

**ВІННИЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПЕДАГОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ МИХАЙЛА КОЦЮБИНСЬКОГО**

ПРИРОДНИЧО-ГЕОГРАФІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ГЕОГРАФІЇ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему: «ВПЛИВ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ НА НАВКОЛИШНЄ
СЕРЕДОВИЩЕ І ЙОГО ВИВЧЕННЯ У ШКІЛЬНІЙ ГЕОГРАФІЇ»**

Студентки 2 курсу МГТ групи

Освітньої програми Середня освіта. Географія.

Краєзнавчо-туристична робота

Спеціальності 014.07 Середня освіта (Географія)

Галузі знань 01 Освіта / Педагогіка

Ступеня вищої освіти магістр

Діхтяр Софії Михайлівни

Науковий керівник Денисик Г. І., доктор
географічних наук, професор

Розширена шкала _____

Кількість балів _____ Оцінка ECTS _____

Голова Екзаменаційної комісії _____
(підпис) (ініціали, прізвище)

Члени Екзаменаційної комісії _____
(підпис) (ініціали, прізвище)

(підпис) (ініціали, прізвище)

Вінниця – 2025

АНОТАЦІЯ

Діхтяр С. С. Вплив гідроелектростанцій на навколишнє середовище і його вивчення у шкільній географії. Магістерська робота за спеціальністю 014.07 Середня освіта (Географія. Краєзнавчо-туристична робота). Вінницький державний педагогічний університет імені Михайла Коцюбинського, Вінниця, 2025.

Магістерська робота присвячена вивченню впливу гідроелектростанцій на навколишнє середовище та розробці методичних підходів до викладання цієї теми у шкільному курсі географії. Проаналізовано теоретико-методологічні основи дослідження впливу ГЕС, зокрема системно-географічний, ландшафтно-екологічний і геоекологічний підходи. Визначено екологічні наслідки функціонування ГЕС: зміна гідрологічного режиму, деградація ґрунтів, порушення мікроклімату, трансформація ландшафтів, зниження біорізноманіття. Розроблено методичні рекомендації та авторський конспект уроку з використанням сучасних педагогічних технологій для формування екологічної компетентності учнів.

Ключові слова: гідроелектростанції, екологічні наслідки, шкільна географія, ГЕС, методика навчання, екологічна освіта, конспект уроку.

ABSTRACT

Dikhtiar S. S. The Impact of Hydroelectric Power Plants on the Environment and Its Study in School Geography. Master's Thesis in Specialty 014.07 Secondary Education (Geography. Local History and Tourism Work). Vinnytsia State Pedagogical University named after Mykhailo Kotsiubynskyi, Vinnytsia, 2025.

The master's thesis explores the environmental impact of hydroelectric power plants and proposes methodological approaches for teaching this topic within the school geography curriculum. The theoretical and methodological foundations of assessing the influence of HPPs are analyzed, including the systemic-geographic, landscape-ecological, and geoecological approaches. The study identifies key environmental consequences of HPP operation: alteration of river hydrology, soil degradation, microclimate disruption, landscape transformation, and biodiversity loss. Methodological recommendations and an original lesson plan using modern educational technologies have been developed to foster students' environmental competence.

Keywords: hydroelectric power plants, environmental impact, school geography, HPP, teaching methodology, environmental education, lesson plan

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ.....	11
1.1. Поняття, класифікація та принципи роботи гідроелектростанцій.....	11
1.2. Методологічні підходи до дослідження впливу ГЕС на довкілля.....	20
Висновки до розділу 1.....	27
РОЗДІЛ 2. ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ.....	28
2.1. Вплив ГЕС на клімат.....	28
2.2. Вплив ГЕС на поверхневі та підземні води.....	34
2.3. Вплив ГЕС на ґрунти.....	39
2.4. Зміни ландшафтів та біорізноманіття в зонах впливу ГЕС.....	46
2.5. Заходи мінімізації негативних наслідків впливу ГЕС на довкілля ...	50
Висновки до розділу 2.....	56
РОЗДІЛ 3. ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ НА ДОВКІЛЛЯ У ШКІЛЬНОМУ КУРСІ ГЕОГРАФІЇ.....	57
3.1. Можливості вивчення впливу ГЕС на довкілля у шкільному курсі географії.....	57
3.2. Методика проведення уроків географії з використанням знань про вплив ГЕС на довкілля.....	62
3.3. Розгорнутий конспект уроку на тему впливу ГЕС на довкілля.....	68
Висновки до розділу 3.....	75
ВИСНОВКИ.....	76
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	79
ДОДАТКИ.....	90

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Гідроенергетика є одним із найдавніших і водночас найбільш динамічно розвинутих секторів відновлюваної енергетики, що відіграє важливу роль у глобальному енергетичному балансі. Гідроелектростанції (ГЕС) забезпечують значний обсяг виробництва електроенергії, сприяючи зниженню залежності від викопних палив і зменшенню антропогенного навантаження на атмосферу шляхом скорочення викидів парникових газів. Проте, незважаючи на їхні позитивні аспекти, функціонування ГЕС зумовлює істотні екологічні трансформації, що можуть мати довготривалий та системний характер.

Сучасні наукові дослідження свідчать, що експлуатація гідроелектростанцій значною мірою впливає на гідрологічний режим річкових систем, призводить до змін морфології річкових русел, порушує природний водообмін та може зумовлювати деградацію водних екосистем. Наслідками таких змін є погіршення якості води, підтоплення або пересихання прилеглих територій, порушення природного процесу седиментації, що своєю чергою впливає на родючість ґрунтів. Штучні водосховища спричиняють локальні та регіональні кліматичні зміни, такі як підвищення вологості, зростання ризику утворення туманів, зміни температурного режиму повітря і води.

Окремої уваги потребує питання впливу ГЕС на біорізноманіття, оскільки створення водосховищ спричиняє трансформацію природних ландшафтів, зміну ареалів існування водних і прибережних екосистем, а також може призводити до фрагментації популяцій гідробіонтів. Деякі види гідрофауни, зокрема риби, зазнають значних втрат через порушення природних міграційних шляхів, що зумовлює необхідність розробки та впровадження спеціальних екологічних заходів. Враховуючи все вищезазначене, актуальність дослідження впливу гідроелектростанцій на довкілля зумовлена необхідністю всебічного оцінювання екологічних ризиків та розробки стратегій їх мінімізації. Особливого значення набуває інтеграція

цих питань у шкільний курс географії, що сприятиме формуванню у школярів екологічної свідомості, розуміння принципів сталого розвитку та усвідомлення наслідків антропогенного втручання в природні екосистеми.

Таким чином, комплексний аналіз впливу гідроелектростанцій на навколишнє середовище та його відображення у навчальному процесі є важливим як у науково-теоретичному, так і у практичному аспектах. Він сприяє розробці екологічно орієнтованих підходів до використання гідроенергетичних ресурсів та формуванню екологічно відповідального ставлення до природних екосистем у майбутніх поколіннях.

Ступінь наукової розробки проблеми. Проблема впливу гідроелектростанцій на навколишнє середовище є предметом активних наукових досліджень у галузі енергетики, екології та географії. У вітчизняній та зарубіжній науковій літературі розглядаються різні аспекти цього питання, зокрема гідроенергетичний потенціал, екологічні ризики, зміни гідрологічного режиму та методологічні підходи до оцінки впливу ГЕС на довкілля. Значну увагу теоретичним та практичним аспектам функціонування гідроелектростанцій приділяють у своїх працях українські науковці, зокрема П. Васько, А. Мороз, В. Лутаєв та інші, які досліджують питання розвитку гідроенергетики, зокрема малої, та її впливу на природні ресурси. Роботи Л. Левковської та В. Мандзика спрямовані на ідентифікацію екологічних ризиків об'єктів малої гідроенергетики, що є важливим для оцінки довгострокових наслідків їх експлуатації. Особливий інтерес становлять дослідження парадинамічної сфери гідрологічного впливу водосховищ, проведені Ю. Яцентюком та І. Войною, а також аналіз регіональних парадинамічних антропогенних ландшафтних систем, здійснений Ю. Яцентюком. Ці дослідження надають наукове підґрунтя для розуміння комплексного впливу ГЕС на ландшафтні структури та довкілля в цілому.

Значний внесок у дослідження глобальних аспектів функціонування ГЕС зроблено у працях зарубіжних авторів, таких як Н. Wagner та J. Mathur. В. Pandey та А. Karik, які висвітлюють технологічні та екологічні аспекти

роботи гідроелектростанцій. Важливі питання взаємозв'язку між гідроенергетикою та стійким розвитком розглядаються у роботах I. Yüksel та F. Koch.

Таким чином, проблема впливу гідроелектростанцій на довкілля є добре розробленою у сучасній науковій літературі, однак продовжує залишатися актуальною з огляду на необхідність узагальнення існуючих підходів, удосконалення методів оцінки впливу та розробки нових екологічних і методичних стратегій, що забезпечують зменшення негативного впливу ГЕС та ефективного впровадження цієї тематики в систему шкільної освіти.

Мета дослідження: дослідити вплив гідроелектростанцій на навколишнє середовище, визначити основні екологічні наслідки їхнього функціонування та розробити методичні підходи до вивчення цієї проблематики у шкільному курсі географії.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати теоретико-методологічні засади дослідження впливу гідроелектростанцій на довкілля.
2. Визначити основні екологічні наслідки роботи ГЕС, зокрема їхній вплив на клімат, водні ресурси, ґрунти, ландшафтні зміни та біорізноманіття.
3. Оцінити екологічні ризики, пов'язані з діяльністю ГЕС, та запропонувати шляхи їх мінімізації.
4. Розробити методичні рекомендації щодо викладання питань впливу ГЕС на довкілля в шкільному курсі географії.
5. Створити розгорнутий конспект уроку, що висвітлює екологічні аспекти функціонування ГЕС.

Об'єкт дослідження: вплив гідроелектростанцій на навколишнє середовище та його вивчення у шкільному курсі географії.

Предмет дослідження: екологічні наслідки функціонування гідроелектростанцій та методичні аспекти їхнього вивчення у процесі викладання географії в закладах середньої освіти.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети використано комплекс методів, що забезпечують всебічний аналіз впливу гідроелектростанцій на навколишнє середовище та особливості його вивчення в освітньому процесі. Теоретичну основу дослідження становлять загальнонаукові методи, зокрема аналіз, синтез, узагальнення та систематизація наукової літератури, нормативно-правових документів і статистичних даних, що дозволяє сформулювати концептуальне розуміння проблеми. Для дослідження екологічних наслідків функціонування ГЕС застосовано методи системного аналізу, що дають змогу визначити структурні взаємозв'язки між гідроенергетичними об'єктами та навколишнім середовищем. Також використано порівняльний метод, який дозволяє оцінити відмінності впливу ГЕС залежно від їхнього типу, масштабу та регіональних особливостей розташування. У частині дослідження методики викладання теми у шкільному курсі географії застосовано педагогічні методи, зокрема методи аналізу навчальних програм, методичних рекомендацій та дидактичних матеріалів. Експериментальний підхід передбачав розробку та апробацію методичних рекомендацій для викладання екологічних аспектів функціонування ГЕС, включаючи інтерактивні технології та проблемно-орієнтоване навчання.

Наукова новизна дослідження полягає в розробці та впровадженні авторського підходу до інтеграції знань про екологічні наслідки функціонування гідроелектростанцій у шкільний курс географії, що базується на міждисциплінарному аналізі та сучасних екологічних даних. Уперше здійснено поєднання екологічного, енергетичного й педагогічного аспектів на прикладі конкретних локальних об'єктів — таких як Ладижинське та (в контексті наслідків руйнування) Каховське водосховище — з метою формування екологічної компетентності учнів. Результатом дослідження стала авторська методика викладання цієї теми, що включає проблемно-орієнтоване навчання, STEM-елементи та адаптацію реальних даних у навчальний процес. Запропоновано новий дидактичний підхід до вивчення

впливу ГЕС на довкілля, який враховує як наукову обґрунтованість екологічних ризиків, так і освітній потенціал для розвитку критичного мислення та відповідального ставлення до сталого розвитку. Розроблений розгорнутий конспект уроку з опорою на актуальні кліматичні виклики є практичним результатом цього дослідження та може бути використаний як інструмент екологічної освіти в загальноосвітніх закладах.

Практичне значення роботи. Розроблені дидактичні матеріали можуть бути використані в освітньому процесі загальноосвітніх навчальних закладів для поглибленого вивчення проблеми впливу ГЕС на довкілля. Запропонований розгорнутий конспект уроку сприяє покращенню методики викладання географії, формуванню екологічної грамотності та розвитку критичного мислення учнів щодо питань сталого розвитку.

Апробація результатів дослідження. Основні положення магістерської роботи були представлені у наукових матеріалах, поданих до друку та таких, що наразі перебувають на етапі рецензування. Підготовлено дві наукові статті: «Гідроенергетика як чинник трансформації географічного середовища», подану до фахового видання «Молодий вчений», та «Інтерактивні методи вивчення впливу гідроелектростанцій на довкілля у шкільній географії», подану до журналу «Наукові перспективи та інновації науки». Результати дослідження також висвітлені у тезі доповіді «Природні та антропогенні ландшафти: порівняльний аналіз для шкільного курсу географії», направленої для участі у Науково-прикладному семінарі «Різноманіття ландшафтних різноманіть», організованому Київським національним університетом імені Тараса Шевченка 20 жовтня 2025 року. Практична апробація методичних напрацювань здійснювалася під час уроків географії у 9-му класі, де були використані створені автором дидактичні матеріали, тематичні карти та інтерактивні завдання.

Структура роботи. Відповідно до поставленої мети та завдань дослідження, магістерська робота складається зі вступу, плану, 3 розділів,

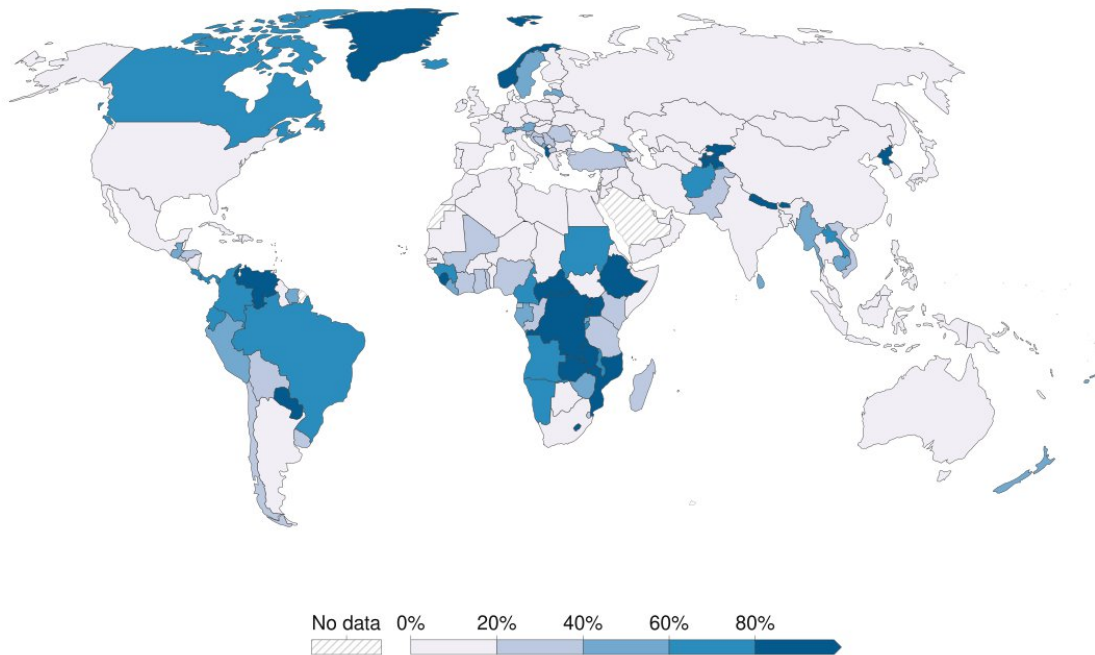
висновків, списку використаних джерел – 86 позицій. Загальний обсяг роботи становить 89 сторінок.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ

1.1. Поняття, класифікація та принципи роботи гідроелектростанцій

У сучасному світі енергетика є однією з ключових галузей, що забезпечує стабільний розвиток економіки та комфортне життя людей. Серед усіх видів енергетичних джерел гідроелектростанції (ГЕС) займають особливе місце, оскільки використовують відновлюваний ресурс — енергію води. Гідроенергетика є однією з найстаріших та найекологічніших галузей виробництва електроенергії, яка продовжує розвиватися й у XXI столітті. ГЕС мають суттєві переваги перед традиційними тепловими електростанціями, що працюють на викопному паливі, оскільки вони не спричиняють значних викидів вуглекислого газу та не залежать від нестабільності цін на енергоресурси. Водночас гідроенергетика має певні виклики, зокрема вплив на навколишнє середовище та необхідність значних капіталовкладень у будівництво [1, с.10]. На рис. 1.1 подано світову карту частки виробництва електроенергії гідроелектростанціями, що демонструє просторові відмінності у значенні гідроенергетики для різних країн світу.

Share of electricity production from hydropower, 2022



Source: Ember's Yearly Electricity Data; Ember's European Electricity Review; Energy Institute Statistical Review of World Energy
OurWorldInData.org/energy • CC BY

Рис. 1.1. Світова карта частки виробництва електроенергії
гідроелектростанціями у 2022 р.

(джерело: Our World in Data / Wikimedia Commons)

Гідроелектростанція (ГЕС) — це інженерна споруда, що виробляє електроенергію за допомогою використання кінетичної та потенціальної енергії водного потоку. Основний принцип її роботи базується на перетворенні енергії руху води в механічну енергію обертання турбіни, яка, у свою чергу, передається генератору для подальшого перетворення в електричний струм. Гідроелектростанції відзначаються високою ефективністю, адже коефіцієнт корисної дії (ККД) сучасних установок може досягати 90%. Вони використовують відновлюване джерело енергії, що робить їх важливим компонентом у глобальній стратегії переходу до екологічно чистих технологій [1, с.23].

Розвиток гідроенергетики має глибокі історичні корені. Перші спроби використання енергії води для механічної роботи були зафіксовані ще в стародавні часи, коли водяні млини допомагали людям у перемелюванні зерна.

Однак перша гідроелектростанція, яка виробляла електроенергію, була збудована в 1878 році в місті Крейгсайд, Великобританія. Вона мала потужність всього 7,5 кВт і використовувалася для освітлення. У США перша велика ГЕС була введена в експлуатацію у 1882 році на річці Фокс у Вісконсині. В Україні розвиток гідроенергетики розпочався в ХХ столітті. Найбільш значущою подією стало будівництво Дніпровської гідроелектростанції (ДніпроГЕС), яку було введено в експлуатацію у 1932 році. Ця станція стала символом індустріалізації та на той момент була однією з найпотужніших у світі [1, с.17].

Сучасна гідроелектростанція складається з кількох ключових елементів, кожен з яких виконує свою функцію у виробництві електроенергії. Гребля є основною конструкцією, яка перешкоджає природному перебігу річки, створюючи тим самим напір води. Завдяки цьому накопичується потенційна енергія, що згодом використовується для обертання турбін. Водосховище, що утворюється за греблею, дозволяє регулювати рівень води, забезпечуючи стабільне постачання енергії навіть у періоди сезонних змін рівня опадів. Головним елементом у виробництві електроенергії є турбіни, які перетворюють енергію потоку води на механічну. Вони можуть мати різну конструкцію, залежно від швидкості та об'єму водного потоку. Серед найпоширеніших типів турбін – турбіни Френсіса, Каплана та Пелтона. Турбіна з'єднана з генератором, який перетворює механічну енергію на електричну. Після цього електроенергія передається в трансформатори, де її напруга підвищується для подальшого транспортування в енергетичну мережу [2]. Структурні компоненти та принцип роботи гідроелектростанції подано на рисунку 1.2.

