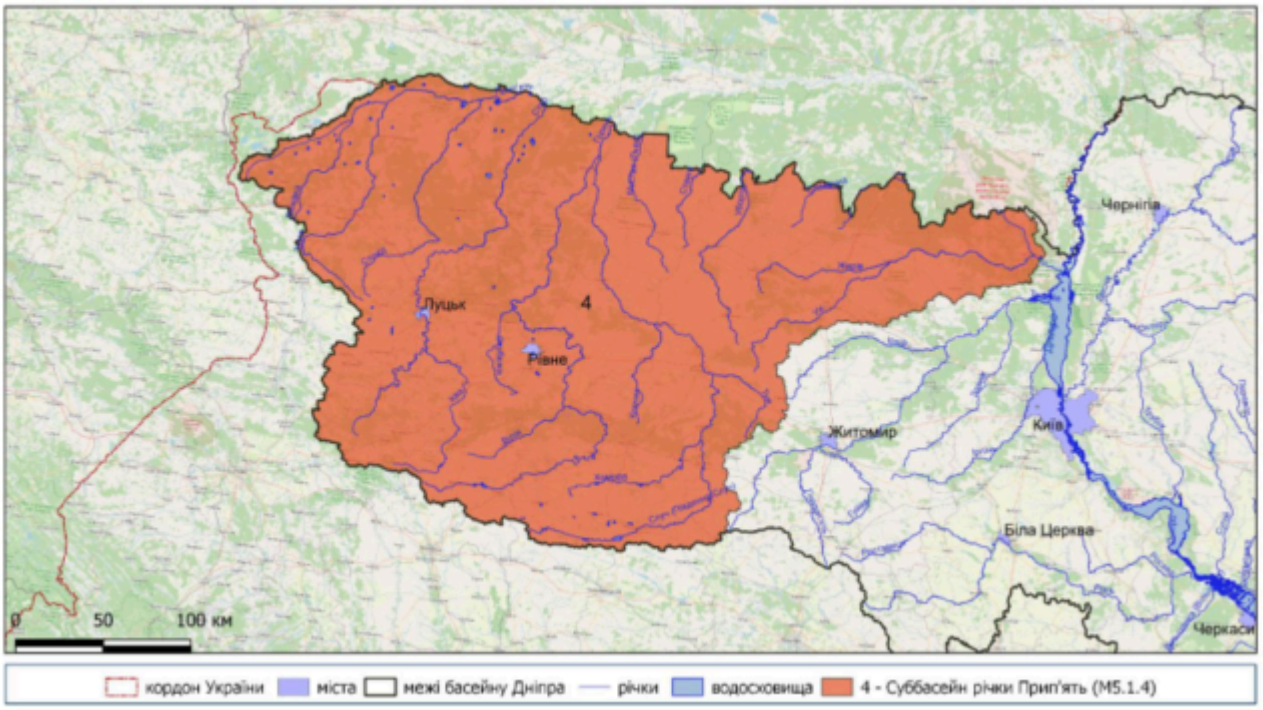


Рис. 2.1. Схема гідрогеологічного районування суббасейну річки Прип'ять у межах Рівненського Полісся *(сформовано на основі картографічних матеріалів ПУРБ [35] та Держгеонадр)*

Рельєф Рівненського Полісся є класичним зразком низовинного акумулятивного ландшафту. Переважають плоскі та слабохвилясті моренно-зандрові й алювіальні рівнини з абсолютними відмітками від 130–140 м на північному сході (у заплаві Прип'яті) до 180–190 м на півдні, на межі з Волинською височиною [33]. Мікрорельєф ландшафтів ускладнений численними еоловими формами (піщані дюни, гряди, вали), які утворюють природні мікроводозбори, а також карстовими й суфозійними западами у місцях близького залягання крейдових порід. Геоморфологічна будова заплав характеризується мінімальними похилами русел (від 0,1 до 0,5 м/км), що історично зумовлювало низьку швидкість течії річок, їхню високу звивистість

(меандрованість) та інтенсивні процеси бічного розмиву й акумуляції наносів.

Кліматичні умови регіону формуються під впливом регулярного перенесення атлантичних повітряних мас і класифікуються як помірно континентальні, надлишково зволожені. Середньорічна температура повітря за останні десятиліття зросла і становить +7,5…+8,5 °С. Середня кількість опадів коливається в межах 600–670 мм на рік, причому близько 70% їхньої кількості випадає в теплий період року. Важливим гідрологічним параметром є низька випаровуваність (420–450 мм), що зумовлює стійко позитивний баланс вологи (коефіцієнт зволоження > 1,2) [34]. Зміна кліматичних трендів (аридизація, часті зимові відлиги та відсутність стійкого снігового покриву) суттєво трансформувала структуру річкового стоку, нівелювавши класичне весняне водопілля та подовживши періоди глибокої літньо-осінньої межені.

Сучасна гідрографічна мережа Рівненського Полісся належить до суббасейну річки Прип'ять (район річкового басейну Дніпра) [35]. Головними водними артеріями є праві притоки Прип'яті: Стир, Горинь (із найбільшою притокою Случ), Льва (Моства) та Ствига. Ретроспективний аналіз стану гідромережі дозволяє виділити три ключові історичні етапи її формування до моменту початку масштабного промислового надрокористування:

1. ***Природний етап (до середини XX ст.).*** Характеризувався максимальною природною заторфованістю водозборів (болота займали до 30–40% площі регіону). Річки мали широкі, розгалужені, багаторукавні заплави, які виконували роль природних гідрологічних буферів, що акумулювали надлишкові води під час повеней і поступово віддавали їх у меженні періоди.

2. ***Техногенно-меліоративний етап (1960–1980-ті роки*).** Період тотальної гідротехнічної експлуатації Полісся. Бувівництво масштабних осушувальних систем (меліоративні системи «Случ–Горинь», «Стир» та ін.) супроводжувалось каналізацією, поглибленням та випрямленням русел малих річок, спорудженням магістральних каналів та шлюзів-регуляторів [13]. Гідромережу було перетворено на штучно керовані водотоки, що призвело до зниження рівня ґрунтових вод та втрати річками природної меандрової

структури.

3. ***Стабілізаційно-ретроспективний етап (1990–2010-ті роки).*** Період занепаду та часткової деградації міжгосподарських меліоративних систем, який супроводжувався процесами самовідновлення (ренатуралізації) русел та вторинного заболочення територій. Саме цей період виступає базовим «нульовим» екологічним фоном, на якому зафіксовано морфометричні параметри річок безпосередньо перед початком масового спалаху легального та нелегального видобутку корисних копалин.

Основні морфометричні та гідрологічні характеристики ретроспективного стану головних річкових систем регіону систематизовано в табл. 2.1.

Аналіз ретроспективного стану (табл. 2.1) показує, що гідрографічна мережа Рівненського Полісся до початку масового промислового освоєння надр уже перебувала у стані суттєвого техногенного напруження через тривалі наслідки радянської гідромеліорації. Проте, попри випрямлення багатьох ділянок, річки зберігали свій гідравлічний зв'язок із заплавними комплексами, луками та залишками боліт, які відігравали роль природних біофільтрів та регуляторів стоку.

Унікальне геологічне залягання еоценових бурштиновмісних піщаних відкладів на незначних глибинах (від 2 до 12 метрів) безпосередньо в межах руслових та заплавних фацій палеорічок зумовило той факт, що сучасний видобуток корисних копалин сконцентрувався саме у водоохоронних зонах та руслах водотоків. Це призвело до тотального та стрімкого руйнування природного просторово-гідрологічного балансу, сформованого в межах басейну Прип'яті, деструктивні передумови якого розглядаються у наступному підрозділі.

Таблиця 2.1

Морфометричні та гідрологічні показники головних річок басейну Прип'яті в межах Рівненської області (ретроспективний фон) *(сформовано автором на основі [3, 5, 34])*

Назва річки	Загальна довжина (км) / в межах області	Площа водозбору (км2)	Середній похил русла (м/км)	Середня багаторічна витрата води (м3/с)	Історичний тип русла та базовий гідрологічний режим
Стир	494 / 234	13100	0,32	45,5 (гідропост Вараш)	Русло помірно звивисте, заплава широка (до 2–3 км), місцями сильно заболочена. Режим значною мірою зарегульований Хрінницьким водосховищем
Горинь	659 / 282	27700	0,38	92,0 (гідропост Антонівка)	Головна водна артерія області. Русло сильномеандруюче, розгалужене на рукави й стариці, заплава досягає 4 км ширини. Висока природна каламутність вод
Случ	451 / 184	13800	0,42	47,0 (гідропост Сарни)	У межах кристалічного щита русло порожисте з крутими берегами («Соколині гори»), при переході на Поліську низовину — плоске, сильно замулене, з низькою швидкістю течії
Льва (Мостава)	172 / 108	2400	0,22	9,8 (гідропост Остки)	Типова поліська річка. Русло штучно каналізоване у середній течії, заплава повністю зливається з великими болотами («Гало»). Живлення переважно снігово-болотне
Ствига	178 / 64	5440	0,25	11,2 (ст. Грані на межі з РБ)	Слаботрансформоване, найближче до природного звивисте русло, що протікає крізь лісоболотні масиви. Заплава двостороння, низька, часто затоплювана

2.2. Просторова організація та структура видобутку мінеральних ресурсів у Рівненській області

Геопросторова диференціація, структурні особливості та інтенсивність господарського освоєння мінерально-сировинного потенціалу Рівненської області безпосередньо детерміновані її унікальним геоструктурним положенням. Оскільки північна та центральна частини регіону просторово збігаються з басейном річки Прип'ять, процеси промислового вилучення корисних копалин відбуваються в межах надзвичайно чутливих, надлишково зволожених ландшафтів Українського Полісся. Сучасна структура надрокористування в досліджуваному регіоні сформована трьома основними сировинними блоками: видобутком самоцвітів (бурштин-сукциніт), розробкою магматичних та осадових товщ будівельної сировини (базальти, граніти, цементні глини та вапняки), а також вилученням органогенних паливних ресурсів (торф) [14, 36].

Провідне місце у структурі специфічного антропогенного навантаження на ландшафти та гідромережу регіону посідає видобуток бурштину. Відповідно до фундаментальних геологічних досліджень [2; 14], Волинський бурштиноносний район характеризується субгоризонтальним заляганням бурштинвмісних глауконіт-кварцових пісків палеогенового (еоценового) віку, які перекриті четвертинними алювіальними та гляціофлювіальними відкладами. Основні промислові запаси та ліцензійні площі сконцентровані в межах трьох ключових просторових ареалів Рівненщини, які безпосередньо дренуються притоками Прип'яті: Сарненського (Клесівське родовище), Вараського (Володимирецька площа) та Дубровицького.

З позицій конструктивно-географічного аналізу, деструктивний вплив на водні об'єкти має не стільки ліцензійний кар'єрний видобуток, скільки масштабна стихійна нелегальна розробка, що набула системного характеру на рубежі XX–XXI століть. Застосування старателями нелегального гідромеханічного способу (розмив бурштинвмісної товщі за допомогою потужних дизельних мотопомп) призводить до повної деструкції морфологічної

будови заплав малих річок. Під дією високоатмосферного тиску води руйнується природний дерновий покрив, знищується профіль алювіальних ґрунтів, а вимита піщано-глиниста пульпа безпосередньо потрапляє в русла річок (зокрема рр. Льва, Ствига, Веселуха), спричиняючи їхнє катастрофічне замулення, зміну гідродинамічних параметрів течії, розширення русел та деградацію прибережних біотопів [2; 36].

