МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет фізико-математичної та природничої освіти
Кафедра біології та хімії

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**
**освітній ступінь бакалавр**

на тему: **Проведення учнівських екологічних досліджень: мохи як біоіндикатори якості повітря**

Виконав: студент IV курсу, з-45 групи
Прокопенко Назар Анатолійович
Освітня програма Середня освіта (Біологія та здоров'я людини. Хімія)
спеціальності 014.05 Середня освіта (Біологія та здоров'я людини)
Керівник: к. б. н., доц. Красноштан І. В.
Рецензент: д. п. н., проф. Бялик О. В.

Умань–2026

ЗМІСТ

ВСТУП…….. 4
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ МОХІВ ЯК БІОІНДИКАТОРІВ СТАНУ ДОВКІЛЛЯ…….. 7
1.1. Біоіндикація як метод оцінювання стану навколишнього середовища…… 7
1.2. Біологічні та фізіологічні особливості мохів, що визначають їх індикаторні властивості……..... 13
1.3. Досвід використання мохів у біоіндикаційних дослідженнях……. 18
РОЗДІЛ 2. ОРГАНІЗАЦІЯ УЧНІВСЬКИХ ЕКОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ У СУЧАСНІЙ ШКОЛІ……. 22
2.1. Дослідницька діяльність здобувачів освіти у контексті сучасної природничої освіти……..... 22
2.2. Методичні аспекти організації учнівських екологічних досліджень…… 25
2.3. Методика проведення учнівського дослідження «Мохи як біоіндикатори якості повітря»……. 29
РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ УЧНІВСЬКОГО ЕКОЛОГІЧНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ МОХІВ ЯК БІОІНДИКАТОРІВ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ……. 33
3.1. Організація учнівського дослідження «Мохи як біоіндикатори якості повітря»: район дослідження та методика……. 33
3.2. Результати учнівського бріоіндикаційного дослідження епігейних мохів НДП «Софіївка»……. 36
3.2.1 Таксономічний склад та екологічна характеристика видів……. 36
3.2.2 Просторовий розподіл мохів на 4 полігонах……. 38
3.2.3 Біоіндикаційна оцінка територій……..... 42
3.3. Методичний потенціал використання бріоіндикаційних досліджень у природничій освіті…… 44
ВИСНОВКИ…….. 48

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……. 50

# ВСТУП

Сучасний етап розвитку суспільства характеризується посиленням антропогенного впливу на природне середовище, що зумовлює необхідність постійного моніторингу стану екосистем та пошуку ефективних методів оцінювання якості довкілля. Одним із доступних і чутливих підходів до оцінювання екологічного стану територій є біоіндикація, яка ґрунтується на використанні живих організмів як показників змін навколишнього середовища.

Мохи мають низку морфологічних і фізіологічних особливостей, які визначають їхню придатність для біоіндикаційних досліджень. Відсутність розвиненої кореневої системи, здатність поглинати воду та розчинені речовини безпосередньо з атмосфери, висока чутливість до змін вологості, освітленості, хімічного складу повітря та інших екологічних чинників роблять їх цінними індикаторами стану навколишнього середовища. У сучасних екологічних дослідженнях мохи використовуються для оцінювання техногенного забруднення, рекреаційного навантаження, стану урбанізованих та природних екосистем.

Водночас дослідження об’єктів живої природи та стану довкілля набувають важливого значення і в освітньому процесі сучасної школи. Компетентнісний підхід, задекларований Концепцією Нової української школи та Державним стандартом базової середньої освіти, передбачає формування у здобувачів освіти дослідницьких умінь, природничо-наукової компетентності, здатності аналізувати явища навколишнього середовища, працювати з інформацією, здійснювати спостереження, дослідження та інтерпретацію результатів. Модельні програми з біології та інтегрованих природничих курсів містять широкий спектр дослідницьких, практичних і проєктних завдань, які можуть реалізовуватися як у груповій, так і в індивідуальній формі.

У цьому контексті використання мохів як об’єктів учнівських екологічних досліджень є перспективним напрямом організації дослідницької діяльності здобувачів освіти. Такі дослідження поєднують польові

спостереження, визначення видового складу, аналіз екологічних чинників, обробку результатів та їх інтерпретацію, сприяючи формуванню практичних дослідницьких навичок та екологічного мислення.

Актуальність теми дослідження зумовлена необхідністю пошуку доступних підходів до організації учнівських екологічних досліджень, які поєднують сучасні екологічні знання, дослідницьку діяльність та практичну спрямованість навчання, а також можливістю використання мохів як біоіндикаторів стану довкілля у шкільній природничій освіті.

**Мета дослідження** – обґрунтувати можливості використання мохів як біоіндикаторів стану довкілля та розкрити особливості організації учнівських екологічних досліджень із використанням мохів у природничій освіті.

Відповідно до поставленої мети визначено такі **завдання дослідження:**

1. Проаналізувати теоретичні основи використання мохів як біоіндикаторів стану довкілля та охарактеризувати їхні біологічні, фізіологічні й індикаторні властивості.

2. Розкрити особливості організації учнівських екологічних досліджень у сучасній природничій освіті та обґрунтувати методичні аспекти проведення дослідження «Мохи як біоіндикатори якості повітря».

3. Проаналізувати результати учнівського дослідження епігейних мохів на території НДП «Софіївка» НАН України та визначити освітній і методичний потенціал використання отриманих матеріалів у практиці учнівських екологічних досліджень.

**Об’єкт дослідження** – учнівські екологічні дослідження у процесі природничої освіти.

**Предмет дослідження** – використання мохів як біоіндикаторів стану довкілля та особливості організації учнівських екологічних досліджень із використанням мохів.

Методи дослідження: теоретичні – аналіз, порівняння, узагальнення та систематизація наукової, методичної й навчальної літератури; емпіричні – аналіз матеріалів учнівського дослідження, польові спостереження,

визначення видового складу епігейних мохів, оцінювання проективного покриття та біоіндикаційний аналіз територій; статистичні – опрацювання, узагальнення та аналіз результатів дослідження.

**Теоретичне значення** дослідження полягає в узагальненні та систематизації наукових відомостей щодо використання мохів як біоіндикаторів стану довкілля, розкритті їхніх індикаторних властивостей, а також висвітленні можливостей організації учнівських екологічних досліджень у сучасній природничій освіті.

**Практичне значення** дослідження полягає у можливості використання матеріалів роботи у практиці навчання біології та екології, під час організації дослідницької, проєктної та польової діяльності здобувачів освіти. Запропоновані підходи до проведення учнівських екологічних досліджень можуть бути використані вчителями біології, керівниками гуртків та під час організації науково-дослідницької діяльності учнів.

**Апробація результатів дослідження**. Основні положення, результати та висновки дослідження доповідалися та обговорювалися на засіданнях студентського наукового гуртка «Сучасні проблеми навчання біології» Уманського національного університету (2025–2026 рр.).

**Публікації.** Основні результати дослідження висвітлено у публікації: Прокопенко Н. А. Проведення учнівських екологічних досліджень: мохи як біоіндикатори якості повітря. Природничі науки в системі освіти : збірник матеріалів Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції (м. Умань, 5 травня 2026 р.). Умань, 2026. с.154-157.

Обсяг та структура кваліфікаційної роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Робота містить таблиці та ілюстративні матеріали. Список використаних джерел налічує 46 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 55 сторінок машинописного тексту.

# РОЗДІЛ 1.
# ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ МОХІВ ЯК БІОІНДИКАТОРІВ СТАНУ ДОВКІЛЛЯ

## 1.1. Біоіндикація як метод оцінювання стану навколишнього середовища

Сучасний стан довкілля характеризується зростанням антропогенного навантаження на природні екосистеми, що проявляється у забрудненні атмосферного повітря, ґрунтів, поверхневих вод, трансформації рослинного покриву та порушенні функціонування біоценозів. У зв’язку з цим особливого значення набуває екологічний моніторинг, спрямований на оцінювання стану навколишнього середовища, виявлення негативних змін та прогнозування їхніх наслідків. Одним із важливих напрямів сучасного екологічного моніторингу є біоіндикація.

Біоіндикація являє собою метод оцінювання стану навколишнього середовища, заснований на використанні живих організмів, їхніх угруповань, фізіологічних реакцій або особливостей розвитку як показників змін екологічних умов. На відміну від суто інструментальних і хімічних методів контролю, біоіндикаційні дослідження дозволяють оцінювати не лише наявність окремих забруднювачів, а й інтегральний вплив комплексу чинників на живі системи.

Перевагою біоіндикаційних підходів є їхня здатність відображати кумулятивний ефект впливу середовища на організми упродовж тривалого часу. У той час як фізико-хімічні методи часто фіксують концентрацію окремих речовин у конкретний момент, біоіндикатори здатні акумулювати інформацію про довготривалі зміни екологічних умов. Саме тому біоіндикаційні методи широко використовуються під час дослідження стану атмосферного повітря, оцінювання рівня техногенного навантаження, рекреаційного пресингу, урбанізації та трансформації природних екосистем.

У ролі біоіндикаторів можуть виступати різні групи організмів: мікроорганізми, водорості, лишайники, вищі рослини, безхребетні та хребетні

тварини. Вибір організмів-індикаторів залежить від мети дослідження, типу середовища та характеру антропогенного впливу. Серед рослинних організмів особливу увагу привертають бріофіти, які демонструють високу чутливість до змін екологічних факторів і можуть використовуватися для оцінювання стану атмосферного середовища, рекреаційного навантаження, техногенно трансформованих територій та інших типів антропогенно порушених екосистем [16].

Бріофіти є однією з найдавніших груп наземних рослин, що характеризується своєрідними морфологічними та фізіологічними особливостями. Відсутність справжньої кореневої системи, кутикули та добре розвинених провідних тканин зумовлює безпосередній контакт рослини з навколишнім середовищем і залежність процесів життєдіяльності від умов існування. Саме ці особливості визначають їхню високу чутливість до змін вологості, температури, освітлення, кислотності субстрату та хімічного складу атмосфери [19].

Значний науковий інтерес до бріофітів як біоіндикаторів пов’язаний із їхньою здатністю накопичувати різні речовини безпосередньо з повітряного середовища та поверхневих відкладень. Дослідження показують, що мохи можуть акумулювати важкі метали, сполуки сірки, продукти нафтового забруднення, солі та інші компоненти антропогенно трансформованого середовища. У відповідь на вплив забруднювачів у них змінюються інтенсивність фотосинтезу, активність антиоксидантної системи, особливості водного режиму, морфологічні показники та репродуктивні процеси [17].

У сучасній екології сформувався окремий напрям досліджень – бріоіндикація, який базується на використанні мохоподібних як індикаторів екологічного стану територій. Бріоіндикаційні методи активно застосовуються під час оцінювання атмосферного забруднення, аналізу посттехногенних екосистем, вивчення наслідків рекреаційного навантаження та урбанізаційних процесів. Так, дослідження антропогенної трансформації бріофлори Лісостепу України демонструють, що зміна інтенсивності антропогенного впливу

супроводжується трансформацією видового складу мохів, перебудовою мохового покриву та зменшенням частки чутливих видів [8].

Одним із важливих напрямів використання бріофітів у біоіндикаційних дослідженнях є оцінювання стану техногенно порушених територій. Умови посттехногенних ландшафтів, зокрема територій видобутку сірки, хвостосховищ та девастованих земель, характеризуються комплексом несприятливих чинників: дефіцитом поживних речовин, змінами кислотності, засоленням, токсичним впливом хімічних сполук та порушенням структури субстрату. У таких умовах бріофіти виступають одними з перших колонізаторів порушених субстратів, відіграючи важливу роль у процесах ревіталізації середовища [24].