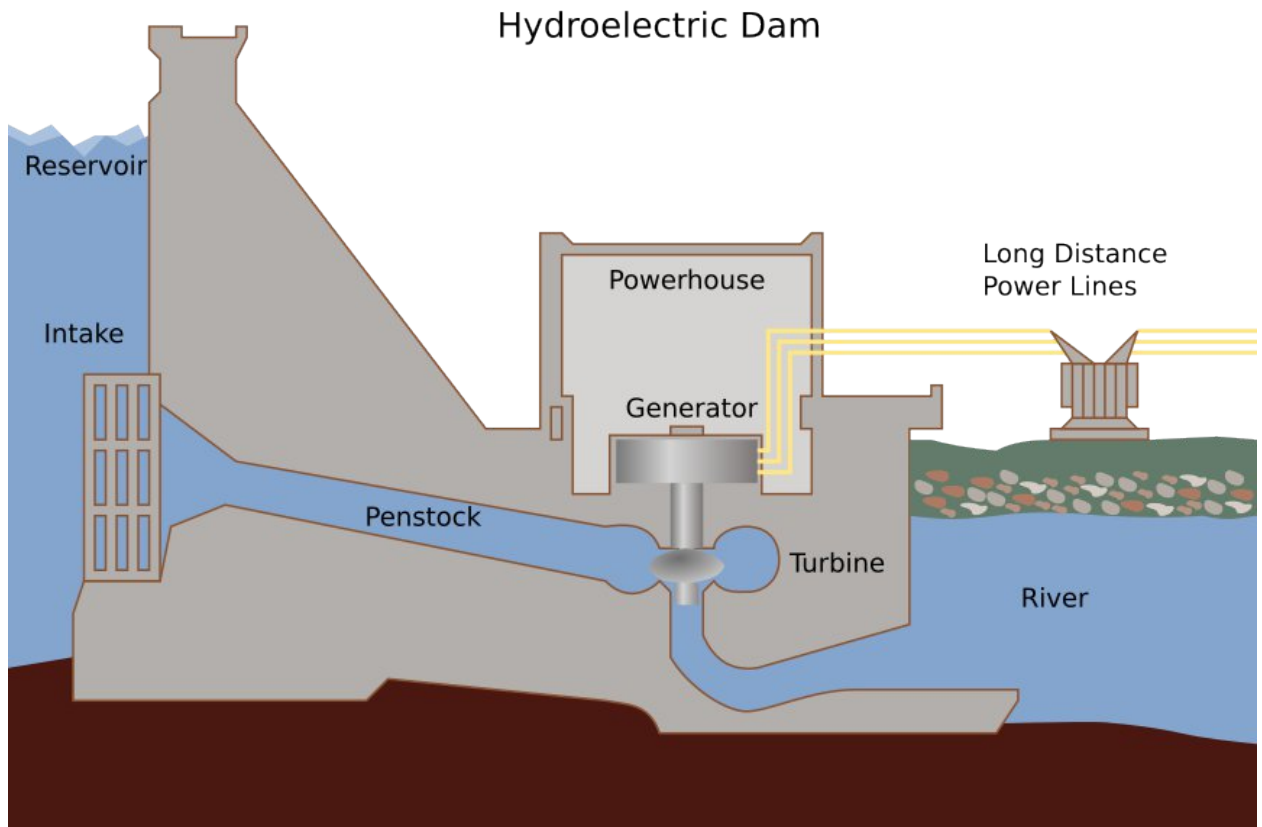


Рис. 1.2. Схема роботи гідроелектростанції

(джерело: Wikimedia Commons, «Hydroelectric_dam.svg»)

Гідроелектростанції можна класифікувати за кількома основними критеріями, що визначають їхню потужність, конструкцію, спосіб регулювання потоку води та місце розташування. Кожен із цих аспектів впливає на ефективність роботи ГЕС, їхнє призначення та технічні характеристики.

Одним із найважливіших параметрів є потужність гідроелектростанції. Залежно від цього критерію розрізняють малі, середні та великі ГЕС. Малі гідроелектростанції, потужність яких не перевищує 10 мегават (МВт), зазвичай використовуються для енергозабезпечення невеликих населених пунктів, підприємств або віддалених регіонів. Вони є екологічно безпечними, оскільки не потребують значних змін у природному середовищі та часто використовують природний рельєф місцевості для створення необхідного напору води. Середні гідроелектростанції, потужність яких варіюється від 10 до 100 МВт, застосовуються для постачання електроенергії в міські або

регіональні мережі. Вони мають більш масштабну інфраструктуру та здатні забезпечувати стабільну генерацію енергії навіть у періоди змін гідрологічних умов. Великі гідроелектростанції, потужність яких перевищує 100 МВт, є основними джерелами електроенергії у великих енергетичних системах. Такі ГЕС зазвичай розташовані на великих річках і мають значний вплив на довкілля через зміну природного стоку води та створення великих водосховищ [3, с.358].

Важливим критерієм є тип греблі, яка використовується на гідроелектростанції. Існують руслові, греблеві та гідроакумулюючі станції. Руслові або проточні гідроелектростанції працюють без створення значного водосховища, використовуючи природний потік річки. Вони менш руйнівні для екосистеми, але їхня ефективність залежить від стабільності водного режиму. Греблеві гідроелектростанції передбачають будівництво греблі, яка утримує значний об'єм води, створюючи великий напір. Це дозволяє регулювати потік води та забезпечувати стабільну генерацію енергії, навіть якщо рівень води в річці коливається. Гідроакумулюючі електростанції (ГАЕС) виконують особливу функцію – вони не лише виробляють електроенергію, а й накопичують її, перекачуючи воду з нижнього водосховища у верхнє під час низького попиту на електроенергію, щоб потім використовувати її в години пікового споживання [1, с.74].

Класифікація за способом регулювання потоку води визначає, наскільки гідроелектростанція може впливати на зміну витрат річки. За цим критерієм виділяють станції сезонного регулювання, добового регулювання та безрегульовальні ГЕС. Станції сезонного регулювання дозволяють накопичувати воду у водосховищі протягом дощового або снігового сезону та використовувати її в періоди низької водності. Вони забезпечують стабільне виробництво електроенергії навіть при значних коливаннях рівня води в річці. Добове регулювання означає, що ГЕС може змінювати інтенсивність роботи залежно від рівня споживання електроенергії протягом дня, наприклад, посилюючи генерацію в години пікового навантаження. Безрегульовальні

гідроелектростанції не мають можливості змінювати витрати води, тому їхня продуктивність залежить виключно від природного стоку річки [4].

Останнім важливим критерієм класифікації є місце розташування гідроелектростанції. Залежно від географічних умов вони поділяються на гірські та рівнинні. Гірські ГЕС розташовуються в місцевостях із великим перепадом висот, що дозволяє використовувати природний напір води для обертання турбін. Вони зазвичай мають менші водосховища та працюють із високою ефективністю завдяки великій швидкості течії води. Рівнинні ГЕС, навпаки, будуються на річках із повільною течією і використовують великі греблі для створення необхідного рівня водного напору. Вони мають масштабні водосховища, що можуть значно змінювати природний ландшафт та екосистему регіону [5, с.31]. Узагальнену класифікацію гідроелектростанцій за основними критеріями подано на рис. 1.3.

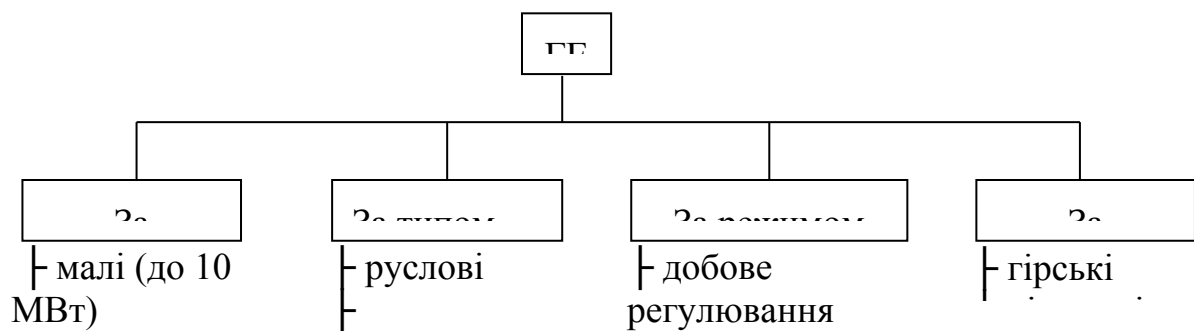


Рис. 1.3. Класифікація гідроелектростанцій за основними критеріями (авторська схема)

Гідроелектростанції працюють за принципом перетворення кінетичної та потенціальної енергії води в електричну. Основна ідея їхньої роботи полягає в тому, що вода, накопичена у водосховищі або природному руслі річки, спрямовується на лопаті турбіни, змушуючи її обертатися. Цей процес дозволяє ефективно використовувати природну енергію руху води та отримувати електроенергію без викидів шкідливих речовин в атмосферу.

Процес виробництва електроенергії на гідроелектростанції проходить кілька ключових етапів. Спочатку створюється необхідний напір води. Для цього гребля затримує потік річки, накопичуючи воду у водосховищі. Чим вищий рівень води, тим більше потенційної енергії вона містить. Потім вода

спрямовується у водоводи, що ведуть до турбін. Під впливом сили гравітації вона набирає швидкість і створює потужний потік, який обертає лопаті турбіни. Турбіна перетворює енергію руху води в механічну енергію обертання [5, с. 31]. Наступним етапом є робота генератора, який з'єднаний з турбіною. Обертання його ротора в магнітному полі призводить до появи електричного струму. Генератор виробляє змінний струм, напруга якого змінюється залежно від потреб електромережі. Для подальшої передачі електроенергії використовується трансформаторна станція, яка підвищує напругу, зменшуючи втрати при транспортуванні. В кінцевому підсумку електроенергія передається в загальну енергосистему та постачається споживачам [6].

Важливу роль у роботі гідроелектростанцій відіграють гідротурбіни, які бувають двох основних типів: реактивні та активні. Реактивні турбіни працюють за принципом зміни тиску води, що діє на лопаті, створюючи силу, яка обертає вал. Найбільш поширеними реактивними турбінами є турбіни Френсіса та Каплана. Турбіна Френсіса використовується при середньому та високому напорі води, забезпечуючи високу ефективність навіть при змінному потоці. Турбіна Каплана, навпаки, краще працює при низькому напорі, оскільки її лопаті можуть змінювати кут нахилу, оптимізуючи роботу залежно від умов [7, с.43].

Активні турбіни працюють за іншим принципом: вони використовують безпосередній вплив швидкого струменя води на лопаті. Найбільш типовим представником цього виду є турбіна Пелтона, що застосовується у гірських районах, де є високий напір і мала витрата води. Така конструкція дозволяє максимально ефективно використовувати потенційну енергію, перетворюючи її в механічну без значних втрат.

Ефективність роботи гідроелектростанції значною мірою залежить від природних умов та технічних факторів. Основним природним чинником є рівень водності річки, який може змінюватися в залежності від сезону або кліматичних умов. Важливу роль відіграє і рельєф місцевості: у гірських

районах ГЕС мають більший напір води, що підвищує їхню ефективність. Серед технічних аспектів важливе значення має конструкція турбін, рівень автоматизації процесів та якість технічного обслуговування станції [1, с. 56].

Гідроелектростанції відіграють важливу роль у сучасній енергетиці, забезпечуючи стабільне постачання електроенергії з використанням відновлюваних ресурсів. Однією з головних переваг ГЕС є їхня висока екологічність. На відміну від теплових електростанцій, що працюють на викопному паливі, вони не виробляють викидів вуглекислого газу та інших забруднювальних речовин в атмосферу. Завдяки цьому гідроенергетика є екологічно безпечним способом отримання електроенергії, що відповідає сучасним світовим тенденціям у боротьбі з глобальним потеплінням та зміною клімату [1, с.11]. Важливою перевагою є відновлюваність ресурсу, який використовується для виробництва електроенергії. Вода є природним ресурсом, що постійно відновлюється внаслідок природного кругообігу. Це забезпечує стабільність та довгостроковість роботи гідроелектростанцій, на відміну від паливних електростанцій, що залежать від запасів викопного палива. ГЕС відзначаються довговічністю експлуатації. Багато станцій, збудованих у першій половині ХХ століття, продовжують ефективно працювати до сьогодні, що свідчить про їхню надійність і високу зносостійкість конструкцій [8].

Гідроелектростанції також мають здатність регулювати енергоспоживання, що є важливим фактором у функціонуванні енергосистем. Завдяки водосховищам вони можуть накопичувати запаси води та використовувати їх у моменти пікового навантаження, що дозволяє збалансувати роботу електромережі. Це робить їх стратегічно важливими об'єктами в енергетичній інфраструктурі країни, адже вони можуть компенсувати нестабільність роботи інших джерел енергії, таких як вітрові або сонячні електростанції [9, с.52].

Однак, незважаючи на численні переваги, гідроелектростанції мають і певні недоліки. Одним із головних є висока вартість будівництва. Процес

створення гідроелектростанції потребує значних капіталовкладень, оскільки включає будівництво греблі, турбінного комплексу, водосховищ та мережі електропередач. Це робить проекти ГЕС складними та довготривалими, що може бути серйозною перешкодою для їх впровадження в країнах із нестабільною економікою або обмеженими фінансовими ресурсами. Також вагомим недоліком є затоплення територій під час створення водосховищ. Будівництво ГЕС часто супроводжується необхідністю перекриття річки та формуванням великих водних резервуарів, що може призводити до затоплення значних площ сільськогосподарських земель, населених пунктів та природних екосистем [10, с.54]. Це може спричинити переселення місцевого населення та втрату культурної або природної спадщини регіону. Окрім цього, гідроелектростанції можуть негативно впливати на екосистему річок. Зміни в природному руслі, уповільнення течії та коливання рівня води можуть призводити до порушення життя водних організмів, зникнення деяких видів риби або змін у складі фауни та флори. Зокрема, риби, які здійснюють міграції, можуть стикатися з перешкодами у вигляді гребель, що ускладнює їхнє природне розмноження. Внаслідок цього екологічні наслідки будівництва ГЕС потребують ретельного аналізу та заходів для мінімізації впливу на природу.

Отже, гідроелектростанції відіграють важливу роль у сучасній енергетичній системі, забезпечуючи стабільне та екологічно чисте виробництво електроенергії. Вони використовують відновлюваний ресурс – енергію води, що дозволяє мінімізувати викиди парникових газів та зменшити залежність від викопного палива. Завдяки своїй довговічності та високому коефіцієнту корисної дії, ГЕС залишаються одним із найефективніших джерел електроенергії, особливо у країнах з розвинутою гідромережею. Проте їхній вплив на довкілля є значним і потребує ретельного аналізу та мінімізації негативних наслідків. Будівництво гідроелектростанцій може призводити до затоплення територій, змін у руслах річок та порушення природних екосистем. Це особливо відчутно в регіонах, де біорізноманіття залежить від стабільного

водного режиму. Водночас сучасні технології дозволяють впроваджувати заходи з екологічної компенсації, такі як створення рибопропускних споруд та екологічного регулювання водних потоків. Перспективи розвитку гідроенергетики пов'язані з будівництвом нових малих ГЕС, модернізацією існуючих станцій та інтеграцією з іншими відновлюваними джерелами енергії. Інноваційні підходи, зокрема використання плавучих турбін та покращені методи регулювання потоку води, можуть зробити гідроенергетику ще більш екологічною та ефективною у майбутньому.

1.2. Методологічні підходи до дослідження впливу ГЕС на довкілля

Гідроелектростанції (ГЕС) відіграють важливу роль у виробництві електроенергії, забезпечуючи країни відновлюваною енергією, що не залежить від викопних палив. Завдяки використанню кінетичної енергії води, ГЕС виробляють електроенергію без значних викидів парникових газів, що робить їх екологічно привабливими порівняно з традиційними тепловими електростанціями. Водночас будівництво та експлуатація ГЕС спричиняють значні зміни в довкіллі, впливаючи на гідрологічні, геоморфологічні, біологічні та соціально-економічні аспекти регіону, в якому вони розташовані. Оцінка екологічного впливу гідроелектростанцій потребує комплексного підходу, що враховує як природні, так і соціально-економічні аспекти функціонування цих об'єктів. Основні напрями впливу гідроелектростанцій на природне середовище показано на рис. 1.4.

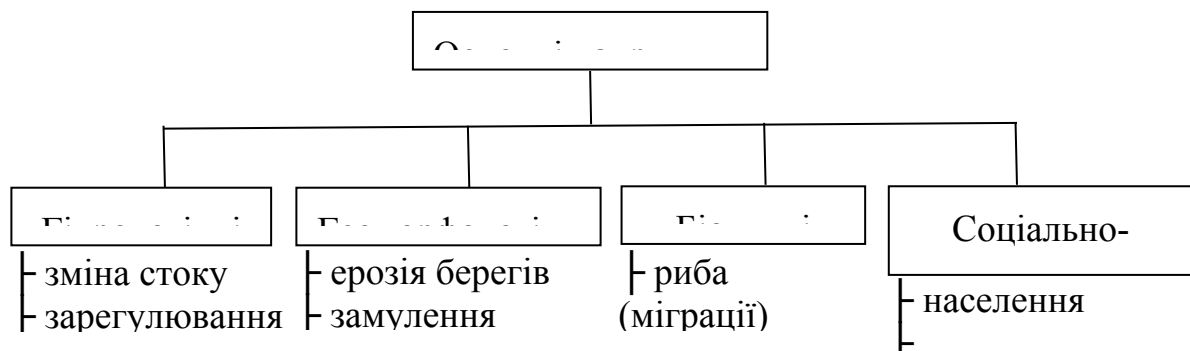


Рис. 1.4. Основні напрями впливу гідроелектростанцій на природне середовище (авторська схема)

Методологія дослідження включає традиційні методи моніторингу, застосування сучасних технологій, математичне моделювання та аналіз соціально-економічних змін у регіонах, що зазнають впливу ГЕС. Використання різних підходів дозволяє отримати більш повну та об'єктивну картину впливу гідроенергетики на довкілля [11, с.26]. Методи дослідження впливу ГЕС на довкілля систематизовано на рис. 1.5.

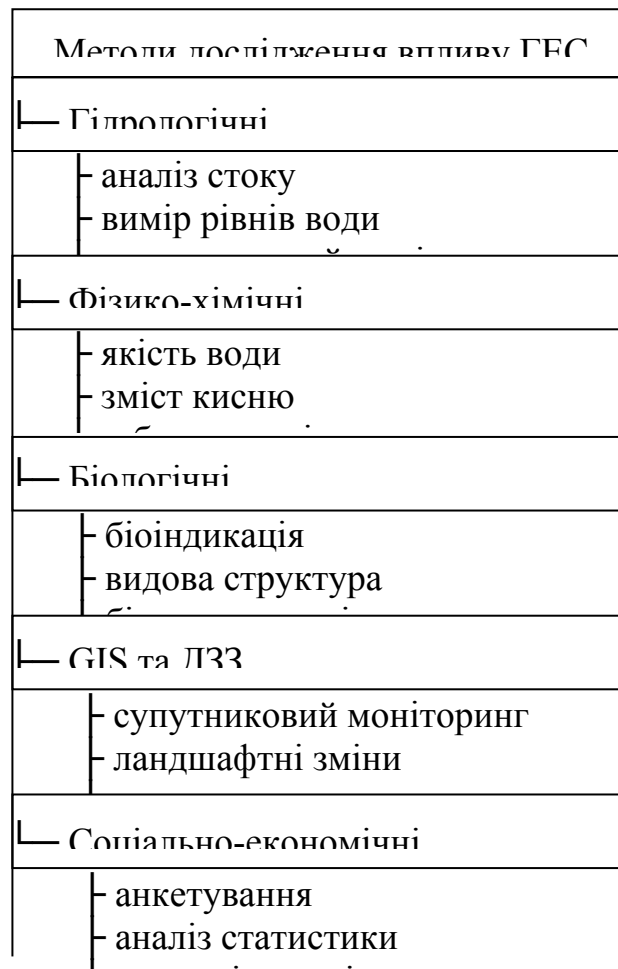


Рис. 1.5. Методи дослідження впливу гідроелектростанцій (авторська схема)

Одним із основних методів екологічного моніторингу є гідрологічні дослідження, які включають аналіз рівня води, швидкості течії, змін у водному балансі річкових басейнів та впливу водосховищ на довкілля. Контроль рівня води у водосховищах та в руслі річки є ключовим для оцінки впливу ГЕС на навколишнє середовище. Коливання рівня води можуть спричиняти зміну прибережних екосистем, підтоплення земель, пересихання ділянок річки

нижче за течією та зменшення об'єму води, доступної для сільськогосподарських і побутових потреб. Аналіз швидкості течії дозволяє визначити, як зміни в руслі впливають на розподіл наносів, ерозію берегів та умови існування водних організмів [12, с.10].

Хімічний аналіз води є ще одним важливим компонентом дослідження впливу ГЕС. Він включає визначення забруднюючих речовин, зміну складу води та її якісних характеристик. Через зміну швидкості течії у водосховищах можуть накопичуватися забруднюючі речовини, такі як важкі метали, пестициди та органічні сполуки. Крім того, у стоячих водах часто спостерігається зменшення вмісту кисню, що може спричинити загибель риб та інших водних організмів. Хімічний аналіз також дозволяє відстежувати рівень біогенних елементів, таких як азот і фосфор, які можуть сприяти цвітінню води та евтрофікації водойм [13, с.52].

Біоіндикаційні методи є надзвичайно ефективними для визначення екологічного стану водних екосистем. Аналіз змін у популяціях риб, водоростей, безхребетних дозволяє оцінити довгострокові наслідки впливу ГЕС на біорізноманіття. Деякі види організмів є чутливими до змін у водному середовищі, тому їхній стан може слугувати індикатором екологічного балансу. Наприклад, зменшення чисельності деяких видів риб свідчить про порушення їхніх міграційних шляхів через будівництво дамб, а надмірне розмноження синьо-зелених водоростей може вказувати на порушення кисневого режиму. Важливим аспектом біоіндикації є аналіз стану донних організмів, оскільки вони безпосередньо реагують на зміни хімічного складу води та наявність забруднень [14].

Одним із сучасних методів дослідження екологічного впливу гідроелектростанцій є використання геоінформаційних технологій (GIS). Завдяки геопросторовому аналізу можна відстежувати зміни у водних екосистемах, моніторити рівень води, прогнозувати ерозійні процеси та визначати зони найбільшого екологічного ризику. GIS-технології дозволяють створювати інтерактивні карти, що відображають екологічний стан водних

об'єктів у динаміці, що є важливим для прийняття рішень у сфері природоохоронної діяльності. За допомогою дистанційного зондування Землі можна виявляти зміни у рослинному покриві прибережних територій, моніторити процеси замулення водосховищ і виявляти забруднення води. Впровадження GIS у дослідження впливу ГЕС дає можливість оперативно отримувати актуальні дані та ефективніше реагувати на екологічні виклики [14].

Математичне моделювання є важливим інструментом для прогнозування екологічних наслідків будівництва та експлуатації гідроелектростанцій. Використовуючи складні розрахункові моделі, дослідники можуть передбачити, як зміняться рівень води, швидкість течії, ерозійні процеси та екологічний стан водойм у майбутньому. Це особливо важливо на етапі планування нових ГЕС, оскільки дозволяє оцінити потенційні ризики та знайти способи мінімізації негативних наслідків. Математичні моделі також застосовуються для аналізу ефективності заходів із запобігання негативному впливу ГЕС, таких як будівництво рибохідних каналів або модернізація систем управління стоком води. Прогнозування екологічних змін за допомогою моделей є ефективним методом, що дозволяє розробляти стратегії сталого використання водних ресурсів [15].