Іншим потужним полюсом антропогенного навантаження на геосистеми є видобуток будівельних матеріалів, зокрема унікальних для України базальтів івано-долинської серії венду. Основні центри видобутку зосереджені в Рівненському (колишньому Костопільському – родовища Іванова Долина, Берестовецьке) та Сарненського (Клесівське кар'єрне поле) районах [33]. Розробка базальтових стовпів та супутніх гранітоїдів здійснюється глибоким відкритим кар'єрним способом. Глибина окремих кар'єрів сягає 40–60 метрів, що значно перевищує рівень залягання перших від поверхні водоносних горизонтів. Функціонування таких об'єктів вимагає постійного проведення масштабного кар'єрного водовідливу для запобігання затопленню робочих зон. Як наслідок, навколо кар'єрів формуються великі депресійні лійки, що призводить до дренування підземних вод, падіння рівнів у колодязях прилеглих населених пунктів та гідродинамічного виснаження малих поверхневих водотоків, які втрачають підземне живлення.

Органогенний сектор надрокористування представлений видобутком торфу, який історично розвивався в межах плоско-заболочених низин Полісся. Найбільші діючі родовища (зокрема «Чемерне» у Сарненському районі) розробляються пошарово-фрезерним способом [37]. Передумовою видобутку торфу є повне попереднє осушення лісоболотного масиву через мережу каналів. Це призводить до безпосереднього руйнування природного гідрологічного акумулятора, прискорення руслового стоку під час паводків та посилення маловоддя в літній період на суміжних територіях.

Просторову організацію, технологічні особливості та характер безпосереднього деструктивного впливу різних видів надрокористування на

гідрографічну мережу басейну Прип'яті в межах області систематизовано в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Структурно-географічна характеристика основних центрів видобутку мінеральних ресурсів у басейні річки Прип'ять (в межах Рівненської області)

(розроблено автором на основі [2, 14, 33, 36, 37])

Вид мінеральної сировини	Основні родовища та райони локалізації (за новим АУД)	Технологія та спосіб вилучення корисних копалин	Характер і наслідки прямого впливу на об'єкти гідромережі досліджуваного регіону
Бурштин-сукциніт	Клесівське родовище, Володимирецька, Дубровицька, Томашгородська площі (Сарненський та Вараський плани/райони)	Офіційний кар'єрний видобуток екскаваторним способом; нелегальний гідромеханічний розмив мотопомпами	Повне руйнування заплав і терас малих річок, катастрофічне замулення русел піщаним матеріалом, втрата гідравлічного зв'язку з болотами
Базальти та граніти	Родовища Іванова Долина, Берестовецьке, Клесівське, Томашгородське (Рівненський та Сарненський райони)	Відкритий глибокий кар'єрний видобуток із застосуванням буровибухових робіт та постійного водовідливу	Формування регіональних депресійних лійок, осушення прилеглих ландшафтів, перехоплення підземного стоку малих річок
Торф	Родовище «Чемерне», болотяні масиви Сарненського, Рокитнівського та Дубровицького складних вузлів	Попереднє осушення масивів відкритою та закритою інженерною мережею; пошаровий фрезерний видобуток	Знищення природних гідроакумуляторів Полісся, деградація джерел живлення річок, мінералізація органічної речовини
Будівельні, цементні та скляні піски/глини	Здолбунівське (цементна сировина), родовища у Вараському та Сарненському районах	Переважно відкритий кар'єрний, рідше – гідромеханічний (намив із заплавних територій).	Локальна зміна конфігурації руслової сітки, порушення природного режиму наносів річок, активізація руслової ерозії

Таким чином, просторова структура надрокористування на Рівненщині накладається на найбільш гідрологічно вразливі елементи річкових басейнів – заплави, перші надзаплавні тераси та лісоболотні масиви. Географічний збіг зон інтенсивного видобутку базальту, торфу і бурштину з басейнами таких річок, як Горинь, Случ, Стир, Льва та Ствига, зумовлює формування масштабних гірничопромислових ландшафтів [36].

У цих порушених геосистемах природний кругообіг води замінено на антропогенно-керований (кар'єрний відлив, гідророзмив, каналізований скид пульпи), що вимагає впровадження сучасних методів дистанційного аерокосмічного моніторингу для оперативного детектування меж екологічних деформацій та оцінки динаміки трансформації дзеркала водних об'єктів.

2.3. Сучасне антропогенне навантаження на геосистеми басейну річки Прип'ять

Геосистеми басейну річки Прип'ять у межах Рівненської області зазнають різнобічного та тривалого антропогенного навантаження, що зумовлено специфікою сучасного господарського комплексу регіону. Окрім деструктивного впливу гірничодобувної промисловості (зокрема видобутку бурштину, базальтів та торфу), провідними чинниками деформації природного гідрологічного та гідрохімічного режимів є комунально-побутове та промислове водовідведення, функціонування великих об'єктів енергетики, дифузне сільськогосподарське забруднення та експлуатація застарілих гідротехнічних меліоративних систем [35].

Особливе місце в структурі техногенного навантаження на ландшафти та водотоки регіону посідає енергетичний сектор, представлений відокремленим підрозділом «Рівненська АЕС» (м. Вараш). Цей промисловий гігант здійснює масштабне вилучення водних ресурсів із річки Стир (права притока Прип'яті) для забезпечення технологічних потреб, насамперед – підживлення оборотних

систем охолодження конденсаторів турбін. Попри впровадження замкнених циклів водопостачання, періодичні скиди продувних вод та значне теплове навантаження призводять до локальної термофікації річкового середовища у нижньому б'єфі водозабору. Штучне підвищення температури води у Стиру активізує процеси вторинного біогенного забруднення, стимулює надлишкове цвітіння води (евтрофікацію) та суттєво трансформує структуру автохтонних біоценозів [38].

Відповідно до офіційних аналітичних матеріалів Міжнародного проекту «Водна ініціатива+ для країн Східного партнерства» (EUWI+ East) щодо розробки Плану управління річковим басейном Дніпра, Рівненська область характеризується специфічним профілем економічного навантаження на водні ресурси суббасейну Прип'яті [39]. Зокрема, частка рентної плати за спеціальне водокористування підприємствами Рівненщини становить 4,2% від загального обсягу надходжень по всьому суббасейну Прип'яті в межах України. Цей показник суттєво перевищує аналогічні значення для Тернопільської (0,3%), Львівської (0,8%) та Волинської (0,9%) областей, що безпосередньо вказує на вищу концентрацію водомістких промислових і комунальних об'єктів у межах рівненської частини басейну [39].

Поряд із цим, обсяги екологічного податку, що сплачуються за прямі скиди забруднюючих речовин у водні об'єкти регіону, складають 4–6% від їхнього сумарного обсягу в басейні Дніпра, фіксуючи наявність стійких та потужних точкових джерел забруднення [39]. Головними точковими джерелами виступають підприємства житлово-комунального господарства (міські водоканали Сарн, Костополя, Березного, Вараша, Дубровиці). Через критичний рівень зношеності очисних споруд, застарілі технології механічної та біологічної деструкції домішок, у річки Горинь, Случ, Стир та їхні малі притоки щорічно потрапляють значні обсяги недостатньо очищених стічних вод. Як наслідок, у контрольних створах спостережень фіксується хронічне перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) за такими інгредієнтами, як азот амонійний, нітрити, фосфати (ортофосфати), синтетичні

поверхнево-активні речовини (СПАР) та легкоокиснювана органічна речовина (за показниками ХСК та $БСК_5$) [34, 35].

Вагомим фактором прихованого, але масштабного впливу на геосистеми Полісся є дифузне (площинне) забруднення, генетично пов'язане з агровиробництвом. Якщо північні райони області переважно лісисті й заболочені, то центральна та південна частини (в межах Волинської височини) інтенсивно розорані. Змив залишків мінеральних добрив, пестицидів та гербіцидів з орних земель під час весняного танення снігу та літніх зливових опадів формує потужний нерегульований притік біогенів у річкову сітку. Додатковим деструктивним чинником є локалізація тваринницьких і птахівничих комплексів, що нерідко функціонують із порушенням меж водоохоронних зон малих річок, спричиняючи мікробіологічне та органічне забруднення поверхневого стоку.

Історичним, проте досі діючим інструментом глобальної трансформації поліських ландшафтів виступає гідротехнічна осушувальна меліорація. Створена у другій половині XX століття густа мережа меліоративних каналів (зокрема великі осушувальні системи «Морочне», «Клесівська» та інші) докорінно змінила природний гідродинамічний баланс межиріч [37]. Спрямлення та каналізація русел малих річок, перетворення їх на магістральні збирачі надлишкових вод зумовили:

- повну втрату природної звивистості (меандрування) та акумуляційної здатності заплав;
- різке прискорення поверхневого стоку в період весняного водопілля, що провокує вимивання родючого шару ґрунту;
- катастрофічне падіння рівнів залягання ґрунтових вод у літньо-осінню межень, що веде до пересихання джерел та малих водотоків.

Сучасний незадовільний технічний стан більшості регулюючих споруд і шлюзів через відсутність належного фінансування унеможливлює здійснення двобічного регулювання водно-повітряного режиму ґрунтів. У сухі періоди року це призводить до глибокого деградаційного висушування верхніх горизонтів, а

під час затяжних дощів – до вторинного підтоплення значних площ, активізуючи процеси мінералізації органогенних торфових товщ.

Таким чином, сумарне антропогенне навантаження на геосистеми басейну Прип'яті в межах Рівненської області досягло критичних меж, за якими природний потенціал самоочищення та регенерації річкових екосистем є практично вичерпаним. Поєднання точкового промислово-комунального забруднення з дифузним аграрним пресингом та гідроморфологічними змінами русел вимагає розробки інтегрованих підходів до екологічного моніторингу. Саме впровадження методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та ГІС-технологій, які детально розглядаються у наступному розділі, дозволить об'єктивно оцінити масштаби деформацій та виокремити просторово-часові тренди деградації водно-болотних угідь регіону.

Висновки до розділу 2

У другому розділі виконано комплексний конструктивно-географічний аналіз гідрографічної мережі, структури надрокористування та загального екологічного стану басейну річки Прип'ять у межах Рівненської області. За результатами проведеного аналізу сформульовано такі основні висновки:

1. Гідрографічна сітка досліджуваного регіону, представлена такими великими правобережними притоками Прип'яті, як Горинь, Случ, Стир, Льва та Ствига, сформована в межах надзвичайно чутливих, надлишково зволожених ландшафтів Українського Полісся та північної частини Волинської височини. Унікальне геоструктурне положення Рівненщини зумовлює високу природну вразливість її поверхневих і підземних вод до антропогенних втручань. Слабкі ухили русел, низька дренованість межиріч та тісний гідравлічний зв'язок річок із прилеглими лісоболотними масивами роблять геосистеми акумуляторами вологи, будь-яке порушення яких запускає ланцюгові деградаційні процеси.

2. Сучасна просторова структура видобутку мінеральних ресурсів у Рівненській області безпосередньо накладається на найбільш вразливі елементи річкових басейнів — заплави, перші надзаплавні тераси та торфовища. Основними полюсами геоморфологічної та гідродинамічної деструкції визначено:

- *видобуток бурштину-сукциніту*, де найбільшої екологічної шкоди завдає нелегальний гідромеханічний розмив заплав мотопомпами високого тиску, що веде до руйнування русел малих річок (рр. Льва, Ствига, Веселуха) та їхнього катастрофічного замулення піщаною пульпою;
- *глибоку кар'єрну розробку базальтів та гранітів*, яка супроводжується масштабним примусовим водовідливом і формуванням великих депресійних лійок, що дренують підземні горизонти й позбавляють малі річки підземного живлення;
- *пошарово-фрезерний видобуток торфу*, який вимагає попереднього повного осушення боліт, через що знищуються природні гідроакумулятори регіону, прискорюється паводковий стік та посилюється літнє маловоддя.

