

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний педагогічний університет
імені Володимира Гнатюка

Хіміко-біологічний факультет
Кафедра загальної біології та методики навчання природничих дисциплін

Кваліфікаційна робота
на тему «ВИСВІТЛЕННЯ ПРОБЛЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ВАЖКИХ
МЕТАЛІВ У ВОДНИХ ЕКОСИСТЕМАХ У ПРОЦЕСІ ВИВЧЕННЯ
НАВЧАЛЬНОГО ПРЕДМЕТА "БІОЛОГІЯ І ЕКОЛОГІЯ" В 11 КЛАСІ
(РІВЕНЬ СТАНДАРТУ)»

Спеціальність:

014.05 Середня освіта (Біологія та здоров'я людини, хімія)

Здобувача другого (магістерського)
рівня вищої освіти

Грабовського Василя-Дениса Миколайовича

НАУКОВИЙ КЕРІВНИК:

доктор біологічних наук, професор
Грубінко Василь Васильович

РЕЦЕНЗЕНТ:

Доктор філософії (PhD), доцент
Кузик Ігор Романович

Робота захищена з оцінкою: _____

Національна шкала _____

Кількість балів: _____ Оцінка: ECTS _____

Тернопіль – 2025

АНОТАЦІЯ

Грабовський В.-Д. М. Висвітлення проблеми накопичення важких металів у водних екосистемах у процесі вивчення навчального предмета “Біологія і екологія” в 11 класі (рівень стандарту). Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» зі спеціальності 014.05 Середня освіта (Біологія та здоров’я людини). ТНПУ ім. В. Гнатюка. Тернопіль, 2025. 118 с.

У роботі розглянуто екологічні та методичні аспекти проблеми забруднення водних екосистем важкими металами й обґрунтовано можливості її вивчення у шкільному курсі «Біологія і екологія». Проаналізовано джерела надходження важких металів у водне середовище та їх вплив на водні екосистеми і людину. Розроблено та апробовано фрагменти уроків, лабораторні й практичні роботи, а також елементи проєктно-дослідницької діяльності учнів.

За результатами емпіричного дослідження встановлено, що використання дослідницьких методів і аналіз локальних водойм сприяють підвищенню навчальної мотивації, формуванню екологічної компетентності та відповідального ставлення учнів до охорони водних ресурсів.

Ключові слова: водні екосистеми, важкі метали, забруднення води, екологічна освіта, біологія і екологія.

ABSTRACT

Hrabovskyi V.-D. M. Addressing the Problem of Heavy Metal Accumulation in Aquatic Ecosystems during the Study of Biology and Ecology in Grade 11 (Standard Level). Master’s qualification thesis for the degree of Master’s in speciality 014.05 Secondary Education (Biology and Human Health). Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University. Ternopil, 2025. 118 p.

The paper examines ecological and methodological aspects of heavy metal pollution of aquatic ecosystems and substantiates the possibilities of studying this issue within the school course “Biology and Ecology”. The sources of heavy metals entering the aquatic environment and their impact on aquatic ecosystems and human health are analyzed. Lesson fragments, laboratory and practical works, as well as elements of students’ project-based research activities, were developed and tested.

The results of the empirical research indicate that the use of research-based methods and the analysis of local water bodies contribute to increased learning motivation, the formation of environmental competence, and the development of responsible attitudes toward the protection of water resources.

Key words: aquatic ecosystems, heavy metals, water pollution, environmental education, biology and ecology.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1. НАУКОВО-ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИВЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ПРОБЛЕМ У ШКІЛЬНОМУ КУРСІ "БІОЛОГІЯ І ЕКОЛОГІЯ"	8
1.1. Екологічна освіта в умовах сучасної школи	8
1.2. Місце теми «Забруднення водного середовища» у шкільному курсі "Біологія і екологія"	11
1.3. Формування екологічної свідомості учнів через навчальний предмет "Біологія і екологія"	14
РОЗДІЛ 2. ПРОБЛЕМА НАКОПИЧЕННЯ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ У ВОДНИХ ЕКОСИСТЕМАХ ЯК ЗМІСТОВА ОСНОВА ЕКОЛОГІЧНОЇ ОСВІТИ	18
2.1. Важкі метали: характеристика, класифікація, токсичність	18
2.2. Джерела та шляхи потрапляння важких металів у водойми	24
2.3. Наслідки забруднення для водних екосистем і людини	33
2.4. ГДК, методи виявлення та моніторинг	40
2.5. Використання мікроводоростей для біологічного очищення води від органічних і неорганічних забруднювачів. Фіторе mediaція.	49
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ВИВЧЕННЯ ПРОБЛЕМИ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ НА УРОКАХ БІОЛОГІЇ І ЕКОЛОГІЇ.....	54
3.1. Освітній потенціал теми «Забруднення довкілля» у шкільному курсі.....	54
3.2. Реалізація компетентнісного підходу у вивченні екологічних проблем	57
3.3. Застосування міжпредметних зв'язків (біологія, хімія, географія)	64
3.4. Організація уроків і позакласної діяльності.....	71
РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПЕДАГОГІЧНИХ ІДЕЙ У ВИВЧЕННІ ТЕМИ ПРО ВАЖКІ МЕТАЛИ	78
4.1. Приклади завдань, лабораторних і практичних робіт для 10 класу.....	78
4.2. Розробка фрагментів уроків із тематикою важких металів	84
4.3. Проектно-дослідницька діяльність учнів (на прикладі аналізу стану місцевих водойм).....	91
4.4. Результати впровадження методичних підходів у педагогічній практиці (опитування, анкетування учнів або аналіз результатів навчання)	96
ВИСНОВКИ.....	104
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	106

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасна екологічна ситуація в Україні характеризується зростанням рівня антропогенного навантаження на природні екосистеми, серед яких особливо вразливими є водні об'єкти. Забруднення водного середовища важкими металами належить до найбільш небезпечних екологічних проблем, оскільки ці елементи здатні накопичуватися в ґрунтах, донних відкладах та живих організмах, утворюючи довготривалі токсичні ефекти. У контексті повномасштабної війни питання охорони водних ресурсів набуває ще більшої гостроти: руйнування промислових об'єктів, військової техніки, складів пального і боєприпасів спричиняє додаткові джерела забруднення водойм важкими металами та іншими токсикантами.

Важливою частиною екологічної безпеки є підготовка молоді, здатної критично оцінювати стан довкілля, проводити елементарні дослідження, робити науково обґрунтовані висновки та брати участь у природоохоронних практиках. Тому формування екологічної компетентності набуває ключового значення в системі загальної середньої освіти. Навчальний предмет «Біологія і екологія» має значний потенціал для реалізації таких завдань, оскільки дозволяє інтегрувати знання про живу природу, екологічні закономірності та взаємовплив людини і довкілля.

Особливе місце у змісті шкільного курсу займає тема «Забруднення водного середовища», що поєднує природничо-наукові знання з практичною діяльністю учнів. Саме аналіз локальних екологічних проблем забезпечує найвищий рівень навчальної мотивації. Дослідження стану місцевих водойм, зокрема Тернопільського ставу, дозволяє учням сприймати екологічні проблеми не абстрактно, а як такі, що впливають на їхнє власне життя, здоров'я та майбутнє.

У рамках дослідження було реалізовано серію навчальних та позакласних заходів із залученням учнів, протягом яких було організовано проєктно-дослідницьку діяльність: забір проб води, визначення орієнтовного вмісту важких металів за допомогою експрес-тестів, аналіз результатів та обговорення отриманих даних. Доповненням став позакласний освітній захід інтерактивного характеру, спрямований на формування екологічної культури та відповідального ставлення до довкілля.

Отже, проблема забруднення водних екосистем важкими металами має як екологічне, так і соціально-освітнє значення, а її вивчення у школі створює можливості для розвитку дослідницьких умінь, критичного мислення, формування екологічної свідомості молоді та виховання відповідальної громадянської позиції.

Об'єктом дослідження є процес формування екологічної компетентності учнів у процесі вивчення теми про забруднення водного середовища.

Предметом дослідження є методичні підходи та педагогічні умови вивчення проблеми забруднення водойм важкими металами на уроках біології і екології та у позакласній діяльності.

Метою роботи є обґрунтувати та розробити методику вивчення теми забруднення водного середовища важкими металами у шкільному курсі «Біологія і екологія» та перевірити її ефективність у педагогічній практиці.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- Проаналізувати теоретичні засади екологічної освіти в умовах сучасної школи.
- Розкрити екологічні особливості забруднення водного середовища важкими металами.
- Обґрунтувати роль міжпредметних зв'язків у вивченні екологічних проблем.