Соціально-економічні методи оцінки впливу ГЕС є невід'ємною частиною комплексного підходу до аналізу їхнього функціонування. Одним із ключових методів є проведення опитувань серед місцевого населення, яке зазнало впливу будівництва або експлуатації гідроелектростанцій. Такі дослідження дозволяють визначити, які проблеми постають перед громадами, зокрема втрати сільськогосподарських земель, переселення, зміни у рибальській діяльності або негативні наслідки для рекреаційного потенціалу регіону. Окрім опитувань, застосовується економічний аналіз, що включає оцінку витрат і вигод від будівництва ГЕС, розрахунок збитків через втрату земель та аналіз соціальної адаптації переміщених громад. Оцінка впливу ГЕС на економічний розвиток регіону дозволяє визначити, чи переважають

позитивні ефекти, такі як створення робочих місць та розвиток інфраструктури, над негативними наслідками для місцевого населення [16].

Дослідження екологічного впливу гідроелектростанцій є складним і багатофакторним процесом, який потребує комплексного підходу. Оскільки діяльність ГЕС впливає на різні аспекти природного середовища – гідрологічні, геоморфологічні, біологічні та соціально-економічні – ефективна оцінка їхнього впливу повинна базуватися на системному аналізі. Для отримання найбільш об'єктивних результатів важливо інтегрувати різні методологічні підходи та розробляти стратегії мінімізації негативних наслідків роботи ГЕС.

Системний аналіз є ключовим інструментом для комплексного дослідження впливу гідроелектростанцій. Його суть полягає у розгляді екосистеми як єдиного цілісного механізму, в якому всі компоненти взаємопов'язані. Це означає, що зміна одного параметра – наприклад, швидкості течії або рівня води – може спричинити низку інших змін, таких як порушення міграції риб, ерозія берегів або зміна складу води. Системний аналіз дозволяє оцінити ці взаємозв'язки, враховуючи не тільки безпосередні наслідки, але й довгострокові зміни, які можуть проявитися через десятки років. Важливим етапом такого аналізу є прогнозування можливих сценаріїв розвитку ситуації, що дозволяє заздалегідь розробляти заходи щодо зменшення екологічного навантаження [17].

Інтеграція різних методологічних підходів є важливою складовою комплексного оцінювання впливу ГЕС. Оскільки кожен з методів має свої обмеження, їхнє поєднання дозволяє отримати максимально точні результати. Наприклад, гідрологічні дослідження допомагають зрозуміти зміни у водному балансі річки, тоді як біоіндикаційні методи дозволяють оцінити вплив цих змін на водну флору і фауну. Використання геоінформаційних технологій сприяє швидкому та точному картографуванню зон екологічного ризику, а математичне моделювання допомагає прогнозувати майбутні зміни. Соціально-економічні дослідження, у свою чергу, дозволяють оцінити, як

робота ГЕС впливає на місцеві громади, що є важливим аспектом екологічної політики. Таким чином, інтегрований підхід сприяє створенню більш реалістичної картини екологічних змін, що викликані діяльністю ГЕС [17].

Окрім дослідження впливу гідроелектростанцій, важливо розробляти та впроваджувати заходи з мінімізації їхнього негативного впливу на довкілля. Одним із ключових напрямків є застосування екологічно орієнтованих рішень під час проєктування та експлуатації ГЕС. Наприклад, регулювання режимів скиду води може допомогти зменшити негативні наслідки для річкової екосистеми, забезпечуючи більш природний рівень течії. Необхідно проводити періодичне очищення водосховищ від намулу, що дозволить запобігти їхньому замуленню та погіршенню якості води [10, с.55].

Важливим заходом є модернізація існуючих гідроелектростанцій, яка дозволяє зменшити їхній екологічний слід. Використання нових технологій, таких як більш ефективні турбіни, може значно знизити вплив на рибу та інші водні організми. Також одним із ключових екологічних рішень є створення рибохідних каналів, які дають змогу риbam долати дамби та продовжувати свої природні міграційні маршрути. Такі канали імітують природний річковий потік і забезпечують можливість вільного переміщення рибу, що сприяє збереженню популяцій, особливо тих, що залежать від сезонних міграцій для нересту [16].

Додатково до технічних заходів, необхідно впроваджувати природоохоронні ініціативи, спрямовані на збереження річкових екосистем. Наприклад, створення природоохоронних зон навколо водосховищ може сприяти відновленню біорізноманіття та захисту прибережних територій від ерозії. Проведення екологічного моніторингу та регулярний контроль стану водних ресурсів дозволять оперативно реагувати на зміни та запобігати їхньому негативному розвитку. Важливим аспектом є також екологічна освіта та інформування місцевого населення про екологічні ризики та шляхи їхнього зменшення.

Отже, гідроелектростанції відіграють важливу роль у виробництві відновлюваної енергії, але їхня експлуатація має значний вплив на довкілля. Серед основних екологічних наслідків – зміни у гідрологічному режимі річок, ерозія берегів, замулення водосховищ, порушення міграції риб та зниження біорізноманіття. Окрім природних факторів, важливими є соціально-економічні зміни, що впливають на місцеві громади, змінюючи умови життя та господарської діяльності. Дослідження екологічного впливу ГЕС потребує комплексного підходу. Використання гідрологічного моніторингу, хімічного аналізу води, біоіндикаційних методів, геоінформаційних технологій, математичного моделювання та соціально-економічних оцінок дозволяє отримати повну картину змін. Інтеграція цих методів підвищує точність аналізу та ефективність прийняття екологічних рішень. Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку екологічно безпечних технологій експлуатації ГЕС, модернізацію існуючих систем, створення ефективних рибохідних каналів та впровадження природоохоронних заходів. Це сприятиме зменшенню негативного впливу ГЕС і забезпеченню гармонійного співіснування енергетики та довкілля.

Висновки до розділу 1

У першому розділі роботи було здійснено ґрунтовний аналіз теоретичних і методологічних підходів до вивчення гідроелектростанцій як складного природно-техногенного об'єкта, що суттєво впливає на навколишнє середовище. Встановлено, що гідроенергетика, незважаючи на свою «зелену» репутацію, має численні екологічні наслідки, які варто розглядати з позицій міждисциплінарного аналізу.

Розглянуто основні етапи становлення та розвитку гідроелектроенергетики в світі й в Україні, виокремлено її значення для енергетичної безпеки, а також окреслено суперечності між потребами енергетики та екологічною безпекою. Проаналізовано сучасну наукову літературу щодо впливу ГЕС на довкілля, що дало змогу сформулювати уявлення про напрямки та глибину екологічних змін, пов'язаних із функціонуванням цих об'єктів. У результаті вивчення методологічних засад дослідження визначено, що комплексний, системний, ландшафтно-екологічний і геоекологічний підходи є найпридатнішими для аналізу взаємодії між ГЕС і природним середовищем. Ці підходи дозволяють врахувати як локальні зміни (зокрема в межах окремих річкових басейнів), так і глобальні виклики, пов'язані з кліматичними та біогеографічними наслідками гідроенергетичного будівництва. Також у межах розділу проаналізовано нормативно-правову базу України щодо водокористування та екологічного регулювання діяльності ГЕС, що стало важливим підґрунтям для оцінки ризиків та планування шляхів їх мінімізації у наступних розділах.

Загалом, результати теоретико-методологічного аналізу підтвердили необхідність подальшого практичного дослідження впливу ГЕС на ключові компоненти довкілля та розробки ефективних освітніх стратегій для формування екологічної свідомості школярів.

РОЗДІЛ 2. ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

2.1. Вплив ГЕС на клімат

Гідроелектростанції (ГЕС) суттєво змінюють кліматичні умови на місцевому рівні, що пов'язано з утворенням великих водосховищ, які порушують природні процеси теплообміну, вологообігу та атмосферної циркуляції. Однією з найбільш помітних змін є зміна температурного режиму місцевості. Водосховища акумулюють тепло, оскільки вода має високу теплоємність. У літній період поверхневий шар водойми нагрівається і віддає тепло навколишньому середовищу, що може підвищувати середньодобову температуру повітря поблизу ГЕС. Узимку ж, навпаки, водосховище зменшує коливання температури, оскільки вода повільніше охолоджується, що може спричинити більш м'які зими в регіоні [18].

Окрім температурних змін, ГЕС значною мірою впливають на вологість повітря та формування мікроклімату. Випаровування з великих водосховищ збільшує кількість водяної пари в атмосфері, що призводить до підвищення вологості. У регіонах із сухим кліматом це може сприяти збільшенню хмарності та навіть зміні кількості опадів. У вологих зонах надмірне зволоження може стати причиною появи туманів і зміни місцевої рослинності. Наприклад, у зонах із природно посушливим кліматом навколо ГЕС можуть почати рости нові види рослинності, що не характерні для даної місцевості, оскільки вологість повітря стає вищою [18]. Схематичне відображення основних мікрокліматичних змін у зоні впливу водосховища наведено на рис. 2.1.

Мікрокліматичний вплив водосховища ГЕС



Рис. 2.1 Мікрокліматичний вплив водосховища ГЕС (авторська схема)

Важливим аспектом локальних кліматичних змін є вплив ГЕС на швидкість вітру та атмосферну циркуляцію. Водосховища змінюють розподіл теплових потоків у приземному шарі атмосфери, що може змінювати напрямок і силу вітру. Вітер зазвичай утворюється через різницю температур між різними ділянками земної поверхні, але через великі водні маси ця різниця стає менш вираженою, що може зменшувати силу вітру. Крім того, водосховища створюють бар'єр для повітряних потоків, що впливає на локальну атмосферну циркуляцію та може спричинити зміну погодних умов у навколишніх районах.

Одним із цікавих феноменів, що виникають унаслідок роботи ГЕС, є так званий ефект «теплової плями». Він пов'язаний із тим, що водосховище має вищу температуру порівняно з навколишніми ділянками, особливо у холодну пору року. Це створює своєрідну "теплову аномалію", яка може впливати на локальний клімат. Над такими водосховищами повітря прогрівається, що може спричинити зміну напрямку локальних вітрів і навіть порушувати природний розподіл опадів. Наприклад, в регіонах, де поблизу ГЕС

розташовані гірські системи, через теплову пляму можуть виникати зміни у розподілі опадів, що призводить до посух у одних районах і підвищеної вологості в інших [19]. На рис. 2.2 подано авторську схему, що ілюструє механізм утворення «теплової плями» над водосховищем.



Рис. 2.2. Схематичне зображення ефекту «теплової плями» над водосховищем (авторська схема)

Суттєвим наслідком роботи ГЕС є порушення природних циклів випаровування та опадів. Водосховища значно змінюють динаміку водного балансу в регіоні, оскільки вони збільшують площу відкритої водної поверхні, що випаровує значно більше води, ніж природні річки та озера. Це може призводити до надмірного зволоження атмосфери та зміни режиму випадіння опадів. У деяких регіонах це може спричиняти локальні зливи або навіть збільшення кількості опадів на загальному рівні. Водночас у інших районах, де природна циркуляція води порушена, може спостерігатися зменшення рівня опадів, що негативно впливає на сільське господарство та природні екосистеми [20].

Коли в червні 2023 року було зруйновано дамбу Каховської ГЕС, ця водна система, яка раніше охолоджувала та зволожувала степову зону, перестала виконувати свою мікрокліматичну функцію. Гідрометеорологічні дослідження показали: температура поверхні осушеного дна зросла майже на 2°C , а зона аномального прогріву розширилась на значні $2\,155\text{ км}^2$, із буферною зоною 10-км шириною площею $5\,657,8\text{ км}^2$ [21]. Ще тривожніші наслідки — це зникнення феномену атмосферного бризу. Водосховище створювало горизонтально-вертикальні потужні рухи повітря, які приносили прохолоду декілька десятків кілометрів углиб степу. Після розриву водойми ці кліматичні годинники зупинилися [21]. Додатково, дослідники зазначають, що порушення водного балансу гальмувало формування хмар і опадів — суховії, пилові бурі, зростання температури та опустелювання — усе це стало послідовним наслідком втрати водосховища як регулятора клімату [22].

Ладижинське водосховище – стратегічна інфраструктурна одиниця Вінниччини: його площа становить близько $20,8\text{ км}^2$ ($\approx 2\,080$ га), довжина – 45 км, середня глибина – 7,2 м, максимальна – 17,8 м, об'єм – $\approx 0,15\text{ км}^3$. У літню пору температура поверхні води сягає $+28^{\circ}\text{C}$ завдяки надходженню підігрітих вод із Ладижинської ТЕС [23-25]. Ці характеристики надають підстави вважати, що Ладижинське водосховище виконує подібні функції до Каховського (до його катастрофи): пом'якшення літньої спеки, зволоження повітря, створення стабільнішого мікроклімату. Для центральної України це надзвичайно цінно, особливо за умов посух та кліматичних аномалій. Проте такі припущення потребують детального

гідрометеорологічного дослідження, щоб кількісно виявити температуру, вологість, опади, випаровування та інші показники.

Вплив ГЕС на кліматичні умови не обмежується лише змінами гідрологічного режиму — він включає трансформацію термічного фону, зміщення опадового режиму, зростання випаровування та локальне зменшення біорізноманіття, що є критичним для розробки адаптаційних заходів у межах зміни клімату. Гідроелектростанції (ГЕС) впливають не лише на локальний клімат, а й на глобальні кліматичні процеси, зокрема на гідрологічний цикл Землі. Водосховища, які створюються внаслідок роботи ГЕС, значно змінюють природний обіг води, що призводить до змін у випаровуванні, викидах парникових газів, розподілі опадів та циркуляції тепла в океанах і атмосфері. Одним із найвагоміших наслідків роботи ГЕС є зміна обсягів випаровування води з водосховищ, що має вплив на парниковий ефект. Великі водосховища значно збільшують площу водної поверхні, з якої відбувається випаровування. На відміну від природних річок, де випаровування обмежене вузьким руслом, водосховища мають розгалужену, інколи навіть розлогу поверхню, що сприяє більш інтенсивному випаровуванню води. Це призводить до підвищення рівня вологості повітря та утворення додаткової водяної пари – одного з найпотужніших парникових газів. Водяна пара має здатність утримувати тепло в атмосфері, що може сприяти локальному і навіть глобальному потеплінню [20]. Хоча цей ефект менший, ніж вплив вуглекислого газу (CO_2) чи метану (CH_4), він усе ж відіграє значну роль у зміні клімату, особливо у регіонах із великою кількістю ГЕС. Окрім водяної пари, водосховища ГЕС є джерелом викидів метану (CH_4), що є одним із найнебезпечніших парникових газів. Цей процес пов'язаний із затопленням великих площ суші під час створення водосховищ. Рослинність, що опиняється під водою, починає розкладатися у безкисневому середовищі, що сприяє утворенню метану. На відміну від річок, які протікають і мають аеровану воду, у глибоких водосховищах на дні формуються анаеробні умови,

що є ідеальним середовищем для утворення CH_4 . Метан, який накопичується у товщі води, періодично викидається в атмосферу, особливо під час сезонних змін температури або при роботі турбін ГЕС, які змішують воду з різних глибин. Викиди метану з великих водосховищ порівнянні з викидами від викопного палива, що робить ГЕС не такими екологічно чистими, як прийнято вважати [26].

Значним наслідком впливу ГЕС на глобальний клімат є порушення природних течій річок та розподілу тепла у світовому океані. Природні річкові потоки відіграють важливу роль у циркуляції тепла, адже вони переносять нагріту сонцем воду в різні кліматичні зони. Коли будуються великі ГЕС, вони змінюють швидкість течії річок і впливають на перенесення води в океанічні басейни. Наприклад, спорудження ГЕС на великих річках, таких як Єнісей чи Янцзи, змінило об'єм води, що потрапляє в Північний Льодовитий океан і Тихий океан, що, у свою чергу, може впливати на морські течії та кліматичні системи. Крім того, зменшення швидкості течії призводить до накопичення осадів у водосховищах, що змінює природний транспорт мінералів та поживних речовин у Світовий океан [27].

Гідроелектростанції формують штучні водні системи, які часто сприймаються як «чисте» джерело енергії. Проте ці водойми можуть стати прихованими джерелами парникових газів, насамперед метану — надпотужного газу, здатного суттєво прискорювати глобальне потепління. Це відбувається через анаеробне руйнування органіки, що залишилася в зоні затоплення, особливо в теплих регіонах — у перші роки функціонування водосховище може стати нетто-джерелом кліматичних змін, навіть якщо самі ГЕС не спалюють викопне паливо.

Новітнє дослідження показало, що водосховища на планеті займають близько 300 000 км², і щорічно виділяють приблизно 10,1 Tg метану у атмосферу — це серйозний внесок у глобальний баланс CH_4 , особливо через його виділення шляхом дифузії та бульбашкового викиду (ebullition) [28].

Хоч метан залишається в атмосфері коротший час, ніж CO₂, його потужний ефект як парникового газу є критичним у короткостроковій перспективі. Статистично, теплі резервуари, особливо у тропіках, демонструють набагато вищі темпи метаноутворення, тоді як в помірному кліматі цей процес менш інтенсивний, але все одно значущий для довгострокової кліматичної динаміки [29,30].

Отже, гідроелектростанції, хоч і вважаються екологічно чистим джерелом енергії, мають значний вплив на клімат як на локальному, так і на глобальному рівнях. Вони змінюють температурний режим, рівень вологості, швидкість вітру, а також впливають на регіональний розподіл опадів. Випаровування з водосховищ сприяє парниковому ефекту, а розкладання органічних матеріалів у затоплених зонах призводить до викидів метану. Крім того, зміни у гідрологічному циклі порушують природні течії річок, впливають на біорізноманіття та спричиняють деградацію ґрунтів. Перспективи розвитку ГЕС повинні враховувати кліматичні ризики, а отже, слід застосовувати технології, що зменшують випаровування, та будувати малі ГЕС, які не потребують масштабних водосховищ. Також можливе впровадження комбінованих рішень, які поєднують ГЕС із сонячними або вітровими станціями, що дозволить зменшити навантаження на річкові екосистеми. Альтернативними підходами є екологічно дружні проєкти, такі як «пливучі» ГЕС або використання існуючих водосховищ без додаткового затоплення.

2.2. Вплив ГЕС на поверхневі та підземні води

Гідроелектростанції значно змінюють природний гідрологічний режим річок, що має довгострокові наслідки для водних екосистем. Найбільш суттєвим впливом є регулювання стоку річок, оскільки будівництво водосховищ та гребель змінює природний рух води.



Рис. 2.3 Профіль змін гідрологічного режиму річки внаслідок будівництва ГЕС (авторська схема)

У звичайних умовах річки мають сезонні коливання рівня води, які залежать від опадів, танення снігу та інших кліматичних факторів. Вплив ГЕС полягає у згладжуванні цих коливань, що призводить до порушення природного циклу життя водних організмів. Регулювання стоку також впливає на швидкість течії. У нижній течії річок, особливо після греблі, швидкість водного потоку може знижуватися, що сприяє замуленню русла. Це, у свою чергу, призводить до зменшення концентрації розчиненого кисню, що негативно позначається на житті водних організмів. Уповільнення течії може сприяти накопиченню забруднюючих речовин, що негативно позначається на якості води. З іншого боку, у періоди скидання води через греблю швидкість потоку може різко збільшуватися, що призводить до ерозії берегів. Це не тільки впливає на стабільність русла річки, але й може спричинити знищення водно-болотних екосистем [1, с.12].

Водосховища, які утворюються внаслідок будівництва ГЕС, здатні накопичувати та утримувати тепло. Це суттєво впливає на загальний температурний режим водойм, оскільки великі обсяги води прогріваються повільніше, але й охолоджуються також значно довше. У літній період поверхневі шари води можуть прогріватися більше, ніж у природних умовах, що спричиняє аномальні температурні коливання в екосистемах. Зміна

температурного режиму також впливає на сезонне замерзання річок. У багатьох випадках, особливо в нижній течії річок після ГЕС, зимові льодові покриви стають менш стабільними або взагалі відсутні. Це порушує життєві цикли багатьох видів водних організмів, які залежать від сезонних змін у водному середовищі. Втрата природного льодового покриву також позначається на місцевих кліматичних умовах, що може мати наслідки для прилеглих екосистем [31].

Одним із важливих екологічних наслідків роботи ГЕС є зміна хімічного складу води. Оскільки у водосховищах вода рухається повільніше, це сприяє накопиченню мулу та інших осадових часток. Затримка осадів у верхній частині річки може спричинити зменшення родючості земель у нижній течії, оскільки річка перестає виносити необхідні для ґрунту поживні речовини. У водосховищах часто спостерігається зниження рівня розчиненого кисню. Це зумовлено тим, що у стоячій воді процеси аерації відбуваються повільніше, а також через накопичення органічних речовин, які активно споживають кисень у процесі розкладу. Низька концентрація кисню у воді створює несприятливі умови для багатьох видів риб і водних організмів, які потребують високого рівня аерації. Значним наслідком є евтрофікація водойм. Уповільнення течії та накопичення поживних речовин, зокрема фосфатів і нітратів, сприяє надмірному росту водоростей. Це призводить до «цвітіння» води, яке може бути шкідливим для екосистеми, оскільки водорості споживають кисень, а їх розкладання викликає ще більше зниження кисневого рівня. Внаслідок цього риба та інші водні організми можуть гинути через нестачу кисню, а якість води значно погіршується [32].