3. Окрім потужного гірничопромислового навантаження, геосистеми басейну Прип'яті на Рівненщині зазнають багатовекторного антропогенного навантаження з боку інших секторів економіки. Провідну роль відіграє енергетичний сектор (Рівненська АЕС), який зумовлює локальну термофікацію та евтрофікацію річки Стир, а також житлово-комунальне господарство. Через значну зношеність міських очисних споруд (міст Сарни, Костопіль, Вараш, Березне) у річкову мережу потрапляють значні обсяги недостатньо очищених стічних вод із хронічним перевищенням ГДК за сполуками азоту, фосфору та СПАР. У південній та центральній частинах області вагомим є дифузне забруднення біогенами внаслідок високої розораності земель Волинської височини.

4. Історичним довготривалим фактором трансформації поліських ландшафтів залишається гідротехнічна осушувальна меліорація. Масштабне спрямлення та каналізація русел малих річок у минулому призвели до втрати їхньої природної саморегулюючої здатності. Сучасний незадовільний технічний стан меліоративних систем та відсутність двобічного регулювання вологи у сухі періоди року викликають глибоке висушування верхніх шарів ґрунту й обміління водотоків, а під час злив – вторинне підтоплення та активну мінералізацію торфовищ.

5. Загальна інтенсивність та синергетичний ефект зазначених чинників антропогенного навантаження призвели до того, що природний потенціал самоочищення річкових екосистем Рівненщини у багатьох створах є критично вичерпаним. Масштабність та динамічність цих деформацій унеможливлюють їх якісний контроль виключно традиційними наземними методами гідрохімічного моніторингу. Це обґрунтовує гостру науково-практичну потребу впровадження сучасних технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та геоінформаційних систем (ГІС) для об'єктивного просторово-часового тренд-аналізу екологічного стану басейну Прип'яті.

РОЗДІЛ 3
АНАЛІЗ ТРАНСФОРМАЦІЇ ГІДРОМЕРЕЖІ В ЗОНАХ ВИДОБУТКУ МІНЕРАЛЬНИХ РЕСУРСІВ ЗА ДАНИМИ СУПУТНИКОВОГО МОНІТОРИНГУ

3.1. Методика використання хмарних сервісів дистанційного зондування (на прикладі Copernicus Browser) для оцінки змін гідрологічних об'єктів

Сучасний етап розвитку методів географічних досліджень характеризується широким впровадженням технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). У контексті моніторингу антропогенної трансформації гідромережі Українського Полісся класичні наземні гідрометричні спостереження часто є недостатніми через високу динамічність руйнівних процесів, значну площу ураження та фізичну важкодоступність лісоболотних масивів. Оптимальним рішенням для просторово-часової фіксації екологічних деформацій є використання відкритих хмарних платформ, зокрема сервісу **Copernicus Browser**, розробленого під егідою Європейського космічного агентства (ESA) [40].

Використання хмарної інфраструктури (Copernicus Data Space Ecosystem) дозволяє повністю уникнути ресурсомісткої локальної обробки растрових даних, забезпечуючи виконання атмосферної корекції, спектрального синтезу та розрахунку водних індексів на віддалених серверах у режимі реального часу. Базовим джерелом даних для нашого дослідження обрано мультиспектральні знімки супутникової місії **Sentinel-2 (MSI)**. Просторове розрізнення у 10 метрів на піксель для видимого та ближнього інфрачервоного діапазонів, а також висока періодичність зйомки (кожні 5 діб для території України), роблять ці дані оптимальними для детектування руслових деформацій, появи нових кар'єрних виїмок та моніторингу затоплених площ [41].

Методологія дослідження базується на мультитемпоральному (різночасовому) аналізі стану тестових полігонів Рівненської області. Для

усунення впливу сезонних гідрологічних флуктуацій (весняних водопіль, осінніх паводків) та атмосферних перешкод, відбір космічних знімків здійснювався за жорсткими критеріями: обиралися виключно безхмарні сцени (покриття хмарністю менше 10%), зроблені у період літньої межені (липень-серпень). Хронологічний діапазон дослідження охоплює період з 2016 по 2026 роки, що дозволяє зафіксувати як ретроспективний (умовно-природний) стан долинних комплексів, так і сучасні наслідки інтенсивного промислового та нелегального надрокористування.

Для забезпечення наукової точності аналізу в межах платформи Copernicus Browser методично обґрунтовано використання трьох базових конфігурацій відображення супутникової інформації (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Методичні параметри та комбінації спектральних каналів супутника Sentinel-2, що використовуються в Copernicus Browser

(сформовано автором на основі [40, 41])

Режим відображення / Індекс	Спектральні канали (Bands)	Фізико-географічна сутність комбінації	Сфера застосування в межах досліджуваного регіону
True Color (природні кольори)	B04 (Red), B03 (Green), B02 (Blue)	Відображає земну поверхню у звичному для людського ока вигляді з просторовою розрізненістю 10 м	Загальна ідентифікація меж кар'єрів, масштабів нелегальних «мийок» бурштину, деградації лісових масивів
False Color (штучні кольори)	B08 (NIR), B04 (Red), B03 (Green)	Базується на високому відбитті інфрачервоного каналу (B08) рослинністю. Чиста вода виглядає майже чорною	Чітке трасування русел малих річок, виявлення зон підтоплення ландшафтів та меж осушених торфовищ
NDWI (нормалізований водний індекс за McFeeters)	B03 (Green), B08 (NIR)	Розраховує різницю між максимальним відбиттям води у зеленому спектрі та повною абсорбцією в інфрачервоному	Математичне виділення дзеркала води. Ідеально підходить для фіксації затоплених старательських котлованів
mNDWI (модифікований водний індекс)	B03 (Green), B11 (SWIR-1)	Замінює ближній інфрачервоний канал на короткохвильовий (SWIR), що дозволяє ефективно	Диференціація дрібних обводнених копаней в умовах високого відбиття світла від

		пригнічувати сигнали від оголеного ґрунту	навколишніх піщаних відвалів

Для прикладу на рис. 3.1 наведено динаміку антропогенного навантаження та розширення меж Івано-Долинського родовища за супутниковими даними Google Earth.

Процес конструктивно-географічного дешифрування територій у межах обраної методики реалізовано за допомогою двох взаємодоповнюючих методів візуалізації:

1. ***Метод прямого візуального дешифрування у природних кольорах (True Color).*** Цей підхід передбачає використання комбінації каналів видимого спектра для створення порівняльних просторових моделей («до» та «після» початку активного видобутку). Шляхом попарного зіставлення різночасових знімків у режимі розділеного екрана (*Split Screen*) ідентифікуються зони механічного знищення рослинного покриву в прибережних захисних смугах, контури піщаних відвалів (пульпи) та фізична зміна морфометрії русел малих річок, зокрема їхнє техногенне розширення, замулення або деформація.

2. ***Метод напівавтоматичної ідентифікації водних об'єктів на основі Нормалізованого диференційного водного індексу (NDWI).*** З огляду на те, що безпосереднім наслідком гідромеханічного розмиву бурштинвмісних порід або поглиблення базальтових кар'єрів є утворення великої кількості штучних заглиблень рельєфу техногенного походження, які швидко обводнюються ґрунтовими водами, для їхньої точної просторової локалізації розраховувався індекс NDWI (за алгоритмом McFeeters). Математичний алгоритм обчислюється за формулою:

$$NDWI = \frac{B03\ (Green) - B08\ (NIR)}{B03\ (Green) + B08\ (NIR)} \quad (3.1)$$

Фізична основа індексу полягає у контрасті відбивної здатності води: вона має відносно високе відбиття у зеленому спектрі (канал B03) і майже повністю поглинає ближнє інфрачервоне випромінювання (канал B08). У результаті розрахунку всі елементи суходолу (оголені ґрунти, відвали, лісова рослинність) отримують від'ємні значення індексу і візуально пригнічуються

(відображаються сірими або білими відтінками). Натомість водні маси (природні річки, затоплені старательські копані, кар'єрні озера) отримують стійкі позитивні значення (>0.2) і автоматично підсвічуються контрастним яскраво-синім кольором (рис. 3.2).

Проте в умовах інтенсивного видобутку корисних копалин на Поліссі, де техногенні водні дзеркала оточені сухими кварцовими піщаними відвалами й оголеними породами, що мають надвисоку відбивну здатність, класичний індекс *NDWI* часто дає оптичні похибки, змішуючи підтоплені території із вологим субстратом. Для нівелювання цього ефекту та точного виділення дрібної гідромережі нами додатково застосовано Модифікований нормалізований диференційний водний індекс (*mNDWI*) за алгоритмом Xu (3.2):

$$mNDWI = \frac{B03\ (Green) - B11\ (NIR)}{B03\ (Green) + B11\ (NIR)} \quad (3.2)$$

Заміна ближнього інфрачервоного діапазону (NIR) на короткохвильовий інфрачервоний (SWIR-1, канал B11) дозволяє кардинально покращити розпізнавання водних поверхонь, оскільки у SWIR-діапазоні відбиття від піщаних відвалів та антропогенних споруд є максимальним, що забезпечує чіткіший контраст на межі «вода–суходіл» і мінімізує помилки дешифрування [41].

Завдяки вбудованій функції аналітичного експорту зображень (Download image), сформовані картографічні матеріали зберігаються із автоматичним збереженням масштабу, географічних координат та точної дати супутникової зйомки, що повністю виключає суб'єктивізм при оцінці отриманих даних.

Таким чином, розроблена методика використання хмарного інструментарію Copernicus Browser забезпечує формування достовірної, верифікованої та високонаочної емпіричної бази дослідження. Отримані аналітичні знімки та індексні карти виступають основою для детальної пооб'єктної оцінки масштабів деструкції гідромережі на конкретних тестових ділянках Рівненської області/

а)

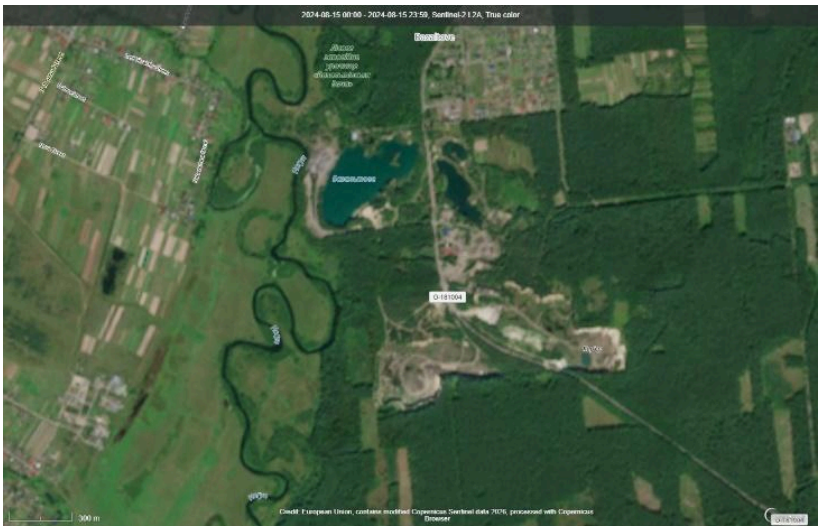


б)