- Розробити методичні матеріали (лабораторні, практичні роботи, фрагменти уроків).
- Провести педагогічний експеримент і оцінити його результати (анкетування, аналіз навчальних досягнень). Визначити умови ефективного формування екологічної свідомості учнів.

Методи дослідження. У процесі дослідження використано такі методи: аналіз наукової та навчальної літератури; педагогічне спостереження; організація і проведення проєктно-дослідницької діяльності; експрес-тестування проб води; опитування і анкетування учнів; кількісно-якісний аналіз результатів.

Наукова новизна отриманих результатів роботи полягає у поєднанні теоретичного аналізу екологічної проблематики забруднення вод важкими металами з практичним дослідженням локального водного об'єкта та розробкою педагогічних підходів до її вивчення в старшій школі. На відміну від наявних методичних матеріалів, у роботі запропоновано модель навчання, що інтегрує польові екологічні дослідження, лабораторні аналізи, проєктно-дослідницьку діяльність, а також позакласну взаємодію, орієнтовану на формування емоційно-ціннісного ставлення до довкілля. Уперше в умовах загальної середньої освіти було апробовано систему навчальних завдань та практичних робіт, побудованих на результатах аналізу реальної водойми (Тернопільського ставу), що дозволило зробити процес навчання екології особистісно значущим для учнів. Крім того, у роботі розкрито вплив сучасних воєнних умов на посилення факторів забруднення природного середовища важкими металами, що розширює зміст традиційних навчальних тем, надаючи їм актуального соціального значення та сприяючи формуванню громадянської відповідальності школярів.

Практичне значення отриманих результатів дослідження. Розроблені фрагменти уроків, система лабораторних і практичних робіт, завдання для

дослідницької діяльності, методика організації екскурсій та польових досліджень можуть бути впроваджені в освітній процес як на рівні базового, так і профільного вивчення предмета. Запропонована модель формування екологічної компетентності є гнучкою та дозволяє враховувати регіональні особливості, стан локальних екосистем, матеріально-технічні можливості школи. Отримані результати опитування і анкетування учнів можуть бути використані для вдосконалення методики викладання екологічних тем у старшій школі, зокрема для переходу від переважно теоретичного навчання до активних, практично-орієнтованих і дослідницьких форм роботи. Крім того, результати дослідження можуть бути використані територіальними громадами, молодіжними еколого-натуралістичними станціями та учнівськими науковими товариствами для організації екологічного моніторингу місцевих водойм.

Структура і обсяг магістерської роботи. Наукове дослідження складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Перший розділ присвячений теоретичним основам екологічної освіти та аналізу місця теми «Забруднення водного середовища» в навчальному курсі «Біологія і екологія». Другий розділ розкриває змістову сутність проблеми накопичення важких металів у водних екосистемах, джерела їх потрапляння, наслідки та токсикологічні аспекти. Третій розділ обґрунтовує методику вивчення цієї проблеми у шкільному середовищі, описує компетентнісний підхід, міжпредметні зв'язки та організаційні форми навчання. Четвертий розділ містить практичні матеріали: розробки уроків, лабораторні та практичні роботи, опис і результати проєктно-дослідницької діяльності учнів та аналіз ефективності впровадження методики. Робота містить 17 таблиць, 4 рисунки. Загальний обсяг роботи складає 118 сторінок, включаючи 13 сторінок списку використаних джерел.

РОЗДІЛ 1

НАУКОВО-ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИВЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ПРОБЛЕМ У ШКІЛЬНОМУ КУРСІ "БІОЛОГІЯ І ЕКОЛОГІЯ"

1.1. Екологічна освіта в умовах сучасної школи

Екологічна ситуація у світі, зокрема в Україні, з кожним роком набуває все більш загрозливого характеру. Інтенсивна урбанізація, промислове забруднення, техногенні катастрофи, кліматичні зміни, а також військові дії - все це чинить серйозний вплив на стан навколишнього природного середовища. В умовах таких викликів екологічна освіта відіграє ключову роль у формуванні свідомого ставлення громадян до природи, у розвитку екологічної культури та набутті практичних умінь для збереження довкілля. Особливої ваги набуває екологічна освіта в шкільному середовищі, адже саме в цьому віці закладаються світоглядні засади особистості.

В українському освітньому законодавстві екологічна освіта визначається як складова цілісної системи освіти, метою якої є формування екологічної свідомості, екологічної культури та екологічної етики особистості. Важливим кроком на цьому шляху стало затвердження у 2001 році Концепції екологічної освіти в Україні, яка орієнтує навчальний процес на принципи неперервності, інтегрованості, міждисциплінарності, зв'язку теорії з практикою, гуманізму та індивідуалізації навчання (Закон України «Про загальну середню освіту», Концепція екологічної освіти, 2001). Відповідно до Державного стандарту базової і повної загальної середньої освіти, що реалізується у рамках Нової української школи (НУШ), екологічна компетентність є однією з десяти ключових компетентностей випускника.

Провідною тенденцією сучасної екологічної освіти є її компетентнісна спрямованість. Це означає, що пріоритет у навчанні надається не лише засвоєнню знань, а й формуванню ціннісних орієнтацій, ставлень, умінь і навичок, які забезпечують здатність особистості діяти екологічно доцільно в

реальному житті. Такий підхід забезпечується через діяльнісну парадигму освіти, де учні залучаються до практичної, пошукової, дослідницької та проєктної роботи. Наприклад, у курсах біології й екології передбачено реалізацію таких форм роботи, як моніторингові дослідження, експерименти, аналіз екологічних ситуацій, створення екологічних мап, участь у екоакціях тощо.

Особливої уваги заслуговує інтегрований підхід до екологічної освіти, який дозволяє поєднувати природничі дисципліни (біологію, хімію, географію) з суспільствознавчими, технологічними і навіть мистецькими компонентами. Таке поєднання створює умови для формування цілісного світогляду школяра, в якому екологічна проблематика набуває міжгалузевого і навіть філософського змісту. Відомо, що інтеграція знань із різних предметів сприяє більш глибокому засвоєнню навчального матеріалу і розвитку критичного мислення. Згідно з сучасними педагогічними концепціями, інтегративно-діяльнісний підхід дозволяє створювати умови для активного залучення учнів у практичну екологічну діяльність, що є важливим для формування екологічної культури та відповідального ставлення до довкілля [67].

Іншою важливою рисою сучасної екологічної освіти є впровадження інформаційно-комунікаційних технологій. Завдяки ІКТ можливим стає вивчення екологічних процесів за допомогою інтерактивних карт, віртуальних лабораторій, відеоеккурсій та онлайн-моделювання. Наприклад, на платформі «EcoStudy» пропонуються цифрові ресурси, що допомагають учням моделювати забруднення води різними речовинами, вивчати властивості ґрунтів, аналізувати шляхи зменшення екологічного навантаження тощо [84]. Застосування таких ресурсів сприяє підвищенню мотивації учнів до навчання, розвитку критичного мислення та навичок самоосвіти.

Значного поширення набуває STEM-орієнтоване навчання, яке дозволяє інтегрувати екологічну проблематику в контекст науково-дослідницької та технічної творчості. Наприклад, дослідження властивостей води, вмісту

забруднюючих речовин, розробка моделей систем очищення - усе це дозволяє школярам не лише оволодіти знаннями з біології чи хімії, але й побачити практичне значення цих знань для вирішення конкретних екологічних проблем. Особливо актуальним це є у контексті теми накопичення важких металів у водному середовищі - учні можуть здійснювати прості хімічні аналізи, вести облік виявлених забруднень, моделювати процеси біоаккумуляції.

Реалії сучасної української школи висвітлюють низку проблем у реалізації екологічної освіти. Спостерігається брак підготовки вчителів до викладання інтегрованих екологічних курсів, нестача сучасних методичних матеріалів та ресурсів, перевантаження програм змістом, а також недостатня практична спрямованість навчання. Особливої гостроти ці проблеми набули в умовах повномасштабної війни, яка спричинила серйозні зміни у функціонуванні закладів освіти. За даними МОН, понад 3500 навчальних закладів в Україні було пошкоджено або зруйновано внаслідок бойових дій [55]. Внаслідок цього значна частина шкіл перейшла на дистанційний або змішаний формат навчання, що ускладнює реалізацію практичних занять з екології, зокрема дослідницьких робіт у природному середовищі.

Попри зазначені труднощі, міжнародна спільнота активно підтримує українську екологічну освіту. Наприклад, у 2023 році ЮНЕСКО спільно з МОН України презентувало освітній ресурсний набір «Teaching and Learning with Living Heritage in Ukraine», який включає методичні рекомендації щодо викладання екологічних тем з урахуванням українського культурного контексту [110]. Ресурсний набір адаптований до умов війни і містить практичні інструменти для реалізації проєктів, пов'язаних із вивченням природного середовища, збереженням екосистем та формуванням екоетики учнів.