Будівництво гідроелектростанцій супроводжується формуванням великих водосховищ, що глибоко змінює природний водний режим річок. Найбільш очевидними є зміни у динаміці поверхневих вод: сповільнення течії, штучне коливання рівнів, порушення сезонного стоку. Природна річкова система, що зазвичай функціонує як динамічна та багаторівнева гідросистема,

трансформується у стаціонарну водойму, де знижуються самоочисні властивості та аерація води, що погіршує її якість.

Окремої уваги заслуговує вплив на підземні води, який залежить від гідрогеологічних особливостей регіону. У зонах з високим ступенем водонасиченості під час заповнення водосховища часто спостерігається підйом рівня ґрунтових вод. Це відбувається внаслідок підвищеного гідростатичного тиску та горизонтального проникнення води в прилеглі геологічні масиви. Такі зміни можуть призвести до заболочування територій, підтоплення сільськогосподарських угідь або фундаментів будівель у прибережних селах [33].

Водночас у деяких випадках — особливо нижче за течією від греблі — можливе зниження рівня підземних вод, що зумовлено змінами напрямку фільтрації та зменшенням живлення водоносних горизонтів. Це явище типове для регіонів, де річка слугувала основним джерелом інфільтраційного поповнення. Прикладом може слугувати ситуація, зафіксована у водозбірному басейні дамб Kralkızı та Dicle (Туреччина), де унаслідок експлуатації водосховищ спостерігалися як підйом, так і зниження рівня статичних підземних вод — залежно від геології конкретної ділянки [33]. Усе це прямо впливає на водопостачання населення, стан агроecosystem та використання свердловин. Зниження рівня ґрунтових вод змушує проводити буріння на більші глибини або шукати альтернативні джерела водозабору, що тягне за собою зростання витрат. Особливо гостро ця проблема проявляється у районах, де відсутні поверхневі джерела, а підземні води є єдиним ресурсом питної води.

Одним із найсерйозніших наслідків функціонування ГЕС є зміна динаміки підземних вод, що може спричиняти підтоплення значних територій. Коли створюється водосховище, його тиск на навколишні ділянки збільшує фільтрацію води у ґрунт, що призводить до підйому рівня підземних вод. Це особливо небезпечно в районах із низькою водопроникністю ґрунтів, де вода не може вільно проникати на великі глибини, а накопичується біля поверхні,

спричиняючи затоплення. Підтоплення є великою проблемою для сільськогосподарських угідь, оскільки надлишкова вологість ґрунту призводить до загибелі врожаю, розвитку болотистих ділянок та зниження родючості земель. Постійне перезволоження сприяє розвитку заболочення, що може значно змінити екосистему території. Від підтоплення часто страждають населені пункти, розташовані поблизу ГЕС. Підвищення рівня підземних вод може спричинити руйнування фундаментів будівель, знищення доріг та інженерних мереж, а також створити сприятливі умови для розвитку плісняви та грибків у житлових будинках. Це не тільки впливає на комфорт проживання, але й може становити загрозу для здоров'я людей [34,35].

Якість підземних вод значною мірою залежить від взаємодії з поверхневими водами, особливо у зонах впливу великих водосховищ. Гідроелектростанції, утворюючи штучні водойми, змінюють гідродинамічний режим ґрунтових вод. Це може призвести як до підтоплення, так і до зменшення глибини залягання водоносних горизонтів. За даними досліджень, найбільш виражений вплив спостерігався у зоні Каховського водосховища, де в межах 50–130 км від берегової лінії рівень підземних вод підвищився з 10–15 м до 1,5–3 м, що призвело до вторинного заболочення значних площ [36, с.538].

У межах Поділля, зокрема у Вінницькій області, наукові спостереження вказують на стабільно високі ресурси підземних вод — до 324,9 млн м³/рік, однак у деяких районах (Калинівський, Барський, Жмеринський) зафіксовано підвищення рівня ґрунтових вод на 0,8–1,3 м після утворення поблизу малих водосховищ і ставків, пов'язаних із енергетичним або меліоративним використанням [37]. У цих районах також виявлено зростання мінералізації вод до 2000–2200 мг/дм³ у прибережних свердловинах, що обмежує їх придатність для питного водопостачання [38]. Ці процеси особливо небезпечні для сільськогосподарських територій, де збільшення рівня та мінералізації підземних вод сприяє засоленню ґрунтів і втраті родючості. Таким чином,

необхідно враховувати гідрогеологічні наслідки при проектуванні та експлуатації водосховищ у межах Подільського регіону.

Створення водосховищ змінює природний гідрологічний режим річок, що призводить до змін у рівнях поверхневих вод, їхньої швидкості течії та температури. Це може порушувати водний баланс у прилеглих екосистемах, викликаючи пересихання або затоплення територій. Щодо підземних вод, накопичення води у водосховищах підвищує гідростатичний тиск, що сприяє інфільтрації води в підземні горизонти. Це може призводити до підйому рівня ґрунтових вод, що впливає на водопостачання та якість води в прилеглих районах. Зміна циркуляції води може спричинити засолення підземних вод у регіонах із високою мінералізацією ґрунтів, що створює ризики для питного водопостачання та сільського господарства [39, с.280].

Отже, гідроелектростанції, хоч і є важливим джерелом відновлюваної енергії, мають значний негативний вплив на водні ресурси. Вони змінюють природний гідрологічний режим річок, що призводить до порушення швидкості течії, змін температурного балансу та накопичення забруднюючих речовин у водосховищах. Це негативно позначається на якості води, сприяє евтрофікації та зменшенню кількості кисню, що шкодить біорізноманіттю. Крім того, спорудження ГЕС створює міграційні бар'єри для риби, змінює екосистеми та може спричинити зникнення окремих видів. Не менш важливим є вплив на підземні води. Зміни рівня ґрунтових вод можуть спричинити підтоплення або виснаження водоносних горизонтів, що негативно впливає на сільське господарство та водопостачання населення. Також збільшується ризик осідання ґрунтів, зсувів та карстових процесів. Щоб мінімізувати негативний вплив ГЕС, необхідно розробляти ефективні екологічні заходи, зокрема використовувати технології, які зменшують зміну водного балансу. Перспективним напрямом є розвиток альтернативних джерел енергії, таких як вітрова, сонячна та хвильова енергетика, які мають менший вплив на довкілля.

2.3. Вплив ГЕС на ґрунти

Зміна гідрологічного режиму має комплексний вплив на ґрунти в зоні дії ГЕС. Внаслідок регулювання річкового стоку спостерігається зміна рівня ґрунтових вод, що безпосередньо позначається на структурі та властивостях ґрунту. Зокрема, у прибережних зонах, де рівень води підвищується, відбувається перезволоження ґрунтів, що може призводити до їхнього заболочування. Постійно зволожені ґрунти втрачають пористість, а це, у свою чергу, зменшує їхню аерацію. Як наслідок, біологічна активність мікроорганізмів у ґрунті знижується, що негативно впливає на процеси розкладу органічних речовин і утворення гумусу. У результаті зменшується родючість ґрунтів, а на поверхні може з'явитися щільний водонепроникний шар, що ускладнює подальше використання земель для сільськогосподарських потреб [40-42].

Тривале затоплення територій, що характерне для створення водосховищ, спричиняє суттєві ґрунтові трансформації. Анаеробні умови зачіпають природні процеси ґрунтоутворення, провокуючи накопичення токсичних речовин — зокрема метану, сірководню та розчиненого заліза — що знижує їхню придатність для рослинності. Під впливом води інтенсивно вилуговуються кальцій, магній та інші поживні елементи, що веде до деградації родючого шару [43].

У Вінницькій області, згідно з Екологічним паспортом, близько 26,2 тис. км² (майже 20%) території перебувають під загрозою екзогенних процесів — особливо заболочення й засолення ґрунтів. Найінтенсивніша активність таких процесів спостерігається у Барському, Жмеринському та Калинівському районах, де створення ставків або меліоративних водойм, що нагромаджують воду в малих водосховищах, практично сприяло локальному заболоченню земель [зони – 26,2 тис. км²] [44]. Окрім цього, агрохімічні дослідження ґрунтів Вінницького регіону засвідчили, що через незбалансоване використання добрив та підвищену кислотність ґрунтів мають місце локальні дефіцити гумусу, а кислотність і втрата агрегатної структури — своєрідна

передумова для розвитку заболочення та ерозійних процесів. Це ускладнює зараження донних еродованих частин ґрунту, особливо поблизу водойм, підвищуючи ризик деградації земель у регіоні [44].

Однак не менш серйозною проблемою є і зворотний процес – осушення територій, який відбувається, коли ГЕС регулює стік і зменшує рівень води в річках. У таких випадках знижується рівень ґрунтових вод, що може спричинити аридизацію (пересушування) земель. В умовах нестачі вологи структура ґрунту змінюється: зменшується вміст органічних речовин, що призводить до його ущільнення та утворення тріщин. Це особливо небезпечно для чорноземів, які потребують достатнього рівня вологи для збереження своєї родючості. У багатьох випадках осушення земель сприяє посиленню ерозійних процесів, особливо в регіонах зі схильними до руйнування ґрунтами [45].

Будівництво гідроелектростанцій та створення штучних водосховищ спричиняє значні зміни в екосистемах, зокрема у стані ґрунтового покриву. Деградація ґрунтів у зонах впливу ГЕС є складним процесом, що включає заболочування, засолення, ерозію, втрату родючості та погіршення аераційних властивостей. Всі ці зміни виникають через зміну рівня ґрунтових вод, зміну гідродинаміки річкових потоків та порушення природного балансу ґрунтоутворення. Одним із найпоширеніших наслідків впливу ГЕС на ґрунти є їхнє заболочування та засолення. Збільшення рівня ґрунтових вод у прибережних зонах водосховищ сприяє накопиченню вологи в ґрунтах, що створює сприятливі умови для розвитку процесів заболочування. Надмірне зволоження призводить до зниження доступу кисню, що, у свою чергу, уповільнює розклад органічних речовин і призводить до утворення анаеробного середовища [40, с.118]. У таких умовах активізуються процеси відновлення заліза та марганцю, що спричиняє утворення токсичних сполук, які погіршують родючість ґрунту. Крім того, в умовах підвищеного випаровування на поверхні ґрунту може накопичуватися сіль, що веде до його засолення. Особливо це характерно для регіонів із сухим кліматом, де

випаровування переважає над опадами. Засолені ґрунти втрачають здатність утримувати вологу та поживні речовини, що робить їх непридатними для сільськогосподарського використання [45,с.110]. На рисунку 2.4 представлено схему процесів просочування та суфозії, що виникають у зоні контакту греблі з ґрунтовою основою.

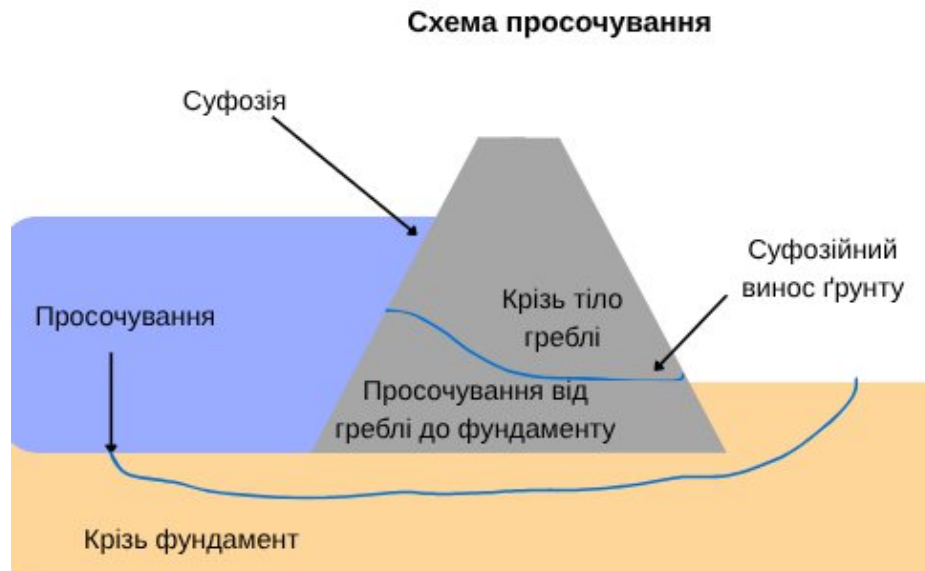


Рис. 2.4. Схема просочування та суфозії ґрунтів у зоні впливу греблі
(авторська схема)

Іншою важливою екологічною загрозою, пов'язаною зі створенням водосховищ для ГЕС, є активізація ерозійних процесів уздовж берегів. Будівництво дамб змінює режим течії — коливні рівні води й нестабільний стік призводять до нерівномірного розмиву берегових зон, що врешті втрачають родючий ґрунт. Наприклад, після руйнації Каховської греблі масивні потоки стоку викликали масштабну абразію берегів і розмив донних відкладень, про що свідчать супутникові спостереження і моделювання наносів, які негативно вплинули як на ландшафт, так і на ерозійні процеси в регіоні [46-48].

У межах Вінницької області специфічних досліджень ерозії берегів водосховищ не виявлено, однак Національний звіт про стан довкілля (2021) містить загальну інформацію про збільшення абразії уздовж районів водойм, що характерно для територій із водоймами штучного походження, у тому

числі східної частини Вінниччини. Окремо заслуговує на увагу, що ерозія веде до втрати верхнього шару ґрунту — щорічно з кожного гектара орних земель Вінниччини зноситься приблизно 24,5 тонн дрібнозему, що концентрується уздовж берегів ставків і малих водосховищ (типово для ґрунтованантажених полів регіону) [49].

Втрата родючості ґрунтів є ще одним негативним наслідком впливу ГЕС. Основною причиною цього явища є вимивання поживних речовин під впливом змін у водному балансі. В умовах підвищеної вологості розчинні форми кальцію, магнію, калію та інших важливих елементів вимиваються у нижні горизонти або потрапляють у водні об'єкти. Це особливо помітно в районах, де рівень ґрунтових вод постійно змінюється через коливання рівня води у водосховищах. Такий процес веде до дегуміфікації – зменшення вмісту гумусу в ґрунтах, що є основним показником їхньої родючості. Без достатньої кількості поживних речовин рослини не можуть нормально розвиватися, а це спричиняє зниження врожайності сільськогосподарських культур та поступове виснаження земель [50, с.31].

Важливим фактором деградації ґрунтів у зонах впливу ГЕС є зменшення їхньої аерації внаслідок підвищеної вологості. Коли рівень ґрунтових вод зростає, пори в ґрунті заповнюються водою, витісняючи повітря. В результаті коріння рослин та мікроорганізми, що мешкають у ґрунті, починають страждати від дефіциту кисню. Це призводить до зміни біохімічних процесів у ґрунті, сповільнення розкладу органічних речовин та зниження активності ґрунтової мікрофлори. Деякі мікроорганізми, що є ключовими для процесів азотфіксації, не можуть виживати в таких умовах, що негативно впливає на азотний баланс ґрунту. Зменшення аерації також сприяє розвитку анаеробних процесів, які можуть супроводжуватися утворенням токсичних сполук, що згубно впливають на ріст рослин [50, с.42].

Одним із головних негативних чинників впливу ГЕС на хімічний склад ґрунтів є накопичення токсичних речовин через застійні явища у водосховищах. Коли річковий потік сповільнюється або навіть повністю

припиняється в деяких зонах водойм, відбувається застій води, що сприяє анаеробним процесам у донних відкладеннях та прилеглих ґрунтах. В умовах нестачі кисню активізується відновлення сульфатів до сірководню, що може призводити до утворення токсичних сполук, зокрема залізистих і марганцевих оксидів. Застійні води часто накопичують залишки органічних речовин, які при розкладі виділяють метан та аміак. Ці процеси можуть призводити до значного забруднення ґрунтів та втрати їхньої придатності для сільськогосподарського використання. Відкладення важких металів, таких як ртуть, свинець і кадмій, що надходять у воду через промислове забруднення, також можуть осідати у прибережних зонах та накопичуватися у ґрунтах, створюючи загрозу для екосистем і здоров'я людей [51].

Важливою хімічною зміною в ґрунтах під впливом ГЕС є порушення кислотно-лужного балансу. Будівництво водосховищ та зміна рівня ґрунтових вод можуть спричиняти як закислення, так і залуження ґрунтів, залежно від специфіки місцевості та геохімічних умов. В умовах тривалого затоплення ґрунтів у болотистих зонах накопичується органічна маса, розкладання якої сприяє підвищенню кислотності. Це особливо характерно для торф'яних та підзолистих ґрунтів, де під впливом анаеробних процесів утворюються органічні кислоти. Висока кислотність негативно впливає на структуру ґрунту, посилюючи вимивання кальцію, магнію та інших важливих мінеральних компонентів, що знижує родючість і погіршує умови для рослинного покриву. З іншого боку, у регіонах з високим вмістом карбонатних порід у ґрунтах може відбуватися зворотний процес – підвищення лужності [14]. Через зміну рівня води в ґрунтових горизонтах відбувається розчинення карбонатів, що сприяє зростанню концентрації гідроксидів кальцію та магнію. Унаслідок цього ґрунти стають менш сприятливими для багатьох культурних рослин, оскільки підвищена лужність ускладнює засвоєння рослинами необхідних мікроелементів, таких як залізо, фосфор і марганець. Подібні зміни кислотно-лужного балансу можуть призводити до втрати рівноваги в ґрунтових екосистемах і зміни видового складу рослинності [15].

Важливим аспектом хімічної трансформації ґрунтів у зоні впливу ГЕС є деградація прибережних ґрунтів через зміну складу води у штучних водосховищах. При створенні водосховищ відбувається поступове осадження наносів, що змінює механічний та хімічний склад ґрунту. У таких умовах прибережні ґрунти зазнають значних змін – їхня структура змінюється через інтенсивне накопичення дрібнодисперсних частинок, що ускладнює водопроникність і повітрообмін. Одночасно підвищений рівень випаровування з поверхні води сприяє накопиченню розчинних солей у верхніх шарах ґрунту, що може спричинити засолення. Зміна хімічного складу ґрунтів у прибережних зонах також призводить до змін у популяціях мікроорганізмів та зниження активності біологічних процесів, які є важливими для ґрунтоутворення [52, с.49].

Будівництво та експлуатація гідроелектростанцій спричиняють значні зміни у функціонуванні екосистем, і одним із найбільш вразливих компонентів є біота ґрунтів. Життя у ґрунтовому середовищі залежить від стабільності вологості, температури, рівня кисню та органічної речовини, тому будь-які зміни в гідрологічному режимі неминуче впливають на мікроорганізми, безхребетних і загальну екосистемну рівновагу. Зміни, спричинені функціонуванням ГЕС, можуть призвести до зміни кількісного і якісного складу ґрунтової мікрофлори, руйнування природних екосистем ґрунту та вимирання окремих видів організмів через погіршення умов існування [17].

Одним із найпомітніших наслідків впливу ГЕС є зміна ґрунтової мікрофлори. Мікроорганізми виконують ключові функції в ґрунтах, зокрема розщеплення органічних сполук, фіксацію азоту, мінералізацію поживних речовин і підтримання родючості. Однак, коли вологісний режим змінюється через підвищення рівня ґрунтових вод або їхнє висихання, популяції ґрунтових мікробів зазнають трансформацій. У перезволожених умовах збільшується кількість анаеробних бактерій, які починають витісняти аеробні форми, що призводить до зміни процесів розкладу органічної речовини. Анаеробні бактерії продукують такі речовини, як сірководень та метан, що

негативно впливають на якість ґрунту та можуть бути токсичними для інших форм життя. З іншого боку, у зонах, які стали пересушеними через регулювання річкового стоку, ґрунтові мікроорганізми гинуть через нестачу вологи, що значно уповільнює біохімічні процеси, зменшує утворення гумусу та призводить до поступового виснаження ґрунту [53, с.217].

Отже, вплив гідроелектростанцій на ґрунти є багатограним і має як прямі, так і опосередковані наслідки. Найважливішими проблемами є зміна водного балансу, що спричиняє заболочування, засолення та ерозію ґрунтів, а також хімічні трансформації, зокрема накопичення токсичних речовин і зміни кислотно-лужного балансу. Функціонування ГЕС впливає на біоту ґрунту, призводячи до деградації екосистем, зміни кількісного та якісного складу мікроорганізмів і зникнення окремих видів ґрунтових організмів. У зв'язку з цим важливим завданням є впровадження екологічно безпечних технологій при експлуатації ГЕС. Це включає раціональне управління рівнем води у водосховищах, інженерні заходи для запобігання ерозії, моніторинг стану ґрунтів і використання методів біологічної рекультивациі деградованих земель. Подальші дослідження повинні бути зосереджені на розробці ефективних стратегій пом'якшення негативного впливу ГЕС, зокрема на відновленні родючості ґрунтів і збереженні біорізноманіття. Збалансоване поєднання енергетичних потреб із природоохоронними заходами дозволить мінімізувати екологічні ризики та забезпечити стале використання ґрунтових ресурсів у майбутньому.

2.4. Зміни ландшафтів та біорізноманіття в зонах впливу ГЕС

Будівництво гідроелектростанцій (ГЕС) має значний вплив на природні ландшафти, зокрема спричиняючи затоплення територій, ерозію берегів, зміну русел річок, а також трансформацію ґрунтового покриву та мікроклімату. Ці процеси є неминучими наслідками створення водосховищ і можуть мати

довготривалі екологічні наслідки. Одним із наймасштабніших перетворень є затоплення великих площ територій. Під час будівництва ГЕС створюється водосховище, яке може охоплювати сотні, а іноді й тисячі квадратних кілометрів. Це призводить до повного занурення під воду значних природних ландшафтів, включаючи ліси, луки, болота та навіть населені пункти. Внаслідок цього безповоротно зникають унікальні природні екосистеми, які формувалися протягом тисячоліть. Наприклад, у процесі створення Київського водосховища були затоплені численні болота та лісові масиви Полісся, що змінило місцеву екологічну рівновагу [54-55].