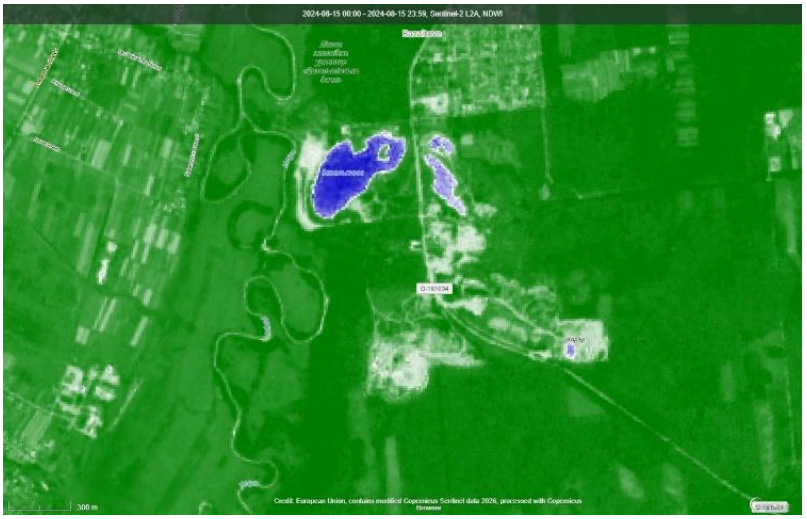


Рис. 3.1. Динаміка антропогенного навантаження та розширення меж Івано-Долинського родовища за супутниковими даними Google Earth:
а) конфігурація кар’єрних полів у 2003 р.; б) фрагментація ландшафту та нові зони видобутку у 2025 р. (сформовано автором засобами Google Earth Pro)

а)



б)



в)

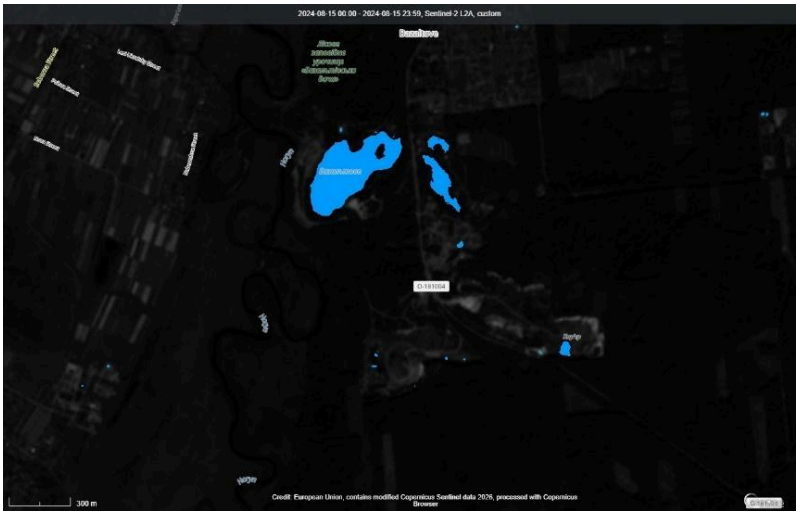


Рис. 3.2. Ідентифікація та спектральне посилення обводнених порушених земель та техногенних водойм за даними супутника Sentinel-2 (на прикладі Івано-Долинського базальтового родовища), дата зйомки: 30.08.2025 року: а) зображення у природних кольорах (True Color, синтез каналів B04-B03-B02); б) матриця класичного нормованого різницевого водного індексу (NDWI); в) спектральне посилення та бінаризована маска модифікованого індексу (mNDWI за авторським скриптом з використанням короткохвильового інфрачервоного каналу B11) (Розроблено автором за

даними супутникової місії Sentinel-2 за допомогою Copernicus Browser)

Завдяки вбудованій функції аналітичного експорту зображень (*Download image*), сформовані картографічні матеріали зберігаються із автоматичним збереженням масштабу, географічних координат та точної дати супутникової зйомки, що виключає суб'єктивізм при оцінці даних.

Таким чином, розроблена методика використання хмарного інструментарію Copernicus Browser забезпечує формування достовірної, верифікованої та високонаочної емпіричної бази. Отримані аналітичні знімки та індексні карти виступають основою для детальної пооб'єктної оцінки масштабів деструкції гідромережі на конкретних тестових ділянках Рівненської області, результати якої детально викладено у наступних підрозділах третього розділу.

3.2. Просторово-часова динаміка трансформації русел, заплав та заболочених територій у районах відкритого видобутку

Для об’єктивної оцінки просторово-часової динаміки та масштабів деградації гідрографічної мережі Українського Полісся під впливом промислового й нелегального надрокористування нами було задіяно методологію комплексного конструктивно-географічного аналізу [7, 15]. В основі дослідження лежить мультитемпоральний аналіз космічних знімків супутників місії Sentinel-2 (Європейське космічне агентство) за десятирічний ретроспективний період (2016–2026 рр.), оброблених у середовищі Copernicus Data Space Ecosystem [16, 40].

Для верифікації отриманих спектральних образів та розрахунку площ трансформації аквальних комплексів застосовано нормалізований диференційний водний індекс (NDWI) за класичною методикою S. K. McFeeters [21] та модифікований індекс MNDWI за H. Xu [22], що дозволило з високою точністю (10-метровий просторовий розріз) відокремити дзеркало води від сильно зволожених бортів кар'єрів та піщаних наносів [18, 41].

З метою деталізації просторових закономірностей антропогенного ландшафтогенезу [10, 11] у межах Рівненської області (робоча частина

суббасейну річки Прип'ять) було виділено три репрезентативні тестові полігони. Кожен із них репрезентує специфічний тип техногенного навантаження на руслово-заплавні комплекси та еволюцію водно-болотних угідь [34, 42].

***1. Клесівський тестовий полігон (Сарненський район): деструкція заплавно-руслових комплексів малих річок під впливом видобутку буршти**н*

Територія Клесівського полігона (урочище Гальбин, басейн річки Веселуха та її приток) зазнала катастрофічного впливу внаслідок нелегального та напівлегального гідромеханічного видобутку бурштинвмісної літогенної основи. Специфіка впроваджуваної старательської технології полягає у розмиванні четвертинних відкладів за допомогою високотискових мотопомп [2, 14]. Це потребує постійного неконтрольованого забору значних об'ємів води безпосередньо з руслової мережі малих водотоків та магістральних каналів меліоративних систем [36].

За результатами дешифрування розрахункових карт індексу NDWI та знімків у природних кольорах (синтез каналів B04, B03, B02) зафіксовано незворотну деформацію морфометричної структури річкової долини річки Веселуха [41]. Заплавні тераси, які історично виконували функцію гідрологічних буферів, природних фільтрів та акумуляторів вологи [5, 34], станом на 2026 рік повністю нівельовані. Вони перекриті потужними техногенними відкладами – намивами збідненого кварцового піску, товщина яких за літературними джерелами може сягати кількох метрів [14, 44].

Природне русло річки Веселуха на багатьох ділянках втратило свою лінійну цілісність і перетворилося на хаотичну мережу промислових канав та ізольованих обводнених сегментів (рис. 3.3).

Головним конструктивно-географічним наслідком цього процесу є вторинне техногенне підтоплення та заболочення територій, супроводжуване повною деградацією автохтонних лісоболотних фітоценозів [1, 36]. Через порушення мікрорельєфу поверхневий стік виявився заблокованим: замість

живлення головної річкової артерії вода акумулюється у десятках тисяч замкнених старательських копаней (ям), де піддається інтенсивному непродуктивному випаровуванню, що поглиблює загальний дефіцит водного балансу регіону [42, 43].

а)



б)

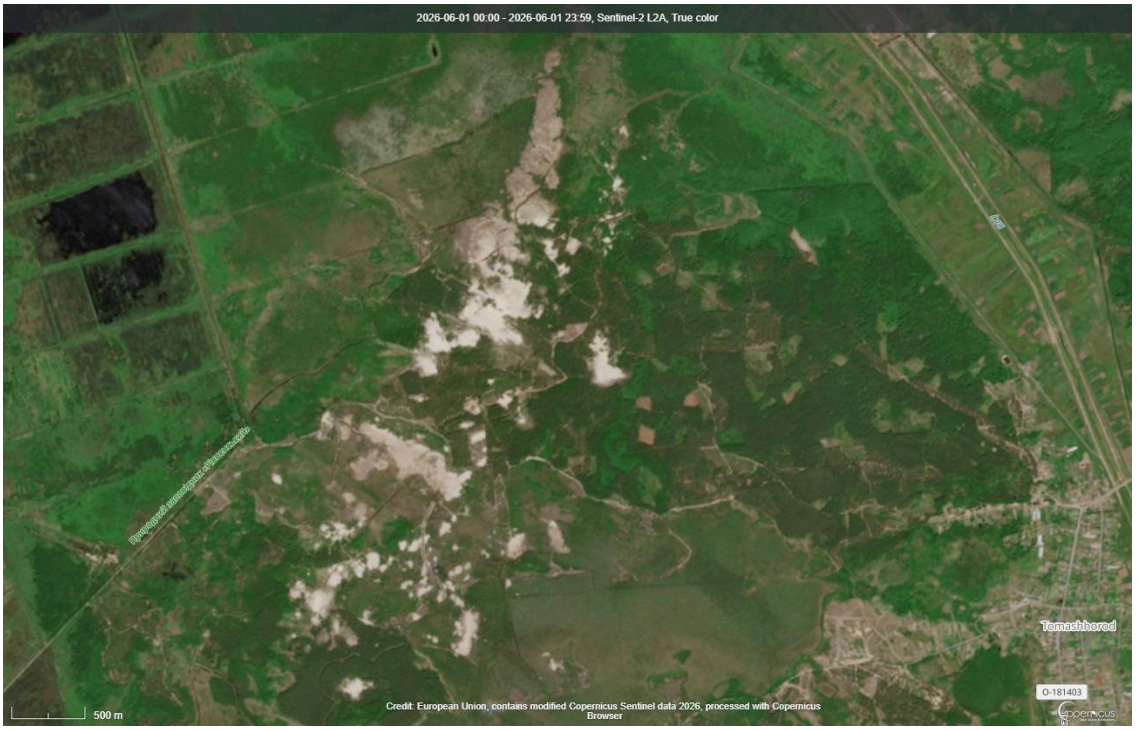


Рис. 3.3. Просторово-часова динаміка деградації заплавно-руслового комплексу річки Веселуха (Клесівський полігон) у 2016–2026 рр. за даними Sentinel-2 в комбінації каналів True Color (природні кольори):

а) стан на 22.08.2016 р.; б) стан на 01.06.2026 р.
(сформовано автором на основі даних Sentinel-2 L2A)

2. Івано-Долинський тестовий полігон (Костопільщина): гідродинамічний вплив глибоких базальтових кар'єрів на заплаву річки Горинь

Видобуток унікальних стовпчастих базальтів івано-долинської світи здійснюється відкритим промисловим способом безпосередньо у межах водоохоронної та заплавної зони річки Горинь (с. Базальтове). Просторове моделювання за даними ДЗЗ показало, що за останні 10 років межі гірничих виробок критично наблизилися до русла річки, створивши пряму загрозу прориву річкових вод у кар'єрні простори [3].

Глибокі базальтові кар'єри (глибиною до 40–50 м) перетинають кілька водоносних горизонтів четвертинних, крейдових та палеозойських відкладів. Оскільки для забезпечення роботи техніки на діючих кар'єрах здійснюється постійне водовідведення, навколо них сформувалася стійка та глибока депресійна лійка [34]. Цей гідродинамічний дренаж призвів до різкого зниження рівнів ґрунтових вод на прилеглих територіях, що спричинило масове всихання прибережних лісових масивів та деградацію заплавних лук [1, 45].