Важливо наголосити, що екологічна освіта не обмежується лише передачею знань - вона є інструментом виховання громадянина, відповідального за стан довкілля та майбутнє країни. У цьому контексті вивчення теми накопичення важких металів у водних екосистемах є особливо

цінним з педагогічної точки зору. Це дозволяє на реальних прикладах пояснити принципи екологічної безпеки, біоаккумуляції, впливу токсикантів на живі організми, а також стимулює учнів до активної участі у збереженні довкілля. Такий зміст можна ефективно інтегрувати в програму предмета «Біологія і екологія» у 11 класі (рівень стандарту), де розділи з охорони природи, глобальних екологічних проблем, впливу антропогенних чинників на біосферу, створюють відповідну дидактичну базу.

Отже, екологічна освіта в умовах сучасної школи є необхідною складовою загальної підготовки учнів, яка поєднує науковий підхід, етичні цінності, практичні навички та громадянську відповідальність. Незважаючи на виклики, спричинені соціально-політичними подіями, українська школа зберігає потенціал до розвитку екологічної грамотності через інноваційні педагогічні стратегії, підтримку міжнародних партнерів та зростаючу мотивацію самих учнів до активної участі у вирішенні екологічних проблем.

1.2. Місце теми «Забруднення водного середовища» у шкільному курсі "Біологія і екологія"

У сучасному контексті екологічної освіти, проблема забруднення водного середовища посідає важливе місце в шкільному курсі «Біологія і екологія» для 11 класу (рівень стандарту). Згідно з чинною навчальною програмою, затвердженою Міністерством освіти і науки України у 2022 році, вивчення цієї теми здійснюється у межах Тем 7 і 8, а саме: «Екологія» (орієнтовно 15 годин) та «Сталий розвиток та раціональне природокористування» (орієнтовно 13 годин) [3].

Попри відсутність прямої теми «Забруднення водного середовища», її зміст є інтегрованим і реалізується через низку понять, компетентностей і завдань. Тема отримує опосередковане, але значуще представлення в таких розділах програми, де учні мають можливість досліджувати:

- вплив антропогенних чинників на гідросферу;
- причини порушення якості природних вод;
- дефіцит водних ресурсів;
- принципи оцінки екологічного стану водойм;
- охорону водойм;
- критерії забруднення довкілля;
- наслідки забруднення для живих організмів, екосистем і людини.

Особливої уваги заслуговує зміст Теми 8. «Сталий розвиток та раціональне природокористування», яка передбачає ґрунтовне вивчення антропогенного впливу на гідросферу, а також формування практичних умінь аналізувати екологічний стан регіону. Учні ознайомлюються з поняттями "якість довкілля", "забруднення", "критерії оцінки стану водних об'єктів", що безпосередньо включають аспекти, пов'язані з хімічним, біологічним і фізичним забрудненням водойм, зокрема важкими металами, пестицидами, мікропластиком тощо.

У компоненті "Знаннєвий" програма пропонує вивчення видів забруднення та джерел їх виникнення. Приклади, які наводяться в пояснювальній частині, включають водні об'єкти, що зазнають негативного впливу промислових, сільськогосподарських, побутових і урбаністичних джерел. У цьому контексті акцент робиться не лише на фактах забруднення, а й на механізмах його виникнення, типології токсикантів, серед яких - важкі метали (ртуть, кадмій, свинець тощо), що є складовою частиною стійких органічних забрудників [65].

Ціннісний компонент програми спрямований на формування відповідального ставлення до природного середовища, розуміння ролі екологічних знань у прийнятті практичних рішень. Учні висловлюють власне ставлення до ефективності екологічної політики, висвітлюють шляхи

раціонального природокористування, оцінюють ступінь забруднення у своєму регіоні, що дає змогу поєднувати навчання із реальним життєвим досвідом.

Крім цього, у практичному компоненті передбачено проведення практичної роботи «Оцінка екологічного стану свого регіону», в межах якої може бути організоване учнівське дослідження якості води місцевих водойм - річок, ставків, каналів. Це створює сприятливі умови для інтеграції проєктної діяльності, в межах якої учні можуть досліджувати концентрацію забруднювальних речовин (наприклад, нітратів або важких металів), застосовувати методи біоіндикації або працювати з відкритими джерелами екологічного моніторингу (наприклад, сайти Держводагентства України, Держекоінспекції тощо).

Значну роль у вивченні теми відіграє Тема 7. «Екологія», де формується фундаментальне розуміння структури екосистем, біогеохімічних циклів, впливу екологічних чинників, зокрема токсикантів, на організми та популяції. Саме тут учні вивчають властивості екосистем, механізми сукцесій, енергетичні потоки, структуру біоценозів - знання, необхідні для глибшого розуміння наслідків забруднення вод.

Так, наприклад, тема біогеохімічних циклів охоплює процеси циркуляції речовин у природі. Вивчення порушень цих циклів через викиди важких металів або інших забруднювачів дає можливість обговорити проблеми втрати саморегуляції екосистем і необхідність підтримання екологічного балансу. У цьому контексті можуть бути використані схеми: (1) кругообігу речовин у природі, (2) потрапляння забруднювачів у трофічні ланцюги, (3) приклади біоаккумуляції у водних організмах.

Додатково програма стимулює міжпредметні зв'язки з хімією, географією, громадянською освітою. Наприклад, хімічна складова забруднення вод (виявлення сполук важких металів), географічне розташування зон

екологічного ризику, правові аспекти охорони природи - усе це може бути інтегроване у вивчення теми.

Загалом, хоча тема «Забруднення водного середовища» не виділена в окремий тематичний блок у програмі, її зміст реалізується інтегровано, із врахуванням міждисциплінарності, компетентнісного підходу та практичного спрямування. Це створює умови для того, щоб учні не лише засвоїли теоретичні знання, але й сформували особисту позицію щодо охорони водних ресурсів та сталого розвитку суспільства.

1.3. Формування екологічної свідомості учнів через навчальний предмет "Біологія і екологія"

Екологічна свідомість є інтегральною характеристикою особистості, що передбачає не лише наявність знань про довкілля, але й сформовану систему цінностей, переконань та поведінкових моделей, спрямованих на збереження природних ресурсів і сталий розвиток. В умовах сучасних глобальних викликів, серед яких особливо гостро стоїть проблема деградації екосистем, забруднення довкілля, зміни клімату, формування екологічної свідомості молоді набуває особливого значення. З огляду на це, шкільна освіта, зокрема курс «Біологія і екологія», відіграє ключову роль у забезпеченні цілеспрямованого екологічного виховання, підготовки свідомого громадянина, здатного до прийняття відповідальних рішень у природоохоронній сфері. Як підкреслював В.І. Вернадський, екологічне мислення - це «наукова думка як планетне явище», що має ґрунтуватися на усвідомленні глобальних наслідків локальних дій.

Навчальний курс «Біологія і екологія» для 10-11 класів реалізується відповідно до концепції компетентнісного підходу, затвердженої Міністерством освіти і науки України. Програма передбачає системне вивчення не лише біологічних процесів, а й екологічних закономірностей, принципів взаємодії живих організмів з довкіллям, основ природоохоронного мислення та моделей

сталого розвитку. У межах цих курсів учні опановують широкий спектр понять, зокрема: екологічні фактори, толерантність, біогеохімічні цикли, стійкість екосистем, ноосфера, сталий розвиток, забруднення довкілля, екологічна етика тощо. Ці знання є основою для формування цілісного екологічного світогляду [3].

У 10 класі, відповідно до програми рівня стандарту, значну частину навчального часу присвячено вивченню загальної біології, зокрема молекулярно-клітинного рівня організації життя, обміну речовин, спадковості, еволюції та біорізноманіття. Хоча акцент у 10 класі робиться переважно на фундаментальні біологічні основи, навіть у цьому контексті формуються первинні уявлення про взаємозв'язок біологічних і екологічних чинників. Наприклад, під час вивчення тем про біорізноманіття, організми різних царств, їхню екологічну роль, розглядаються приклади порушення екологічного балансу, спричинені антропогенним втручанням.

У 11 класі вивчення екології винесене в окремі тематичні блоки - «Екологія» (орієнтовно 15 год.) та «Сталий розвиток і раціональне природокористування» (орієнтовно 13 год.), що створює основу для цілеспрямованого формування екологічної свідомості учнів. В межах цих тем учні не лише ознайомлюються з науковими поняттями, а й набувають умінь встановлювати причинно-наслідкові зв'язки між природними процесами та людською діяльністю, критично осмислювати екологічні проблеми, аналізувати локальні та глобальні загрози, розробляти стратегії поведінки в умовах екологічної небезпеки.