Зміни в ландшафтах супроводжуються активними процесами ерозії берегів. Коливання рівня води у водосховищах, які виникають через зміну режиму роботи ГЕС, призводять до поступового руйнування берегової лінії. Це особливо характерно для великих водосховищ, де хвилі підмивають ґрунти та викликають обвали ґрунтових мас. Внаслідок цього формуються круті, урвисті береги, які стають нестійкими до подальшої ерозії. Окрім того, в деяких випадках через надмірне зволоження та механічний вплив води активізуються зсувні процеси. Такі явища спостерігалися, наприклад, у зоні впливу Дніпровського каскаду ГЕС, де багато берегових ділянок піддалися деградації та заболоченню [56]. Важливою зміною є трансформація річкових русел. Природні річкові течії формувалися століттями, забезпечуючи стабільний баланс між ерозійними та акумулятивними процесами. Будівництво ГЕС порушує цей баланс, перетворюючи річкові потоки на великі стоячі водойми. Це спричиняє накопичення мулу та інших наносів у нижній частині водосховищ, що, своєю чергою, змінює динаміку водообміну. Водночас нижче за течією спостерігається дефіцит наносів, що може призвести до поглиблення річкового русла та підмивання берегів. Деформація берегової лінії, зумовлена цими процесами, може спричинити втрату прибережних екосистем та зміну гідрологічного режиму сусідніх територій [57]. Ерозійні процеси мають циклічний характер: спочатку відбувається підмивання та вимивання ґрунту, далі формується обвал масиву, після чого

частина ґрунту зсувається та виноситься у воду. Послідовність цих стадій відображена на рис. 2.5.

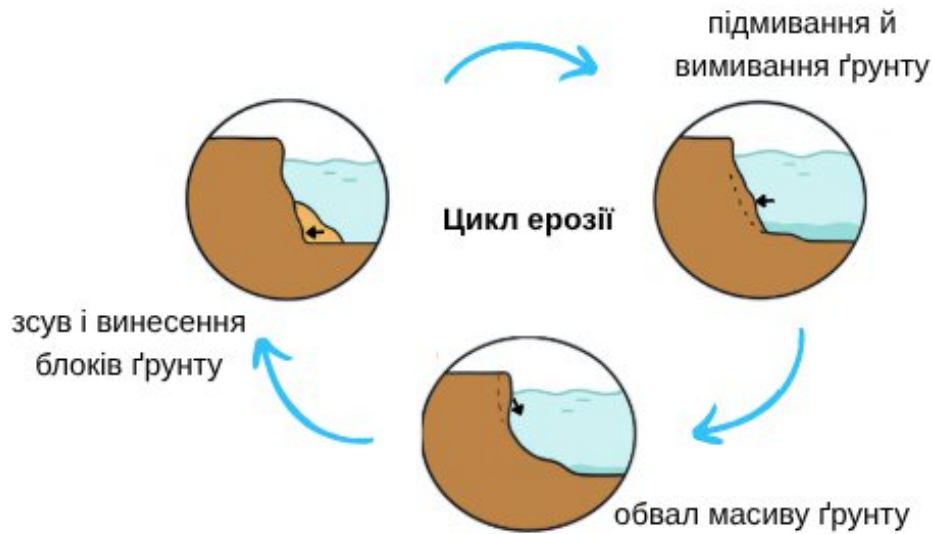


Рис. 2.5. Цикл ерозії берегової зони під впливом коливань рівня води у водосховищі (авторська схема)

Значний вплив будівництва ГЕС спостерігається також у сфері змін ґрунтового покриву та мікроклімату. Затоплення призводить до радикальної зміни вологості ґрунтів: прибережні території можуть зазнавати як надмірного зволоження, так і дегідратації внаслідок перерозподілу підземних вод. На заболочених ділянках відбувається накопичення органічних залишків, що призводить до анаеробного розкладу біомаси, утворення метану та інших газів. Окрім того, підвищена вологість сприяє частішій появі туманів, що змінює мікроклімат регіону. У зимові періоди температурні аномалії у прибережних зонах можуть бути спричинені зміною теплоємності води у водосховищах [58,59].

Один із найсерйозніших наслідків функціонування ГЕС – це втрата природних місць існування різних видів рослин і тварин. Великі площі територій затоплюються, що призводить до зникнення лісів, лук, боліт та інших біотопів, які були середовищем проживання численних організмів. Багато видів флори не можуть вижити в умовах підвищеної вологості або

зміни хімічного складу ґрунтів, що спричиняє їхню поступову деградацію та вимирання. Тварини, що мешкали у прибережних зонах, змушені або адаптуватися до нових умов, або мігрувати в інші райони. Однак для багатьох з них нове середовище може бути непридатним, що призводить до значного скорочення популяцій і навіть повного вимирання окремих видів. Особливо вразливими є земноводні та комахи, які залежать від водно-болотних екосистем і не можуть швидко адаптуватися до нових умов [60, с.13].

Не менш значущим є негативний вплив ГЕС на рибні ресурси. Оскільки греблі перегороджують річки, вони стають непереборною перешкодою для міграції багатьох видів риб. Це особливо критично для прохідних риб, таких як осетрові або лососеві, які мігрують на нерест, піднімаючись за течією. Відсутність доступу до природних нерестовищ призводить до різкого скорочення їхньої чисельності та, у деяких випадках, до повного зникнення популяцій у певних регіонах [61, с.26]. Водночас у водосховищах створюються умови для розмноження нових, непритаманних для регіону видів риб, які можуть витіснити місцеву іхтіофауну. Через зміну швидкості течії та збільшення глибини водойм змінюється температурний режим води, що також впливає на умови розмноження та розвитку багатьох водних організмів. Також екологічною проблемою, пов'язаною з діяльністю ГЕС, є зміни у водних екосистемах. У водосховищах часто спостерігається надмірне розмноження водоростей – процес, відомий як евтрофікація. Це відбувається через застій води та накопичення біогенних речовин, що сприяють активному росту фітопланктону [62, с.15]. Внаслідок цього вода стає каламутною, а велика кількість водоростей споживає значну частину кисню, що призводить до його дефіциту. Через нестачу кисню у воді відбувається загибель багатьох водних організмів, включаючи риб, молюсків та ракоподібних. Розклад органічних залишків на дні водосховищ спричиняє утворення сірководню, що ще більше погіршує якість води і створює несприятливі умови для життя водних організмів [63].

Наземні тварини також відчувають значний вплив від будівництва ГЕС. Унаслідок затоплення природних територій вони змушені залишати свої місця існування та шукати нові біотопи. Проте не завжди це можливо, особливо для спеціалізованих видів, які пристосовані до певних екологічних умов. Вимушена міграція часто призводить до зменшення чисельності популяцій, оскільки нові середовища можуть не містити необхідних ресурсів для виживання [64]. Хижаки та травоядні тварини, які залежали від певних екосистем, втрачають доступ до їжі, що також спричиняє зміни у трофічних ланцюгах. У прибережних районах спостерігається значне скорочення біорізноманіття через знищення природних оселищ, що негативно впливає на екологічну рівновагу у всьому регіоні [65, с.5].

Отже, будівництво та експлуатація гідроелектростанцій призводять до значних і часто незворотних змін у природному середовищі. Найбільший вплив спостерігається у зміні ландшафтів, що проявляється у затопленні територій, ерозії берегів, зміні русел річок та порушенні мікроклімату регіонів. Унаслідок цих процесів відбувається втрата природних екосистем, які формувалися протягом століть і підтримували стабільне функціонування місцевих біотопів. Окрім ландшафтних змін, ГЕС також негативно впливають на біорізноманіття. Руйнування природних середовищ існування спричиняє зникнення багатьох видів рослин і тварин. Особливо вразливими є водні екосистеми, оскільки греблі перешкоджають міграції риб, змінюють умови проживання багатьох організмів і сприяють небажаним процесам, таким як евтрофікація. Зміни у водному балансі та хімічному складі води можуть призводити до загибелі багатьох видів і зменшення загальної біологічної різноманітності в регіоні. У зв'язку з цими викликами надзвичайно важливо розробляти та впроваджувати екологічно безпечні підходи до гідроенергетики.

2.5. Заходи мінімізації негативних наслідків впливу ГЕС на довкілля

Гідроенергетика (ГЕС) забезпечує значну частку відновлюваної електроенергії та характеризується відсутністю прямого викиду шкідливих речовин в атмосферу, у порівнянні з викопними джерелами енергії. Проте роботи крупних, середніх і малих ГЕС спричиняють множинні екологічні проблеми: порушення міграцій риб, зміну гідрології та біоценозів, накопичення метану, ерозію і затоплення земель, утворення мікрокліматичних змін тощо. Тому надзвичайно важливо впроваджувати комплексні заходи мінімізації негативного впливу, які охоплюють етапи планування, будівництва, експлуатації та рекультивації [66].

WWF підкреслює, що сучасне управління водними ресурсами має здійснюватися на рівні всього річкового басейну, а не обмежуватися окремими ділянками. Такий багатовимірний (системний) підхід дозволяє одночасно враховувати економічні, соціальні та екологічні потреби. У плануванні включаються різні зацікавлені сторони — від державних органів до місцевих громад — задля вибору збалансованих рішень [67,68].

Стратегічна екологічна оцінка (CEO) допомагає оцінити сукупний вплив гідроенергетичних проектів на екосистеми та громади на рівні всього басейну, а не лише у безпосередній зоні споруди. Це дозволяє уникнути помилкових рішень, прийнятих без оцінки кумулятивних наслідків, та сприяє розробці проектів із максимально зваженим компромісом між розвитком і безпекою природи й людей [69].

Протокол Hydropower Sustainability Assessment Protocol (HSAP) — це міжнародно визнаний інструмент для оцінювання сталості гідроенергетичних проектів на різних етапах їхнього циклу: від планування до експлуатації. Його розробка проводилася з 2008 по 2010 роки, за участі широкого кола зацікавлених сторін: екологічних та громадських організацій (наприклад, WWF, Oxfam, The Nature Conservancy), урядових структур (Китай, Норвегія, Ісландія тощо), фінансових інституцій (включно з банками, що дотримуються принципів «Equator Principles», Світовим банком), а також компаній та організацій гідроенергетичного сектору [70]. Протокол містить чітко

визначені критерії з понад двадцятьма темами, що охоплюють екологічні, соціальні, технічні та економічні аспекти. До них належать: підтримка природних режимів стоку, якість води, біорізноманіття, ерозія, седиментація, безпека інфраструктури, переселення населення, права корінних народів, економічна доцільність, управління проектом тощо.

HSAP дозволяє виробляти стандартизовані оцінки і позиціонувати проєкт в рамках практик від «good practice» до «best practice», що дає змогу порівнювати результати найрізноманітніших проєктів незалежно від їхньої географії [70]. Протокол не є альтернативою обов'язковій екологічній експертизі, а служить доповненням і покращенням практики, забезпечуючи прозорість, стандартизованість та порівняльність оцінок.

Екологічно дружні технології гідроенергетики здобувають дедалі більшої актуальності в контексті мінімізації впливу на водні екосистеми. Одним із таких рішень є run-of-the-river (гідроенергетика без великих резервуарів), яка використовує природний річковий потік без затримки води. Цей підхід забезпечує менший вплив на середовище: зменшує затоплення прилеглих земель, фрагментацію річкових систем та ризик накопичення органіки, яка може виробляти метан. Він підтримує природну гідрологічну динаміку русла [71]. Проте така технологія має й обмеження: генерація електроенергії залежить від сезонності стоку, що знижує її здатність реагувати на пікове енергоспоживання [72].

Перспективним підходом є low-head hydropower (малі турбіни на перепадах низького напору), які встановлюють на існуючих дамбах чи греблях. Це рішення суттєво знижує екологічний тиск, оскільки відбувається адаптація до вже зміненого ландшафту. У цій технології також можливе облаштування рибопереходів або захисних решіток — така конструкція сприяє підтримці міграції риб й допомагає уникнути накопичення метану у водоймах [73].

Для гармонізації гідроенергетичної діяльності з природними процесами важливим є ефективне управління седиментацією та водним режимом. Одним

із методів є флашинговий скид (flushing flow) — контрольований потік води, що очищує водосховище від відкладеного осаду. Це зберігає морфологію русла, але може короткочасно створювати згущення завислих часток, які можуть негативно впливати на дрібних водних організмів [74,75].

Альтернатива — седиментні обхідні тунелі (sediment bypass tunnels), що дозволяють воді разом з осадом обминати греблю, зберігаючи природний седиментаційний потік. Такий підхід ефективно використовується в гірських умовах і допомагає мінімізувати накопичення у водосховищах. Наприклад, випадок водосховища Solis у Швейцарії підтверджує, що bypass-тунелі дозволяють регулярно підтримувати транспорт осаду нижче по течії без потреби частого втручання [76]. Комплексне поєднання технологій run-of-the-river, low-head hydropower з адаптивними механізмами керування водою і седиментами (флашинг, bypass) утворює збалансований підхід, що знижує екологічний слід гідроенергетики, зберігаючи при цьому ефективність виробництва енергії.

У сучасній практиці мінімізації екологічного впливу гідроелектростанцій особливе значення мають біоінженерні заходи, спрямовані на збереження або відновлення водних міграційних шляхів риб і зменшення індустріального навантаження на біоценози. Хоча термінологія типу «salmon cannon», «trap-and-haul» або «рибоходи» широко використовується в галузі, особливо в проектах Північно-Західних лабораторій США (PNNL), це є технічним суттєвим рішенням: вони функціонують як автоматизовані або напівавтоматизовані системи, які переносять риб через штучні бар'єри таким чином, що зменшується їхня смертність при міграції [77].

Паралельно з цим розробки fish-friendly турбін стали важливою складовою сучасних ГЕС. Компанії, такі як Natel Energy, у співпраці з PNNL, створили турбіни, конструкційно адаптовані так, аби риба могла безпечно проходити через гідротехнічні структури без травм або втрат. Це дозволяє зберегти продуктивність електростанцій, водночас мінімізуючи екологічні

ризика [78]. Інші технології, наприклад турбіни від Andritz, DIVE та Alden, сфокусовані на зменшенні турбулентності і змін потоку, що знижує потенційне пошкодження риби — підходи особливо важливі для маломасштабних або модернізаційних проєктів [79].

У рамках експлуатаційних заходів природна стабільність системи підтримується кількома ключовими практиками. По-перше, регулярне очищення водосховищ від органічного надлишку, зокрема від відмерлих рослин, практично зменшує утворення парникових газів, таких як метан і CO₂, які утворюються під час анаеробного розкладання — хоча прямі офіційні джерела з України щодо методів ще варто сформулювати, загальноприйняті екологічні стандарти (включаючи RBMP) містять вимоги проводити моніторинг і профілактику накопичення органіки [80].

По-друге, забезпечення мінімального екологічного стоку — це обов'язкова вимога законодавця України: для регульованих річок визначається мінімально прийнятний водний стік, який забезпечує нормальні умови існування екосистеми — він закріплений у Директиві щодо водного права України і RBMP [81].

По-третє, постійну увагу до стану води забезпечує моніторинг якості води, що здійснюється територіальними водоймами згідно з методологією, затвердженою Міністерством екології. Такі оцінки включають хімічні, гідробіологічні та фізичні параметри, що дозволяє оперативно виявляти антропогенні забруднення або гідроморфологічні ризики [82].

У контексті екологічно сталого розвитку гідроенергетики ретрофітинг існуючих дамб стає перспективною стратегією. Додавання турбін до непрацюючих споруд дозволяє генерувати «чисту» енергію без нових масштабних будівництв — це зменшує екологічні втрати й мінімізує адміністративні бар'єри. Наприклад, у США лише близько 2 500 з понад 90 000 дамб наразі виробляють електроенергію; потенціал ретрофітингу оцінюється у додаткові 12 000 МВт [83]. Експерти відзначають можливість суттєвого збільшення відновлюваного потенціалу без залучення нових територій — і

такі проекти підтримуються як екологічні спільнотою, так і гідроіндустрією [84].

Насосно-акумуляційні системи (ГАЕС) — заслуговує окремої уваги як один із найефективніших методів накопичення енергії. За даними National Renewable Energy Laboratory, закриті системи ГАЕС (closed-loop pumped storage hydropower) демонструють найнижчий потенціал глобального потепління серед технологій зберігання енергії. Вони є основним сховищем енергії в енергомережах — в США ГАЕС становлять понад 95 % встановленої потужності накопичення. Їхня гнучкість дозволяє стабілізувати мережу при нарощуванні генерації з змінних джерел (сонце, вітер) [85,86].

Отже, з урахуванням проаналізованих екологічних, інженерних та управлінських аспектів, можна зробити висновок, що ефективна мінімізація негативного впливу гідроелектростанцій на довкілля потребує не ізольованих заходів, а саме їх комплексного поєднання. Кожне окреме рішення — від впровадження fish-friendly турбін до управління седиментацією — дає помітний ефект, однак лише в інтегрованій взаємодії вони формують стійку систему, що здатна поєднувати енергетичну ефективність із екологічною відповідальністю.

Ключовим є перехід від точкових інтервенцій до стратегічного екосистемного мислення. Необхідно впроваджувати басейнове планування, підкріплене системною екологічною оцінкою, дотриманням міжнародних стандартів (зокрема HSAP) та використанням екологічно обґрунтованих технологій — таких як run-of-the-river або low-head системи. Також важливо модернізувати існуючі об'єкти за допомогою ретрофітінгу, розвивати ГАЕС як елемент гнучкої енергомережі та впроваджувати штучний інтелект для прогнозного управління.

Суть сучасної гідроенергетики полягає не лише у виробництві електроенергії, а й у здатності функціонувати як частина стійкої екосистеми. Лише за умови системного підходу, який враховує екологічні, технічні, економічні та соціальні чинники, можна забезпечити її гармонійне існування

в умовах глобальної зміни клімату, зростаючого енергоспоживання та потреби у збереженні біорізноманіття.

Висновки до розділу 2

У другому розділі було здійснено комплексний аналіз екологічних наслідків функціонування гідроелектростанцій на довкілля. Дослідження доводить, що експлуатація ГЕС призводить до глибоких змін у природних системах, впливаючи на водні ресурси, кліматичні характеристики, ґрунтовий покрив, ландшапти та біорізноманіття. Особливо помітними є зміни гідрологічного режиму річок: уповільнення течії, нестабільність рівня води, порушення сезонних коливань, що негативно впливає на водну екосистему.

Установлено, що в зонах впливу ГЕС змінюється мікроклімат: підвищується вологість повітря, зменшується добова та річна амплітуда температур, що позначається на життєдіяльності рослин і тварин. Ґрунти піддаються заболоченню, деградації, втраті родючості, особливо в заплавах, що заливаються при створенні водосховищ. Значних трансформацій зазнають ландшапти: створюються штучні водойми, зникають природні рельєфні форми, руйнуються екосистеми річкових долин.

Надзвичайно загрозливим є вплив ГЕС на біорізноманіття. Спостерігається зменшення кількості видів риб, порушення міграцій водних організмів, зникнення або переміщення окремих популяцій. Крім того, функціонування водосховищ спричиняє накопичення токсичних речовин, евтрофікацію води, зміну хімічного складу водного середовища. Аналіз ситуації з Каховською ГЕС, зруйнованою в 2023 році, став яскравим прикладом того, як технологічні об'єкти великої потужності можуть не лише змінювати довкілля поступово, а й провокувати масштабні екологічні катастрофи в разі їх руйнування. Цей випадок підтверджує важливість прогнозування ризиків та належного екологічного супроводу експлуатації ГЕС.

РОЗДІЛ 3. ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ НА ДОВКІЛЛЯ У ШКІЛЬНОМУ КУРСІ ГЕОГРАФІЇ

3.1. Можливості вивчення впливу ГЕС на довкілля у шкільному курсі географії

Системне опрацювання теми гідроенергетики у шкільному курсі географії доцільно вибудовувати як спіраль: від базових уявлень про водні об'єкти та найпростіші екологічні наслідки їхнього штучного перетворення у 6 класі — до комплексного розгляду ролі гідроенергетики в паливно-енергетичному комплексі та в контексті сталого розвитку у 9 класі. Нижче подано конкретну вбудову теми за класами, розділами й темами з орієнтацією на предметні результати, методи, приклади й очікувані навчальні дії здобувачів освіти.

6 клас — Розділ 3. Води суходолу; тема: «Річки. Озера. Болота. Водосховища». На цьому етапі учні закладають фундаментальні поняття про природні водні об'єкти, їхні джерела живлення, водний режим і роль у колообігу води. Саме тут доцільно вперше представити поняття «водосховище» як штучну водойму та пояснити, що воно найчастіше створюється для потреб гідроелектростанцій. Через спостереження за схемами та простими моделями (наприклад, лоток з піском і водяним потоком) учні бачать, як будівництво греблі змінює швидкість течії, спричиняє акумуляцію наносів у верхів'ях і дефіцит твердого стоку нижче за течією. На рівні доступних прикладів учитель

демонструє, як поява водосховища трансформує берегову лінію, створює заплавні акваторії та нові прибережні біотопи, але водночас порушує умови існування видів, пристосованих до проточної води. Під час аналізу карт і контурних схем корисно запропонувати учням позначити природне русло та межі гіпотетичного водосховища, порівняти їх і зробити висновки про зміну площі водного дзеркала та підтоплення низин. Формувальне оцінювання зосереджується на вмінні пояснювати причинно-наслідкові зв'язки: «гребля → зміна течії → осадки → зміна умов існування водних організмів». Ключове дидактичне завдання – створити цілісне уявлення про те, що ГЕС є одним із чинників антропогенної трансформації річкових систем (Додаток А).