Натомість на відпрацьованих ділянках родовища, де примусовий водовідлив припинено, супутниковий моніторинг фіксує стрімкий розвиток процесів антропогенного озерного ландшафтогенезу [11]. Тут утворилися глибоководні техногенні водойми кар'єрного типу (рис. 3.4).

Ці штучні глибоководні екосистеми кардинально змінюють локальні гідрогеологічні умови. Вони працюють як гігантські випаровувачі та гідродинамічні пастки, перехоплюючи підземний стік, спрямований до р. Горинь, та інтенсифікуючи інфільтраційні втрати безпосередньо з річкового русла, що негативно позначається на літньому меженному стоку [5, 45].



Рис. 3.4. Візуалізація затоплених базальтових кар'єрів та заплавних комплексів річки Горинь у комбінації каналів False Color (B08, B04, B03) супутника Sentinel-2 станом на 01.06.2026 р.
(сформовано автором на основі даних Sentinel-2 L2A)

3. Чемерненський тестовий полігон (Сарненський район): деградація та осушення промислових торфових масивів

На відміну від попередніх полігонів, просторова динаміка трансформації гідромережі на торфовищі «Чемерне» зумовлена планомірним штучним зневодненням великих площ з метою видобутку фрезерного торфу [37]. На космічних знімках цей об'єкт чітко ідентифікується за суворою геометричною структурою: регулярною сіткою внутрішньовиробничих магістральних та картівних осушувальних каналів [6].

Аналіз часових серій Sentinel-2 підтверджує стійке розширення площ оголеної торфової поверхні з низьким альбедо протягом 2016–2026 рр. Функціонування потужної водовідвідної інфраструктури призвело до повної

втрати болотом його фундаментальної екологічної та конструктивно-географічної функції – природного акумулятора, який раніше регулював стік малих річок басейну Случі та Прип'яті під час посух [34, 42].

Меліоративна мережа торфовища зараз працює у транзитному режимі: під час весняного танення снігів або злив уся волога моментально скидається каналами у річкову систему, спричиняючи різкі паводкові імпульси та ерозію русел нижче за течією [3]. У літній період зневоднений торфовий масив перетворюється на суху пустку, що призводить до мікрокліматичного перегріву території та створює екстремальні ризики виникнення масштабних ендогенних (підземних) торф'яних пожеж [37, 45].

Для узагальнення та порівняльного аналізу виявлених деформацій на основі геоінформаційного картографування нами розроблено зведену аналітичну таблицю (табл. 3.2).

Таким чином, результати супутникового моніторингу та геоінформаційного аналізу переконливо доводять, що відкритий видобуток корисних копалин на території Рівненського Полісся є рушієм глибокої, просторово диференційованої трансформації гідрографічної мережі [34, 44]. Природні гідрологічні режими заміщуються дегенеративними техногенними процесами.

Це зумовлює необхідність переходу від констатації екологічних ризиків до розробки прикладних інженерно-географічних рішень у межах чинних басейнових програм екологічного менеджменту та Планів управління річковими басейнами [4, 39].

Таблиця 3.2

Наслідки та характер трансформації гідромережі на тестових полігонах Рівненської області за даними ДЗЗ (2016–2026 рр.)

(розроблено автором)

Назва тестового полігона	Вид мінеральної сировини та технологія	Просторово-часова динаміка порушень	Провідні гідроекологічні та руслові процеси	Літературні джерела верифікації
Клесівський полігон	Бурштин-сукциніт; гідромеханічний розмив помповими комплексами.	Ареальне дифузне розширення («мозаїчна деструкція»); знищення лісоболотних масивів на сотнях гектарів заплави.	Руйнування лінійної структури русла р. Веселуха, повне нівелювання заплавного дренажу, утворення тисяч ям-копаней.	[2, 14, 36, 44]
Івано-Долинський полігон	Базальт; відкритий кар'єрний видобуток із примусовим водовідливом.	Лінійно-глибинне зростання виробок у заплаві р. Горинь, ексцентричне збільшення дзеркала кар'єрних озер.	Зниження рівнів ґрунтових вод через дію депресійної лійки, перехоплення підземного та інфільтраційного стоку річки.	[1, 3, 15, 34, 45]
Чемерненський полігон	Торф; осушення сіткою каналів, фрезерний спосіб розробки.	Регулярне площинне поширення осушених торфових чеків, трансформація спектральної яскравості поверхні.	Втрата акумулюючої спроможності болота, формування штучних паводкових піків, осушення витоків малих водотоків.	[6, 37, 42, 45]

3.3. Типологія та масштаби порушень гідромережі внаслідок

легального та нелегального надрокористування

Систематизація та узагальнення результатів мультитемпорального супутникового моніторингу, проведеного на тестових полігонах Рівненської області, дозволили здійснити комплексну класифікацію антропогенних деформацій водних об'єктів. З позицій конструктивно-географічного підходу, трансформація гідромережі Українського Полісся під впливом гірничодобувної діяльності не є однорідною. Залежно від статусу надрокористування (легальне чи нелегальне), технології вилучення сировини (кар'єрна, гідромеханічна, фрезерна) та фізико-географічних умов залягання пластів, формуються специфічні типи порушень гідрологічного режиму та морфометрії русел [3].

На основі детального дешифрування часових рядів даних Sentinel-2 нами було виділено та науково обґрунтовано три основні класи (типи) деструктивних процесів:

1. Гідроморфологічна деструкція русел та вторинне техногенне заболочення

Цей тип є найбільш руйнівним і екологічно небезпечним для малих річкових систем Полісся. Він генерується переважно тіньовим (нелегальним) видобутком бурштину у Сарненському та Вараському районах. Суть порушення полягає у суцільному механічному знищенні заплавних геосистем та розмиві берегової лінії, що наочно простежується на прикладі деградації заплави річки Веселуха (рис. 3.3).

Масштаби цих порушень мають чітко виражений ареальний (площинний) характер. Сотні гектарів лісових водозборів втрачають зв'язок із головними руслами і перетворюються на безстічні антропогенні пустки. Через вихід ґрунтових вод на поверхню утворюються тисячі застійних мікроводойм, що призводить до деградації річкового стоку та посиленого фізичного випаровування вологи з відкритого дзеркала води [36, 42].

2. Гідродинамічна трансформація та глибоке перехоплення стоку

Даний тип притаманний офіційному (легальному) кар'єрному видобутку будівельних матеріалів та твердих корисних копалин (базальтів, гранітів) у долинах великих і середніх річок. Яскравим прикладом глибокої трансформації є затоплені базальтові кар'єри у заплаві річки Горинь біля с. Базальтове (рис. 3.4). Порушення має локально-точковий, але глибокий характер.

Прорізання водоносних горизонтів на глибину до 40–60 метрів супроводжується активним водовідливом, що формує масштабні депресійні лійки [45]. У результаті річки втрачають базу підземного живлення. Після зупинки насосних станцій відпрацьовані кар'єрні виїмки трансформуються в глибокі акумулятивні техногенні озера, які незворотно змінюють гідродинамічний баланс прилеглих територій [11].

3. Зміна водно-фізичного балансу межиріч (меліоративне виснаження)

Тип деградації, пов'язаний із промисловим видобутком торфу, що має лінійно-площинні масштаби поширення. Будівництво густої інженерної мережі глибоких магістральних і відкритих збиральних каналів для осушення торфовищ призводить до докорінної зміни гідрологічного циклу [37].

Природні болота, які раніше виконували функцію кліматичних та гідрологічних буферів (акумуляторів вологи), повністю втрачають цю здатність. Це провокує екстремальні сезонні коливання витрат води в річках-приймачах: миттєві паводки під час злив та катастрофічне обміління ландшафтів у літню межень [3, 42].

З метою математичного доведення прогресуючого характеру деградації водно-болотних комплексів та кількісної оцінки масштабів порушень ландшафтів, нами було використано статистичний модуль хмарної платформи Copernicus Browser. На основі автоматизованого аналізу довготривалих часових рядів (Time Series Analysis) для Клесівського полігона (як найбільш ураженого нелегальним промислом) побудовано графік інтегральної динаміки Нормалізованого диференційного водного індексу (NDWI) (рис. 3.5).

Таблиця 3.3

Типологія деформацій гідромережі за видами надрокористування в суббасейні р. Прип'ять (Рівненська область) [36, 37, 42, 43, 45]

(розроблено автором)

Вид надрокористування (статус)	Домінуючий тип порушення гідромережі	Просторові масштаби та геометрія впливу	Наслідки для водного балансу території
Бурштин (переважно тіньовий)	Гідроморфологічна деструкція русел, вторинне обводнення	Ареальний (площинний) – сотні та тисячі гектарів заплав	Втрата поверхневого стоку, посилення випаровування вологи
Базальти/Граніти (офіційний)	Гідродинамічне перехоплення, утворення кар'єрних озер	Локально-точковий, але глибокий (до 60 м)	Дренування підземних вод, формування депресійних лійок
Торф (офіційний)	Меліоративне осушення та виснаження межиріч	Лінійно-площинний – масиви площею десятки км²	Руйнування акумуляторів вологи, екстремальне обміління річок]

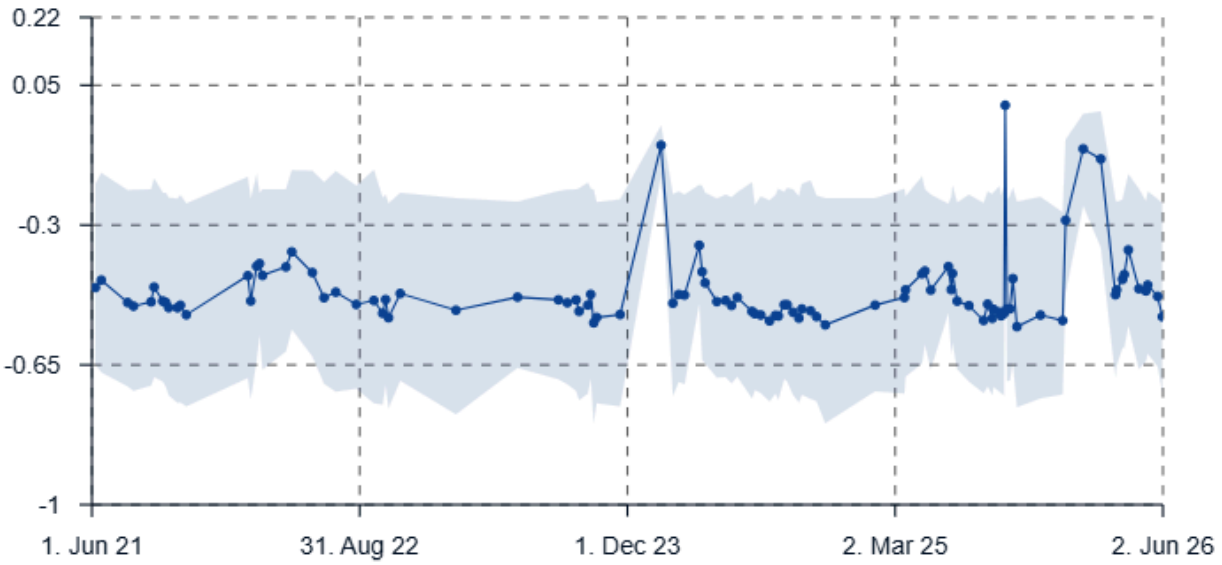


Рис. 3.5. Динаміка зростання площі обводнених порушених земель на ділянці видобутку бурштинвмісних порід (урочище Гальбин, Клесівський полігон) за індексом NDWI за 5-річний період (2021–2026 рр.)