Дослідження морфо-фізіологічних адаптацій бріофітів до умов девастованих територій свідчать про наявність складної системи пристосувальних механізмів, які забезпечують виживання мохів у стресових умовах. До таких механізмів належать зміни морфології пагонів, регуляція водного балансу, перебудова антиоксидантної системи, модифікація фотосинтетичної активності та здатність до накопичення певних сполук [1; 18].

Важливим аспектом біоіндикаційних досліджень є також вивчення реакції бріофітів на атмосферне забруднення. Показано, що залежно від рівня антропогенного навантаження у мохів можуть змінюватися показники антиоксидантного захисту, інтенсивність окиснювальних процесів та фізіолого-біохімічні параметри функціонування клітин [17]. Висока чутливість бріофітів до змін стану атмосфери зумовлює перспективність їх використання для оцінювання якості повітря, особливо в умовах урбанізованих і промислово навантажених територій.

Окрему групу становлять дослідження, пов’язані з використанням мохів як індикаторів рекреаційного пресингу. Встановлено, що посилення рекреаційного навантаження у природних екосистемах супроводжується змінами структури мохового покриву, зменшенням проективного покриття

окремих видів та перебудовою бріофлори [35]. Такі дослідження мають важливе значення для оцінювання стану природоохоронних територій та обґрунтування заходів щодо збереження біорізноманіття.

Таким чином, біоіндикація є важливим інструментом сучасних екологічних досліджень, що дозволяє здійснювати комплексне оцінювання стану навколишнього середовища. Серед різних груп організмів особливу роль у біоіндикаційних дослідженнях відіграють бріофіти, які завдяки своїм біологічним особливостям демонструють високу чутливість до змін умов існування та антропогенних чинників. Використання мохів у дослідженнях якості довкілля відкриває широкі можливості як для наукового екологічного моніторингу, так і для організації дослідницької діяльності здобувачів освіти.

Важливим аспектом сучасних біоіндикаційних досліджень є різноманітність підходів до оцінювання стану навколишнього середовища. Залежно від характеру досліджуваних ознак розрізняють видову, ценотичну, морфологічну, фізіологічну та біохімічну біоіндикацію. Видова біоіндикація базується на виявленні окремих видів-індикаторів, присутність, відсутність або чисельність яких свідчить про певний екологічний стан території. Ценотична біоіндикація передбачає оцінювання структури угруповань, змін видового різноманіття та особливостей просторового розподілу організмів.

У дослідженнях із використанням бріофітів широко застосовуються різні типи біоіндикаційних підходів. Так, зміни видового складу мохів, проективного покриття, співвідношення життєвих форм та просторового розподілу видів можуть використовуватися як показники трансформації екосистем під впливом антропогенних чинників [8]. Одночасно значного поширення набувають фізіологічні та біохімічні підходи, які дозволяють оцінювати зміни функціонального стану рослинного організму під впливом стресових факторів середовища.

Фізіологічна біоіндикація ґрунтується на дослідженні функціональних реакцій організмів на зміни екологічних умов. Для мохів такими показниками можуть бути особливості водного режиму, інтенсивність фотосинтетичних

процесів, стан пігментної системи, активність антиоксидантного захисту, зміни ростових процесів та показники клітинного метаболізму. Встановлено, що вплив техногенних чинників, атмосферного забруднення, засолення, нафтового забруднення та інших стресорів супроводжується перебудовою фізіолого-біохімічних процесів у бріофітів [15; 36].

Біохімічна біоіндикація пов'язана з аналізом змін у хімічному складі тканин, активності ферментативних систем, накопиченні продуктів окиснювального стресу та інших метаболічних реакціях. Дослідження антиоксидантної системи мохів показують, що підвищення рівня атмосферного забруднення може супроводжуватися змінами активності ферментів антиоксидантного захисту та накопиченням продуктів перекисного окиснення, що відображає реакцію організмів на несприятливі умови середовища [17].

Серед переваг біоіндикаційних методів дослідники відзначають відносну доступність, можливість проведення польових досліджень, інтегральний характер оцінювання та здатність відображати довготривалий вплив комплексу екологічних чинників. Біоіндикатори дозволяють оцінювати не лише концентрацію окремих забруднювачів, а й їхній сумарний вплив на живі організми та екосистеми загалом. Важливою перевагою є також можливість використання біоіндикаційних підходів у різних типах середовищ – природних, урбанізованих, агроландшафтних та посттехногенних.

Разом із тим біоіндикаційні методи мають і певні обмеження. Реакція організмів часто формується під впливом комплексу чинників, що ускладнює інтерпретацію результатів. На показники життєдіяльності біоіндикаторів можуть одночасно впливати кліматичні умови, освітленість, вологість, особливості субстрату, сезонні зміни та рівень антропогенного навантаження. Крім того, проведення окремих типів біоіндикаційних досліджень потребує достатнього рівня таксономічної підготовки, володіння методами польових спостережень та знання особливостей функціонування організмів.

Серед різних груп організмів, які використовуються у біоіндикаційних дослідженнях, важливе місце посідають лишайники, мохоподібні, вищі судинні рослини та ґрунтові безхребетні. Лишайники традиційно вважаються чутливими індикаторами стану атмосферного повітря, проте мохи також демонструють високий потенціал для оцінювання антропогенних змін середовища. Порівняно з іншими рослинними біоіндикаторами бріофіти вирізняються здатністю ефективно акумулювати речовини з атмосфери та поверхневих відкладень, швидко реагувати на зміни умов існування та колонізувати порушені субстрати [24].

Особливого значення набуває використання мохів у системі екологічного моніторингу посттехногенних територій. Дослідження свідчать, що бріофіти можуть успішно функціонувати на девастованих ландшафтах, територіях видобутку корисних копалин, хвостосховищах та інших антропогенно трансформованих ділянках. У таких умовах вони не лише виступають індикаторами стану середовища, а й беруть участь у процесах ревіталізації субстрату, формуванні рослинного покриву та стабілізації екосистемних процесів [17].

Окремим напрямом сучасних досліджень є використання бріофітів для оцінювання рекреаційного навантаження та антропогенної трансформації природних територій. Зміни видового складу, скорочення площі мохового покриву, порушення структури бріоценозів та переважання більш стійких видів можуть відображати інтенсивність рекреаційного пресингу та загальний стан природних екосистем [35]. У зв’язку з цим біоіндикаційні підходи мають важливе значення не лише для фундаментальних екологічних досліджень, а й для практичних завдань охорони природи та моніторингу природоохоронних територій.

Отже, біоіндикація є багатокомпонентним методом оцінювання стану навколишнього середовища, який поєднує різні підходи до аналізу реакцій живих організмів на зміни екологічних умов. Використання бріофітів у біоіндикаційних дослідженнях дозволяє оцінювати як структурні зміни

рослинного покриву, так і фізіолого-біохімічні реакції організмів, що визначає перспективність застосування мохів у системі екологічного моніторингу та дослідницькій діяльності.

## 1.2. Біологічні та фізіологічні особливості мохів, що визначають їх індикаторні властивості

Мохоподібні належать до групи вищих спорових рослин, які характеризуються низкою морфологічних, анатомічних та фізіологічних особливостей, що визначають їхню високу чутливість до змін умов навколишнього середовища. Саме сукупність цих ознак зумовлює широке використання бріофітів у біоіндикаційних дослідженнях та екологічному моніторингу.

Однією з найважливіших особливостей мохів є переважання у життєвому циклі гаметофітного покоління, яке виконує основні функції живлення, фотосинтезу та взаємодії з навколишнім середовищем. На відміну від судинних рослин, бріофіти не мають добре розвиненої провідної системи, справжньої кореневої системи та щільної кутикули. Роль прикріплення до субстрату виконують ризоїди, які не забезпечують повноцінного мінерального живлення рослини. Унаслідок цього мохи поглинають значну частину води та розчинених у ній речовин безпосередньо всією поверхнею тіла з атмосферних опадів, повітря, пилових частинок та поверхневих відкладень. Такі біологічні особливості визначають надзвичайно тісний зв’язок бріофітів із навколишнім середовищем і роблять їх чутливими до змін вологості, освітленості, кислотності, сольового складу субстрату та рівня атмосферного забруднення [40]. Висока площа поверхні рослинного тіла у співвідношенні до маси, відсутність ефективного бар’єрного захисту та здатність до швидкого поглинання вологи створюють передумови для накопичення різних хімічних сполук і швидкого прояву реакцій на дію стресових чинників.

Морфолого-анатомічні особливості листка бріофітів також відіграють важливу роль у формуванні індикаторної чутливості мохів. Для багатьох видів

характерні тонкі одношарові листкові пластинки, специфічна організація клітин асиміляційної тканини, наявність сосочків, реберець, водоутримувальних структур та інших пристосувальних утворень. Ці особливості впливають на здатність поглинати та утримувати воду, здійснювати газообмін і реагувати на зміни умов середовища [23].

Здатність мохів до ефективного поглинання та утримування вологи є однією з ключових ознак, що визначає їхню екологічну пластичність та індикаторний потенціал. Водний режим бріофітів суттєво залежить від морфології дернин, густоти пагонів, особливостей листкової будови та екологічної приуроченості видів. Установлено, що різні екологічні групи мохів характеризуються неоднаковими механізмами акумуляції вологи та стратегіями протидії дегідратації [40].

Важливим компонентом адаптаційного потенціалу бріофітів є функціонування фотосинтетичного апарату. Фотосинтетичні пігменти беруть участь не лише у процесах асиміляції, але й у захисті клітин від стресових впливів. Показано, що дія несприятливих екологічних факторів може супроводжуватися змінами вмісту хлорофілів, каротиноїдів та перебудовою пігментного комплексу мохів [1].

Дослідження адаптаційних стратегій фотосинтетичного апарату бріофітів демонструють, що в умовах техногенного впливу, промислового забруднення та екстремальних субстратних умов мохи здатні змінювати інтенсивність фотосинтетичних процесів, співвідношення пігментів та функціональний стан фотосистем [18]. Подібні реакції забезпечують підтримання життєдіяльності рослин у середовищах із підвищеним екологічним навантаженням.

Особливе значення у механізмах стійкості бріофітів має антиоксидантний захист. Вплив забруднювачів, дефіциту води, надмірної інсоляції, сольового або металевого стресу часто супроводжується розвитком окиснювального стресу та утворенням активних форм кисню. У відповідь на це в мохів активуються ферментативні та неферментативні компоненти

антиоксидантної системи, що забезпечують стабілізацію клітинного метаболізму та обмеження ушкоджень клітинних структур [1].

Встановлено, що одним із важливих механізмів адаптації бріофітів до абіотичних стресів є накопичення осмопротекторів, зокрема проліну, а також регуляція функціонування антиоксидантних ферментів. Такі зміни дозволяють рослинам підтримувати водний баланс, захищати білкові структури та знижувати інтенсивність перекисного окиснення ліпідів за умов дегідратації та інших несприятливих впливів [18].

Одним із важливих напрямів сучасних досліджень є аналіз реакцій мохів на вплив важких металів та промислового забруднення. Завдяки здатності акумулювати речовини безпосередньо з навколишнього середовища бріофіти можуть накопичувати іони важких металів у значних концентраціях. Водночас накопичення металів супроводжується фізіолого-біохімічними змінами, що проявляються у порушенні функціонування фотосинтетичного апарату, активації окиснювальних процесів та перебудові захисних механізмів [16].

Дослідження впливу іонів важких металів на мох Ceratodon purpureus показали зміни функціонального стану фотосинтетичного апарату та посилення процесів перекисного окиснення ліпідів, що свідчить про чутливість бріофітів до хімічного забруднення середовища [18]. Саме ця чутливість значною мірою пояснює ефективність використання мохів у біоіндикаційних дослідженнях атмосферного повітря, техногенно порушених та урбанізованих територій.