Формування екологічної свідомості через навчальний предмет «Біологія і екологія» відбувається у кількох взаємопов'язаних напрямках:

1. **Когнітивний рівень** - передбачає оволодіння екологічною термінологією, законами екології, знаннями про екосистеми, чинники середовища, особливості популяційної динаміки, механізми

біогеохімічних циклів, вплив антропогенної діяльності на біосферу. Учень дізнається, як функціонує природа як цілісна система.

2. **Ціннісний рівень** - спрямований на формування етичного ставлення до природи, розуміння ролі людини як частини біосфери, відповідальності за прийняті рішення. У навчальній програмі передбачене формування здатності висловлювати власну позицію щодо актуальних екологічних проблем, таких як забруднення водойм, деградація ґрунтів, зміна клімату, вимирання видів.

3. **Діяльнісний рівень** - реалізується через навчальні проекти, практичні роботи, моделювання екологічних ситуацій, дослідницьку діяльність. Учні не тільки вивчають теоретичний матеріал, а й застосовують знання на практиці - складають екологічні карти, порівнюють рівень забруднення різних територій, моделюють сценарії сталого природокористування.

Формування екологічної свідомості відбувається також шляхом усвідомлення реального впливу екологічних факторів на життя людини. Особливу увагу в курсі приділено вивченню наслідків забруднення довкілля, зокрема водного середовища. Розгляд причин і джерел забруднення вод, впливу важких металів, пестицидів та мікропластику на водні організми і людину, дозволяє учням зрозуміти взаємозв'язки між побутовими звичками, господарською діяльністю та здоров'ям населення. Ці знання формують екологічну відповідальність та практичну готовність діяти - зменшувати кількість відходів, раціонально використовувати ресурси, брати участь у природоохоронних ініціативах.

Окремо слід підкреслити міжпредметний характер екологічної освіти. Знання, здобуті під час вивчення курсу «Біологія і екологія», інтегруються з темами з географії (наприклад, «Глобальні екологічні проблеми», «Гідросфера»), хімії (вивчення складу речовин, токсичності, хімічного аналізу

води), фізики (поняття енергії, теплових процесів, розчинності тощо). Така міждисциплінарність сприяє глибшому осмисленню екологічних процесів, комплексному підходу до оцінки проблем довкілля.

Не менш важливою є практична орієнтація змісту курсу. У 11 класі передбачена практична робота з оцінки екологічного стану свого регіону. Така діяльність дозволяє учням безпосередньо стикнутися з реальною проблематикою місцевого довкілля, розвивати навички спостереження, аналізу, використання екологічних індикаторів. Це є прикладом набуття екологічної компетентності в дії, що відповідає концепції Нової української школи.

Ключову роль у формуванні екологічної свідомості відіграє вчитель. Його завдання - не лише донести знання, а й створити умови для самостійного мислення, критичної оцінки інформації, формування особистісної позиції. Ефективними методами є дебати, аналіз екологічних ситуацій, розв'язання кейсів, створення мініпроектів, участь у соціальних ініціативах. Учитель має бути провідником між наукою і суспільством, носієм екологічної культури.

Отже, шкільний курс «Біологія і екологія» є не лише академічною дисципліною, а потужним інструментом формування екологічної свідомості в учнів старшої школи. Його змістове наповнення, методологічні засади, компетентнісний підхід та міждисциплінарність створюють умови для виховання особистості, здатної відповідально діяти в умовах сучасних екологічних викликів.

РОЗДІЛ 2

ПРОБЛЕМА НАКОПИЧЕННЯ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ У ВОДНИХ ЕКОСИСТЕМАХ ЯК ЗМІСТОВА ОСНОВА ЕКОЛОГІЧНОЇ ОСВІТИ

2.1. Важкі метали: характеристика, класифікація, токсичність

Важкі метали - це специфічна група хімічних елементів, які характеризуються значно вищою атомною масою і густиною порівняно з більшістю інших елементів періодичної таблиці. Зазвичай за критерієм вважають метали з густиною понад 5 грамів на кубічний сантиметр (г/см³). Наприклад, густина заліза - приблизно 7,9 г/см³, свинцю - 11,3 г/см³, а ртуті - 13,6 г/см³. Саме ця фізична характеристика - висока густина - і визначає термін "важкі" метали, що відрізняє їх від "легких" металів, таких як алюміній або магній [38].

Важкі метали є природними компонентами земної кори і поширені у вигляді різних мінералів і руд. Вони також відіграють важливу роль у біології, деякі з них є необхідними для нормального функціонування живих організмів у малих концентраціях. З іншого боку, вони відомі своєю токсичністю при підвищеному вмісті, що викликає серйозні екологічні проблеми.

До групи важких металів входить низка елементів, які найчастіше досліджуються через їхній вплив на довкілля та здоров'я людини [49]:

- **Свинець (Pb)** - один з найвідоміших токсичних металів, широко застосовується у промисловості, особливо в акумуляторах, боїться кислого середовища. Свинець накопичується в організмі і викликає порушення нервової системи.
- **Кадмій (Cd)** - використовується в металургії, електроніці, виробництві акумуляторів. Має високу токсичність, особливо впливає на нирки та легені.

- **Мідь (Cu)** - есенціальний метал, необхідний для багатьох ферментів, але у великих дозах шкідливий.
- **Ртуть (Hg)** - відома своєю леткістю і здатністю накопичуватися у живих організмах у формі метилртуті, що робить її особливо небезпечною.
- **Хром (Cr)** - широко застосовується у виробництві сталей і фарб, має токсичні форми, такі як шестивалентний хром (Cr(VI)).
- **Цинк (Zn)** - есенціальний мікроелемент, але у великих концентраціях може викликати отруєння.
- **Нікель (Ni)** - застосовується в металургії та виробництві сплавів, алерген і токсин.
- **Арсен (As)** - напівметал, який часто вважають важким металом через схожу токсичність, відомий своєю канцерогенністю.

Важкі метали класифікують на дві основні категорії: ті, що необхідні для біологічних процесів (есенціальні), і токсичні. До першої групи входять такі метали, як цинк, мідь і залізо, які в невеликих кількостях виконують важливі функції в обміні речовин організмів. Проте при надмірній концентрації ці метали можуть бути шкідливими, викликаючи порушення клітинної діяльності. Друга група включає метали, як свинець, ртуть і кадмій, які є небезпечними навіть у дуже малих дозах для здоров'я людей і навколишнього середовища.

Важкі метали характеризуються низкою особливих фізико-хімічних властивостей, які визначають їхню поведінку в природних середовищах, зокрема у водних екосистемах. По-перше, вони мають високу густину, що перевищує 5 г/см^3 , а також велику атомну масу - це є основою для їхньої класифікації як важких металів. По-друге, ці елементи відзначаються значною хімічною стійкістю, завдяки чому вони не розкладаються в природних умовах і можуть довготривало зберігатися у воді, ґрунті чи донних відкладах. Ще однією важливою властивістю є їх здатність утворювати різноманітні хімічні сполуки, серед яких іони (наприклад, Pb^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+}), оксиди, сульфіді, а

також комплексні органічні сполуки. Це визначає їхню розчинність, можливості міграції у довкіллі та біодоступність для живих організмів.

Таблиця 2.1

Класифікація важких металів

Група	Опис	Приклади металів	Роль в організмі	Токсичність
Есенціальні (біологічно необхідні) метали	Метали, які в малих концентраціях необхідні для нормального функціонування організмів. Вони беруть участь у багатьох метаболічних процесах.	Цинк (Zn), Мідь (Cu), Залізо (Fe), Кобальт (Co), Марганець (Mn)	Входять до складу ферментів, каталізують хімічні реакції, регулюють обмін речовин. Забезпечують нормальний ріст, розвиток, підтримку життєвих функцій.	Корисні в малих дозах, але при перевищенні концентрацій можуть викликати порушення клітинних функцій та ушкодження тканин.
Токсичні метали	Метали, які не виконують життєво необхідних функцій і мають високу токсичність навіть у мінімальних концентраціях.	Свинець (Pb), Ртуть (Hg), Кадмій (Cd), Арсен (As)	Не беруть участі у життєвих процесах організмів.	Викликають серйозні порушення роботи нервової системи, печінки, нирок; спричиняють мутації та онкологічні захворювання.

Розчинність важких металів у воді значною мірою залежить від умов середовища, таких як рівень кислотності (pH), концентрація інших іонів, температура та вміст органічних речовин. Зокрема, у кислому середовищі

метали частіше переходять у розчинні форми, що посилює їхню токсичність. Окрім того, важкі метали мають здатність до біоаккумуляції, тобто накопичення в живих організмах з подальшим переходом по харчових ланцюгах. Це призводить до посилення токсичного впливу на кожному наступному рівні живлення. Прикладом є ртуть, яка може трансформуватися в органічну форму - метилртуть, що легко накопичується в тканинах риб і становить значну загрозу для здоров'я людини при споживанні такої риби.