7 клас — Розділ 2. Материка і океани; тема: «Природні ресурси материків. Використання людиною водних ресурсів». У 7 класі учні розширюють горизонти до глобального масштабу, де логічно розглянути приклади найбільших ГЕС світу та пов'язані з ними географічні закономірності. Порівняння розміщення гігантських гребель на різних материках допомагає усвідомити роль рельєфу (гірські ущелини, міжгірські долини), клімату (сезонність стоку, мусонні дощі), площі і водності басейнів. На карті світу учні простежують, як техногенні водосховища змінюють структуру річкових долин, а також як будівництво ГЕС впливає на локальне населення: переселення громад, зміна традиційного природокористування, трансформація рибальства та зрошувального землеробства. У процесі роботи з атласами та короткими кейс-стаді учні вчать співвідносити «енергетичний» ефект (виробіток електроенергії, регулювання паводків, водопостачання) з

екологічною ціною (втрата біорізноманіття, бар'єр для міграцій риб, евтрофікація). Пропоновані навчальні дії — побудова простих порівняльних таблиць і усні аргументовані висновки — сприяють розвитку географічної уяви та навичок критичного аналізу ресурсокористування на глобальному рівні (Додаток Б).

8 клас — Розділ 2. «Україна у світі: природа і населення»; тема: «Природні умови і ресурси України. Водні ресурси та їх використання».

Перехід до національного рівня дозволяє глибоко опрацювати конкретні кейси й показати учням безпосередній зв'язок гідроенергетики з їхнім життєвим простором. Аналізуючи річкові басейни України, учні досліджують Дніпровський каскад ГЕС як системний приклад антропогенної трансформації великої річкової системи. Важливо послідовно розглянути екологічні наслідки: затоплення заплавлених і прибережних територій та пов'язані з цим ґрунтові процеси (вторинне засолення, підтоплення), зміну гідрографічної мережі (звивистість русла нижче гребель, перерозподіл наносів), зміну гідрохімічного режиму (евтрофікація стаціонарних акваторій, цвітіння води), а також вплив на іхтіофауну (переривання міграційних шляхів, селекційний тиск на види, пристосовані до течії). Доцільно застосувати локальні карти, цифрові висотні моделі й супутникові знімки (за можливості — через шкільні ГІС-платформи), аби учні ідентифікували межі водосховищ, порівняли їх із доводосховищним станом, оцінили зміни берегової лінії та нові зони затоплення. Практичним результатом є короткий аналітичний есе-звіт або міні-проект з фотодоказами (скріншоти карт, аерознімків), де учні роблять власні висновки про баланс вигод і ризиків (Додаток В).

8 клас — Розділ 4. «Використання та охорона природних умов і ресурсів України»; тема: «Антропогенні зміни природи. Проблеми охорони водних ресурсів». У межах цього розділу тему ГЕС варто поглибити через призму екологічної безпеки та природоохоронних підходів. Учні вивчають механізми впливу гідроенергетичної інфраструктури на річки (фрагментація екосистем, «ефект бар'єра» для живих організмів), на ґрунти

(підтоплення, торф'яні процеси на колишніх заплавах), на біорізноманіття (редукція видового різноманіття риб, інвазійні види у стоячих водоймах). Паралельно опановуються інструменти мінімізації негативних наслідків: рибоходи та рибопідйомники, екологічні попуски (environmental flows), протипродовгові заходи для боротьби з евтрофікацією (аерація, біоманіпуляції), кероване осушення прибережних ділянок, моніторинг якості води. До навчальних дій включається рольова дискусія «Громада — енергетики — природоохоронці», в якій учні моделюють ухвалення рішень щодо реконструкції греблі або режимів попусків. Критеріями оцінювання стають уміння посилатися на дані (карти, спостереження, офіційні довідники), продукувати збалансовані рекомендації та відрізнити природні процеси від техногенно індукованих (Додаток В).

9 клас — Розділ 2. «Господарство України і світу»; тема: «Електроенергетика України та світу». На фінальному етапі спіралі учні узагальнюють і систематизують знання про роль гідроенергетики в структурі паливно-енергетичного комплексу. Тематичний акцент зміщується до порівняльного аналізу джерел енергії за життєвим циклом (LCA): матеріалоємність, вуглецевий слід, використання земель і води, вплив на локальні екосистеми та громади. Учні опановують базові елементи «енергетичної грамотності»: розуміння пікових навантажень, маневровості потужностей, ролі ГЕС у балансуванні системи з великою часткою ВДЕ, а також екологічної вартості такої маневровості (часті зміни рівня води, тиск на прибережні біотопи, ерозія нижче греблі). Доцільно залучити прості розрахунки: оцінити потенційну енергію води для заданого напору, зіставити її з орієнтовним добовим споживанням електроенергії міста, сформулювати висновки про доцільність і межі нарощування гідропотужностей. Підсумковою діяльністю може стати політика-бриф (policy brief) або структурована презентація, де учні формують аргументовану позицію щодо майбутньої ролі ГЕС у національній енергетиці з урахуванням екологічних ризиків (Додаток Г).

9 клас — Розділ 4. «Геоєкологічні проблеми та сталий розвиток»;
тема: «Вплив господарської діяльності на географічну оболонку».
Завершальне узагальнення доцільно виконати в логіці системного мислення: ГЕС розглядаються як вузли складної соціо-еколого-технічної системи, де будь-яка інженерна дія породжує каскадні наслідки — від зміни мікроклімату прибережних територій і структури донних відкладів до переміщення населення й трансформацій локальних економік. Учні аналізують кейси геоєкологічних проблем, спричинених гідробудівництвом: руйнування берегів нижче гребель унаслідок дефіциту наносів, модифікація мікрокліматичних умов (підвищення вологості, тумани у прибережних зонах), порушення міграційних шляхів риби і зникнення чутливих видів. У форматі дебатів і проблемних семінарів розглядаються сценарії «зеленої» модернізації: реконструкція старих ГЕС, екологічні попуски, ренатуралізація окремих ділянок русла, компенсаторні заходи для громад. Вимірюваними навчальними результатами виступають здатність інтегрувати природничі, соціально-економічні та технологічні аргументи, рефлексувати екологічні ризики й пропонувати практично здійсненні, науково обґрунтовані рішення (Додаток Г).

Запропонована «дорожня карта» дає вчителю чіткі точки входу в тему на кожному рівні шкільної географії, забезпечує наростання складності змісту й методів (від наочного моделювання до аналізу даних і політики), а також формує в учнів послідовне розуміння того, як гідроелектростанції одночасно слугують енергетичній безпеці й становлять суттєвий виклик для річкових екосистем, ландшафтів і громад. Така логіка викладу відповідає компетентнісному підходу: учні не лише відтворюють факти, а й навчаються досліджувати, оцінювати та аргументовано ухвалювати рішення в реальних екологічних ситуаціях.

Отже, вивчення впливу гідроелектростанцій на довкілля у шкільному курсі географії є важливим напрямом формування екологічної грамотності учнів. Дослідження цієї теми сприяє усвідомленню школярами взаємозв'язку

між природними процесами та діяльністю людини, допомагає розвивати відповідальне ставлення до використання природних ресурсів і спонукає до пошуку екологічно безпечних рішень у сфері енергетики. Значну роль у цьому відіграє використання інтерактивних методів навчання, таких як проєктна діяльність, експериментальні дослідження, аналіз картографічних матеріалів і статистичних даних. Практичні заняття, екскурсії, використання ГІС-технологій і дебати дозволяють учням не лише глибше зрозуміти проблему, а й сформувати навички критичного мислення та наукового аналізу. Перспективи розвитку шкільної географічної освіти в контексті екологічних досліджень полягають у розширенні міждисциплінарного підходу, активній співпраці з науковими установами та екологічними організаціями. Це дозволить виховати нове покоління громадян, здатних ухвалювати зважені екологічні рішення та сприяти сталому розвитку суспільства.

3.2. Методика проведення уроків географії з використанням знань про вплив ГЕС на довкілля

Уроки географії є ідеальним майданчиком для розгляду екологічних питань, оскільки вони дозволяють учням комплексно аналізувати наслідки людської діяльності. Викладання теми впливу ГЕС на довкілля сприяє розвитку критичного мислення, формуванню відповідального ставлення до використання природних ресурсів та усвідомленню важливості сталого розвитку. Викладання теми впливу гідроелектростанцій на довкілля потребує системного підходу та логічної побудови навчального матеріалу. Учні повинні не лише отримати теоретичні знання, а й розвинути аналітичні навички для оцінки екологічних наслідків людської діяльності. Для цього важливо структурувати урок у такий спосіб, щоб він охоплював як фундаментальні поняття, так і реальні приклади з життя.

Методика формування в учнів цілісного розуміння впливу гідроелектростанцій на довкілля ґрунтується на компетентнісному та дослідницькому підходах, що поєднують предметний зміст курсу географії з міжпредметними зв'язками та практичними формами діяльності. Вона передбачає поступове нарощування складності від елементарних понять про води суходолу та спостережень за наслідками штучного регулювання стоку у 6 класі до аналізу енергетичної політики, життєвого циклу виробництва електроенергії та геоecологічних ризиків у 9 класі. Логіка реалізації такої методики спирається на три взаємопов'язані складові: дидактичні цілі, зміст і сценарії уроків, а також систему оцінювання, яка фіксує зростання пізнавальної автономії та аналітичних умінь школярів.

На рівні методологічних засад пріоритет надається навчальним ситуаціям, у яких учень не лише відтворює визначення або перелік фактів, а конструює власні пояснення, спираючись на емпіричні спостереження, моделювання, аналіз картографічних і статистичних джерел, елементи геоінформаційного аналізу. Важливо забезпечити контекстність навчання: глобальні приклади гідроенергетичних проєктів пропонуються для порівняння з національними кейсами, а останні — з локальними спостереженнями у знайомому учням середовищі. Таке зіставлення масштабів дозволяє побачити єдність природничих закономірностей і соціально-економічних наслідків, а також досягнути компроміси між енергетичною безпекою та екологічною вартістю гідробудівництва.

Сценарна частина методики детально корелює із запропонованими програмними місцями для 6–9 класів. У 6 класі, у межах розділу «Води суходолу», доречно організувати комбінований урок із елементами практикуму, де провідна дидактична мета — сформулювати первинні уявлення про те, як гребля перетворює ділянку річки на водосховище і з якими фізико-географічними наслідками це пов'язано. Вступний етап може містити коротку проблемну ситуацію на основі фотографій або схеми «до» і «після» перекриття русла. Далі вчитель здійснює цілеспрямоване пояснення базових понять:

природний стік, швидкість течії, нанос, верхній та нижній б'єфи, берегова лінія. Практичний компонент реалізується як безпечне шкільне моделювання: у довгому лотку з шаром піску учні спостерігають за рухом води, появою зон акумуляції та ерозії, після чого вводиться «гребля» як тонка пластина; учні фіксують, як змінюються швидкість потоку, характер донних відкладів і берегова форма. Завершальний етап передбачає картографічне закріплення: школярі на контурній схемі позначають межі річкового плеса і умовного водосховища, роблять письмовий висновок про причинно-наслідкові зв'язки між будівництвом греблі та трансформацією екосистеми. Особлива увага приділяється поняттю «штучна водойма», відмінностям між проточними та стоячими водами, а також першим уявленням про вплив на живі організми, що згодом буде поглиблено у старших класах.

У 7 класі, в межах розділу «Материки і океани», доцільно побудувати урок-кейс, зосереджений на порівняльному аналізі великих ГЕС світу з різних материків. Після актуалізації попередніх знань і постановки проблемного запитання про чинники вибору місця для греблі учні працюють із фізичною картою світу й тематичними картами водних ресурсів, зіставляючи роль рельєфу, клімату та площ водозбору. Наступним кроком є колективний розбір двох-трьох кейсів, які демонструють різні поєднання природних і соціально-економічних умов: гірські ущелини з високим напором, рівнинні водосховища на великих річках, аридні регіони, де водосховища відіграють роль іригаційних резервуарів. Учитель спрямовує учнів до аналітичного зіставлення «енергетичних вигод» з «екологічною ціною», включно з переселенням населення, фрагментацією річкових екосистем і бар'єром для міграції риб. У підсумку урок перетворюється на коротку академічну дискусію, під час якої школярі формулюють аргументовані позиції щодо доцільності гідробудівництва у різних фізико-географічних умовах і роблять висновок про те, що подібні рішення потребують балансування природничих, економічних та соціальних міркувань.

У 8 класі, в межах розділу «Україна у світі: природа і населення», методика акцентує роботу з даними й локальними прикладами. Вибір Дніпровського каскаду як наскрізного кейсу дозволяє організувати навчальне дослідження, що поєднує картографічний аналіз, порівняння схем водообміну, інтерпретацію супутникових знімків і короткі лабораторні демонстрації. На першому занятті учні візуально співставляють межі історичного річкового русла та сучасних водосховищ, з'ясовують, як змінився гідрологічний режим: згладжування паводків, збільшення часу перебування води, формування великих мілководних акваторій. Далі вчитель підводить до екологічних наслідків, зокрема до явища евтрофікації як результату поєднання повільних течій, високих температур у літній період і надходження біогенних елементів. Безпечний лабораторний дослід у класі може моделювати відносні умови «швидкого» та «повільного» обміну води у двох прозорих посудинах із доданим індикатором, що дає змогу обговорити, чому стоячі акваторії є більш вразливими до «цвітіння» води. Окремий блок присвячується іхтіофауні: учні аналізують, як переривання міграційних шляхів і зміна донних субстратів впливають на видовий склад та чисельність, і під керівництвом учителя знайомляться з інженерними рішеннями на кшталт рибоходів. Навчальний результат формулюється у форматі короткого аналітичного звіту з власними висновками, підкріпленими картографічними фрагментами та ілюстративним матеріалом.

У цьому ж класі, у межах розділу «Використання та охорона природних умов і ресурсів України», методика змінює акцент із констатації наслідків на вироблення рішень. Доцільно застосувати формат уроку-обговорення зі структурованою рольовою компонентою, у межах якого моделюється переговорний процес між представниками громади, енергетичної компанії та природоохоронної організації. Підготовчий етап передбачає опрацювання коротких інформаційних довідок про механізми пом'якшення впливів: екологічні попуски як інструмент імітації природних паводків, що підтримують нерест і переміщення риб; моніторинг якості води та

біоманіпуляції для зниження інтенсивності «цвітіння»; зміцнення берегів і відновлення прибережних буферів. У ході обговорення учні мають співвідносити пропоновані заходи з конкретними проблемами й обмеженнями, визнаючи, що жодне рішення не є універсальним, а ефективність залежить від сезонних і просторових параметрів річкової системи. Дидактична мета полягає у формуванні здатності переходити від опису явищ до проектування керованих змін і їхнього оцінювання.

У 9 класі, у темі «Електроенергетика України та світу», методика пропонує іншу оптику — системно-економічну. Урок варто організувати як аналітичний семінар, де учні зіставляють гідроенергетику з іншими джерелами за ключовими параметрами життєвого циклу: вуглецевим слідом, матеріалоемністю, використанням земель і води, впливом на локальні екосистеми та соціальні структури. Важливо включити елемент кількісної грамотності: простий розрахунок потенційної енергії води при заданому напорі дозволяє зрозуміти фізичну основу виробництва гідроенергії, а обговорення маневровості потужностей — її функціональну роль у балансуванні енергосистеми з високою часткою відновлюваних джерел. Обов'язковою є рефлексія над «екологічною собівартістю» такої маневровості, зокрема над тим, як коливання рівнів впливають на прибережні екосистеми нижче гребель. Підсумком стає короткий письмовий політика-бриф, у якому учні виробляють аргументовану позицію щодо пріоритетів модернізації гідроенергетики з огляду на екологічні критерії.

Завершальний методичний акцент у 9 класі, у темі «Вплив господарської діяльності на географічну оболонку», спрямовано на інтеграцію всіх попередніх елементів у рамку сталого розвитку. Урок доцільно вибудувати як проблемний колоквиум. Учні аналізують ланцюги наслідків гідробудівництва — від перерозподілу наносів, що спричиняє руйнування берегів нижче гребель, до модифікації мікроклімату прибережних зон із підвищеною вологістю та частотою туманів, а також до соціальних зрушень у громадах, котрі зазнали переселення. У дискусії вони застосовують інструменти

системного мислення: окреслюють зацікавлені сторони, визначають індикатори екологічного стану, пропонують сценарії модернізації та критерії їхньої оцінки. Результатом є узгоджене у групі формулювання набору практичних рекомендацій, які демонструють здатність школярів інтегрувати природничі дані, техніко-економічні міркування та етичні вимоги до просторової справедливості.

Система оцінювання у цій методиці виконує не лише вимірювальну, а й навчальну функцію. Формувальне оцінювання реалізується через короткі письмові висновки після дослідів, мікрорефлексії наприкінці уроків, спостережні листи під час роботи в групах і стандартизовані критерії для оцінювання картографічного аналізу. Підсумкове оцінювання передбачає перевірку здатності застосовувати поняття в новій ситуації, інтерпретувати дані з карт і діаграм, аргументувати позицію, спираючись на факти, і пропонувати реалістичні заходи пом'якшення впливу. Для проєктних і дебатних форм доцільно наперед ознайомлювати учнів із критеріями, що охоплюють коректність використання термінів, точність інтерпретації джерел, логіку міркувань і вміння працювати в команді.

Методика передбачає диференціацію та інклюзію. Учням із різними освітніми потребами пропонуються варіативні форми презентації результатів: письмові нотатки, усні повідомлення, короткі відео або інфографіки. Для учнів, що потребують більшої структурованості, надаються шаблони картографічного аналізу та лабораторних звітів; для мотивованих — розширені завдання з елементами самостійного ГІС-аналізу або зіставлення двох незалежних джерел даних. Безпекові аспекти врегульовано інструктажем перед експериментами та екскурсіями, чітким розподілом ролей під час практичних робіт і дотриманням академічної доброчесності щодо використання джерел інформації.

Змістове наповнення уроків підтримується відповідним інструментарієм. Базові матеріали охоплюють фізичні та тематичні карти, атласи, настінні схеми; за можливості використовується проєкція

спутникових знімків і простих ГІС-середовищ для демонстрації зміни берегової лінії та конфігурації водних дзеркал. Практичні досліді виконуються з безпечних матеріалів: піску або дрібного гравію, чистої води, індикаторних барвників, прозорих посудин і вимірювальних інструментів. Інформаційно-комунікаційні технології служать для спільного опрацювання результатів, збирання зворотного зв'язку та презентації навчальних продуктів.

Організаційно методика легко вкладається в модульне планування. У 6 і 7 класах достатньо одного-двох занять для формування базових уявлень і глобального контексту; в 8 класі доцільні три-чотири заняття, що розкривають національний кейс і логіку природоохоронних рішень; у 9 класі потрібні щонайменше три заняття для економіко-географічного аналізу, системного узагальнення та дискусії про сценарії модернізації. Така поступовість гарантує, що на кожному віковому етапі учні отримують саме той рівень змісту й видів діяльності, який відповідає їхнім когнітивним можливостям і програмним вимогам.

Отже, запропонована методика демонструє, як у межах чинної структури шкільного курсу географії системно й послідовно формувати у здобувачів освіти науково обґрунтоване розуміння впливу гідроелектростанцій на довкілля. Вона пов'язує природничі знання з реальними просторовими процесами, розвиває вміння працювати з різними джерелами даних і відстоювати аргументовані позиції, а також поступово переводить учня від опису явищ до оцінювання та проектування рішень у парадигмі сталого розвитку. Такий підхід не лише підвищує мотивацію та навчальні результати, а й робить шкільний курс географії ефективним інструментом виховання екологічної відповідальності.

3.3. Розгорнутий конспект уроку на тему впливу ГЕС на довкілля

Предмет: Географія

Клас: 9 («Україна і світове господарство»)

Тип уроку: Комбінований (вивчення нового + практична діяльність)

Тривалість: 45 хв

1) Обґрунтування місця теми в програмі

Урок розроблено в межах теми 9 класу «**Виробництво та постачання електроенергії**»: типи електростанцій (зокрема ГЕС), електроенергетика України/світу, практична робота з позначенням найбільших електростанцій; акцент курсу — аналіз негативних наслідків діяльності різних типів електростанцій для довкілля і здоров'я людей.

Очікувані результати теми також передбачають уміння **знаходити на карті ГЕС/ГАЕС (каскад на Дніпрі, Дністровська, Ташлицька) та пояснювати розміщення енергопотужностей.**

Варіанти інтеграції з іншими класами:

- 6 клас (Гідросфера): «Води суходолу», «Штучні водойми і водотоки: водосховища та канали», екологічні акценти щодо охорони вод.
- 8 клас (Україна: природа і населення): «Води суходолу і водні ресурси України», охорона водних ресурсів; практична робота з позначенням водосховищ.

2) Цілі уроку (за компонентами)

Знаннєві: учні пояснюють принцип роботи ГЕС; називають приклади ГЕС України; розкривають позитивні/негативні впливи ГЕС на довкілля й населення. (У межах теми 9 кл про типи електростанцій та їх вплив.)

Діяльнісні: знаходять на карті ГЕС/ГАЕС України, аналізують чинники розміщення, виконують міні-дослідження й презентують висновки.

Ціннісні: оцінюють наслідки енергобудівництва для сталого розвитку та безпеки.

Наскрізнi лінії: «Екологічна безпека та сталий розвиток», «Громадянська відповідальність».

3) Обладнання й ресурси

- Фізична карта України, атласи 9 кл; контурні карти.