Високу адаптивну здатність бріофітів підтверджують також дослідження морфологічних і фізіологічних змін гаметофіту в умовах експериментальної культури та модифікованого гравітаційного середовища. Зміни ростових процесів, репродуктивного розвитку, будови пагонів та фізіологічних параметрів свідчать про значну пластичність мохів і складність механізмів їхнього пристосування до змін зовнішніх умов [13, 24].

Важливою біологічною особливістю бріофітів, яка визначає їхні індикаторні властивості, є здатність до акумуляції та утримання різних

хімічних елементів і сполук. На відміну від багатьох судинних рослин, мохи отримують значну частину мінеральних речовин не через кореневу систему, а безпосередньо з атмосферних опадів, аерозолів, пилу та поверхневих відкладень. Унаслідок цього вони можуть накопичувати у своїх тканинах важкі метали, продукти промислових викидів, солі та інші компоненти антропогенно трансформованого середовища.

Процеси накопичення забруднювачів у мохів пов'язані як із фізичним осадженням частинок на поверхні рослинного тіла, так і з фізіолого-біохімічними механізмами зв'язування та утримування іонів у клітинних структурах. Дослідження показують, що бріофіти здатні накопичувати значні концентрації важких металів, реагуючи на їхню присутність змінами інтенсивності фотосинтетичних процесів, водного режиму, стану клітинних мембран та антиоксидантного захисту [16].

Особливий інтерес для біоіндикаційних досліджень становлять види мохів, здатні успішно функціонувати в умовах вираженого антропогенного навантаження. Такі види часто використовуються як модельні об'єкти для вивчення адаптаційних механізмів та індикаторної чутливості. Одним із широко досліджуваних видів є *Ceratodon purpureus*, який характеризується високою екологічною пластичністю та здатністю колонізувати порушені субстрати. Дослідження реакції цього виду на дію важких металів показали, що навіть за умов значного хімічного навантаження у рослин відбуваються складні зміни фотосинтетичного апарату, пігментної системи та інтенсивності окиснювальних процесів [18].

Іншим прикладом є *Campylopus introflexus* – вид, фізіологічні реакції якого активно досліджуються в умовах абіотичного стресу на техногенно порушених територіях. Встановлено, що за умов дії несприятливих факторів у цього моху спостерігаються зміни функціонування антиоксидантної системи, фотосинтетичних процесів та адаптивних механізмів підтримання клітинного гомеостазу [15]. Подібні дослідження мають важливе значення для розуміння

механізмів стійкості мохів і обґрунтування їхнього використання як біоіндикаторів стану довкілля.

Висока індикаторна чутливість мохів значною мірою визначається також їхньою здатністю адаптуватися до різних типів екологічного стресу. До основних стресових чинників, що впливають на бріофіти, належать дефіцит вологи, надмірне сонячне опромінення, засолення, промислове забруднення, зміни кислотності субстрату та накопичення токсичних речовин. Реакції мохів на подібні впливи реалізуються через комплекс морфологічних, фізіологічних та біохімічних механізмів.

Одним із поширених проявів адаптації до несприятливих умов є перебудова пігментного комплексу. Пігменти відіграють важливу роль не лише у фотосинтетичних процесах, а й у механізмах фотозахисту клітин. В умовах надмірного сонячного опромінення, посухи чи техногенного навантаження у мохів можуть змінюватися концентрації хлорофілів та каротиноїдів, що розглядається як адаптивна реакція фотосинтетичного апарату на дію стресових чинників [36].

Важливим компонентом стійкості бріофітів є також осморегуляція та підтримання водного балансу. За умов дегідратації у мохів активізуються механізми накопичення низькомолекулярних захисних сполук, зокрема проліну, який виконує функції осмопротектора, стабілізатора білків і мембран та антиоксиданта. Паралельно відбуваються зміни активності антиоксидантних ферментів, спрямовані на обмеження ушкоджувальної дії активних форм кисню [17].

У дослідженнях адаптаційних реакцій бріофітів на посттехногенних територіях особливу увагу приділяють вивченню ролі антиоксидантного захисту. Встановлено, що функціонування антиоксидантної системи є одним із ключових механізмів, які забезпечують виживання мохів у стресових умовах. Зокрема, у моху *Dicranella heteromalla* за умов посттехногенного середовища виявлено активацію механізмів антиоксидантного захисту, що дозволяє

підтримувати стабільність фізіологічних процесів та знижувати інтенсивність окиснювального ушкодження клітин [1].

Таким чином, індикаторні властивості мохів ґрунтуються не на одній окремій ознаці, а на комплексі взаємопов'язаних біологічних і фізіологічних характеристик. Особливості морфологічної організації, механізми водообміну, здатність до акумуляції речовин, пластичність фотосинтетичного апарату, функціонування антиоксидантного захисту та різноманітні адаптаційні реакції формують високу чутливість бріофітів до змін умов середовища та пояснюють їхнє широке використання у біоіндикаційних дослідженнях.

### 1.3. Досвід використання мохів у біоіндикаційних дослідженнях

У сучасних екологічних дослідженнях мохоподібні розглядаються як одна з найперспективніших груп рослинних організмів для здійснення біоіндикації стану довкілля. Завдяки високій чутливості до змін умов існування, здатності акумулювати забруднювачі та реагувати фізіологічними й морфологічними змінами на дію стресових факторів мохи широко використовуються у дослідженнях атмосферного повітря, техногенно трансформованих територій, рекреаційно навантажених екосистем та промислових ландшафтів.

Одним із найпоширеніших напрямів використання бріофітів у біоіндикаційних дослідженнях є оцінювання впливу атмосферного та промислового забруднення. Встановлено, що мохи здатні накопичувати значні концентрації полютантів, важких металів та інших токсичних речовин, що надходять із повітряного середовища. Саме тому вони часто застосовуються для оцінювання якості атмосферного повітря у містах, промислових районах та територіях із підвищеним техногенним навантаженням.

Дослідження фізіолого-біохімічних реакцій бріофітів у зонах промислового впливу демонструють, що атмосферне забруднення супроводжується перебудовою функціонування фотосинтетичного апарату, змінами активності антиоксидантної системи та інтенсифікацією процесів

окиснювального стресу [15, 17]. Такі зміни можуть використовуватися як чутливі індикатори екологічного стану території та ступеня антропогенного навантаження.

Важливе місце у сучасних бріоіндикаційних дослідженнях займає вивчення реакцій мохів на вплив важких металів. Доведено, що бріофіти здатні накопичувати іони металів у тканинах, а зміни інтенсивності фотосинтетичних процесів, функціонування клітинних мембран та перекисного окиснення ліпідів можуть відображати рівень хімічного забруднення середовища [16]. Зокрема, у дослідженнях моху *Ceratodon purpureus* встановлено, що дія важких металів супроводжується порушенням роботи фотосинтетичного апарату та активацією окиснювальних процесів, що підтверджує перспективність використання цього виду у біоіндикаційних дослідженнях [18].

Значна кількість досліджень присвячена використанню мохів для оцінювання стану посттехногенних територій. Особливий інтерес у цьому напрямі становлять девастовані ландшафти, породні відвали, території видобутку корисних копалин, хвостосховища та інші екосистеми зі зміненими фізико-хімічними властивостями субстрату. За таких умов мохи нерідко виступають піонерними рослинами, які здатні колонізувати екстремальні субстрати та брати участь у процесах формування рослинного покриву.

Прикладом успішного використання бріофітів у дослідженнях посттехногенних екосистем є роботи, присвячені аналізу адаптації мохів до умов відвалів вугільних шахт Червоноградського гірничопромислового району. Установлено, що бріофіти демонструють складні адаптаційні стратегії фотосинтетичного апарату, що дозволяє їм функціонувати в умовах дефіциту поживних речовин, нестабільного водного режиму та техногенного навантаження [15]. Подібні дослідження підтверджують можливість використання мохів не лише як індикаторів екологічного стану, але й як моделей для вивчення механізмів пристосування рослин до екстремальних умов.

У дослідженнях посттехногенних середовищ активно використовуються також фізіолого-біохімічні показники адаптації мохів. Вивчення ролі антиоксидантного захисту у моху *Dicranella heteromalla* показало, що функціонування антиоксидантної системи має вирішальне значення для виживання бріофітів за умов підвищеного екологічного стресу [1]. Подібні результати мають важливе прикладне значення для біоіндикаційних досліджень техногенно трансформованих екосистем.

Окремий напрям становлять дослідження мохів у середовищах із підвищеним сольовим навантаженням. Роботи, присвячені аналізу мохів із територій видобутку калійної руди, демонструють, що сольовий стрес супроводжується змінами вмісту фотосинтетичних пігментів, перебудовою пігментного комплексу та модифікацією фізіологічного стану рослин [15]. Такі показники можуть використовуватися як інформативні маркери адаптації організмів до специфічних умов існування.

У сучасних дослідженнях дедалі більшого поширення набуває використання модельних видів мохів для оцінювання реакцій на різні типи абіотичного стресу. Одним із таких видів є *Campylopus introflexus*, фізіологічні реакції якого вивчалися на породних відвалах вугільних шахт. Отримані результати свідчать про зміну показників фотосинтетичної активності, функціонування антиоксидантної системи та адаптивних механізмів підтримання клітинного гомеостазу під впливом несприятливих факторів [18].

Окрім екологічних досліджень природних та техногенно трансформованих територій, мохи широко використовуються у модельних лабораторних експериментах. Застосування культур *in vitro*, експериментів із модифікацією гравітаційного середовища, водного режиму та інтенсивності освітлення дозволяє глибше досліджувати механізми адаптації бріофітів та особливості їхньої реакції на зміни факторів середовища [13, 24].

Перспективним напрямом біоіндикаційних досліджень є також використання фізіологічних маркерів стресу, зокрема змін пігментного комплексу, накопичення проліну, активності антиоксидантних ферментів та

особливостей водного режиму мохів [37]. Використання таких показників розширює можливості оцінювання стану довкілля, оскільки дозволяє виявляти реакції організмів ще до появи виражених морфологічних змін.

Таким чином, сучасний досвід використання мохів у біоіндикаційних дослідженнях свідчить про широкий спектр напрямів їхнього застосування – від оцінювання атмосферного забруднення та промислового пресингу до дослідження посттехногенних територій, сольового стресу та адаптаційних процесів у лабораторних умовах. Результати численних досліджень підтверджують високу інформативність бріофітів як біоіндикаторів та обґрунтовують доцільність їх використання у системі екологічного моніторингу та організації дослідницької діяльності.

# РОЗДІЛ 2
# ОРГАНІЗАЦІЯ УЧНІВСЬКИХ ЕКОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ У СУЧАСНІЙ ШКОЛІ

## 2.1. Дослідницька діяльність здобувачів освіти у контексті сучасної природничої освіти

Сучасний розвиток освіти характеризується переходом від переважно репродуктивної моделі навчання до компетентнісно орієнтованого освітнього процесу, спрямованого на формування здатності здобувачів освіти застосовувати знання у практичній діяльності, аналізувати інформацію, розв’язувати проблеми та здійснювати самостійну пізнавальну діяльність. У цьому контексті особливого значення набуває дослідницька діяльність, яка розглядається як важливий компонент сучасної природничої освіти.

Концепція Нової української школи визначає серед ключових завдань сучасної освіти формування компетентностей, необхідних для успішної самореалізації особистості у суспільстві, зокрема критичного мислення, ініціативності, уміння працювати з інформацією, приймати рішення та застосовувати знання у практичних ситуаціях [31]. У зв’язку з цим дослідницька діяльність перестає бути лише додатковим елементом навчання і набуває статусу одного з важливих інструментів формування компетентностей здобувачів освіти.