Токсичність важких металів є однією з найзначніших їхніх властивостей, що визначає їхній негативний вплив на живі організми. Вона пов'язана з їхньою здатністю взаємодіяти з білками, змінюючи їхню структуру і порушуючи функції, а також блокувати активні центри ферментів. Наприклад, кадмій накопичується переважно в печінці та нирках, викликаючи пошкодження клітин і провокуючи хронічні захворювання. Свинець впливає на центральну нервову систему, знижуючи когнітивні здібності, а ртуть має токсичний ефект на нервову систему та нирки. Окрім того, токсичність цих металів посилюється завдяки їхній здатності до біоаккумуляції - накопиченню в організмах і передачі по харчових ланцюгах, що підвищує ризики для всієї екосистеми.

Особливу увагу слід приділяти синергетичному ефекту важких металів, коли одночасна наявність кількох елементів у воді збільшує їхній токсичний вплив. Це ускладнює процес очищення забруднених вод, вимагаючи застосування комплексних технологій для зниження концентрації металів до безпечного рівня.

Отже, класифікація, фізико-хімічні властивості та токсичність важких металів визначають їхню поведінку у природних системах та вплив на здоров'я людей і навколишнє середовище. Розуміння цих характеристик є ключовим для розробки ефективних методів очищення забруднених водних ресурсів. Знання фізико-хімічних особливостей і токсичних властивостей металів дозволяє не лише оцінити їхній вплив, але й вибрати оптимальні підходи для зменшення їхньої концентрації у водоймах.

Таблиця 2.2

Фізико-хімічні властивості та токсичність важких металів

Метал	Атомна маса, г/моль	Густина, г/см ³	Форма існування у воді	Основні джерела забруднення	Токсичний вплив
Свинець (Pb)	207,2	11,34	Іони Pb ²⁺ , комплексні сполуки	Гірничовидобування, промисловість, батареї, фарби	Порушення нервової системи, зниження когнітивних функцій, ураження нирок
Кадмій (Cd)	112,41	8,65	Іони Cd ²⁺ , комплексні сполуки	Металургія, виготовлення акумуляторів, фосфатні добрива	Накопичення у нирках, канцерогенність, порушення функцій дихальної системи
Ртуть (Hg)	200,59	13,53	Елементарна ртуть (Hg), метилртуть (CH ₃ Hg ⁺)	Видобуток золота, виробництво хімічних речовин, електроніка	Ураження нервової системи, порушення зору і слуху, висока токсичність для плода
Цинк (Zn)	65,38	7,14	Іони Zn ²⁺	Металургія, виробництво гальванічних елементів, стічні води	Порушення обміну речовин, токсичність для рослин, ураження печінки у високих дозах
Мідь (Cu)	63,55	8,96	Іони Cu ⁺	Видобуток руд, виробництво, електротехніка, сільське господарство,	Порушення функцій печінки, токсичність для водних організмів
Хром (Cr)	51,996	7,19	Іони Cr ³⁺ , Cr ⁶⁺	Виробництво сталі, текстильна та шкіряна промисловість	Канцерогенність, ураження шкіри та слизових оболонок, мутагенність

Токсичність важких металів посилюється їхньою стійкістю до природного розпаду і здатністю довготривало накопичуватися у водному середовищі, осадових відкладах та живих організмах. У контексті гірничовидобувної діяльності важкі метали часто потрапляють у водойми разом із промисловими стоками, які містять високі концентрації свинцю, цинку, міді, ртуті та інших елементів. Вони взаємодіють із природними компонентами водних екосистем, змінюючи хімічні властивості води, знижуючи рівень кисню і спричиняючи втрату біорізноманіття. Накопичення металів у донних відкладах може викликати вторинне забруднення, особливо у випадках порушення екологічної рівноваги, наприклад, під час паводків чи змін гідрологічного режиму.

Важливо вивчати шляхи міграції важких металів у воді, адже вони можуть переміщуватися як у розчиненій формі, так і у вигляді колоїдних частинок, зв'язаних із суспензіями чи органічними сполуками. Це ускладнює прогнозування їхньої поведінки та вибір методів очищення. Наприклад, ртуть може трансформуватися у метилртуть - органічну форму, яка легко накопичується в тканинах риб і становить серйозну загрозу для здоров'я людини.

З огляду на це, пріоритетним завданням є розробка комплексних заходів боротьби із забрудненням. Це включає регулярний моніторинг концентрації важких металів, оцінку стану водних об'єктів, визначення вмісту металів у донних відкладах і біологічних організмах. Також важливо оцінювати екотоксикологічний вплив металів на різні складові екосистеми, що допомагає виявити найбільш уразливі ланки і цілеспрямовано впроваджувати заходи очищення.

При цьому слід враховувати географічні та кліматичні умови, які впливають на поведінку важких металів у водних системах. У теплих регіонах

швидкість хімічних реакцій і міграції металів є вищою, що створює додаткові труднощі для очищення. Водночас у холодних зонах метали можуть довше залишатися у вигляді нерозчинних сполук в осадах, що змінює пріоритетність застосовуваних методів.

Отже, дослідження фізико-хімічних характеристик і токсичності важких металів формує основу для створення ефективних стратегій очищення водних об'єктів. Знання їхньої поведінки у природі і впливу на екосистеми дозволяє розробляти сучасні технології, адаптовані до конкретних умов, які забезпечують не лише очищення, а й запобігають повторному забрудненню. Наступним етапом є аналіз джерел потрапляння важких металів у воду і їх внеску в загальне антропогенне навантаження на водні екосистеми.

2.2. Джерела та шляхи потрапляння важких металів у водойми

Проблема забруднення водних екосистем важкими металами є однією з ключових у сучасній екології, оскільки ці елементи відзначаються високою токсичністю, хімічною стійкістю та здатністю до накопичення в природних середовищах. Важкі метали не розкладаються біологічними чи природними процесами, що зумовлює їх довготривалу присутність у воді та донних відкладах, а також створює ризики їх повторної міграції у водне середовище. Джерела надходження цих елементів у водойми поділяють на природні та антропогенні, при цьому останні відіграють визначальну роль у формуванні сучасного рівня забруднення.

Природні джерела важких металів у водному середовищі пов'язані з геохімічними процесами, які відбуваються у літосфері. До них належать вивітрювання мінералів, ерозія ґрунтів, винос металів із глибинних геологічних пластів, а також вулканічна діяльність, яка супроводжується викидами ртуті, арсену та інших елементів у навколишнє середовище. Крім того, у ряді регіонів світу природний вміст металів у підземних та поверхневих водах може бути

підвищеним унаслідок геохімічної специфіки території, наприклад, у районах із високим вмістом рудних формацій. Проте у глобальному масштабі природні джерела відіграють другорядну роль, поступаючись за масштабами та інтенсивністю антропогенним чинникам.

Гірничо-видобувна промисловість, яка спеціалізується на видобутку корисних копалин, належить до ключових факторів формування техногенного навантаження на водні екосистеми. У процесі видобутку руд утворюються шахтні та дренажні води, що характеризуються високим вмістом важких металів - свинцю, кадмію, міді, цинку та інших елементів. Ці води формуються внаслідок контакту підземних вод із рудними пластами, технологічними відвалами та відпрацьованими шахтами. Без належного очищення вони потрапляють у природні водойми, змінюючи їхній хімічний склад та створюючи загрозу для гідробіонтів і людини. Токсичність таких стоків посилюється тим, що в умовах окиснення утворюється кислий шахтний дренаж, який виступає каталізатором мобілізації металів із гірських порід у водне середовище. Це призводить до накопичення небезпечних концентрацій у річках, озерах і водосховищах, розташованих поблизу гірничих підприємств.

Не менш вагомим джерелом надходження важких металів у водойми є металургійна промисловість, яка охоплює процеси виплавлення, очищення та легування металів. У ході цих технологічних циклів утворюються великі обсяги відходів - шлаки, пил, шламові відклади та стічні води, що містять сполуки свинцю, кадмію, ртуті, хрому, нікелю та цинку. Потрапляючи у водойми, вони не лише безпосередньо забруднюють водне середовище, а й сприяють довготривалому накопиченню металів у донних відкладах. Ці відклади є потенційним джерелом вторинного забруднення: при зміні фізико-хімічних умов (наприклад, зниженні рН чи зміні окисно-відновного потенціалу) важкі метали знову переходять у розчин і продовжують циркулювати в екосистемі. Такий процес створює передумови для біоаккумуляції у водних організмах та їхнього подальшого потрапляння у харчові ланцюги.