- Роздатки: **Картка 1** «Схема будови ГЕС», **Картка 2** «Екологічні наслідки ГЕС», **Картка 3** «Карта-основа Дніпровського каскаду».
- Проектор/екран (за наявності).
- Набір стікерів (зелений/жовтий/червоний) для «світлофора».

4) Структура та поминутне планування

I. Організаційний момент, мотивація (5 хв)

Учитель. «Електроенергія потрібна всім — але чи все чисто там, де працюють «чисті» ГЕС? Спробуймо з'ясувати». Міні-анкета (Mentimeter/папір): «ГЕС — це радше плюс чи мінус для природи?» (1 хв, без обговорення — повернемося наприкінці).

Задача: покажіть на настінній карті річку Дніпро й один гідровузол (усна відповідь 2–3 учнів).

II. Актуалізація опорних знань (5 хв)

Метод «Правда/Міф» (робота в парах):

1. «ГЕС не мають викидів CO₂ — отже, екологічних ризиків немає».
2. «Водосховища — це лише позитив: зрошення, питна вода, рекреація».
3. «Розміщення ГЕС залежить від рельєфу і водності річки».

→ Коротке обговорення з підбиттям проміжних висновків (роль рельєфу/гідрології; поява водосховищ, зміна стоку). (Пов'язуємо з вимогами курсу: типи ЕС, чинники розміщення).

III. Вивчення нового матеріалу (20 хв)

Блок 1. Як працює ГЕС? (5 хв)

- Стисло: гребля → водосховище → напір → турбіна → генератор → ЛЕП.

- Різновиди: руслові, дериваційні, ГАЕС (на прикладах України). (Уміння «називати типи ЕС», «пояснювати розміщення», «показувати ГЕС/ГАЕС на карті»).

Блок 2. Позитивні ефекти ГЕС (3 хв)

- Відновлюване джерело; регулювання паводків; зрошення; водопостачання; рекреація. (Зв'язок із курсами 6–8 кл «Води суходолу/водні ресурси, охорона вод»).

Блок 3. Негативний вплив ГЕС (10 хв)

- **Гідрологія:** зміна природного стоку, зарегулювання течії, «ефект водосховища» (замулення, зміна температурного/кисневого режиму).

- **Екосистеми:** бар'єри міграції риб; трансформація прибережних біотопів; зменшення біорізноманіття.

- **Геоморфологія/береги:** ерозія та абразія у нижній течії через дефіцит наносів; підтоплення прибережних територій вище греблі.

- **Якість води й здоров'я:** евтрофікація, «цвітіння» води, ризики для рекреації/рибальства.

- **Соціально-економічні наслідки:** затоплення земель, переселення громад.

Підсумовуємо: з погляду програми 9 класу, учні мають уміти аналізувати негативні наслідки діяльності електростанцій для довкілля і здоров'я.

Метод прийняття рішень (2 хв усередині Блоку 3): на дошці — два стовпці «вигоди»/«ризики». Клас швидко заповнює прикладами; учитель фіксує баланс.

IV. Практична частина (10–12 хв)

Завдання А (індивідуально, 5 хв): На контурній карті позначте: **каскад ГЕС на Дніпрі**, Дністровську ГАЕС, Ташлицьку ГАЕС. Додайте стрілками можливі зони ризиків (евтрофікація, ерозія берегів). (Відповідає практичним роботам і номенклатурі програм 8–9 кл: позначення водосховищ/електростанцій).

Завдання В (групи по 4, 6–7 хв): кейс «Річка N і проект ГЕС». Групи отримують **Картку 2** з коротким описом річки (схематичний профіль течії, поселення, рибні ресурси). Ролі в групі: Аналітик (гідрологія), Еколог (флора/фауна), Інженер (безпека/техрішення), Модератор (підсумок).

1. Визначте 3 ключові ризики і 2 вигоди саме для цієї місцевості.
2. Запропонуйте 3 мінімізувальні заходи (приклади: рибопропускні споруди; екологічні попуски/санітарні витрати; моніторинг якості води; укріплення берегів природними матеріалами; відновлення заплав).
3. Підготуйте 1-хвилинний захист рішення (плакат/стікери).
(Групове дослідження/практична спрямованість — вимога курсу.)

V. Рефлексія та підсумок (3–5 хв)

- **«Повернення до анкети»:** чи змінилася ваша думка щодо ГЕС?
Короткі аргументи.

- **«Світлофор» (стікери):**
 - Зелений — можу назвати **2+ наслідки** впливу ГЕС і **2 заходи** мінімізації.
 - Жовтий — потребую ще прикладів/карт.
 - Червоний — хочу повторити принцип роботи ГЕС.

Узагальнюємо: ГЕС — важливий елемент енергобалансу, **але рішення мають прийматись з урахуванням екологічної безпеки та сталого розвитку.**

5) Оцінювання (критерії й інструменти)

Формувальне: спостереження, «Правда/Міф», світлофор.

Підсумкове (за 12-бальною шкалою):

- Карта (Завдання А): коректність позначень ГЕС/водосховищ (0–4); пояснення чинників розміщення/ризиків (0–2).
- Кейс (Завдання В): ідентифікація ризиків/вигод (0–3); реалістичність заходів мінімізації (0–2); чіткість презентації (0–1).
- Внесок у групу (самооцінка/взаємооцінка): 0–2.

Рубрика для кейсу (урізаний вигляд):

- 3 ризики прив'язані до локальних умов (береги/риба/затоплення) — 3 бали.
- Заходи конкретні (не «покращити», а **які** споруди/режими/відновлення) — 2 бали.
- Послідовна аргументація — 1 бал.

6) Диференціація та інклюзія

- **Підтримка:** готовий «словничок» (стихійний стік, санітарний попуск, рибопрохід), контурні карти з підказками, формула фраз для презентації.
- **Розширення:** мікророзрахунок впливу ГЕС на сезонну зміну стоку (на основі умовних даних); порівняння ГЕС vs ГАЕС.
- **Інклюзія:** чіткі інструкції крок-за-кроком; візуальні піктограми на картках; можливість усної/письмової відповіді; парна підтримка.

7) Домашні завдання (на вибір)

1. **Есе (0,5–1 стор.):** «Чи розширювати гідроенергетику в Україні? Мій аргументований вибір». (Оцінюємо логіку, джерела, баланс вигод/ризиків.)
2. **Міні-дослідження (1–2 тижні):** «Мій регіон і вода: які гідроспороди є? Які екологічні наслідки відчутні?» — у форматі плаката/презентації. (Дослідження — вимога курсу: індивідуально або в групі.)

8) Міжпредметні зв'язки

- **Фізика:** перетворення енергії, робота турбіни.
- **Біологія/Екологія:** біоміграції риб, біоіндикація вод.
- **Громадянська освіта:** участь громади у прийнятті рішень щодо великих інфраструктурних проєктів. (Лінія «Громадянська відповідальність».)

9) Матеріали для роздатку (зміст коротко)

- **Картка 1 «Схема ГЕС»** — підписати елементи, намалювати шлях води.

- **Картка 2 «Екологічні наслідки»** — таблиця «Вигода/Ризик/Мінімізація».

- **Картка 3 «Карта-основа Дніпра»** — контур з місцями для позначення ГЕС/водосховищ. (Відповідає номенклатурі «водосховища: Київське, Канівське, Кременчуцьке, Каховське...»).

10) Резерв/альтернативи (якщо є 60 хв або просять більше практики)

- **Моделювання «екологічного попуску»:** учні на графіку задають режим добового/сезонного скиду води, щоб підтримати нерест риб (обґрунтування наслідків).

- **Дебати:** «Велика ГЕС vs кілька МГЕС + ВДЕ» (2 команди, модераторська панель із класу).

11) Адаптації під інші курси (короткий план)

- **6 клас (Гідросфера):** «Як водосховище змінює річку?» (робота з поняттями «водосховище», «похил/падіння річки», «режим стоку»; позначення найбільших водосховищ на контурній карті; акцент на ощадному використанні вод).

- **8 клас (Україна):** «Дніпровський каскад ГЕС і довкілля регіону» (кейс по області; практична робота з номенклатурою; охорона вод).

Короткий сценарій реплік (фрагмент)

- **Учитель:** «Назвіть один можливий екологічний ризик ГЕС у нижній течії річки».

- **Учень:** «Ерозія берегів через дефіцит наносів».

- **Учитель (до класу):** «Яким заходом це можна пом'якшити?»

- **Учні:** «Регульовані екологічні попуски; берегозахист природними матеріалами; відновлення заплав».

Очікувані результати уроку

Після уроку учні пояснюють роботу ГЕС, перелічують їхні головні екологічні наслідки, показують на карті ключові ГЕС/водосховища України,

пропонують реалістичні заходи мінімізації, аргументують позицію з урахуванням сталого розвитку.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі роботи було обґрунтовано необхідність і запропоновано ефективні шляхи інтеграції теми впливу гідроелектростанцій на довкілля у шкільний курс географії. Аналіз чинних навчальних програм показав, що питання екологічних наслідків діяльності ГЕС або зовсім не висвітлюються, або подаються фрагментарно, без достатнього зв'язку з реальними українськими прикладами. Це свідчить про нагальну потребу вдосконалення змісту географічної освіти у напрямі формування екологічної компетентності учнів.

У роботі було розроблено методичні рекомендації щодо реалізації змісту теми через сучасні освітні підходи: проблемно-орієнтоване навчання, інтерактивні методи, використання реальних даних, міжпредметні зв'язки, інфографіку, мультимедійні матеріали, аналіз конкретних кейсів (зокрема ситуації з Каховською ГЕС). Застосування цих підходів сприяє не лише засвоєнню знань, а й формуванню критичного мислення, вміння аналізувати причинно-наслідкові зв'язки, оцінювати екологічні ризики та шукати шляхи їх розв'язання.

Практичним результатом стало створення розгорнутого конспекту уроку для 10 класу, що передбачає активне включення учнів у навчальний процес. Урок містить чітку логіку, поєднує науковість і доступність, враховує вікові особливості учнів, орієнтований на формування екологічної культури. Запропоновані завдання, відеофрагменти, статистичні матеріали та робота в групах сприяють глибшому розумінню теми та її зв'язку з актуальними подіями в Україні.

Таким чином, третій розділ підтвердив, що тема екологічних наслідків діяльності ГЕС є не лише важливою у змісті географічної освіти, а й має значний потенціал для розвитку екологічної свідомості учнів. Запропонована методика є прикладом інтеграції наукових знань у практику сучасного шкільного навчання.

ВИСНОВКИ

Гідроелектростанції відіграють важливу роль у сучасній енергетичній системі, забезпечуючи значну частину виробництва електроенергії за рахунок використання відновлюваних водних ресурсів. Вони мають низку переваг, серед яких – відсутність значних викидів парникових газів, довговічність експлуатації та можливість регулювання енергоспоживання. Однак функціонування ГЕС супроводжується істотними екологічними наслідками, які потребують ретельного аналізу та мінімізації негативного впливу.

Метою дослідження було дослідити вплив гідроелектростанцій на навколишнє середовище, визначити основні екологічні наслідки їхнього функціонування та розробити методичні підходи до вивчення цієї проблематики у шкільному курсі географії. У процесі дослідження поставлену мету було досягнуто шляхом поетапного вирішення визначених завдань:

1. У результаті опрацювання наукових джерел було встановлено, що вплив гідроелектростанцій є об'єктом дослідження в різних галузях — екології, гідрології, енергетики, географії, а також педагогіки. Сформовано узагальнене уявлення про види гідроелектростанцій, принципи їх роботи та класифікаційні ознаки. Проаналізовано сучасні підходи до оцінки екологічних наслідків, включаючи системний, комплексний, ландшафтно-екологічний та еколого-географічний. Доведено, що вивчення впливу ГЕС потребує інтеграції природничих і соціальних знань. Також визначено, що питання антропогенного навантаження на довкілля внаслідок роботи ГЕС залишаються недостатньо репрезентованими в шкільній географії, що обґрунтовує доцільність подальших педагогічних розробок у цьому напрямі.

2. Дослідження показало, що діяльність гідроелектростанцій має низку системних наслідків для природного середовища. Серед найбільш значущих було виділено: зміну гідрологічного режиму річок (штучна регуляція стоку, зниження швидкості течії, застій води), зміну мікрокліматичних умов у прибережних зонах, підвищення вологості та зниження середньорічної

температури. Встановлено негативний вплив на ґрунтовий покрив через зменшення родючості внаслідок заболочення або засолення. Простежено порушення біологічної рівноваги: зменшення видового різноманіття риб, порушення міграцій тварин, зникнення вразливих екосистем. Особливу увагу приділено трансформаціям ландшафтів — зміна берегової лінії, підтоплення територій, створення штучних водойм із нестабільною екологічною структурою.

3. Проведено класифікацію екологічних ризиків, які супроводжують функціонування гідроелектростанцій: ризик затоплення, ерозійні процеси, біоценотичні зрушення, хімічне забруднення вод, сейсмічні навантаження в зонах великих гребель. Досліджено приклади катастрофічних наслідків руйнування гідротехнічних споруд — зокрема, знищення Каховської ГЕС у 2023 році. У роботі окреслено шляхи мінімізації таких ризиків: впровадження екологічного моніторингу, модернізація ГЕС із урахуванням екологічних стандартів, створення екологічних проходів для міграції риб, формування буферних зон довкола водосховищ, а також посилення законодавчого регулювання у сфері водокористування та енергетичної безпеки.

4. У ході дослідження розроблено методичні підходи до інтеграції теми впливу ГЕС у шкільну географічну освіту. Запропоновано структурування змісту відповідно до вікових особливостей учнів та програмових вимог. Рекомендовано використання міжпредметних зв'язків (біологія, фізика, хімія), елементів STEM-освіти, картографічного аналізу, екологічного моделювання, а також роботу з реальними статистичними та фактологічними матеріалами (на прикладі українських ГЕС). Запропоновано використання інноваційних форм навчання — інтерактивних вправ, дискусій, проєктів, екологічних кейсів, що дозволяють формувати в учнів критичне мислення, відповідальне ставлення до природи та розуміння ролі сталого розвитку.

5. Розроблено авторський конспект уроку з географії для 10 класу на тему «Екологічні наслідки функціонування гідроелектростанцій». У ньому реалізовано принципи проблемно-орієнтованого навчання, використано

інтерактивні методи (аналіз відеоматеріалів, групова робота, кейс-методи), а також локальні приклади з українського контексту. Матеріал уроку відповідає компетентнісному підходу й орієнтований на формування екологічної грамотності учнів, вміння аналізувати, порівнювати та робити висновки. Урок може бути інтегрований до чинної навчальної програми та слугувати інструментом розвитку екологічної свідомості школярів.

Проведене дослідження довело, що екологічні наслідки функціонування гідроелектростанцій є складним і актуальним об'єктом дослідження, який має не лише наукове, а й значне освітнє значення. Створені авторські методичні розробки дозволяють осучаснити зміст шкільної географії та зробити його більш практико-орієнтованим, з урахуванням сучасних викликів у сфері екології та енергетики України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гідроенергетика : курс лекцій : навчальний посібник для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / уклад.: В. І. Будько, П. Ф. Васько, С. Т. Пазич. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 205 с.
2. Васько П. Ф., Бриль А. О., Мороз А. В. Проект державного стандарту Гідроенергетика. Гідроелектростанції малі. Терміни та визначення понять. Відновлювана енергетика. 2013. № 2. С. 65–67.
3. Гончар В. В. Архітектура гідроелектростанцій в історичному аспекті. Сучасні проблеми архітектури та містобудування. 2015. № 40. С. 357–364.
4. Гідравлічні електричні станції : практикум : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітня програма «Електричні станції» / уклад.: П. Л. Денисюк, М. П. Болотний, О. Л. Бондаренко. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 132 с.
5. Popescu M., Arsenie D., Vlase P. Applied Hydraulic Transients: For Hydropower Plants and Pumping Stations. CRC Press, 2003. 342 p.
6. Лутаєв В. В., Сунічук С. В. Гідроелектростанції (Машинна будівля ГЕС) : інтерактивний комплекс навчально-методичного забезпечення. Рівне : НУВГП, 2008. 138 с.
7. Маляренко В. А., Доценко С. І., Темнохуд І. О. Конспект лекцій з дисципліни «Технологія виробництва електроенергії» (для студентів 1, 2 курсів денної, 2 курсу заочної форм навчання за напрямом підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології» та слухачів другої вищої освіти зі спеціальності «Електротехнічні системи електроспоживання»). Харків : ХНУМГ, 2014. С. 41–50.
8. Назаров М. Т. Гідроелектричні станції. Багатофакторні задачі. Київ : УМК ВО, 1992. 104 с.

9. Васько П. Ф., Мороз А. В. Потенціал використання гідроенергетичних ресурсів основних малих річок України. Відновлювана енергетика. 2016. № 3. С. 50–56.

10. Васько П. Ф., Мороз А. В., Ібрагімова М. Р. Мала гідроенергетика в структурі електроенергетичної галузі України. Відновлювана енергетика. 2015. № 3. С. 53–61.

11. Лежнюк П. Д., Нікіторович О. В., Кулик В. В. Малі гідроелектростанції з асинхронними генераторами. Вінниця : ВНТУ, 2011. 142 с.

12. Левковська Л., Мандзик В. Ідентифікація екологічних ризиків об'єктів малої гідроенергетики. Економіст. 2016. № 12. С. 8–12.

13. Сухарева О. Ю., Рябухіна Т. С., Делеган-Кокайко С. В., Сухарев С. М. Вплив греблі малої ГЕС на стан річки Шипот. Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: Хімія. 2015. № 2. С. 51–54.

14. Гідроелектростанції мають згубні наслідки для екології. URL: <http://freedome.org.ua/hidroelektrostantsii-maiut-zghubni-naslidky-dlia-ekolohii-ekspert> (дата звернення: 17.02.2025).

15. Зуб Л. М., Панасюк І. В. Вплив малих гідроелектростанцій на екосистему річки Рось. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/a6382254-149e-46d5-83ed-55564e449292/content> (дата звернення: 17.02.2025).

16. Великі гідроелектростанції дуже шкодять навколишньому середовищу: як саме? URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/features-46118920> (дата звернення: 17.02.2025).

17. Підрив Каховської ГЕС: Якими будуть наслідки для довкілля? URL: <https://uwecworkgroup.info/uk/explosion-of-the-kakhovka-hydropower-plant-what-are-the-environmental-consequences> (дата звернення: 17.02.2025).

18. Підрив дамби Каховської ГЕС спричинить кліматичні зміни в регіоні, — експерт. URL: <https://superagronom.com/news/17270-pidriv-dambi->

[kahovskoyi-ges-sprichinit-klimatichni-zmini-v-regioni--ekspert](#) (дата звернення: 17.02.2025).

19. Вплив на навколишнє середовище, спричинений виробництвом електричної енергії. URL: <https://www.ez.rv.ua/vplyv-na-navkolyshnye-seredovyshe-sprychynenyj-vyrobnytstvom-elektrychnoyi-energiyi> (дата звернення: 17.02.2025).

20. Гідроенергетика та дефіцит води: зростаючі кліматичні ризики. URL: https://uhe.gov.ua/media_tsentr/novyny/hidroenerhetyka-ta-defitsyt-vody-zrostayuchi-klimatichni-ryzyky (дата звернення: 17.02.2025).

21. Гусаков В. Чому варто відновлювати Каховське водосховище: думка науковців. URL: <https://most.ks.ua/news/url/chomu-varto-vidnovljuvati-kahovske-vodoshovische-dumka-naukovtsiv> (дата звернення: 17.02.2025).

22. Що чекає Південь України після руйнування Каховського водосховища. URL: <https://kurkul.com/spetsproekty/1460-scho-chekaye-pivden-ukrayini-pislya-ruynuvannya-kahovskogo-vodoshovischa> (дата звернення: 17.02.2025).

23. Про Ладижинське водосховище та його водних мешканців. URL: https://vn.darg.gov.ua/_pro_ladizhinsjke_0_0_0_1807_1.html (дата звернення: 17.02.2025).

24. Ладижинське водосховище. URL: <https://rivnefish.com/places/1138> (дата звернення: 17.02.2025).

25. Ладижинське водосховище перетворюється на Аральське море (фото та відео). URL: <http://lad.vn.ua/suspilstvo/ladizhinske-vodoshovisze-vtratilo-17-5-milioniv-kubiv-vodi.html> (дата звернення: 17.02.2025).

26. Войцицький С. М. Екологічний вплив гідроенергетики на навколишнє середовище. URL: <https://www.udau.edu.ua/assets/files/zbirniki/conference/ekologiya/Vojcickij.pdf> (дата звернення: 17.02.2025).

27. Чому гідроенергетика не має майбутнього? URL: <https://ekosphaera.org/chomu-gidroenergetyka-ne-maye-majbutnogo> (дата звернення: 17.02.2025).

28. Johnson M. S., Matthews E., Bastviken D., Du J., Genovese V. Spatiotemporal Methane Emission From Global Reservoirs. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210020086/downloads/Johnson%20et%20al%202021%20Spatiotemporal%20Methane%20Emission%20From%20Global%20Reservoirs.pdf> (дата звернення: 17.02.2025).

29. New study sheds light on reservoir emissions over a long time period. URL: <https://www.hydropower.org/blog/new-study-sheds-light-on-reservoir-emissions-over-a-long-time-period> (дата звернення: 17.02.2025).

30. Tracking the Carbon Footprint of Hydropower. URL: <https://www.energy.gov/eere/water/tracking-carbon-footprint-hydropower> (дата звернення: 17.02.2025).

31. Як проявляється зміна клімату в Україні? URL: <https://ua.boell.org/uk/2020/06/09/yak-proyavlyaetsya-zmina-klimatu-v-ukraini> (дата звернення: 17.02.2025).