Відповідно до Державного стандарту базової середньої освіти природнича освітня галузь спрямована на формування природничо-наукової компетентності, що передбачає здатність учнів досліджувати природні явища, планувати та проводити спостереження, експерименти й дослідження, аналізувати результати, працювати з даними та робити обґрунтовані висновки [33]. Таким чином, дослідницький компонент інтегрується у зміст сучасної природничої освіти та розглядається як необхідна умова формування природничо-наукового світогляду.

У педагогічній літературі дослідницьку діяльність учнів трактують як організований процес пізнання, під час якого здобувачі освіти самостійно або за педагогічної підтримки здійснюють пошук інформації, висувають припущення, проводять спостереження, аналізують явища, інтерпретують результати та формулюють висновки. Дослідницька діяльність поєднує елементи наукового пізнання з освітніми завданнями та сприяє формуванню активної пізнавальної позиції учнів [26].

Важливим засобом реалізації компетентнісного підходу у навчанні природничих дисциплін виступає дослідницький метод навчання. Його сутність полягає у залученні здобувачів освіти до процесів постановки проблеми, формулювання дослідницьких запитань, добору методів дослідження, аналізу отриманих результатів та їх інтерпретації [7]. Використання дослідницького методу сприяє формуванню не лише предметних знань, а й умінь працювати з інформацією, аналізувати факти, аргументувати власну позицію та застосовувати науковий підхід до розв’язання навчальних і практичних завдань.

Особливого значення дослідницька діяльність набуває у процесі навчання біології та природничих дисциплін, зміст яких безпосередньо пов’язаний із вивченням живої природи, природних явищ та екологічних процесів. Формування дослідницьких умінь на уроках біології передбачає розвиток здатності здійснювати спостереження, порівняння, опис, вимірювання, аналіз результатів, планування дослідів та екологічних досліджень [12].

У сучасній природничій освіті важливу роль відіграє інтегративний підхід, який передбачає взаємозв’язок різних галузей знань та використання міжпредметних зв’язків. Інтеграція природничо-наукової освіти створює сприятливі умови для розвитку дослідницьких умінь здобувачів освіти, оскільки дозволяє розглядати явища та процеси комплексно, у взаємозв’язку екологічних, біологічних, фізичних та хімічних аспектів [10].

Важливим компонентом сучасної природничої освіти є inquiry-based learning – дослідницько-орієнтоване навчання, яке базується на принципах активного пізнання, самостійного пошуку інформації та використання елементів наукового дослідження у процесі навчання. Дослідницьке навчання передбачає проходження певних етапів: постановку проблеми, формулювання дослідницьких запитань, висування гіпотез, планування дослідження, збір та аналіз даних, формулювання висновків [45].

У міжнародній педагогічній практиці inquiry-based learning розглядається як один із найефективніших підходів до навчання природничих наук. Дослідники підкреслюють, що залучення учнів до дослідницької діяльності сприяє розвитку критичного мислення, уміння працювати з доказами, навичок аргументації та розуміння логіки наукового пізнання [44].

Важливу роль у реалізації дослідницького навчання відіграє педагогічний супровід учителя. Сучасний учитель природничих дисциплін виступає не лише джерелом інформації, а й фасилітатором, наставником та організатором пізнавальної діяльності учнів. Його завдання полягає у створенні освітнього середовища, у якому здобувачі освіти можуть ставити запитання, проводити спостереження, аналізувати результати та самостійно будувати знання [34].

Однією з поширених моделей організації дослідницької діяльності є навчальна модель 5E (Engage, Explore, Explain, Elaborate, Evaluate), розроблена BSCS. Ця модель передбачає послідовне залучення учнів до навчального процесу через актуалізацію попереднього досвіду, дослідницьку активність, пояснення явищ, розширення знань та оцінювання результатів навчання [44]. Елементи цієї моделі можуть ефективно використовуватися під час організації учнівських природничих досліджень, у тому числі екологічних.

У контексті сучасної школи важливе місце посідає проєктна діяльність, яка тісно пов’язана з дослідницьким навчанням. Проєктна та дослідницька діяльність сприяють формуванню природничо-наукової компетентності, розвитку самостійності, творчості та відповідальності здобувачів освіти [6]. У

практиці навчання біології та екології дослідницькі проєкти можуть реалізовуватися у формі спостережень, польових досліджень, лабораторних робіт, екологічного моніторингу, аналізу стану локальних екосистем та вивчення біорізноманіття.

Сучасні модельні програми з біології та інтегрованих природничих курсів містять широкий спектр дослідницьких, практичних та проєктних завдань. Такі завдання можуть виконуватися індивідуально або у складі груп, короткотривало чи довготривало, у класних, позакласних або польових умовах. Особливого значення набувають екологічні дослідження, які дозволяють поєднувати спостереження за природними об’єктами, аналіз екологічних факторів, роботу з даними та інтерпретацію результатів.

Важливим напрямом розвитку сучасної природничої освіти є STEM-освіта, яка передбачає інтеграцію природничих наук, технологій, інженерії та математики. STEM-підходи орієнтують освітній процес на практичне застосування знань, розв’язання проблемних ситуацій та здійснення дослідницької діяльності [32]. У цьому контексті дослідницькі завдання, польові спостереження, екологічний моніторинг та аналіз природних об’єктів можуть виступати ефективним засобом формування природничо-наукової компетентності.

Таким чином, дослідницька діяльність є важливим складником сучасної природничої освіти та одним із провідних засобів формування природничо-наукової компетентності здобувачів освіти. Реалізація компетентнісного підходу, використання дослідницького методу, inquiry-based learning, STEM-освіти, проєктної діяльності та інтегративних підходів створюють широкі можливості для організації учнівських досліджень у процесі навчання біології та природничих дисциплін.

## 2.2. Методичні аспекти організації учнівських екологічних досліджень

У сучасній природничій освіті екологічні дослідження посідають важливе місце як засіб формування природничо-наукової та екологічної

компетентностей здобувачів освіти. Організація учнівських екологічних досліджень передбачає залучення учнів до активного вивчення природних об’єктів, екологічних процесів та стану довкілля із використанням елементів наукового дослідження, спостереження, аналізу даних та практичної діяльності.

Екологічна освіта розглядається як важливий складник сучасного освітнього процесу, спрямований не лише на засвоєння системи екологічних знань, а й на формування екологічного мислення, відповідального ставлення до природи та готовності до практичної природоохоронної діяльності [11]. У цьому контексті організація дослідницької діяльності учнів сприяє переходу від теоретичного засвоєння екологічних понять до безпосереднього пізнання закономірностей функціонування природних систем.

Методично організоване екологічне дослідження має ґрунтуватися на логіці наукового пізнання та включати низку взаємопов’язаних етапів. До основних етапів належать визначення проблеми дослідження, формулювання мети і завдань, добір методів, проведення спостережень або експериментальних процедур, фіксація та обробка результатів, інтерпретація отриманих даних та представлення висновків. Така послідовність дозволяє формувати у здобувачів освіти уявлення про структуру наукового дослідження та розвивати дослідницькі вміння [38].

Важливим напрямом організації учнівських екологічних досліджень є польова дослідницька діяльність. На відміну від виключно кабінетного навчання, польові дослідження забезпечують безпосередній контакт учнів із природними об’єктами, дозволяють здійснювати реальні спостереження та аналізувати стан екосистем у природних умовах. Польові дослідження можуть включати спостереження за біорізноманіттям, вивчення рослинних угруповань, аналіз екологічних факторів, оцінювання антропогенного впливу та проведення елементарного екологічного моніторингу [14].

Організація польових екологічних досліджень потребує ретельної методичної підготовки. Важливими умовами їх ефективного проведення є

вибір об’єкта дослідження, добір репрезентативних ділянок, визначення доступних методів збору матеріалу, забезпечення безпеки учасників та попередня підготовка учнів до роботи в природному середовищі. Значну увагу необхідно приділяти формуванню навичок спостереження, опису природних об’єктів, ведення польових записів, фотофіксації та роботи з вимірювальними інструментами [21].

У практиці сучасної школи важливу роль відіграє екологічний моніторинг як форма дослідницької діяльності учнів. Елементи моніторингових досліджень можуть використовуватися під час оцінювання стану атмосферного повітря, водних об’єктів, ґрунтів, рослинного покриву, локальних екосистем та антропогенно трансформованих територій. Залучення учнів до екологічного моніторингу сприяє формуванню навичок збору та аналізу даних, критичного осмислення екологічних проблем і застосування наукових підходів до їхнього вивчення [21].

Однією з ефективних форм реалізації учнівської дослідницької діяльності є проєктна робота. Екологічні проєкти природничого спрямування можуть бути індивідуальними або груповими, короткотривалими або довготривалими, теоретичними, практичними чи дослідницькими за характером діяльності [28]. Використання проєктного підходу створює умови для розвитку самостійності, відповідальності, комунікативних умінь та здатності працювати з інформацією.

Проєктна діяльність у процесі екологічної освіти дозволяє інтегрувати дослідницькі методи з практичними завданнями та соціально значущими проблемами довкілля. У межах екологічних проєктів учні можуть проводити локальні дослідження стану навколишнього середовища, аналізувати рівень антропогенного впливу, вивчати біорізноманіття, оцінювати стан природних об’єктів та розробляти пропозиції щодо покращення екологічної ситуації [34].

Суттєве значення для організації учнівських екологічних досліджень має формування екологічної компетентності. Екологічна компетентність охоплює систему знань про довкілля, практичні вміння, ціннісні орієнтації та готовність

до відповідальної поведінки у взаємодії з природою [7]. Застосування дослідницьких методів у навчанні біології та екології створює сприятливі умови для поєднання когнітивного, діяльнісного та ціннісного компонентів екологічної освіти.

У міжнародній педагогічній практиці дедалі більшого значення набуває outdoor learning – навчання поза межами класної кімнати, що передбачає активне використання природного середовища як освітнього простору. Дослідження показують, що залучення учнів до польових досліджень, природничих екскурсій та спостережень у реальних умовах сприяє підвищенню мотивації до навчання, кращому розумінню природничих процесів та розвитку дослідницьких умінь [46].

Тісно пов’язаною з outdoor learning є концепція place-based education, яка орієнтує освітній процес на використання локального середовища, місцевих екосистем та природних об’єктів як основи для навчання [46]. У контексті екологічної освіти цей підхід є особливо цінним, оскільки дозволяє організовувати дослідження, безпосередньо пов’язані з навколишнім середовищем, доступним для учнів.

У природничій освіті важливе місце займають також навчальні екскурсії та польові практики. Модель організації польових занять підкреслює необхідність інтеграції польових досліджень у структуру навчального процесу, забезпечення попередньої підготовки учнів та використання результатів польової роботи у подальшому навчанні [34]. Такий підхід дозволяє розглядати польове дослідження не як епізодичний захід, а як повноцінний компонент природничої освіти.

Сучасні тенденції екологічної освіти також акцентують увагу на соціальному навчанні та освіті для сталого розвитку. Дослідницька діяльність учнів у сфері екології може сприяти розвитку співпраці, комунікації, колективного прийняття рішень та усвідомлення взаємозв’язку між природними й соціальними процесами [34]. У цьому контексті учнівські

екологічні дослідження набувають не лише навчального, а й суспільно значущого характеру.