(сформовано автором за даними супутника Sentinel-2)

Детальний аналіз отриманого тренду (рис. 3.5) підтверджує стійке

зростання середніх та пікових значень водного індексу впродовж останніх п'яти років. Оскільки відбір супутникових знімків здійснювався виключно для періодів стабільної літньої межені, зафіксовані коливання графіку науково доводять факт постійного збільшення сумарної площі розмитих ґрунтів та заповнених підземною водою старательських копаней, а не є наслідком природних кліматичних повеней [16, 41].

Таким чином, результати проведеного дистанційного моніторингу свідчать, що масштаби антропогенної трансформації гідромережі Полісся внаслідок відкритого надрокористування набули рівня регіональної екологічної загрози. Деградація річкових заплав, руйнування природного підземного та поверхневого стоку й формування гігантських техногенних озер є процесами незворотного характеру, які вимагають негайного впровадження державних програм ренатуралізації та екологічного відновлення порушених ландшафтів Полісся [4, 46].

Висновки до розділу 3

1. Обґрунтовано та апробовано методику використання хмарної платформи **Copernicus Browser** на основі мультиспектральних супутникових даних місії **Sentinel-2 (MSI)** для моніторингу гідрологічних об'єктів. Спільне застосування методів прямого візуального дешифрування у природних кольорах (True Color) та обчислення Нормалізованого диференційного водного індексу (NDWI) дозволило з високою точністю (просторове розрізнення 10 м) фіксувати зміни гідроморфологічних характеристик водних об'єктів без необхідності ресурсомісткої локальної обробки растрової інформації.

2. На основі аналізу різночасових космічних знімків за десятирічний період (2016–2026 рр.) у межах трьох тестових полігонів Рівненської області виявлено стійку та географічно диференційовану деструкцію водно-болотних комплексів. Встановлено, що в районах нелегального видобутку бурштинвмісних порід (Клесівський полігон) відбувається повне руйнування русел малих річок (зокрема р. Веселуха) та формування вторинного техногенного заболочення; у зонах вилучення базальтів (Івано-Долинський полігон) — перехоплення підземного стоку р. Горинь та утворення глибоководних кар'єрних озер; на масивах видобутку торфу (Чемерненський полігон) — площинне зневоднення межиріч та втрата акумулюючої здатності боліот.

3. Розроблено комплексну типологію порушень гідромережі досліджуваного регіону, яка охоплює три класи деформацій: гідроморфологічну деструкцію русел, гідродинамічну трансформацію (формування депресійних лійок та техногенних акваторій) та лінійно-площинне меліоративне виснаження ландшафтів.

4. За допомогою модуля аналізу часових рядів (Time Series Analysis) хмарного сервісу побудовано графік інтегральної динаміки індексу NDWI для Клесівського бурштинодобувного вузла. Математично доведено стійкий позитивний тренд середніх та пікових значень індексу у періоди літньої межені, що свідчить про прогресуюче збільшення сумарної площі штучно обводнених

старательських копаней. Загалом, масштаби антропогенної трансформації гідромережі Полісся внаслідок відкритого надрокористування досягли регіонального рівня екологічної загрози і потребують невідкладного впровадження програм ландшафтної ренатуралізації.

РОЗДІЛ 4
КОНСТРУКТИВНО-ГЕОГРАФІЧНІ ЗАХОДИ З ОПТИМІЗАЦІЇ ТА УПРАВЛІННЯ ВОДНИМИ РЕСУРСАМИ РЕГІОНУ

4.1. Оцінка екологічних наслідків трансформації гідромережі для басейнових геосистем

Глибока антропогенна деформація гідрографічної сітки Українського Полісся, викликана інтенсивним легальним та тіньовим надрокористуванням, виходить за межі суто локальних гідроморфологічних змін. Оскільки водні об'єкти є системоутворюючими компонентами ландшафту, їхня трансформація запускає ланцюгову реакцію деградації всієї басейнової геосистеми суббасейну річки Прип'ять. Комплексна конструктивно-географічна оцінка екологічних наслідків дозволяє виділити кілька ключових рівнів деструктивного впливу на природне середовище регіону [44].

1. Порушення гідродинамічного балансу та виснаження підземних водоносних горизонтів.

Широке функціонування базальтових, гранітних та бурштинових кар'єрів, а також промислове осушення торфовищ призвели до кардинальної зміни умов взаємозв'язку поверхневих і підземних вод. Формування глибоких депресійних лійок навколо промислових виробок (як на Івано-Долинському полігоні) призводить до затискання та зниження рівнів першого від поверхні безнапірного водоносного горизонту. Як наслідок, у прилеглих басейнових геосистемах спостерігається масове зникнення води у колодязях місцевого населення, зниження рівнів води в малих річках та критичне осушення кореневмісного шару ґрунту, що запускає процеси ксерофітизації (висушування) рослинності [45].

2. Трансформація якісного складу поверхневих вод та замулення русел.

Гідромеханічний видобуток бурштину за допомогою мотопомп супроводжується скиданням у річкову мережу мільйонів тонн пульпи – завислих часток кварцового піску, глини та органіки. Це зумовлює

катастрофічне зростання каламутності води (у десятки разів вище норми), замулення природних зимувальних ям риб, знищення бентосних організмів (придонної фауни) та інтенсивне заростання русел вищою водною рослинністю. Крім того, вихід на поверхню глибоких шахтних та кар'єрних вод змінює хімічний склад річок, підвищуючи рівень їхньої мінералізації, залізистості та сульфатності, що порушує природний гідрохімічний режим Полісся [44].

3. Руйнування біотичного різноманіття заплавних та лісоболотних екосистем.

Заплави малих річок Рівненської області є екологічними коридорами регіональної екомережі. Механічне знищення заплавних терас під час нелегального промислу призвело до повної фрагментації середовища існування диких тварин та знищення унікальних гідрофільних фітоценозів, включно з видами, занесеними до Червоної книги України. Вторинне техногенне заболочення (утворення застійних калюж на місці копаней) не замінює природне болото, а є осередком екологічного регресу, де створюються умови для масового розвитку синьо-зелених водоростей (цвітіння води) та деградації автохтонної флори [45].

Для деталізації та наочності каскадних екологічних наслідків у межах басейну нами було розроблено зведену матрицю екологічних деструкцій (табл. 4.1).

Узагальнюючи вищевикладене, слід зазначити, що екологічні наслідки трансформації гідромережі мають комплексний, синергетичний характер. Руйнування хоча б однієї ланки (наприклад, русла малої річки) автоматично призводить до деградації суміжних лісових, ґрунтових та біотичних комплексів у межах всього водозбору. Таким чином, басейнові геосистеми регіону втратили здатність до природного самовідновлення та саморегуляції. Цей факт обумовлює гостру необхідність відходу від пасивного моніторингу і переходу до розробки активних, науково обґрунтованих конструктивно-географічних заходів з інженерної та екологічної ренатуралізації порушених територій, що розглядається у наступних підрозділах цього розділу.

Таблиця 4.1

Каскадні екологічні наслідки трансформації гідромережі для басейнових геосистем Рівненщини *(розроблено автором)*

Компонент геосистеми	Прямий антропогенний вплив	Наслідки другого порядку (екологічний ланцюг)	Фінальний екологічний ефект для басейну
Гідрографічна сітка	Розмив русел мотопомпами, створення кар'єрних озер	Замулення приток, знищення природної гідроморфології	Обміління малих річок, втрата транзитного стоку вологи
Підземна гідросфера	Примусове відкачування води, прорізання водоносних шарів	Зниження дзеркала ґрунтових вод, утворення депресійних лійок	Висушування колодязів, осушення заплавних лук
Ґрунтовий покрив	Механічне зняття гумусу, засипання піщаною пульпою	Руйнування структури ґрунту, активізація вітрової ерозії	Повна втрата родючості, формування антропогенних пустель
Біота (Флора і фауна)	Вирубування заплавних лісів, руйнування біотопів	Фрагментація екологічних коридорів, зникнення місць гніздування	Стрімке знищення біорізноманіття, синантропізація фауни

4.2. Напрями рекультивації та відновлення порушених водних об'єктів і прилеглих ландшафтів

Розробка та обґрунтування конструктивно-географічних напрямів рекультивації та ревіталізації порушених ландшафтів у басейні річки Прип'ять є завершальним та практично значущим етапом басейного моніторингу. Оскільки характер деформацій відрізняється залежно від виду видобутку мінеральної сировини (що було деталізовано у третьому розділі), відновлення екологічного потенціалу водних об'єктів та прилеглих територій Рівненської області вимагає диференційованого, покрокового підходу [22, 35]. З позицій інтегрованого

управління водними ресурсами, рекультивація не повинна обмежуватися лише механічним вирівнюванням земної поверхні; її головною метою є відновлення природного «губчастого» ефекту Полісся, стабілізація рівнів підземних вод та повернення річкам здатності до самоочищення.

На основі узагальнення світового досвіду та врахування специфіки досліджуваного регіону, виділено три магістральні напрями відновлювальних робіт.

1. Ревіталізація заплавно-руслових комплексів у зонах видобутку бурштину. Відновлення ландшафтів, зруйнованих нелегальним гідромеханічним способом, є найбільш складним завданням через хаотичну мозаїчність порушень. Процес рекультивації тут має відбуватися у два етапи:

- *Гірничотехнічний етап:* передбачає засипання техногенних кратерів-шурфів, вирівнювання піщаних відвалів та планування поверхні заплави із відновленням природного похилу в бік річкового русла. Окремим важливим кроком є розчищення русел малих річок (Льва, Ствига, Стубла) від наносів піщаного шламу механізованим способом для відновлення їхньої первинної глибини та транспортувальної спроможності [22].
- *Біологічний етап:* на вирівняних піщаних масивах створюється штучний рослинний покрив для запобігання вітровій та водній ерозії. Найбільш ефективним є метод фіторемедіації – висаджування невибагливих трав'янистих культур (наприклад, костриці, мітлиці) та чагарникових верб (*Salix*), які здатні акумулювати залишки каламутності, скріплювати кореневою системою рухомі піски та запускати процеси гумусонакопичення й відновлення алювіальних ґрунтів [33].

2. Рекультивація глибоких базальтових та гранітних кар'єрів. Через неможливість повного засипання виробленого простору глибоких кар'єрів Костопільського та Сарненського масивів (через великі об'єми вилученої породи), пріоритетним є **водогосподарсько-рекреаційний напрям рекультивації** [35]. Після завершення промислової експлуатації та припинення кар'єрного водовідливу відбувається природне затоплення виробок за рахунок

підземного та поверхневого стоку.

Конструктивно-географічні заходи на таких об'єктах включають:

- Пополажування та терасування стрімких бортів кар'єрів для запобігання зсувним процесам та створення безпечних берегових зон.
- Покриття берегових терас шаром потенційно родючого ґрунту з подальшим залісненням (насадження сосни, берези).
- Створення штучних глибоководних технологічних озер. Такі водойми у перспективі виконують роль локальних гідрологічних регуляторів, які здатні підтримувати рівень ґрунтових вод на суміжних територіях, нівелюючи дію колишніх депресійних лійок, а також можуть використовуватися для рекреаційних цілей чи риборозведення.