Хімічна промисловість виступає ще одним вагомим джерелом забруднення вод важкими металами. Виробництво пестицидів, фармацевтичних препаратів, барвників, пластмас та інших продуктів супроводжується викидами стічних вод, що містять ртуть, кадмій, хром, мідь та інші елементи. Особливо небезпечною є присутність органічних форм металів, зокрема метилртуті, яка характеризується високою токсичністю та здатністю швидко включатися у біохімічні процеси живих організмів. Метилртуть накопичується у тканинах риб і водних безхребетних, створюючи серйозні ризики для здоров'я людини, оскільки внаслідок харчового ланцюга ці сполуки потрапляють у людський організм і викликають тяжкі порушення нервової системи.

Сільське господарство, хоча й не відноситься до галузей, що безпосередньо використовують важкі метали у виробничих процесах, опосередковано сприяє їхньому надходженню у водні об'єкти. Використання мінеральних добрив, особливо фосфатних, супроводжується внесенням у ґрунт домішок кадмію, свинцю та цинку, які поступово вимиваються в ґрунті та поверхневі води. Додатковим джерелом забруднення є пестициди та засоби захисту рослин, у складі яких трапляються мідь, ртуть та інші токсичні сполуки. Зрошувальні системи, характерні для інтенсивного землеробства, сприяють перенесенню металів у дренажні води, що зрештою потрапляють у річкові басейни та водосховища.

Вагомий внесок у забруднення здійснюють транспорт і енергетика. Тривале використання свинцевих добавок у паливі призвело до накопичення цього металу у міських екосистемах, а викиди автотранспорту і дотепер залишаються джерелом свинцю, цинку та міді. Енергетична галузь, особливо теплоелектростанції, що працюють на вугіллі, продукують значні обсяги золи й шлаків, які містять ртуть, кадмій та арсен. Ці відходи, зберігаючись у золовідвалах, поступово інфільтруються у ґрунті води або змиваються опадами у річкові системи, що призводить до довготривалого і розсіяного забруднення.

Таблиця 2.3

Джерела забруднення вод важкими металами та їхні характеристики

Джерело	Основні забруднювачі (важкі метали)	Механізм потрапляння у воду	Приклади	Екологічні наслідки
Гірничо-видобувна промисловість	Свинець (Pb), кадмій (Cd), мідь (Cu), цинк (Zn)	Шахтні води, вилуговування металевих руд, дренаж із відвалів	Видобуток руд, кар'єри	Зміна хімічного складу вод, накопичення металів у донних відкладах
Металургія	Свинець (Pb), цинк (Zn), мідь (Cu), хром (Cr)	Викиди стічних вод і забруднення поверхневих вод, осідання металів з повітря	Металургічні комбінати, переробка металобрухту	Токсичний вплив на водні організми та накопичення металів у харчових ланцюгах
Хімічна промисловість	Ртуть (Hg), хром (Cr), кадмій (Cd)	Викиди технологічних вод, просочення пестицидів і фармацевтичних препаратів через ґрунт	Виробництво хімікатів, пестицидів та фармацевтиків	Висока токсичність для водних організмів, накопичення у харчових ланцюгах
Сільське господарство	Кадмій (Cd), свинець (Pb)	Змив із полів, насичення ґрунтових вод	Використання добрив та пестицидів, покриттів зі свинцем	Довготривале забруднення ґрунтових і підземних вод
Транспорт	Свинець (Pb), ртуть (Hg), мідь (Cu)	Осадження викидів із паливом та змив з дорожніх поверхонь	Автомобілі, транспортні шляхи	Вторинне забруднення вод, токсичний вплив на міську флору та фауну
Побутові джерела	Свинець (Pb), ртуть (Hg), кадмій (Cd)	Просочення відходів, неправильна утилізація батарейок, ламп, електроніки	Домашні відходи, люмінесцентні лампи	Забруднення підземних вод, біоаккумуляція металів у екосистемах, токсичний вплив на міські водойми

Окрему категорію становлять побутові джерела, пов'язані з неефективною системою поводження з відходами. Неправильна утилізація електронної техніки, акумуляторів, батарейок, люмінесцентних ламп та іншої продукції, що містить метали, зумовлює поступове вивільнення свинцю, кадмію, ртуті та нікелю у навколишнє середовище. У разі зберігання таких відходів на полігонах чи несанкціонованих сміттєзвалищах токсичні сполуки під дією атмосферних опадів вимиваються і разом із поверхневим стоком або шляхом інфільтрації проникають у водні об'єкти.

Отже, джерела надходження важких металів у водні екосистеми мають комплексний характер і охоплюють широкий спектр діяльності людини - від гірничо-металургійних та хімічних виробництв до аграрного сектору, транспорту, енергетики та побутової сфери. Масштаби та інтенсивність забруднення залежать від рівня індустріалізації, геохімічних особливостей території та ефективності функціонування очисних систем. Усвідомлення багатфакторності цього процесу є необхідною передумовою для розробки інтегрованих стратегій екологічного управління, спрямованих на мінімізацію викидів і впровадження сучасних технологій очищення стічних вод, що є одним із ключових завдань сучасної екологічної науки та практики охорони довкілля.

Слід також враховувати вплив воєнного конфлікту на поширення важких металів у гідросфері. Збройні дії на території України призвели до руйнування великої кількості інфраструктурних об'єктів - дамб, промислових підприємств, комунальних мереж, що стало каталізатором масштабного вторинного забруднення. Найрезонанснішим прикладом стало руйнування Каховської ГЕС у червні 2023 року: внаслідок цього з дна колишнього водосховища були вивільнені приблизно 83 000 тонн важких металів - свинцю, кадмію, нікелю - які раніше накопичувалися в осаді [52].

Лише близько 1 % цих речовин потрапили у воду безпосередньо під час руйнації; решта продовжує поступово надходити в дніпровську систему у результаті сезонних дощів та ерозійних процесів [66].

Крім того, внаслідок бойових дій і бомбардувань у промислових регіонах Донецької та Луганської областей відбулося ураження заводів, складів із хімікатами та водоочисних споруд. Це призвело до витоку важких металів у водоносні горизонти та наземні водойми, особливо у зонах активних бойових дій. Загалом, екологічні збитки від війни в Україні оцінюють у понад 56,4 мільярда доларів США, а значна частина з них обумовлена хімічним забрудненням води, повітря та ґрунтів - включно із важкими металами [97].

Темпи деградації довкілля настільки високі, що міжнародні й українські експертні організації вже розглядають окремі випадки, як-от знищення Каховської ГЕС, як екологічні злочини, які мають потенціал тривалих і незворотних наслідків для екосистем і здоров'я людей [106].

Розуміння джерел та шляхів надходження важких металів у водні об'єкти є ключовим для визначення масштабів екологічної проблеми та формування дієвих заходів щодо її подолання. Ефективне управління водними ресурсами в умовах антропогенного навантаження неможливе без постійного моніторингу й контролю процесів міграції та акумуляції токсичних компонентів. Моніторинг має бути комплексним і включати не лише виявлення джерел забруднення, а й простеження шляхів переміщення металів у водному середовищі, враховуючи як поверхневі потоки, так і підземні води, а також процеси, що відбуваються в донних відкладах.

Шляхи потрапляння важких металів у воду можуть бути як прямими, так і опосередкованими. До прямих належать скидання промислових і побутових стічних вод, проникнення шахтних та дощових вод у природні водойми, випадання на поверхню води атмосферних аерозолів, що містять важкі метали. Опосередковане забруднення пов'язане з більш тривалими процесами міграції: через ґрунти, ґрунтові води або мобілізацію металів із донних відкладів. У разі змін фізико-хімічних умов - наприклад, під дією коливань рівня рН або окислювально-відновного потенціалу - метали можуть вторинно вивільнятися з

донних відкладів і знову потрапляти у водне середовище, підвищуючи його токсичність навіть через десятиліття після первинного забруднення.

Оцінка ступеня небезпеки джерел забруднення потребує врахування не лише якісних, а й кількісних показників. Так, гірничо-видобувні підприємства здатні генерувати сотні тонн шахтних вод щоденно, причому концентрація важких металів у них нерідко у десятки разів перевищує гранично допустимі норми. Для хімічної промисловості характерним є не стільки великий обсяг викидів, скільки надзвичайна токсичність окремих сполук, що швидко мігрують у трофічних ланцюгах. У сільському господарстві вміст металів може здаватися незначним, проте їхній акумулятивний вплив проявляється через багаторічне накопичення у ґрунтах і водоносних горизонтах, створюючи довготривалу загрозу екологічній безпеці.