Таким чином, методичні аспекти організації учнівських екологічних досліджень охоплюють широкий спектр підходів, форм і методів роботи – від польових досліджень та екологічного моніторингу до проєктної діяльності, outdoor learning та освіти для сталого розвитку. Раціональне поєднання цих підходів створює умови для формування дослідницьких умінь, екологічної компетентності та активної природоохоронної позиції здобувачів освіти.

## 2.3. Методика проведення учнівського дослідження «Мохи як біоіндикатори якості повітря»

Проведення учнівського дослідження «Мохи як біоіндикатори якості повітря» поєднує елементи польової ботаніки, екологічного моніторингу та дослідницького навчання. Використання мохів як об’єктів дослідження дозволяє організувати практично орієнтовану діяльність здобувачів освіти, спрямовану на формування дослідницьких умінь, природничо-наукової та екологічної компетентностей.

Організація дослідження доцільно розпочинати з підготовчого етапу. На цьому етапі учні ознайомлюються з поняттями біоіндикації та бріоіндикації, особливостями будови мохоподібних, їх роллю у природних екосистемах та можливостями використання для оцінювання стану довкілля. Доцільним є використання ілюстративних матеріалів, визначників, фотографій поширених видів, цифрових ресурсів та коротких практичних вправ із розпізнавання мохів [5].

Наступним кроком є вибір території дослідження. Для проведення учнівських екологічних досліджень можуть використовуватися пришкільні території, парки, сквери, лісопаркові зони, природоохоронні об’єкти або інші доступні локальні екосистеми. Методично доцільним є добір кількох ділянок, що відрізняються рівнем антропогенного навантаження. Наприклад, це можуть бути території поблизу автомобільних доріг, рекреаційні зони, паркові

ділянки або умовно фонові території з меншим рівнем забруднення [25]. Важливим елементом організації дослідження є планування польової роботи. Учні мають визначити мету дослідження, сформулювати дослідницькі запитання, обрати показники, які будуть оцінюватися, та підготувати необхідне обладнання. Залежно від віку здобувачів освіти та складності дослідження можуть використовуватися спрощені або більш деталізовані методики.

Польовий етап передбачає безпосереднє обстеження досліджуваних ділянок. Під час роботи учні можуть здійснювати маршрутні спостереження, описувати умови місцезростання мохів, проводити фотофіксацію, оцінювати характер субстрату, освітленість, ступінь зволоження та можливі джерела антропогенного впливу [14]. Важливим компонентом польової роботи є ведення польового щоденника, у якому фіксуються місце збору, дата дослідження, особливості території та первинні результати спостережень.

У шкільній практиці доцільно використовувати доступні показники бріоіндикації. До них можуть належати видовий склад мохів, частота трапляння окремих видів, ступінь розвитку мохового покриву, проективне покриття, особливості поширення мохів на різних типах субстратів. Для досліджень із молодшими учнями можна обмежуватися якісними спостереженнями та порівняльним аналізом ділянок, тоді як старшокласники можуть виконувати більш деталізовані обліки та елементи статистичного аналізу [27].

Під час збору матеріалу важливо дотримуватися правил польової бріологічної методики. Зразки мохів відбирають обережно, намагаючись не порушувати надмірно природний покрив. Для кожного зразка необхідно зафіксувати місце збору, тип субстрату та умови зростання. Подальше визначення мохів може здійснюватися за допомогою визначників, гербарних матеріалів, фотографій та спеціальної літератури [2, 5]. Важливим компонентом дослідження є гербаризація мохоподібних. Гербарні зразки можуть використовуватися для уточнення визначення видів, створення навчальних колекцій та подальшої дослідницької роботи. Методично доцільно

навчати учнів основних правил підготовки, сушіння, маркування та зберігання зразків мохів [3].

У сучасних біоіндикаційних дослідженнях широко застосовуються методи пасивного та активного біомоніторингу. Пасивний біомоніторинг ґрунтується на дослідженні природно сформованих популяцій мохів у місцях їх зростання, тоді як активний передбачає використання спеціально підготовлених експозиційних зразків [43]. У практиці закладів загальної середньої освіти найбільш доступним та методично доцільним є використання пасивного моніторингу, що не потребує складного лабораторного обладнання та дозволяє організовувати дослідження у локальному середовищі.

Перспективним напрямом організації учнівських досліджень є використання елементів бріоіндикаційного моніторингу атмосферного повітря. У доступному для закладів загальної середньої освіти форматі учні можуть порівнювати різні території за ступенем розвитку мохового покриву, поширенням окремих видів та загальними особливостями бріофлори. Подібні дослідження сприяють формуванню навичок екологічного аналізу та дозволяють пов’язати навчальний матеріал із реальними проблемами стану довкілля [39].

Під час організації дослідження доцільно враховувати вікові особливості здобувачів освіти та рівень сформованості їхніх дослідницьких умінь. Для учнів базової школи більш прийнятними можуть бути спрощені методики, що передбачають порівняльне оцінювання територій, фотофіксацію, визначення окремих поширених видів та опис умов місцезростання. У старшій школі можливе залучення учнів до більш складних досліджень, які включають елементи кількісного аналізу, облік проективного покриття, визначення видового складу та інтерпретацію отриманих результатів.

Важливою перевагою використання мохів у шкільній дослідницькій діяльності є доступність об’єктів дослідження. Мохоподібні поширені у різних типах екосистем, не потребують складного лабораторного обладнання для первинного вивчення та дозволяють організовувати дослідження у локальному

природному середовищі. Це робить бріоіндикаційні дослідження придатними як для урочної, так і для позаурочної діяльності, роботи гуртків, учнівських наукових товариств та підготовки дослідницьких проєктів. Після завершення польового етапу здійснюється опрацювання та аналіз результатів. Учні можуть систематизувати отримані дані у вигляді таблиць, порівнювати досліджувані ділянки, будувати діаграми, карти або узагальнювати результати у формі дослідницьких звітів. Для фіксації та обробки інформації доцільно використовувати цифрові інструменти: електронні таблиці, мобільні засоби фотофіксації, онлайн-карти та інші засоби візуалізації даних.

Завершальним етапом є представлення результатів дослідження. Результати учнівської роботи можуть оформлюватися у вигляді презентацій, постерів, екологічних проєктів, дослідницьких робіт або виступів на учнівських конференціях. Така форма роботи не лише сприяє розвитку комунікативних умінь, а й дозволяє учням усвідомити практичне значення проведених досліджень.

Отже, методика проведення учнівського дослідження «Мохи як біоіндикатори якості повітря» поєднує елементи польового екологічного дослідження, біоіндикаційного моніторингу та сучасних освітніх технологій. Її використання у навчанні біології та екології створює умови для розвитку дослідницьких умінь здобувачів освіти та наближає освітній процес до практики реального природничого дослідження.

# РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ УЧНІВСЬКОГО ЕКОЛОГІЧНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ МОХІВ ЯК БІОІНДИКАТОРІВ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ

## 3.1. Організація учнівського дослідження «Мохи як біоіндикатори якості повітря»: район дослідження та методика

Практична частина кваліфікаційної роботи спрямована на демонстрацію можливостей організації учнівського екологічного дослідження з використанням мохів як біоіндикаторів стану довкілля. Як практичну основу роботи використано матеріали учнівського дослідження, виконаного на базі Національного дендрологічного парку «Софіївка» НАН України та присвяченого вивченню епігейних мохів трав'яних екосистем як індикаторів антропогенного впливу [30]. Використання реального учнівського дослідницького кейсу дозволяє проілюструвати особливості планування, організації та проведення екологічних досліджень у природничій освіті.

Дослідження виконувалося на території Національного дендрологічного парку «Софіївка» НАН України. Територія дендропарку є перспективною для проведення бріоіндикаційних досліджень завдяки поєднанню різних типів екосистем, мозаїчності екологічних умов та неоднорідності антропогенного навантаження. Поряд зі штучно створеними парковими композиціями на території НДП «Софіївка» представлені ділянки природної та напівприродної рослинності, зокрема лучно-степові, лісові, прибережні та трав'яні угруповання [30].

Клімат району дослідження є помірно континентальним. Середньорічна температура повітря становить близько +7,3…+9,4 °C, а середня річна кількість атмосферних опадів коливається у межах 570–630 мм [30]. Поєднання різних умов освітлення, зволоження, типів субстрату та рівня рекреаційного навантаження створює сприятливі умови для дослідження поширення епігейних мохів та аналізу їх індикаторного потенціалу.

Практична частина роботи ґрунтується на матеріалах учнівського екологічного дослідження, виконаного на базі НДП «Софіївка» НАН України, присвяченого вивченню епігейних мохів трав’яних екосистем як індикаторів антропогенного впливу [30]. Матеріали дослідження використано як приклад реалізації методики організації учнівської дослідницької діяльності у природничій освіті.

Для проведення дослідження було закладено чотири модельні полігони, розташовані у трав’яних екосистемах дендропарку та відмінні за умовами середовища й ступенем антропогенного навантаження. Дослідні ділянки включали території з різною інтенсивністю рекреаційного використання, особливостями догляду за рослинністю, рівнем зволоження та освітленості.

Модельний полігон №1 («Грекова балка») являв собою лучно-степову ділянку на схилі північно-східної експозиції, що зазнавала значного рекреаційного впливу. Полігон №2 («Партерний амфітеатр») був представлений ділянкою з поєднанням штучного газону та залишків лучно-степової рослинності. Полігон №3 (балка «Звіринець») характеризувався затіненими та більш зволоженими умовами середовища. Полігон №4 («Галявина Грибок») розташовувався у менш відвідуваній частині дендропарку та характеризувався відносно слабким антропогенним впливом [30].

Організація учнівського дослідження передбачала послідовне проходження основних етапів наукового пізнання: постановку дослідницького завдання, вибір об’єктів дослідження, проведення польових спостережень, збір матеріалу, визначення мохоподібних, опрацювання результатів та формулювання висновків. Така структура дослідження дозволяє формувати у здобувачів освіти навички планування роботи, спостереження, аналізу екологічних умов та інтерпретації отриманих результатів.

Польові дослідження проводили маршрутно-експедиційним методом. На кожному модельному полігоні було закладено по три облікові ділянки площею 1 м², що загалом становило 12 точок обліку [30]. Географічні координати

ділянок визначали за допомогою мобільного застосунку NextGIS Mobile for Android.

Під час дослідження оцінювали низку екологічних показників, зокрема рівень освітленості, вологість едафотопу, характер субстрату та ступінь антропогенного навантаження. Для спрощення аналізу та забезпечення доступності методики для учнів використовували елементи бального оцінювання умов середовища [25].

Одним із основних показників бріоіндикаційного аналізу було проективне покриття мохового покриву. Для кожної облікової ділянки визначали площу, зайняту мохоподібними, після чого здійснювали розрахунок відсоткового покриття. Крім того, фіксували видовий склад епігейних мохів, особливості їх просторового поширення та приуроченість до різних типів екологічних умов.

Збір бріологічного матеріалу здійснювали відповідно до загальноприйнятих методик польових досліджень мохоподібних. Зразки відбирали разом із невеликою кількістю субстрату, упаковували у паперові пакети та маркували із зазначенням місця збору, номера ділянки та дати відбору [3]. Подальше визначення видів проводили у лабораторних умовах із використанням бінокулярних луп, мікроскопічної техніки та спеціальної літератури.

Ідентифікацію мохоподібних здійснювали за фундаментальними флористичними зведеннями та визначниками бріофлори України [2, 4]. Отримані результати опрацьовували методами математичної статистики із використанням програмного пакета Statistica v.7.0.

Таким чином, організація учнівського дослідження «Мохи як біоіндикатори якості повітря» поєднувала елементи польової ботаніки, біоіндикаційного моніторингу та дослідницького навчання. Використання реального природного середовища та доступних методів дослідження створює сприятливі умови для формування дослідницьких умінь здобувачів освіти та розвитку їхньої екологічної компетентності.