32. Велика гідроенергетика XXI сторіччя — виклики та обмеження. URL: https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/635375/mod_resource/content/1/%D0%A1%D0%B5%D1%80%D0%B3%D1%96%D0%B9%20%D0%9A%D1%83%D1%87%D0%B5%D1%80%20%C2%AB%D0%92%D0%B5%D0%BB%D0%B8%D0%BA%D0%B0%20%D0%B3%D1%96%D0%B4%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B5%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0%20%D0%A5%D0%A5%D0%86%20%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%80%D1%96%D1%87%D1%87%D1%8F%20%E2%80%93%20%D0%B2%D0%B8%D0%BA%D0%BB%D0%B8%D0%BA%20%D1%82%D0%B0%20%D0%BE%D0%B1%D0%BC%D0%B5%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F%C2%BB.pdf (дата звернення: 17.02.2025).

33. Çelik R. Impact of Dams on Groundwater Static Water Level Changes: a Case Study Kralkızı and Dicle Dam Watershed. *International Journal of Engineering Research and Development*. 2018. Vol. 10, № 2. P. 119–126.

34. Яцентюк Ю. В., Война І. М. Парадинамічна сфера гідрологічного впливу водосховищ Поділля. *Landscape Science*. 2022. № 1 (1). С. 85–95.

35. Яцентюк Ю. В. Регіональні парадинамічні антропогенні ландшафтні системи : автореферат дис. на здобуття наук. ступеня д-ра геогр. наук. Київ, 2019. 43 с.

36. Yakovliev Y., Rogozhin O., Stefanyshyn D., Kreta D., Anpilova Y., Myrontsov M. Environmental and Geological Hazards After the Explosion of the Kakhovka Hydroelectric Power Plant and Rehabilitation Options. *Systems, Decision and Control in Energy VI: Volume II: Power Engineering and Environmental Safety*. Cham : Springer Nature Switzerland, 2024. P. 537–557.

37. Мокін В. Б., Крижановський Є. М., Слободянюк А. О. Аналіз та прогноз резервів поверхневих і підземних вод для потреб водопостачання Вінницької області. URL: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/file:///C:/Users/asus/Downloads/2669-11865-1-PВ.pdf> (дата звернення: 04.03.2025).

38. Екологічний паспорт Вінницької області (2024). Вінниця : Департамент екології та природних ресурсів Вінницької ОДА, 2024. URL: https://vin.gov.ua/images/UPRTER/2024/ogoloshennya/Ekologichnuy%20pasport%202024_%20.pdf (дата звернення: 04.03.2025).

39. Gupta H. K. A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India. *Earth-Science Reviews*. 2002. Vol. 58, № 3–4. P. 279–310.

40. Стоян О. Ю. Дослідження стану розвитку малої гідроенергетики України: особливості, тенденції, енергетичний потенціал. Інвестиції: практика та досвід. 2015. № 3. С. 116–120.

41. Гориславська В. В., Смирнова С. М., Смирнов В. М. Мала гідроенергетика: переваги та недоліки. URL:

https://eprints.kname.edu.ua/51093/1/ilovepdf_com-289-290.pdf (дата звернення: 04.03.2025).

42. Неродик М. В. Перспективні напрямки розвитку гідроенергетики України. Студентський вісник Національного університету водного господарства та природокористування. 2014. С. 95–97.

43. Маковський А. М., Філіпович Ю. Ю. Енергоресурси та гідрологічні основи гідроенергетики : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2010. 128 с.

44. Екологічний паспорт Вінницької області (2024). Вінниця : Департамент екології та природних ресурсів Вінницької ОДА, 2024. URL: https://vin.gov.ua/images/UPRTER/2024/ogoloshennya/Ekologichnuy%20pasport%202024_%20.pdf (дата звернення: 04.03.2025).

45. Kumar A. Hydropower–Basics and its role in achieving energy sustainability for the developing economies. Renewable Energy and Sustainability. 2022. P. 107–134.

46. Leibniz Institute of Freshwater Ecology and Inland Fisheries (IGB). Water at war: the long-term environmental consequences of the destruction of the Kakhovka Dam in Ukraine. URL: <https://www.preventionweb.net/news/water-war-long-term-environmental-consequences-destruction-kakhovka-dam-ukraine> (дата звернення: 04.03.2025).

47. Rapid Environmental Assessment of Kakhovka Dam Breach Ukraine, 2023. URL: https://unepdhi.org/wp-content/uploads/sites/2/2023/11/UNEP_Kakhovka_Dam_Breach_Ukraine_Assessment.pdf (дата звернення: 04.03.2025).

48. The Washington Post. Destruction of Ukraine dam triggered toxic ‘time bomb,’ researchers say. URL: <https://www.washingtonpost.com/world/2025/03/13/kakhovka-dam-environment-heavy-metals-science-study> (дата звернення: 04.03.2025).

49. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році. Київ : Міністерство захисту довкілля та

природних ресурсів України, 2023. URL: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf> (дата звернення: 04.03.2025).

50. Pandey B., Karki A. Hydroelectric energy: renewable energy and the environment. CRC Press, 2016. 419 p.

51. Breeze P. Hydropower. Academic Press, 2018. 104 p.

52. Ladyka M., Beksultanov M., Naumovskaya O., Starodubtsev V. Soil erosion and salinization on the coast of the Bugun irrigation reservoir. Sworld-Us Conference proceedings. 2022. № usc09-01. P. 48–52.

53. Kaygusuz K. Hydropower and the world's energy future. Energy Sources. 2004. № 26(3). P. 215–224.

54. Yüksel I. Hydropower for sustainable water and energy development. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2010. № 14(1). P. 462–469.

55. Koch F. H. Hydropower—the politics of water and energy: introduction and overview. Energy Policy. 2002. № 30(14). P. 1207–1213.

56. Kaunda C. S., Kimambo C. Z., Nielsen T. K. Hydropower in the context of sustainable energy supply: a review of technologies and challenges. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.5402/2012/730631> (дата звернення: 04.03.2025).

57. Комітет розглянув на своєму засіданні та схвалив проект рекомендацій круглого столу на тему: "Екологічні аспекти розвитку гідроенергетики в Україні". URL: https://komekolog.rada.gov.ua/news/main_news/74399.html (дата звернення: 04.03.2025).

58. Борсукевич Л. М. Збереження біорізноманіття водно-болотних угідь шляхом оптимізації регіональної екомережі (басейн верхньої течії Дністра, Прута та Західного Бугу). Науковий вісник НЛТУ України. Екологія довкілля. 2010. Вип. 20(6). С. 85–93.

59. Вишневецький В. І., Куций А. В. Багаторічні зміни водного режиму річок України : монографія. Київ : Наукова думка, 2022. 269 с.

60. Гавриленко О. П. Дослідження антропогенної трансформації сучасних ландшафтів України для цілей геоecологічного обґрунтування системи природоохоронних заходів. Вісник Київського національного університету ім. Т. Г. Шевченка. Географія. 2002. Вип. 49. С. 12–15.

61. Петрук А. М. Гідроекологічний моніторинг водних екосистем з огляду на сучасні європейські напрямки у природоохоронній діяльності. Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Серія: Сільськогосподарські науки. 2013. Вип. 3. С. 24–34.

62. Гопчак І. В., Яцик А. В., Басюк Т. О. Методологія водогосподарсько-ecологічного районування басейнів малих річок. Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Серія: Технічні науки. 2019. Вип. 1(58). С. 14–22.

63. Гродзинський М. Д., Савицька О. В. Ландшафтознавство : навчальний посібник. Київ : Видавничо-поліграфічний центр Київський університет, 2008. 319 с.

64. Шищенко П. Г. Принципи та методи ландшафтного аналізу в регіональному проектуванні : монографія. Київ : Фітосоціоцентр, 1999. 284 с.

65. Залеський І. І., Бровко Г. І. Динаміка ерозійних екзогенно-geологічних процесів у басейні р. Стир. Природа Західного Полісся та прилеглих територій. Луцьк : РВВ «Вежа» ВНУ ім. Лесі Українки, 2009. Вип. 6. С. 3–9.

66. Environmental Mitigation Technology for Hydropower: Summary Report on a Summit Meeting Convened by Oak Ridge National Laboratory, the National Hydropower Association, and the Hydropower Research Foundation. URL: <https://www.hydro.org/wp-content/uploads/2017/08/EMTSSummit4.pdf> (дата звернення: 04.03.2025).

67. Strategic Water Management in the 21st Century. URL: <https://www.wwf.org.uk/strategic-water-management> (дата звернення: 04.03.2025).

68. Strategic basin planning. Developed in partnership with the General Institute of Water Resources & Hydropower Planning, Ministry of Water Resources, People's Republic of China. URL: https://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/2_strategic_basin_planning_web.pdf (дата звернення: 04.03.2025).

69. Improving EIAS towards Sustainable Hydropower Development In Sarawak. URL: <https://www.wwf.org.my/?22205%2FImproving-EIAS-towards-Sustainable-Hydropower-Development-In-Sarawak> (дата звернення: 04.03.2025).

70. Hydropower Sustainability Assessment Protocol (HSAP). URL: <https://www.hydropower.org/publications/hydropower-sustainability-assessment-protocol> (дата звернення: 04.03.2025).

71. Kuriqi A., Pinheiro A. N., Sordo-Ward A., Bejarano M. D., Garrote L. Ecological impacts of run-of-river hydropower plants—Current status and future prospects on the brink of energy transition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 142. 110833.

72. Integration of Run-Of-River Hydropower with Energy Storage Creates Additional Grid Value, New Market Participation Opportunities. URL: <https://www.energy.gov/eere/water/articles/integration-run-river-hydropower-energy-storage-creates-additional-grid-value> (дата звернення: 04.03.2025).

73. Sasthav C., Oladosu G. Environmental design of low-head run-of-river hydropower in the United States: A review of facility design models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 160. 112312.

74. Panthi M., Lee A. A., Dahal S., Omer A., Franca M. J., Crosato A. Effects of sediment flushing operations versus natural floods on Chinook salmon survival. *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12, № 1. 15354.

75. Lai Y. G., Huang J., Greimann B. P. Hydraulic flushing of sediment in reservoirs: Best practices of numerical modeling. *Fluids*. 2024. Vol. 9, № 2. 38. URL: <https://www.mdpi.com/2311-5521/9/2/38> (дата звернення: 04.03.2025).

76. What Is Tunnel Bypass? URL: <https://turnium.com/tunnel-bypass-what-is-it-and-what-can-it-do-for-you> (дата звернення: 04.03.2025).

77. Showalter M. A. A Bene-fish-al Solution for Salmon and Steelhead Passage. URL: <https://www.pnnl.gov/news-media/bene-fish-al-solution-salmon-and-steelhead-passage> (дата звернення: 04.03.2025).

78. EERE Success Story—Innovative Water Turbines Allow More Fish to Pass Safely Through Hydropower Dams. URL: <https://www.energy.gov/eere/articles/eere-success-story-innovative-water-turbines-allow-more-fish-pass-safely-through> (дата звернення: 04.03.2025).

79. Innovating Hydropower: Fish-friendly Turbines as a Solution to Fish Mortality. URL: <https://blog.cwf-fcf.org/index.php/en/innovating-hydropower-fish-friendly-turbines-as-a-solution-to-fish-mortality> (дата звернення: 04.03.2025).

80. Southern Bug River Basin Management Plan 2025-2030. URL: https://davr.gov.ua/fls18/5-RBMP_Southern%20Bug_February_2025_ENG.pdf (дата звернення: 04.03.2025).

81. Dnipro River Basin Management Plan 2025-2030. URL: https://davr.gov.ua/fls18/1-RBMP_Dnipro_February_2025_ENG.pdf (дата звернення: 04.03.2025).

82. Vistula River Basin Management Plan 2025-2030. URL: https://davr.gov.ua/fls18/6-RBMP_Visla_February_2025_ENG.pdf (дата звернення: 04.03.2025).

83. Improve or Remove: Funding for U.S. Dams. URL: <https://woods.stanford.edu/news/improve-or-remove-funding-us-dams> (дата звернення: 04.03.2025).

84. This Dam Simple Trick Is a Big Green Energy Win. URL: <https://www.wired.com/story/retrofitting-dams-green-energy> (дата звернення: 04.03.2025).

85. The Role of Hydropower in the Next-Generation Grid. URL: <https://docs.nrel.gov/docs/fy22osti/81373.pdf> (дата звернення: 04.03.2025).

86. Pumped Storage Hydropower: Benefits for Grid Reliability and Integration of Variable Renewable Energy. URL:

<https://publications.anl.gov/anlpubs/2014/12/106380.pdf> (дата звернення: 04.03.2025).

Ілюстративні матеріали

1. Our World in Data. *Share of electricity production from hydropower, 2022*. Wikimedia Commons. URL: <https://commons.wikimedia.org> (дата звернення: [16.11.2025])
2. Hydroelectric dam (schematic diagram). *Wikimedia Commons*, *File:Hydroelectric_dam.svg*. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hydroelectric_dam.svg (дата звернення: [16.11.2025]).

ДОДАТОК А

6 клас — Розділ 3. «Води суходолу»

Тема: Річки. Озера. Болота. Водосховища.

Тривалість уроку: 45 хв

Цілі (SMART)	Ключові поняття	Етапи уроку та види діяльності (з таймінгом)	Ресурси та ІКТ	Оцінювання та критерії	Продукт учня / ДЗ
Учень пояснює, як гребля змінює швидкість течії, русло і берегову лінію; відрізняє природний стік від регульованого; на контурі річки позначає можливі межі водосховища; формулює письмовий висновок на 60–80 слів.	Природний стік, водосховище, гребля, верхній/нижній б'єф, наноси, руслові процеси, «цвітіння води» (початкове уявлення).	Мотивація (5 хв): фото «до/після» перекриття русла, коротке запитання. Пояснення (10 хв): стік, нанос, б'єфи. Практикум-моделювання (15 хв): лоток із піском; спостереження за течією до/після встановлення «греблі». Картографія (10 хв): позначення умовного водосховища на схемі. Рефлексія (5 хв): «Що змінилося і чому?»	Лоток/прозора ванночка, пісок/дрібний гравій, лінійка, пластикова «гребля», фізична карта, проектор (за можливості).	Формувальне: спостережний лист (точність спостережень), exit-ticket з 2 причинно-наслідковими зв'язками. Підсумкове: міні-висновок (чіткість, коректність термінів).	Продукт: ескіз «до/після» з підписами. ДЗ: фото/скетч найближчої водойми + 5–7 речень, як могли б змінитися берег і течія, якби з'явилася гребля.

ДОДАТОК Б

7 клас — Розділ 2. «Материками і океани»

Тема: Природні ресурси материків. Використання людиною водних ресурсів.

Тривалість уроку: 45 хв

Цілі (SMART)	Ключові поняття	Етапи уроку та види діяльності (з таймінгом)	Ресурси та ІКТ	Оцінювання та критерії	Продукт учня / ДЗ
Учень порівнює 2–3 великі ГЕС світу за рельєфом, кліматом, водозбором; укладає таблицю «вигоди/ризика»; формулює аргументований висновок на 100 слів.	Водозбір; напір; іригація; регулювання паводків; фрагментація річок; міграція риб; переселення населення.	Актуалізація (5 хв): «Де доцільніше зводити греблі?». Картографія (10 хв): атлас, позначення ГЕС на різних материках. Кейс-аналіз (20 хв): 2–3 приклади з короткими довідками; заповнення таблиці «вигоди/ризика». Мікродебати (8 хв): «Чи скрізь однаково «ціна» електроенергії з ГЕС?». Рефлексія (2 хв).	Атласи світу, тематичні карти, короткі кейс-довідки на 1 стор., проєктор.	Формувальне: таблиця «вигоди/ризика» (повнота, аргументи). Підсумкове: письмовий висновок (логіка, терміни, обсяг).	Продукт: таблиця + висновок. ДЗ: знайти в мережі або атласі ще одну ГЕС та коротко оцінити її вплив на природу й людину (5–7 речень).

ДОДАТОК В

8 клас — Розділ 2. «Україна у світі: природа і населення»

Тема: Природні умови і ресурси України. Водні ресурси та їх використання.

Тривалість уроку: 45–90 хв (1–2 уроки)

Цілі (SMART)	Ключові поняття	Етапи уроку та види діяльності (з таймінгом)	Ресурси та ІКТ	Оцінювання та критерії	Продукт учня / ДЗ
Учень аналізує кейс Дніпровського каскаду: називає щонайменше 3 екологічні наслідки (затоплення, евтрофікація, порушення міграції риб); співвідносить зміни берегової лінії з появою водосховищ; готує аналітичний міні-звіт на 1 сторінку з ілюстраціями.	Час водообміну; евтрофікація; донні відклади; рибоходи (вступ); заплава; підтоплення.	Вступ (5 хв): «Що змінило Дніпро?» Картографія/знімки (20 хв): порівняння історичних і сучасних меж; позначення мілководних зон. Лаб-демо (10 хв): дві посудини — «швидке/повільне» оновлення води, обговорення ризику «цвітіння». Обговорення іхтіофауни (5–10 хв). Узагальнення (5 хв): причинно-наслідкові ланцюги. За 2 уроків — розширення до міні-дослідження.	Історичні карти, знімки з супутника, прозорі посудини, фарбована вода, аркуші, маркери, проектор.	Формувальне: участь в обговоренні, точність позначень на схемах. Підсумкове: міні-звіт — наявність 3 наслідків, причинно-наслідкові зв'язки, візуалізація.	Продукт: міні-звіт з ілюстраціями. ДЗ: за бажанням — інфографіка або презентація щодо одного з наслідків.

8 клас — Розділ 4. «Використання та охорона природних умов і ресурсів
України»

Тема: Антропогенні зміни природи. Проблеми охорони водних ресурсів. |

Тривалість уроку: 45 хв

Цілі (SMART)	Ключові поняття	Етапи уроку та види діяльності (з таймінгом)	Ресурси та ІКТ	Оцінювання та критерії	Продукт учня / ДЗ
Учень добирає та аргументує щонайменше 2 дієві заходи пом'якшення впливу ГЕС для конкретної проблеми; бере участь у рольовій сесії; фіксує рішення в «матриці вибору».	Екологічні попуски; рибоходи/рибопідйомники; буферні смуги; моніторинг якості води; біоманіпуляції; берегоукріплення.	Вступ (5 хв): типові проблеми (евтрофікація, міграція риби, ерозія нижче греблі). Рольова гра (25 хв): «Громада—енергетики—екологи» з брифами. Узгодження рішень (10 хв): матриця «проблема—заходи—умови успіху—ризиків». Підсумок (5 хв): які показники моніторити.	Картки-брифи, шаблон матриці, мультимедійна презентація (за потреби), дошка/фліпчарт.	Формувальне: участь у дискусії, аргументованість пропозицій. Підсумкове: заповнена матриця — відповідність між проблемами і заходами.	Продукт: матриця вибору. ДЗ: скласти короткий пост/історію для соцмереж про 1 захід із прикладом (до 100 слів).

ДОДАТОК Г

9 клас — Розділ 2. «Господарство України і світу»

Тема: Електроенергетика України та світу.

Тривалість уроку: 45–90 хв (1–2 уроки)

Цілі (SMART)	Ключові поняття	Етапи уроку та види діяльності (з таймінгом)	Ресурси та ІКТ	Оцінювання та критерії	Продукт учня / ДЗ
Учень зіставляє гідроенергетику з іншими джерелами за показниками життєвого циклу; виконує базовий розрахунок потенційної/електричної потужності при заданих H та Q ; формує політика-бриф на 1 стор.	LCA (життєвий цикл); вуглецевий слід; маневровість; балансування системи; $P=ρgQHη$ (понятійно).	Актуалізація (5 хв): роль ГЕС у піках навантаження. Міні-лекція (10 хв): показники LCA. Практикум (15 хв): розрахунок P для різних H , Q ; інтерпретація. Семінар (10–15 хв): екологічна «ціна» маневровості. Узагальнення (5 хв): тези до брифу.	Калькулятор або табличний редактор, довідкові таблиці H та Q , інфографіка LCA, презентація.	Формувальне: точність розрахунків, участь в обговоренні. Підсумкове: бриф — структура, коректність термінів, аргументація.	Продукт: політика-бриф (1 стор.). ДЗ: інфографіка або допис на тему «Якою може бути роль ГЕС у майбутньому України?»

9 клас — Розділ 4. «Геоекологічні проблеми та сталий розвиток»

Тема: Вплив господарської діяльності на географічну оболонку.

Тривалість уроку: 45 хв

Цілі (SMART)	Ключові поняття	Етапи уроку та види діяльності (з таймінгом)	Ресурси та ІКТ	Оцінювання та критерії	Продукт учня / ДЗ
Учень буде причинно-наслідкову схему впливів ГЕС на компоненти географічної оболонки; пропонує 2 сценарії модернізації з критеріями	Перерозподіл наносів; ерозія нижче греблі; мікроклімат прибережних зон; соціо-еколого-	Вступ (5 хв): «ланцюги наслідків». Робота в групах (20 хв): карта впливів і зацікавлених	Формат А3, маркери, слайд з прикладом причинно-наслідкової схеми, шаблони для	Формувальне: якість схем, участь у груповій роботі. Підсумкове: відповідність сценаріїв	Продукт: карта впливів + порівняльна таблиця сценаріїв. ДЗ: створити постер або слайд-

оцінювання; аргументує вибір.	технічні системи; сталій розвиток.	сторін. Сценарії (15 хв): 2 варіанти модернізації + критерії оцінки (екологічні, соціальні, економічні). Підсумок (5 хв): рефлексія.	сценаріїв.	критеріям, обґрунтованість вибору.	презентацію на тему «Стале використання річок в Україні».
----------------------------------	---------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------	------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------