Подолання проблеми забруднення вод важкими металами потребує системного підходу (рис.2.1). Він має включати інвентаризацію джерел забруднення з точним визначенням усіх секторів, що спричиняють надходження токсикантів у довкілля, - від промислових об'єктів і сільськогосподарських угідь до побутових відходів. Наступним елементом є впровадження сучасних технологій очищення, серед яких особливу ефективність демонструють комбіновані фізико-хімічні та біологічні методи, здатні знижувати концентрації металів до екологічно безпечного рівня. Не менш важливим аспектом є дотримання жорстких нормативних вимог і регуляторний контроль, що передбачає встановлення суворих стандартів для скидання стічних вод і контролю якості природних водойм. Паралельно із цим мають впроваджуватися попереджувальні заходи, зокрема скорочення використання металовмісних речовин у виробництві та перехід до екологічно безпечних технологій.

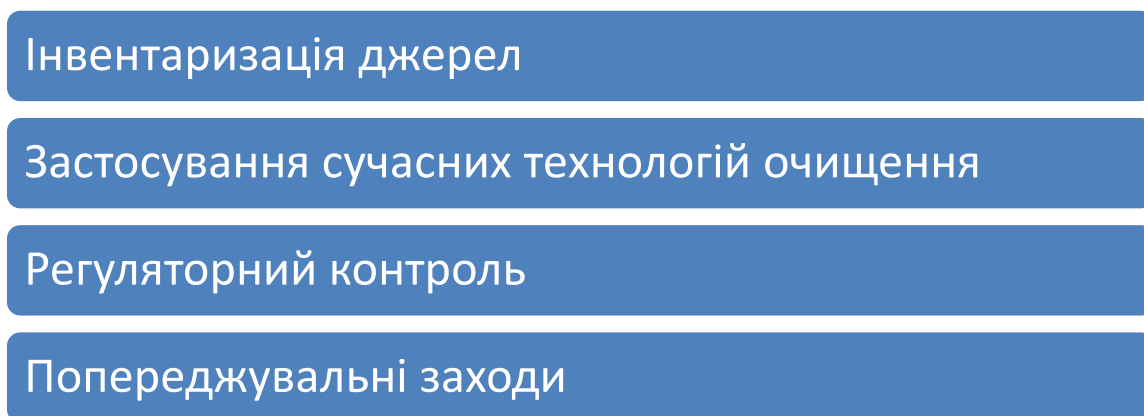


Рис.2.1. Елементи системного підходу для ефективного управління джерелами забруднення вод важкими металами

Окремої уваги заслуговують заходи з реабілітації вже забруднених водойм. Це може передбачати видалення або нейтралізацію донних відкладів, застосування біоремедіаційних технологій, що базуються на використанні живих організмів для знешкодження забруднювачів, а також створення санітарно-захисних зон. У випадках високого рівня техногенного навантаження, як-от у зонах інтенсивного гірничо-видобувного виробництва, доцільним є створення систем замкнутого водообігу, що дозволяють мінімізувати контакт забруднених вод із природним середовищем.

Отже, боротьба з джерелами і шляхами надходження важких металів у водойми є багатокомпонентним і довготривалим процесом, що вимагає поєднання технологічних, організаційних і регуляторних рішень. Лише комплексний підхід, який поєднує моніторинг, сучасні методи очищення, відновлювальні заходи та превентивні стратегії, здатен забезпечити стійке зменшення рівня забруднення. Важливим залишається також розвиток наукових досліджень, спрямованих на вивчення поведінки металів у різних типах екосистем, а також створення інноваційних технологій, що враховуватимуть регіональні особливості та рівень антропогенного навантаження. Лише завдяки такому комплексному підходу можна досягти стабільного покращення екологічного стану водних ресурсів та захистити здоров'я людини й біорізноманіття.

Одним із перспективних напрямів очищення води є використання біотехнологій. Біоремедіація, що базується на застосуванні мікроорганізмів, рослин або грибів, здатних поглинати важкі метали, є одночасно екологічно безпечним і економічно вигідним підходом. Наприклад, водорості та водні рослини, такі як ряска або очерет, демонструють високу здатність до акумуляції важких металів. Деякі мікроорганізми здатні використовувати важкі метали у своїх метаболічних процесах, перетворюючи їх на менш токсичні сполуки, що відкриває можливості для локальної та промислової очистки водних об'єктів.

Ще одним інноваційним напрямом є застосування нанотехнологій. Наноматеріали, такі як вуглецеві нанотрубки або наночастинки оксиду заліза, здатні ефективно сорбувати іони важких металів завдяки високій питомій поверхні та хімічній активності. Це дозволяє створювати компактні та ефективні системи очищення, придатні як для великих промислових обсягів, так і для локального очищення забруднених водойм.

Серед фізико-хімічних методів особливо ефективними є мембранні технології, такі як зворотний осмос або ультрафільтрація. Вони дозволяють видаляти навіть найменші концентрації важких металів, забезпечуючи очищення води до рівня питної. Проте такі методи мають високу вартість та значні енергетичні витрати, що обмежує їх застосування для великих водойм.

Для реабілітації водних об'єктів, які зазнали значного забруднення, доцільно застосовувати комбіновані методи, що поєднують фізико-хімічні, біологічні та механічні підходи. Наприклад, видалення забруднених донних відкладів можна поєднувати з біоремедіацією для відновлення біорізноманіття. Створення буферних зон навколо водойм допомагає зменшити надходження забруднювачів із поверхневого стоку.

Ефективне управління джерелами забруднення вод важкими металами має включати не лише технологічні заходи, а й соціальні ініціативи. Підвищення екологічної свідомості населення, навчання працівників

промислових підприємств методам екологічного менеджменту та суворий контроль за дотриманням екологічного законодавства сприяють значному зниженню обсягів забруднення.

Водночас важливо враховувати економічний аспект проблеми. Інвестиції в екологічні проєкти, спрямовані на очищення води та запобігання забрудненню, мають розглядатися як довгострокові. Вони сприяють збереженню природних ресурсів, підвищенню якості життя населення та зменшенню витрат на охорону здоров'я.

Ефективна співпраця між урядом, промисловістю та науковими установами є критично важливою для реалізації таких ініціатив. Вирішення проблеми забруднення вод важкими металами потребує інтегрованого підходу, що поєднує технічні, екологічні та соціальні аспекти. Впровадження сучасних технологій очищення, розвиток наукових досліджень, посилення нормативного регулювання та підвищення екологічної свідомості суспільства є основними елементами цієї стратегії. Лише комплексний підхід забезпечить ефективний захист водних ресурсів та сталий розвиток екосистем у зоні впливу гірничо-видобувних і промислових підприємств.

2.3. Наслідки забруднення для водних екосистем і людини

Важкі метали чинять надзвичайно складний і багатогранний вплив на водні екосистеми, руйнуючи їхній екологічний баланс та порушуючи нормальне функціонування біоти. Їхня токсичність визначається не лише концентрацією, але й хімічною формою у водному середовищі, тривалістю та періодичністю дії, а також взаємодією з іншими хімічними компонентами води. Метали мають здатність накопичуватися у тканинах риб, молюсків, планктону та інших водних організмів, що призводить до їх подальшого перенесення по харчовому ланцюгу. Біоаккумуляція створює ефект посилення токсичного впливу на вищі трофічні рівні, включаючи хижаків та людину. Метилртуть,

наприклад, є особливо небезпечним елементом, здатним вражати нервову систему організмів навіть у малих концентраціях, що робить її серйозною загрозою для здоров'я людей, які споживають рибу з забруднених водойм.

Надходження важких металів у воду безпосередньо змінює її фізико-хімічні властивості. Підвищення концентрації певних іонів може призводити до зміни рН, зниження рівня розчиненого кисню та порушення хімічного складу середовища. Такі зміни створюють стресові умови для водних організмів, зменшуючи їхню виживаність і здатність до відтворення. Високі концентрації свинцю, кадмію, цинку та міді негативно впливають на фотосинтетичну активність водоростей, зменшуючи їхню біомасу, а отже, знижуючи доступність поживних речовин для інших видів. Це призводить до руйнування харчових ланцюгів і зниження продуктивності екосистеми, що в довгостроковій перспективі загрожує стабільності водних об'єктів.

Донні відклади є додатковим джерелом ризику, адже вони накопичують важкі метали протягом десятиліть. Під впливом змін гідрологічних чи хімічних умов, таких як підвищення кислотності або зменшення рівня кисню, метали можуть повторно потрапляти у водне середовище, створюючи ефект вторинного забруднення. Цей процес є особливо небезпечним, оскільки його наслідки можуть проявлятися навіть після ліквідації основного джерела забруднення, продовжуючи впливати на водні екосистеми протягом багатьох років.