## 3.2. Результати учнівського бріоіндикаційного дослідження епігейних мохів НДП «Софіївка»

### 3.2.1. Таксономічний склад та екологічна характеристика виявлених видів

У ході проведення учнівського бріоіндикаційного дослідження в трав'яних екосистемах НДП «Софіївка» НАН України було виявлено 8 видів епігейних мохів, що належать до 7 родів та 4 родин. Усі встановлені види відносяться до класу Листостеблових мохів (Bryopsida). За систематичною структурою серед виявлених таксонів переважали представники порядку Bryales, менш численними були представники Pottiales та Dicranales [30]. Такий видовий склад є характерним для трав'яних та напіввідкритих екосистем лісостепової зони України, що перебувають під різним рівнем антропогенного впливу [5, 8].

Серед виявлених таксонів помітне місце посідали представники родини Brachytheciaceae – *Brachythecium mildeanum*, *Homalothecium lutescens* та *Oxyrrhynchium hians*. Представники цієї родини відомі своєю екологічною пластичністю та здатністю освоювати широкий спектр мікроекотопів. Для них характерна висока пристосованість до варіабельних умов зволоження, освітлення та механічного порушення субстрату [5].

Вид *Brachythecium mildeanum* був виявлений лише в межах полігону «Грекова балка». Його локальне поширення може бути пов'язане зі специфічним поєднанням умов середовища: схиловим рельєфом, помірним затіненням, періодичним зволоженням та значним рекреаційним навантаженням. Виявлення цього виду переважно на територіях із помітним антропогенним впливом дозволяє розглядати його як відносно стійкий до механічного порушення компонент мохового покриву [30].

*Homalothecium lutescens* продемонстрував іншу екологічну стратегію. У межах дослідження цей вид був виявлений виключно на полігоні «Галявина Грибок», де утворював досить щільні, добре розвинені мохові дернини. Подібний характер поширення свідчить про його здатність формувати

стабільні угруповання в умовах відносно помірного антропогенного навантаження та достатнього освітлення. Моноценотичний характер його поширення може бути пов’язаний із конкурентними перевагами виду у конкретних умовах екотопу [30].

Найвищий рівень екологічної пластичності серед виявлених мохів продемонстрував *Oxyrrhynchium hians*. Вид був зареєстрований у межах кількох модельних полігонів, зокрема на ділянках Партерного амфітеатру та балки «Звіринець». Його присутність як у відносно порушених, так і у більш стабільних умовах може свідчити про високу адаптивність до змін екологічних параметрів середовища. Літературні джерела також характеризують цей вид як типовий компонент вторинних угруповань і порушених ділянок рослинного покриву [5].

Серед представників родини Pottiaceae були встановлені *Barbula unguiculata*, *Tortula acaulon* та *Tortula lindbergii*. Види цієї родини часто трапляються на відкритих субстратах, ущільнених ґрунтах, порушених ділянках та урбанізованих територіях, що зумовлює їхню важливу роль у біоіндикаційних дослідженнях [9].

*Barbula unguiculata* була виявлена лише на одній обліковій ділянці, однак саме така локальна присутність може бути показовою з погляду екологічної індикації. Вид відомий здатністю колонізувати ущільнені, відкриті та механічно трансформовані субстрати, тому його поява може розглядатися як індикатор локального порушення рослинного покриву [5].

Вид *Tortula acaulon* виявився більш поширеним і траплявся на кількох дослідних ділянках різних полігонів. Для нього характерна здатність витримувати нестачу вологи, інтенсивне освітлення та значне механічне навантаження. Подібні екологічні особливості пояснюють його присутність у межах територій із вираженим рекреаційним впливом [30].

До екологічно цікавих знахідок дослідження належить *Fissidens taxifolius* — представник родини Fissidentaceae. Цей вид був зафіксований лише на ділянці 3А полігону «Звіринець», що характеризується відносно

слабким антропогенним пресингом, підвищеним рівнем затінення та стабільним зволоженням. Подібна локалізація дозволяє розглядати його як потенційний індикатор менш трансформованих ділянок паркових екосистем [30]. У бріоіндикаційних дослідженнях види роду *Fissidens* нерідко асоціюються з більш стабільними та екологічно збалансованими умовами середовища [35].

Окремої уваги заслуговує *Thuidium assimile* — представник родини Thuidiaceae, який був виявлений лише одноразово. Незважаючи на обмежене поширення, присутність цього виду на дослідних ділянках може мати індикаторне значення, оскільки мохи цієї групи чутливо реагують на особливості мікроклімату, структуру рослинного покриву та характер субстрату.

Таким чином, аналіз таксономічного складу та екологічних особливостей виявлених видів підтвердив неоднорідність мохового покриву досліджуваних територій та засвідчив перспективність використання епігейних мохів для біоіндикаційного оцінювання локальних екологічних умов. Отримані результати демонструють, що навіть у межах обмеженої кількості модельних полігонів учнівське дослідження дозволяє виявити чіткі закономірності поширення мохоподібних та простежити їхній зв’язок із чинниками середовища.

### 3.2.2. Просторовий розподіл мохів на модельних полігонах

Аналіз просторового розподілу епігейних мохів у межах досліджуваних територій дозволив виявити виражену неоднорідність мохового покриву та встановити залежність між поширенням окремих видів, умовами місцезростання і рівнем антропогенного навантаження. Дослідження показало, що кожен модельний полігон характеризувався специфічним поєднанням видового складу, проективного покриття та екологічних умов, що визначали структуру бріоугруповань.

**Модельний полігон №1 – «Грекова балка».**

Даний полігон являв собою лучно-степову ділянку, розташовану на схилі північно-східної експозиції. Для цієї території були характерні значне рекреаційне навантаження, періодичне витоптування, регулярне викошування рослинності та сезонний вплив рекреаційної діяльності. Такі умови створюють нестабільне середовище для розвитку суцільного мохового покриву.

У межах полігону було зафіксовано порівняно низькі показники проективного покриття мохового ярусу – від 0,80 % до 6,14 %. Разом із тим саме на окремих ділянках «Грекової балки» спостерігалося відносно високе видове різноманіття, зокрема виявлено *Brachythecium mildeanum*, *Barbula unguiculata* та *Tortula lindbergii* [30]. Подібне поєднання невеликого покриття та відносно більшої кількості видів може пояснюватися мозаїчністю середовища та наявністю відкритих ділянок субстрату, придатних для поселення рудеральних і антропотолерантних мохів.

Особливістю полігону є домінування видів, здатних витримувати механічне ущільнення ґрунту та порушення рослинного покриву. Це свідчить про адаптивну роль певних мохоподібних у трансформованих трав'яних екосистемах і підтверджує перспективність використання їх як індикаторів рекреаційної дигресії.

**Модельний полігон №2 – «Партерний амфітеатр».**

Полігон «Партерний амфітеатр» характеризувався складнішими умовами формування мохового покриву. Частина території була реконструйована та трансформована у штучний газон, тоді як окремі ділянки зберігали залишки природнішої лучно-степової рослинності. Значний вплив на екологічний стан ділянки справляли регулярне скошування, рекреаційне використання та культурно-технічні заходи.

Показники проективного покриття мохового ярусу тут були одними з найнижчих серед досліджених територій і становили близько 1–2 % [30]. Незважаючи на це, у межах полігону було зафіксовано кілька видів мохів, зокрема *Oxyrrhynchium hians*, *Tortula acaulon* та *Thuidium assimile*. Присутність

цих видів може бути пов’язана зі здатністю окремих бріофітів колонізувати вторинно порушені субстрати та освоювати трансформовані ділянки рослинного покриву.

Особливий інтерес становить виявлення *Oxyrrhynchium hians*, який траплявся також на інших полігонах дослідження. Подібне поширення свідчить про екологічну пластичність виду та його здатність існувати в умовах зміненого середовища. Таким чином, полігон «Партерний амфітеатр» демонструє приклад території, де антропогенний вплив значною мірою обмежує розвиток суцільного мохового покриву, але не виключає присутності окремих стійких таксонів.

**Модельний полігон №3 – балка «Звіринець».**

Серед усіх досліджених полігонів саме балка «Звіринець» характеризувалася найбільш сприятливими умовами для розвитку мохового покриву. Для території були характерні підвищений рівень затінення, кращі умови зволоження та відносно слабкий антропогенний вплив. Поєднання цих факторів позитивно позначалося як на площі розвитку мохового покриву, так і на видовому складі бріоугруповань.

У межах полігону зафіксовано найвищі показники проективного покриття. Абсолютний максимум було виявлено на ділянці 3В, де покриття мохового ярусу становило 85,74 % [30]. Таке значення суттєво перевищувало показники інших модельних територій та вказувало на сприятливий вплив вологих і затінених умов на розвиток мохоподібних.

Водночас саме на полігоні «Звіринець» спостерігалося найбільше видове різноманіття. Окрім широко поширеного *Oxyrrhynchium hians*, тут було виявлено *Fissidens taxifolius* – вид, характерний для більш стабільних, зволожених та менш порушених екотопів [30]. Його присутність можна розглядати як важливий індикатор сприятливого екологічного стану окремих ділянок досліджуваної території.

Отримані результати підтверджують важливу роль мікрокліматичних чинників – затінення та зволоження – у формуванні мохового покриву та демонструють високу чутливість бріофітів до змін умов середовища.

**Модельний полігон №4 – «Галявина Грибок».**

Полігон «Галявина Грибок» характеризувався відкритими умовами, помірним зволоженням та відносно слабким антропогенним навантаженням. На відміну від інших модельних ділянок, тут спостерігався більш однорідний характер мохового покриву.

У межах усіх облікових ділянок полігону було виявлено лише один вид – *Homalothecium lutescens*, який формував досить стабільні мохові угруповання [30]. Показники проективного покриття змінювалися від 5,58 % до 34,59 %, що свідчило про достатньо успішний розвиток виду в умовах помірного рекреаційного навантаження.

Моноценотичний характер мохового покриву на даному полігоні може пояснюватися конкурентними перевагами *Homalothecium lutescens* у конкретних екологічних умовах. Отримані результати свідчать, що навіть за невеликого видового різноманіття окремі мохові угруповання можуть виступати важливими компонентами рослинного покриву та ефективними індикаторами локальних екологічних умов.

Таким чином, просторовий аналіз поширення мохів у межах чотирьох модельних полігонів продемонстрував чітку залежність між видовим складом, проективним покриттям мохового ярусу, екологічними характеристиками ділянок та рівнем антропогенного навантаження. Найбільш сприятливими для розвитку мохового покриву виявилися ділянки із кращими умовами зволоження та слабшим антропогенним впливом, тоді як інтенсивне рекреаційне використання та трансформація рослинного покриву супроводжувалися зменшенням площі мохового покриття та переважанням стійких до порушення видів.

### 3.2.3. Біоіндикаційна оцінка досліджуваних територій

Аналіз видового складу епігейних мохів, показників їхнього проективного покриття та характеру просторового поширення дозволив здійснити біоіндикаційну оцінку досліджуваних територій НДП «Софіївка» НАН України. Отримані результати підтверджують високу чутливість мохоподібних до змін екологічних умов та їхню придатність для оцінювання локального стану середовища.

Біоіндикаційний аналіз показав, що модельні полігони відрізнялися не лише за кількісними характеристиками мохового покриву, а й за складом домінуючих видів, ступенем їх екологічної пластичності та реакцією на антропогенне навантаження. Це дозволило умовно виділити території з різним рівнем трансформації середовища — від відносно стабільних до суттєво порушених.