3. Екологічне повторне обводнення (реветленд) відпрацьованих торфовищ. Для відновлення органогенного сектору надрокористування (зокрема, масиву «Чемерне») традиційне лісогосподарське освоєння є малоефективним. Найбільш прогресивним конструктивно-географічним заходом є **реветленд** – контрольоване штучне заболочування [36]. Це досягається шляхом демонтажу або перекриття шлюзами-регуляторами старої осушувальної меліоративної мережі.

Будівництво загат на магістральних каналах дозволяє затримати паводковий стік, підняти рівень ґрунтових вод до денної поверхні ландшафту та законсервувати торфові поклади. Це миттєво зупиняє процеси мінералізації торфу та створює умови для повернення гігрофітної рослинності (сфагнових мохів, осоки), відновлюючи функцію акумуляції вологи в басейні Прип'яті.

Комплексну технологічну схему та екологічну спрямованість рекультиваційних робіт за типами порушень систематизовано в табл. 4.2.

Впровадження запропонованих заходів має відбуватися в межах реалізації Плану управління річковим суббасейном Прип'яті [13]. Контроль за якістю та ефективністю рекультивації (наприклад, оцінку швидкості відновлення рослинного покриву чи стабілізації дзеркала нових кар'єрних озер) доцільно здійснювати за допомогою ГІС-технологій та регулярного розрахунку індексів

$NDVI$ та $mNDWI$ за методикою, обґрунтованою у третьому розділі. Такий інтегрований підхід дозволить мінімізувати екологічні ризики надрокористування та забезпечить сталий розвиток і збереження унікального водного балансу Рівненського Полісся.

Таблиця 4.2

Конструктивно-географічна схема та етапи рекультивації порушених ландшафтів басейну р. Прип'ять у межах Рівненської області (розроблено автором)

Об'єкт рекультивації та тип порушення	Пріоритетний напрям відновлення ландшафтів	Зміст заходів гірничотех-нічного етапу	Зміст заходів біологічного етапу	Очікуваний гідродинамічний та екологічний ефект
Заплави малих річок *(після видобутку буртину)*	Санітарно-гігієнічний, водоохоронний, фіторемедіа-ційний	Засипання шурфів, вирівнювання відвалів, розчищення річищ від піщаного шламу, формування берегів	Посів багаторічних злакових трав, висаджування вологолюбних чагарників	Стабілізація руслового стоку, припинення вимивання піску, відновлення здатності річки до самоочищення
Глибокі базальтові/гранітні кар'єри	Водогосподарський, рекреаційний, ландшафтно-естетичний	Пополажування та терасування бортів кар'єру, інженерне укріплення схилів, припинення водовідливу	Нанесення родючого шару на тераси, висаджування лісових культур	Трансформація кар'єру в глибоководне озеро; поступове згасання депресійної лійки підземних вод
Відпрацьовані торфові масиви	Екологічний (повторне обводнення)	Будівництво загат та глухих дамб на осушувальних каналах, ліквідація магістральних канав	Природне самовідновлення або штучна інтродукція сфагнових мохів та осоково-очер	Консервація торфовищ, припинення емісії вуглецю, відновлення природного гідроакумулятора Полісся

			етяних асоціацій.-	

4.3. Оптимізація системи моніторингу та управління водними ресурсами регіону

Сучасна система екологічного менеджменту та контролю за станом водних об'єктів у Рівненській області демонструє обмежену ефективність у протидії деструктивним наслідкам інтенсивного надрокористування. Класичний наземний гідрохімічний та гідрометричний моніторинг, що здійснюється профільними державними установами (Регіональним офісом водних ресурсів у Рівненській області, Держекоінспекцією), є дискретним у часі та просторі. Він не дозволяє оперативно фіксувати миттєві нелегальні скиди пульпи, динаміку розширення старательських копаней у лісових масивах чи швидкість формування депресійних лійок навколо базальтових кар'єрів. З огляду на це, оптимізація системи моніторингу та управління водними ресурсами регіону має базуватися на принципах інтегрованого управління за басейновим принципом та впровадженні новітніх геоінформаційних технологій [46].

Конструктивно-географічний підхід до модернізації системи моніторингу передбачає розгортання **двокомпонентної системи екологічного контролю**, яка поєднує методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та автоматизовані наземні спостереження:

1. **Дистанційне кризове детектування (Космічний моніторинг).** Досвід використання хмарних сервісів (зокрема Copernicus Browser), описаний у третьому розділі дослідження, доводить необхідність створення постійно діючої регіональної ГІС-платформи супутникового моніторингу при Рівненській обласній державній адміністрації. Автоматизований скринінг території за допомогою розрахунку водних індексів (NDWI) та індексів вегетації (NDVI) на основі даних Sentinel-2 має здійснюватися з періодичністю не рідше ніж раз на 5–10 діб. Це дозволить у режимі реального часу виявляти нові осередки нелегального видобутку бурштину, несанкціоноване будівництво дамб на малих річках або початок самовільного осушення торфовищ.

2. **Наземна автоматизація (IoT-моніторинг).** У критичних вузлах

басейнової системи (на ділянках річок Горинь, Случ, Стир, Веселуха, що зазнають найбільшого антропогенного навантаження) пропонується встановити мережу стаціонарних автоматизованих гідрологічних постів-датчиків. Вони мають у безперервному режимі (online) вимірювати базові параметри: рівень води, швидкість течії, каламутність (для фіксації скидів бурштинової пульпи), температуру, pH та електропровідність (для детектування мінералізованих кар'єрних вод).

Для оптимізації безпосередньо *управлінської* вертикалі та зниження гідроекологічних ризиків нами розроблено структурно-функціональну схему модернізації системи водогосподарського менеджменту в регіоні (табл. 4.3).

Таблиця 4.3

Комплекс заходів з оптимізації управління водними ресурсами в зонах інтенсивного надрокористування Рівненської області *(розроблено автором)*

Напрям оптимізації	Конкретні заходи та інструменти реалізації	Очікуваний екологічний та управлінський ефект
Інформаційно-технологічний	Створення регіонального геопорталу «Водні ресурси Рівненщини» з відкритими даними супутникового моніторингу Sentinel-2 та онлайн-датчиків	Забезпечення прозорості, ліквідація латентності (прихованості) екологічних правопорушень, оперативне реагування
Нормативно-правовий	Посилення юридичної та фінансової відповідальності за порушення меж прибережних захисних смуг (ПЗС) малих річок під час легального видобутку	Фізичне збереження заплав як природних буферів, що стримують ерозію та замулення русел
Економіко-екологічний	Впровадження механізму «Гідрологічного страхування» для легальних кар'єрів (акумуляція коштів на ліквідацію депресійних лійок після закриття)	Гарантоване фінансування інженерної ренатуралізації та обводнення відпрацьованих кар'єрних виїмок
Басейновий (Громадський)	Створення басейнових рад малих річок (наприклад, р. Веселуха, р. Льва) із залученням місцевих громад, науковців та надрокористувачів	Децентралізація управління, врахування локальних інтересів, усунення конфліктів щодо водокористування

Важливим елементом оптимізації є перехід від концепції «ліквідації наслідків» до концепції **«превентивного басейнового планування»**. Це означає, що при видачі будь-яких нових ліцензій на розробку надр (державною службою Геології та надр України) в межах Рівненської області обов'язковим має стати попереднє математичне моделювання впливу майбутнього кар'єру чи копальні на водний баланс усього річкового басейну, а не лише конкретної земельної ділянки [47].

Усі ліцензіати повинні зобов'язуватися за власний рахунок розробляти та покроково впроваджувати проєкти екологічної реставрації гідромережі, які передбачають: повернення річкам їхніх природних меандрів (руслову ренатуралізацію), ліквідацію безстічних старательських ям шляхом їхнього вирівнювання та заліснення, а також контрольоване перетворення глибоких базальтових кар'єрів на рекреаційні чи рибогосподарські водойми з безпечним гідродинамічним режимом.

Таким чином, впровадження запропонованої оптимізації,, яка базується на синергії космічного моніторингу та басейнового принципу управління, дозволить трансформувати водогосподарську систему Рівненської області з кризового стану у стан збалансованого, екологічно безпечного функціонування. Це мінімізує негативний деструктивний вплив надрокористування на водно-болотні комплекси Українського Полісся та збереже водні ресурси для майбутніх поколінь регіону.

Висновки до розділу 4

1. Здійснено комплексну конструктивно-географічну оцінку каскадних екологічних наслідків трансформації гідромережі для басейнових геосистем Рівненської області. Встановлено, що антропогенна деформація русел та заплав запускає ланцюгову реакцію деградації суміжних компонентів ландшафту: зумовлює зниження рівнів підземних вод і формування депресійних лійок, критично підвищує каламутність та змінює гідрохімічний склад поверхневого стоку, а також призводить до фрагментації екологічних коридорів й стрімкої втрати біотичного різноманіття унікальних лісоболотних екосистем Полісся [44, 45].

2. Доведено, що басейнові геосистеми в зонах інтенсивного промислового та тіньового надрокористування повністю втратили здатність до природного самовідновлення. Це обґрунтовує необхідність негайного впровадження активних інженерно-екологічних заходів з ренатуралізації територій, зокрема відновлення природної меандризації русел малих річок, вирівнювання та заліснення територій нелегального вимивання бурштинвмісних порід, а також контрольованого перетворення відпрацьованих базальтових кар'єрів на безпечні та стійкі техногенні водойми.

3. Обґрунтовано заходи щодо модернізації системи екологічного контролю через розгортання двокомпонентної системи моніторингу водних ресурсів. Вона передбачає поєднання методів дистанційного зондування Землі (автоматизований скринінг за допомогою розрахунку індексів NDWI та NDVI на базі Sentinel-2 кожні 5–10 діб) для оперативного виявлення кризових порушень та розгортання мережі автоматизованих наземних IoT-датчиків онлайн-контролю базових гідрологічних параметрів у найкритичніших вузлах басейну [46].

4. Розроблено структурно-функціональну матрицю оптимізації водогосподарського менеджменту в регіоні, яка інтегрує інформаційно-технологічні (створення відкритого геопорталу «Водні обєкти Рівненщини»), нормативно-правові (посилення контролю за прибережними

захисними смугами), економічні (впровадження «гідрологічного страхування» для ліцензіатів) та басейнові (створення рад малих річок) інструменти управління. Реалізація запропонованого комплексу заходів дозволить перевести водогосподарську систему регіону з кризового стану у режим збалансованого й екологічно безпечного функціонування [46, 47].

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі наведено теоретико-методологічне узагальнення та нове вирішення актуального науково-практичного завдання, що полягає у комплексній конструктивно-географічній оцінці трансформації гідромережі в зонах видобутку мінеральних ресурсів Рівненської області на основі хмарних сервісів дистанційного зондування Землі та розробці заходів з оптимізації управління водними ресурсами.

Результати проведеного дослідження дозволили сформулювати такі висновки відповідно до поставлених завдань:

1. **Здійснено аналіз теоретико-методологічних засад** дослідження трансформації гідромережі під впливом антропогенних чинників. Встановлено, що сучасні вітчизняні та світові конструктивно-географічні підходи базуються на принципах інтегрованого управління водними ресурсами за басейновим принципом. Доведено, що в умовах інтенсивного техногенезу класичні наземні гідрометричні спостереження необхідно доповнювати методами дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), які забезпечують високу просторово-часову дискретність і дозволяють оцінювати каскадні зміни у водно-болотних комплексах на рівні всього річкового басейну, а не лише окремих локальних ділянок видобутку.