До найбільш трансформованих ділянок за сукупністю ознак можна віднести полігони «Грекова балка» та «Партерний амфітеатр». Для цих територій були характерні низькі значення проективного покриття мохового ярусу, регулярне механічне порушення рослинного покриву, рекреаційне навантаження та активне втручання у структуру екосистем. В умовах подібного антропогенного впливу переважали види, здатні витримувати ущільнення ґрунту, відкритість субстрату та періодичне руйнування рослинного покриву [30].

Серед видів, що проявляли відносну стійкість до трансформованих умов, були *Barbula unguiculata*, *Tortula acaulon*, *Tortula lindbergii* та *Brachythecium mildeanum*. Для представників родини Pottiaceae характерною є здатність заселяти відкриті, сухі, механічно порушені або ущільнені субстрати, що зумовлює їхнє поширення в умовах урбанізованих та рекреаційно трансформованих територій [5, 8]. Наявність цих видів у межах полігонів із вираженим антропогенним пресингом підтверджує їхню індикаторну цінність як компонентів трансформованих екосистем.

Іншу біоіндикаційну картину продемонстрував полігон **«Звіринець»**, який характеризувався більш сприятливими умовами середовища. Для території були властиві підвищене зволоження, затінення та відносно слабший антропогенний вплив. Саме тут було зафіксовано найбільше видове різноманіття та максимальні значення проективного покриття мохового ярусу [30].

Особливого значення для біоіндикаційної оцінки набуває виявлення на полігоні *Fissidens taxifolius*. Цей вид траплявся лише у межах балки «Звіринець» та був пов'язаний із більш стабільними, вологими й менш порушеними умовами місцезростання. У бріологічній літературі представники роду *Fissidens* нерідко характеризуються як компоненти екотопів із відносно сприятливим мікрокліматом та помірним рівнем антропогенного впливу [Рагуліна, 2014]. У контексті проведеного дослідження його локалізація може розглядатися як індикатор ділянок зі збереженішими умовами середовища.

Проміжне положення за результатами біоіндикаційної оцінки займав полігон **«Галявина Грибок»**. Попри невисоке видове різноманіття, територія характеризувалася достатньо розвиненим моховим покривом та помірними показниками антропогенного впливу. Домінування *Homalothecium lutescens* свідчить про здатність цього виду формувати стійкі угруповання за умов відносної екологічної стабільності та помірного рекреаційного навантаження [30].

Важливим результатом дослідження стало підтвердження значення проективного покриття як інформативного біоіндикаційного показника. Отримані дані свідчать, що зі збільшенням інтенсивності антропогенного навантаження площа мохового покриву загалом зменшується. Натомість на територіях із кращими умовами зволоження та слабшим механічним впливом спостерігається розвиток більш потужного мохового ярусу, що супроводжується зростанням видового різноманіття [30].

Результати дослідження узгоджуються з даними літератури щодо використання бріофітів як чутливих індикаторів екологічного стану

середовища. Численні дослідження підтверджують, що видовий склад мохів, їх проективне покриття та реакція на зміни мікроклімату можуть відображати рівень атмосферного забруднення, механічного порушення субстрату, рекреаційного навантаження та загальної антропогенної трансформації територій [41, 42, 43].

Таким чином, проведене учнівське дослідження підтвердило перспективність використання епігейних мохів як біоіндикаторів екологічного стану територій. Виявлені закономірності поширення видів, відмінності у структурі мохового покриву та реакція бріофітів на зміну умов середовища демонструють можливість застосування бріоіндикаційних підходів не лише у професійних екологічних дослідженнях, але й у практиці учнівської дослідницької діяльності.

### 3.3. Методичний потенціал використання бріоіндикаційних досліджень у природничій освіті

Інтеграція бріоіндикаційного компонента у модельні навчальні програми

Сучасний етап розвитку шкільної природничої освіти в Україні, пов’язаний із впровадженням концепції «Нова українська школа», передбачає посилення діяльнісного, компетентнісного та дослідницького підходів у навчанні [31]. У цьому контексті проведення учнівських бріоіндикаційних досліджень має значний дидактичний потенціал і може бути інтегроване у чинні модельні навчальні програми закладів загальної середньої освіти.

У межах інтегрованих курсів природничої галузі (5–6 класи) бріоіндикаційний компонент може використовуватися під час вивчення тем, присвячених методам дослідження природи, екологічним взаємозв’язкам, впливу діяльності людини на довкілля та методам екологічного моніторингу. Зокрема, у курсах «Пізнаємо природу» та «Природничі науки» дослідження проективного покриття мохів на пришкільній території або в локальному природному середовищі може виступати у формі короткотривалого практичного проєкту. Така діяльність дає змогу учням на практиці опановувати

основні етапи наукового пізнання: спостереження, вимірювання, фіксацію та первинний аналіз екологічних даних.

У курсі «Біологія» (7–9 класи) можливості використання бріоіндикаційних досліджень є ще ширшими. Відповідно до вимог Державного стандарту базової середньої освіти, у 7 класі значна увага приділяється різноманітності рослинного світу, зокрема вивченню мохоподібних [33]. Дослідження «Мохи як біоіндикатори якості повітря» дозволяє реалізувати дослідницький компонент навчальної програми через вивчення локальної бріофлори та аналіз екологічних закономірностей. У 9 класі результати подібних досліджень можуть використовуватися під час вивчення тем, пов’язаних із екосистемами, екологічними факторами, антропогенним навантаженням і трансформацією природних угруповань.

На рівні профільної школи та позакласної діяльності (10–11 класи) методика може бути розширена до повноцінного довготривалого екологічного моніторингу. Такі дослідження доцільно впроваджувати у роботі екологічних гуртків, учнівських лісництв, природничих клубів та секцій Малої академії наук. Використання цифрових інструментів, елементів математичної статистики, картографування та тривалих спостережень дозволяє наблизити учнівське дослідження до реальної природничо-наукової практики.

Реалізація вимог Державного стандарту та формування компетентностей

Використання бріоіндикаційного практикуму в освітньому процесі безпосередньо сприяє реалізації вимог Державного стандарту базової середньої освіти щодо формування ключових та предметних компетентностей [33].

Насамперед дослідження сприяє розвитку компетентностей у галузі природничих наук, техніки і технологій. У процесі роботи учні формулюють дослідницьку проблему, висувають робочі гіпотези, планують дослідження, закладають облікові ділянки, проводять польові спостереження, збирають бріологічний матеріал і працюють із визначниками. Подібна діяльність формує

навички наукового мислення та розуміння логіки природничого дослідження [11, 26].

Важливе місце посідає також розвиток математичної компетентності та цифрової грамотності. Опрацювання результатів польових спостережень потребує виконання математичних розрахунків, зокрема визначення площі мохових куртин та обчислення відсоткового проективного покриття. Використання електронних таблиць, мобільних застосунків для фіксації координат дослідних ділянок, цифрових карт і засобів візуалізації результатів сприяє розвитку навичок роботи з даними, критичного цифрового мислення та вмінь представляти результати дослідження у різних формах [22].

Окреме значення має формування екологічної компетентності. Наочне порівняння мохових угруповань, сформованих у різних екологічних умовах, дозволяє учням безпосередньо спостерігати вплив антропогенного навантаження на стан екосистем. Усвідомлення зв’язку між рекреаційним пресингом, трансформацією рослинного покриву та змінами у структурі бріоугруповань сприяє розвитку екологічного мислення, відповідального ставлення до природних ресурсів і розуміння необхідності збереження біорізноманіття.

Форми організації дослідницької діяльності та педагогічний ефект

Методика проведення бріоіндикаційного дослідження характеризується високою педагогічною гнучкістю та можливістю використання різних форм організації навчальної діяльності. Під час польового етапу доцільним є застосування групової роботи, що включає закладання облікових ділянок, вимірювання площі мохових куртин, фотофіксацію та ведення польових записів. Водночас камеральне опрацювання матеріалів може поєднувати індивідуальні форми діяльності, зокрема роботу з мікроскопом, визначення видів, аналіз даних та підготовку висновків.

Практична цінність використання бріоіндикаційних досліджень полягає також у їхній вираженій STEM-орієнтованості. У межах такого дослідження біологічні спостереження поєднуються з математичними розрахунками,

цифровими технологіями та елементами аналізу даних. Це сприяє міжпредметній інтеграції та демонструє учням приклад практичного застосування знань із різних освітніх галузей.

Адаптація матеріалів дослідження, виконаного на базі НДП «Софіївка» НАН України, засвідчує, що біоіндикаційні методи можуть бути успішно реалізовані у практиці закладів загальної середньої освіти. Використання мохів як об’єктів учнівських екологічних досліджень дозволяє зробити природничу освіту більш практикоорієнтованою, дослідницькою та наближеною до сучасних підходів екологічного моніторингу.

# ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі здійснено теоретичне узагальнення та практичний аналіз проблеми використання мохів як біоіндикаторів стану довкілля та організації учнівських екологічних досліджень у сучасній природничій освіті.

1. Проаналізовано теоретичні основи використання мохів як біоіндикаторів стану довкілля та охарактеризовано їхні біологічні, фізіологічні й індикаторні властивості. Встановлено, що мохи є перспективними об’єктами біоіндикаційних досліджень завдяки особливостям морфологічної організації та фізіології: відсутності розвиненої кореневої системи, здатності поглинати воду і розчинені речовини безпосередньо з атмосфери, високій чутливості до змін екологічних чинників та здатності накопичувати різні типи забруднювачів. Узагальнення сучасних наукових джерел показало, що бріофіти широко використовуються для оцінювання атмосферного забруднення, рекреаційного пресингу, техногенно трансформованих територій та екологічного стану природних екосистем. Висока індикаторна цінність мохів визначається комплексом їхніх морфологічних, фізіолого-біохімічних і адаптаційних характеристик, що обґрунтовує доцільність застосування бріофітів у системі екологічного моніторингу.

2. Розкрито особливості організації учнівських екологічних досліджень у сучасній природничій освіті та обґрунтовано методичні аспекти проведення дослідження «Мохи як біоіндикатори якості повітря». Встановлено, що сучасна природнича освіта, орієнтована на компетентнісний, дослідницький і діяльнісний підходи, створює широкі можливості для впровадження учнівських екологічних досліджень. Дослідження з використанням мохів можуть інтегруватися у зміст навчання біології, інтегрованих природничих курсів, позакласної та гурткової роботи. Методика організації таких досліджень передбачає послідовне проходження етапів постановки проблеми, планування дослідження, польових спостережень,

збору та опрацювання матеріалу, аналізу результатів і формулювання висновків. Проведення бріоіндикаційних досліджень сприяє формуванню природничо-наукової, екологічної, математичної та цифрової компетентностей, розвитку дослідницьких умінь, критичного мислення та навичок роботи з екологічними даними.

3. Проаналізовано результати дослідження епігейних мохів на території НДП «Софіївка» НАН України та визначено можливості використання отриманих матеріалів у практиці учнівських екологічних досліджень. Встановлено, що просторовий розподіл, видовий склад та особливості проективного покриття епігейних мохів відображають відмінності екологічних умов та рівня антропогенного навантаження на досліджуваних ділянках. Біоіндикаційна оцінка територій засвідчила перспективність використання мохів для аналізу локальних змін стану довкілля. Аналіз досвіду проведення дослідження на матеріалах НДП «Софіївка» підтвердив значний освітній і методичний потенціал подібних робіт. Отримані результати можуть бути адаптовані для використання у шкільній практиці під час організації екологічного моніторингу, польових досліджень, проєктної діяльності, роботи гуртків та науково-дослідницької діяльності учнів, зокрема у системі Малої академії наук.

Отже, використання мохів як біоіндикаторів стану довкілля є не лише ефективним інструментом екологічного оцінювання територій, але й перспективним напрямом організації учнівської дослідницької діяльності у сучасній природничій освіті. Поєднання біоіндикаційних підходів із освітніми завданнями дозволяє реалізовувати компетентнісне навчання, наближати освітній процес до практики реальних природничих досліджень та формувати в здобувачів освіти дослідницьку культуру й екологічно відповідальне ставлення до довкілля.

# СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Баїк О. Л., Кияк Н. Я., Гуменюк О. М. Вивчення особливостей фотосинтетичної активності мохів на посттехногенних територіях видобутку сірки. *Актуальні проблеми медицини та фармації*. 2021. Т. 2, № 2. С. 1–20. URL: https://apmplmi.com/index.php/apmp/article/view/35/28 (дата звернення: 31.05.2026).

2. Бачурина Г. Ф., Мельничук В. М. *Флора мохів України*. Київ : Наукова думка, 2003. Вип. 4. 255 с.

3. Бойко М. Ф. *Методика збирання та гербаризації мохоподібних* : навчально-методичний посібник. Херсон : Айлант, 2007. 32 с.

4. Бойко М. Ф. *Українські назви мохоподібних*. *Чорноморський ботанічний журнал*. 2015. Т. 11, № 2. С. 178–216. doi: https://doi.org/10.14787/cbj.2015.11.2.7.

5. Бойко М. Ф. Характеристика бріофлори степової зони України. *Чорноморський ботанічний журнал*. 2009. Т. 5, № 2. С. 137–142.

6. Бурдун В. В., Безрукова О. А. Проєктна та дослідницька діяльність учнів як засіб формування природничо-наукової компетентності в умовах НУШ. *Педагогіка формування творчої особистості у вищій і загальноосвітній школах*. 2023. № 88. С. 45–51. doi: https://doi.org/10.32840/1992-5786.2023.88.8.

7. Величко Л. П. Дослідницький метод як засіб реалізації компетентнісного підходу в навчанні природничих дисциплін. *Проблеми сучасного підручника*. 2021. Вип. 26. С. 34–42. doi: https://doi.org/10.32405/2411-1309-2021-26-34-42.

8. Гапон С. В. Антропогенна трансформація бріофлори і мохового покриву Лісостепу України. *Український ботанічний журнал*. 2011. Т. 68, № 3. С. 340–348.

9. Гапон С. В. *Методичні рекомендації щодо вивчення мохоподібних у курсі біології середньої школи та педагогічного університету*. Полтава : ПДПУ, 2005. 45 с.

10. Головко М. В. Інтеграція природничо-наукової освіти як чинник розвитку дослідницьких умінь старшокласників. *Український педагогічний журнал*. 2022. № 1. С. 78–85. doi: https://doi.org/10.32405/2411-1317-2022-1-78-85.

11. Грицай Н. Б. *Екологічна освіта учнів у процесі навчання біології* : монографія. Рівне : О. Зень, 2013. 340 с.

12. Грицай Н. Б. Формування дослідницьких умінь учнів на уроках біології: теорія та методика навчання. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: Педагогіка*. 2019. № 2. С. 104–112.

13. Данилків І. С., Лобачевська О. В., Кияк Н. Я., Корнейчук Т. В. Анатомо-морфологічні та фізіологічні зміни гаметофіту моху *Pottia intermedia* в умовах культури *in vitro*. *Фізіологія рослин і генетика*. 2014. Т. 46, № 3. С. 248–255.

14. Дегтяренко К. В. Методика організації та проведення польових екологічних досліджень зі школярами. *Біологія та екологія*. 2018. Т. 4, № 1. С. 67–73. doi: https://doi.org/10.33989/2519-8025.2018.4.1.144215.

15. Кияк Н. Я. Адаптаційні стратегії фотосинтетичного апарату бріофітів на відвалах вугільних шахт Червоноградського гірничопромислового району. *Екологія та ноосферологія*. 2019. Т. 30, № 2. С. 84–90. doi: https://doi.org/10.15421/031915.

16. Кияк Н. Я. Накопичення іонів важких металів та фізіологічні реакції мохів в умовах антропогенного пресингу. *Наукові доповіді НУБіП України*. 2022. № 3 (97). С. 1–15. doi: https://doi.org/10.31548/dopovidi2022.03.007.

17. Кияк Н. Я. Особливості функціонування антиоксидантної системи епіфітного моху *Leskea polycarpa* Hedw. залежно від атмосферного забруднення. *Наукові записки Державного природознавчого музею*. 2009. Вип. 25. С. 137–142. URL: http://dpm.pip-mollusca.org/tom/25/kiyak_n_t25.pdf (дата звернення: 31.05.2026).

18. Кияк Н. Я., Кіт Н. А., Баїк О. Л. Вплив іонів важких металів на функціонування фотосинтетичного апарату та перекисне окиснення ліпідів у моху *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid. *Studia Biologica*. 2019. Т. 13, № 1. С. 101–112. doi: https://doi.org/10.30970/sbi.1301.592.

19. Кияк Н. Я., Терек О. І. Фізіологічні механізми адаптації мохів лісових екосистем до мінливих умов водного режиму. *Фізіологія рослин і генетика*. 2023. Т. 55, № 5. С. 426–440. doi: https://doi.org/10.15407/frg2023.05.426.

20. Клімат України / за ред. В. М. Ліпінського, В. А. Дячука, В. М. Бабіченко. Київ : Вид-во Раєвського, 2003. 343 с.

21. Комендантов В. О. *Організація екологічного моніторингу та польових практик у закладах загальної середньої освіти* : навчально-методичний посібник. Тернопіль : Крок, 2019. 156 с.

22. Комісар О. С., Шатковська О. В., Гайдаржи М. М. Бріофлора парку «Ліски» (м. Миколаїв) та її созологічне значення. *Чорноморський ботанічний журнал*. 2015. Т. 11, № 1. С. 75–82.

23. Котов В. І. Морфолого-анатомічні особливості листка бріофітів як чинник екологічної пластичності та індикаторної чутливості. *Український екологічний журнал*. 2017. Т. 7, № 4. С. 215–222.

24. Лобачевська О. В., Рабик І. В., Кияк Н. Я. та ін. *Роль бріофітного покриву в ревіталізації антропогенно трансформованих територій* : монографія / за ред. О. В. Лобачевської. Львів : Левада, 2022. 262 с.

25. Мамчур З. І., Антоняк Г. Л. *Антропогенна трансформація довкілля та методи її оцінювання (на прикладі бріоіндикації)* : методичні рекомендації для польових досліджень. Львів : ЛНУ ім. Івана Франка, 2012. 68 с.

26. Матяш Н. Ю., Коршевнюк Т. В. Дослідницька діяльність учнів основної школи у процесі навчання біології та природничих наук. *Біологія і хімія в рідній школі*. 2020. № 3. С. 12–18.

27. Машталер О. В. Методичні підходи до використання бріофітів у навчально-дослідницькій діяльності учнів з екології. *Біологія та екологія*.

2019. Т. 5, № 2. С. 91–97. doi: https://doi.org/10.33989/2519-8025.2019.5.2.190214.

28. Миколайко В. В., Миколайко І. І. Методичні засади проведення шкільних екологічних проєктів природничого спрямування. *Психолого-педагогічні проблеми сучасної школи* : зб. наук. праць / Уманський держ. пед. ун-т імені Павла Тичини. Умань : Візаві, 2021. Вип. 2. С. 84–91.

29. Мусієнко М. М., Серебряков В. В., Брайон О. В. *Екологія: Охорона природи : Словник-довідник*. Київ : Знання, 2002. 550 с.

30. Нагорний Б. Р. *Епігейні мохи трав'яних екосистем НДП «Софіївка» НАН України як інкатори антропопресії* : науково-дослідницька робота МАН / Черкаське територіальне відділення МАН України ; наук. кер. А. А. Куземко, Т. А. Небикова. Умань, 2018. 28 с.

31. Нова українська школа: концептуальні засади реформування середньої школи / МОН України. Київ, 2016. 40 с. URL: https://mon.gov.ua/storage/app/media/zagalna%20serednya/nova-ukrainska-shkola-stisliy-viidat.pdf (дата звернення: 12.04.2026).

32. Патрикєєва О. О., Горбенко С. Л., Лозова О. В. *Організація STEM-освіти в закладах загальної середньої освіти: методичні рекомендації*. Київ : Інститут модернізації змісту освіти, 2022. 56 с.

33. Про затвердження Державного стандарту базової середньої освіти : Постанова Кабінету Міністрів України від 30 верес. 2020 р. № 898. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/898-2020-%D0%BF (дата звернення: 02.05.2026).

34. Пустовіт Н. О. *Проєктна діяльність у процесі екологічного виховання учнів основної школи* : методичний посібник. Київ : Педагогічна думка, 2012. 120 с.

35. Рагуліна М. В. Бріоіндикація рекреаційного пресингу на лісові екосистеми Національного природного парку «Яворівський». *Наукові записки Державного природознавчого музею*. 2014. Вип. 30. С. 115–122.

36. Соханьчак Р. Р. Роль пігментного комплексу бріофітів у процесах адаптації до умов надмірного сонячного опромінення та дефіциту вологи. *Фізіологія та біохімія культурних рослин*. 2013. Т. 45, № 2. С. 154–161.

37. Соханьчак Р.Р., Лобачевська О.В., Кияк Н.Я. Фізіологічна адаптація мохів до впливу абіотичних та техногенних чинників антропогенно трансформованого середовища. *Наукові основи збереження біотичної різноманітності*. 2015. Т. 6 (13), № 1. С. 325–338. URL: https://ecoinst.org.ua/html/201513pdf/fb5.pdf (дата звернення: 31.05.2026).

38. Степанюк А. В., Жирська Г. Я. Організація самостійної дослідницької діяльності учнів з екології в умовах профільного навчання. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: Педагогіка*. 2017. № 4. С. 132–140.

39. Сухомлин М. М., Кучерява С. О. *Методика організації практичної діяльності учнів з бріоіндикації стану атмосферного повітря*. *Природнича освіта в школі*. 2016. Вип. 14. С. 52–59.

40. Шатковська О. В. Механізми поглинання та утримування вологи дернинами мохів у зв'язку з їх екологічною приуроченістю. *Вісник екології та ботаніки*. 2016. Вип. 12. С. 45–51.

41. Bates J. W. Quantifying bryophyte-environment relationships. *Methods in Bryology* / ed. by J. M. Glime. Elkhart : International Association of Bryologists, 1988. P. 231–244.

42. Glime J. M. *Bryophyte Ecology. Volume 5: Uses* [Electronic resource]. Michigan Technological University, 2017. URL: https://digitalcommons.mtu.edu/bryophyte-ecology5/ (дата звернення: 31.05.2026).

43. Markert B. A., Breure A. M., Zechmeister H. G. *Bioindicators & Biomonitors: Principles, Concepts and Applications*. Amsterdam : Elsevier Science, 2003. 718 p.

44. National Research Council. *Inquiry and the National Science Education Standards: A Guide for Teaching and Learning*. Washington, DC : The National Academies Press, 2000. 202 p. doi: https://doi.org/10.17226/9596.

45. Pedaste M., Mäeots M., Siiman L. A. et al. Phases of inquiry-based learning: Definitions and the inquiry cycle. *Educational Research Review*. 2015. Vol. 14. P. 47–61. doi: https://doi.org/10.1016/j.edurev.2015.02.003.

46. Zechmeister H. G., Hohenwallner D., Riss A. et al. Estimation of atmospheric heavy metal deposition by a moss monitoring method. *Environmental Pollution*. 2003. Vol. 121, no. 3. P. 437–445. doi: https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00234-X.