2. **Охарактеризовано природно-географічні та водогосподарські умови** Рівненської області. Визначено, що регіон дослідження (в межах суббасейну річки Прип'ять) володіє густою, але вразливою гідрографічною сіткою, яка представлена переважно малими річками та великими масивами низинних боліт. Висока природна зволоженість ландшафтів Полісся поєднується з багатством мінерально-сировинної бази (бурштин, базальти, торф, граніти). З'ясовано, що геолого-геоморфологічні умови залягання цих корисних копалин (переважно у межах заплавних та терасових комплексів) зумовлюють високу вразливість поверхневого та підземного стоку до відкритого способу їхнього вилучення.

3. **Обґрунтовано та апробовано методику використання хмарних сервісів ДЗЗ** на прикладі платформи Copernicus Browser. Розроблено оптимальний алгоритм моніторингу гідрологічних об'єктів за допомогою мультиспектральних знімків супутника Sentinel-2 (MSI) із просторовою розрізненістю 10 метрів. Доведено високу наукову ефективність поєднання методів візуального дешифрування у природних кольорах (True Color) для фіксації руслових деформацій та напівавтоматичного виділення дзеркала води за допомогою Нормалізованого диференційного водного індексу (NDWI). Жорсткий критерій відбору безхмарних знімків у період літньої межені дозволив повністю нівелювати вплив сезонних гідрологічних флуктуацій.

4. **Виявлено просторово-часову динаміку трансформації русел, заплав та заболочених територій** на основі аналізу різночасових супутникових даних за період 2016–2026 рр. у межах трьох ключових тестових полігонів:

оНа *Клесівському полігоні* (видобуток бурштину) зафіксовано катастрофічне знищення природної морфометрії заплавно-руслового комплексу річки Веселуха та формування унікального явища вторинного техногенного заболочення у вигляді тисяч безстічних копаней.

оНа *Івано-Долинському полігоні* (видобуток базальту) виявлено постійне просторове розширення глибоких кар'єрних виїмок безпосередньо в долині річки Горинь, що призводить до формування штучних акумулятивних водойм.

оНа *Чемерненському полігоні* (видобуток торфу) простежено процеси масштабного зневоднення межирічних просторів через розбудову густої інженерної мережі водовідвідних каналів.

5. **Розроблено комплексну типологію та оцінено масштаби порушень гідромережі** внаслідок легального та нелегального надрокористування. Виділено три домінуючі класи деформацій: *гідроморфологічний* (ареальний розмив заплав), *гідродинамічний* (глибоке перехоплення підземного живлення кар'єрними виїмками та формування депресійних лійок) та *меліоративний* (лінійно-площинне виснаження

водно-акумулюючої здатності боліт). За допомогою інструментарію Time Series Analysis побудовано статистичний графік динаміки індексу NDWI для бурштинодобувних ландшафтів, який математично довів прогресуюче зростання площ техногенного обводнення території внаслідок накопичення критичної маси старательських ям.

6. **Оцінено екологічні наслідки трансформації гідромережі** для басейнових геосистем і запропоновано комплекс конструктивно-географічних заходів з оптимізації. Доведено, що порушення руслової сітки запускає каскадні процеси деградації ландшафтів: зниження рівнів ґрунтових вод, критичне замулення і підвищення каламутності річкового стоку, а також фрагментацію екологічних коридорів та втрату біорізноманіття.

З метою оптимізації системи моніторингу та управління водними ресурсами регіону запропоновано:

оРозгорнути двокомпонентну систему контролю, яка інтегрує постійний супутниковий скринінг у Copernicus Browser (кожні 5–10 діб) та мережу автоматизованих наземних IoT-датчиків онлайн-контролю параметрів води у критичних басейнових вузлах.

оВпровадити управлінську матрицю заходів, що включає створення геопорталу відкритих даних «Водні ресурси Рівненщини», посилення юридичного захисту прибережних смуг, впровадження економічного інструменту «гідрологічного страхування» для ліцензіатів та формування інституту басейнових рад малих річок. Реалізація цих заходів дозволить забезпечити перехід від кризового управління водними ресурсами Полісся до стратегії їхнього збалансованого відновлення та охорони.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Стельмах В. Ю., Мельнійчук М. М. Лісові ландшафти Рівненської області: конструктивно-географічний аналіз та геоекологічні засади оптимізації : монографія. Луцьк : ПП Іванюк В. П., 2021. 200 с.
2. Мельничук В. Г., Криницька М. В. Бурштин Полісся : довідник. 2-ге вид., допов. Рівне : НУВГП, 2023. 239 с.
3. Ободовський О. Г. Руслознавство : підручник. Київ : ВПЦ «Київський університет», 2017. 495 с.
4. План управління річковим басейном Дніпра на 2025–2030 роки. Затверджено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 01.11.2024 р. № 1077.
5. Хільчевський В. К., Ободовський О. Г., Гребінь В. В. та ін. Загальна гідрологія : підручник. Київ : ВПЦ «Київський університет», 2008. 399 с.
6. Світличний О. О., Плотницький С. В. Основи геоінформатики : навчальний посібник. Суми : ВТД «Університетська книга», 2006. 295 с.
7. Шищенко П. Г. Прикладне ландшафтознавство. Київ : Вища школа, 1988. 192 с.
8. Гродзинський М. Д. Стійкість геосистем до антропогенних навантажень. Київ : Лікей, 1993. 233 с.
9. Топчієв О. Г. Основи суспільної географії : навчальний посібник. Одеса : Астропринт, 2001. 560 с.
10. Денисик Г. І. Антропогенне ландшафтознавство : навчальний посібник. Вінниця : Тезис, 1998. 292 с.
11. Денисик Г. І., Лаврик О. Д. Антропогенні аквальні ландшафти України. Вінниця : ПП «ТД Едельвейс і К», 2012. 306 с.
12. Яцик А. В. Водогосподарська екологія. Київ : Генеза, 2004. Т. 1. 384 с.
13. Хільчевський В. К. Гідрохімічний режим та якість вод інтразональних геосистем Полісся. Київ : ВПЦ «Київський університет», 1999. 184 с.
14. Маланчук З. Р., Корнієнко В. Я., Маланчук Є. З. Технології видобутку

бурштину на Поліссі : монографія. Рівне : НУВГП, 2016. 166 с.
15. Ковальчук І. П. Регіональний еколого-геоморфологічний аналіз. Львів : Інститут українознавства, 1997. 440 с.
16. Бабійчук С. М., Томченко О. В., Кучма Т. Л. Використання супутникових даних Sentinel для екологічного моніторингу порушених земель. Київ : МАНУ, 2021. 94 с.
17. Руденко Л. Г., Маруняк Є. О. та ін. Ландшафтознавство та ландшафтне планування в Україні. Київ : Реферат, 2014. 144 с.
18. Лялько В. І., Попов М. О. Многоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування : монографія. Київ : Наукова думка, 2012. 316 с.
19. Байрак Г. Р. Дистанційне зондування Землі : навчальний посібник. Львів : Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2017. 320 с.
20. Кохан С. С., Востоков Є. Б. Дистанційне зондування Землі: теоретичні основи : підручник. Київ : Вища школа, 2009. 368 с.
21. McFeeters S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*. 1996. Vol. 17, No. 7. P. 1425–1432.
22. Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 2006. Vol. 27, No. 14. P. 3025–3033.
23. Gorelick N., Hancher M., Dixon M. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*. 2017. Vol. 202. P. 18–27.
24. Гетьман А. П. Екологічне право України : підручник. Харків : Право, 2021. 552 с.
25. Водний кодекс України : Закон України від 06.06.1995 № 213/95-ВР. Дата оновлення: 01.01.2024. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-вр
26. Кодекс України про надра : Закон України від 27.07.1994 № 132/94-ВР. Дата оновлення: 28.12.2023. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/132/94-вр

27. Про оцінку впливу на довкілля : Закон України від 23.05.2017 № 2059-VIII. Дата оновлення: 29.12.2023. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19
28. Земельний кодекс України : Закон України від 25.10.2001 № 2768-III. Дата оновлення: 01.01.2024. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14
29. Гірничий закон України : Закон України від 03.03.1999 № 112/99-ВР. Дата оновлення: 01.10.2023. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/112/99-вр
30. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо вдосконалення законодавства про видобуток бурштину та інших корисних копалин : Закон України від 19.12.2019 № 402-IX. Дата оновлення: 28.12.2023. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/402-20
31. Директива 2000/60/ЄС Європейського Парламенту і Ради «Про встановлення рамок діяльності Співтовариства в галузі водної політики» від 23.10.2000. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_962#Text
32. Маринич О. М., Шищенко П. Г. Фізична географія України : підручник. Київ : Знання, 2005. 511 с.
33. Коротун І. М., Коротун Л. К. Географія Рівненської області. Рівне : Світовид, 1996. 274 с.
34. Басюк Т. О. Гідрографічні та гідрологічні особливості річок Рівненщини. Рівне : НУВГП, 2018. 156 с.
35. Хільчевський В. К., Гребінь В. В. Гідрографічне районування території України, затверджене у 2016 р. як основа басейнового управління водними ресурсами. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія.* 2017. № 1 (44). С. 8–20.
36. Кошляков О. Є., Кошлякова Т. О. Екологічні наслідки нелегального видобутку бурштину в Українському Поліссі: географічний та гідрогеологічний аспекти. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія.* 2019. Вип. 2 (85). С. 45–52.
37. Гнатів Р. М., Клименко М. О. Оцінка трансформації торфових ландшафтів Полісся під впливом промислової розробки. *Агроекологічний журнал.* 2021. № 3. С. 78–86.

38. Клименко М. О., Бєдункова О. О. Моніторинг та екологічна оцінка стану водних екосистем в зоні впливу Рівненської АЕС. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Серія: Сільськогосподарські науки.* 2018. Вип. 2 (82). С. 112–124.
39. План управління річковим басейном Дніпра: суббасейн річки Прип'ять (скорочена версія для громадських консультацій). Проект ЄС «Водна ініціатива + для країн Східного партнерства» (EUWI+ East). Липень 2020. 24 с.
40. Copernicus Data Space Ecosystem: Browser User Guide and Data Access Specification. European Space Agency (ESA). 2023. URL: https://dataspace.copernicus.eu/
41. Приймаченко А. О., Савенко В. М. Застосування супутникових знімків Sentinel-2 та індексу NDWI для оперативного моніторингу внутрішніх водних об’єктів. *Екологічні науки: науково-практичний журнал.* 2021. № 2 (35). С. 143–149.
42. Ковальчук І. П., Стецюк В. В. Структурно-гідрологічні зміни в басейнах малих річок Полісся в умовах інтенсивного природокористування. *Український географічний журнал.* 2020. № 4. С. 22–31.
43. Яцик А. В. Водогосподарська екологія: у 4-х т. Київ: Генеза, 2024. Т. 3: Антропогенний вплив на гідрографічну мережу. 384 с.
44. Денисик Г. І. Антропогенні ландшафти Правобережного Полісся: монографія. Вінниця: ПП «ТД Едельвейс», 2022. 216 с. *(Описує наслідки зміни ландшафтів Полісся через видобуток).*
45. Клименко М. О., Бєдункова О. О. Екологічний стан басейнів малих річок Рівненської області в умовах техногенезу. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Серія: Сільськогосподарські науки.* 2021. Вип. 3 (95). С. 82–93. *(Ідеальне профільне джерело по Рівненській області).*
46. Хвесик М. А., Голян В. А. Інституціональне забезпечення управління водними ресурсами: басейновий принцип та європейські орієнтири. Київ:

Інститут економіки природокористування та сталого розвитку НАН України, 2021. 312 с.

47. Гребінь В. В., Чунарьов О. В. Гідрографічне районування території України як основа розробки планів управління річковими басейнами. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія.* 2023. № 2 (68). С. 6–15.