Вплив важких металів проявляється і на рівні популяцій водних організмів. Чутливі види, які не здатні адаптуватися до токсичних умов, гинуть або витісняються більш стійкими, що призводить до спрощення структури біоценозів і зниження стійкості екосистеми до інших стресових факторів. Зменшення біорізноманіття знижує здатність водойм протистояти змінам клімату, вторгненню чужорідних видів або епізодам масового цвітіння водоростей, що загалом порушує екологічну рівновагу та знижує продуктивність екосистеми.

Забруднення важкими металами також зменшує здатність водойм виконувати ключові екосистемні функції. Порушується природне очищення води, знижується біопродуктивність та здатність до регулювання гідрологічних процесів. Втрата цих функцій створює додатковий тиск на навколишні екосистеми, знижує якість водних ресурсів і прямо впливає на життя людей, які залежать від цих водойм для рибальства, питного водопостачання та рекреації.

Комплексне управління впливом важких металів на водні екосистеми потребує системного підходу. Моніторинг концентрацій металів у воді, донних відкладах і організмах дозволяє визначити критичні зони забруднення та оцінити динаміку змін у екосистемі. Моделювання процесів міграції і накопичення металів допомагає прогнозувати їхнє поширення та оцінювати ефективність заходів очищення до їхнього впровадження. Важливим є застосування фізико-хімічних методів очищення, таких як коагуляція, адсорбція, мембранні технології, а також біологічних методів, включно з фіторе mediaцією та використанням мікроорганізмів, здатних поглинати і нейтралізувати важкі метали [5].

Не менш важливими є превентивні заходи, що запобігають подальшому забрудненню. До них належать модернізація систем водоочищення, контроль за скиданням стічних вод промисловими підприємствами, створення захисних зон навколо водойм та інтеграція екологічної політики у промислові й сільськогосподарські процеси. Підвищення екологічної свідомості населення, освітні програми для працівників промисловості та активна участь громадськості у вирішенні екологічних проблем сприяють формуванню культури сталого розвитку, де економічні, соціальні та екологічні аспекти перебувають у гармонії. Тільки такий комплексний підхід дозволяє мінімізувати негативний вплив важких металів, зберегти водні ресурси та забезпечити довгострокову стійкість водних екосистем.

Таблиця 2.4

Вплив забруднення на водні екосистеми

Наслідки	Опис	Приклади металів, що спричиняють наслідки
Зміна фізико-хімічних властивостей води	Вплив на водне середовище проявляється у зниженні концентрації розчиненого кисню, зміні рН та накопиченні токсичних речовин	Мідь (Cu), цинк (Zn), свинець (Pb)
Біоаккумуляція у водних організмах	Метали накопичуються в тканинах організмів і поступово передаються по харчовому ланцюгу, збільшуючи ризики для вищих трофічних рівнів	Ртуть (Hg), кадмій (Cd), свинець (Pb)
Порушення метаболізму водних організмів	Токсичний вплив металів уповільнює ріст, знижує репродуктивну здатність та порушує дихальні і ферментативні процеси	Цинк (Zn), мідь (Cu), хром (Cr)
Зниження біорізноманітності	Чутливі види гинуть або витісняються більш стійкими, що спрощує структуру екосистеми	Свинець (Pb), кадмій (Cd), хром (Cr)
Вторинне забруднення	Метали, що осіли на дно, можуть знову потрапляти у воду при зміні умов (кислотності, окислення), створюючи довготривалий ефект забруднення	Свинець (Pb), ртуть (Hg), кадмій (Cd)
Порушення харчових ланцюгів	Загибель продуцентів і первинних споживачів призводить до зменшення доступності їжі для вищих трофічних рівнів	Мідь (Cu), цинк (Zn), хром (Cr)
Деградація екосистемних послуг	Знижується здатність водойм до самоочищення, страждає рибогосподарський потенціал та інші екосистемні функції	Свинець (Pb), ртуть (Hg), кадмій (Cd)

Важкі метали мають широкий спектр шкідливих наслідків не лише для живих організмів, але й для здоров'я людини. Поряд із пестицидами, діоксинами, нафтопродуктами, фенолами, фосфатами та нітратами вони

становлять серйозну загрозу існуванню цивілізації. Збільшення концентрацій важких металів у навколишньому середовищі прямо впливає на підвищення частоти генетичних мутацій, розвитку онкологічних захворювань, серцево-судинних патологій, професійних захворювань, отруєнь, дерматозів та зниження імунного захисту організму.

Основним джерелом надходження важких металів є антропогенна діяльність людини, що часто ведеться без урахування екологічних наслідків. Проте важкі метали також зустрічаються в природі: вивітрювання гірських порід, ерозійні процеси, вулканічна активність також сприяють їх надходженню у середовище. Техногенні джерела включають видобуток і переробку корисних копалин, спалювання палива, рух транспорту, промислові та сільськогосподарські процеси. Частина таких викидів переноситься на великі відстані у вигляді аерозолів і спричиняє глобальне забруднення, а інша потрапляє у водойми, де накопичується і стає джерелом вторинного забруднення через хімічні перетворення у воді.

Важкі метали потрапляють в організм переважно через питну воду, продукти харчування, а також повітря. Ртуть у вигляді пари особливо небезпечна, бо швидко проникає в легені і потрапляє у кров. В організмі важкі метали зазвичай не зазнають істотного перетворення, на відміну від органічних токсикантів, і надовго включаються у біохімічні цикли, поступово накопичуючись у тканинах.

Малими дозами деякі метали є життєво необхідними, беруть участь у метаболізмі, перенесенні та синтезі речовин. Але при перевищенні допустимих концентрацій вони стають токсичними. Наприклад, хром (Cr VI) є сильним канцерогеном і здатен викликати онкологічні захворювання, хронічні запальні процеси та ураження шкіри. Надлишок заліза порушує обмін речовин, формує хелатоподібні комплекси з метаболітами, взаємодіє з клітинними мембранами, змінюючи їхню проникність, що призводить до пошкодження тканин і органів.

Таблиця 2.5

Вплив важких металів на організм людини

Важкий метал	Механізм токсичності	Органи/системи, що уражаються	Наслідки для організму
Ртуть (Hg)	Проникає у нервові клітини, зв'язується з білками, порушує функцію ферментів	Нервова система, нирки, печінка	Порушення координації, паралічі, втрата слуху, зору та нюху, ниркова недостатність
Свинець (Pb)	Замінює кальцій у кістках та ферментах, накопичується в організмі	Нервова система, кістки, кровоносна система, нирки	Зниження інтелекту, анемія, гіпертензія, порушення росту, слабкість
Кадмій (Cd)	Нарощує окислювальний стрес, ушкоджує клітинні мембрани	Нирки, легені, печінка	Хронічна ниркова недостатність, остеопороз, легеневі захворювання
Хром (Cr VI)	Генотоксичний, канцерогенний, викликає утворення вільних радикалів	Печінка, шкіра, легені	Онкологічні захворювання, дерматити, порушення метаболізму
Мідь (Cu)	Надлишок утворює токсичні комплекси з білками, порушує антиоксидантний захист	Печінка, нирки, мозок	Печінкова недостатність, порушення нервової діяльності, диспепсичні явища
Цинк (Zn)	Надлишок блокує всмоктування інших мікроелементів, викликає метаболічні порушення	Шлунково-кишковий тракт, імунна система	Нудота, блювання, зниження імунітету, порушення росту
Залізо (Fe)	Утворює вільні радикали, порушує клітинний метаболізм	Печінка, серце, підшлункова залоза	Порушення обміну речовин, токсичне ураження печінки та серця, діабетоподібні зміни
Свинець та кадмій	Кумулятивна токсичність, ушкодження ферментних систем	Кістки, нирки, нервова система	Хронічна інтоксикація, анемія, порушення нервової діяльності, остеопороз

Важкі метали впливають на різні системи організму. Нервова система особливо чутлива до ртуті, свинцю та кадмію. Вони можуть викликати порушення координації, зниження слуху і зору, пам'яті, уваги, а при високих дозах - паралічі та ураження центральної нервової системи. Серцево-судинна система реагує на токсини зміною тиску, аритмією та порушенням серцевого ритму. Печінка та нирки, які виконують детоксикаційну функцію, страждають від накопичення металів і можуть зазнавати некротичних змін, що веде до хронічної інтоксикації та порушення обмінних процесів. Травний тракт часто перш за все реагує нудотою, блювотою, болями та порушенням перистальтики.

Отруєння важкими металами у гострій формі зустрічається рідко, але має тяжкі наслідки для цілого населення, як у випадку хвороби Мінамата через ртуть, коли симптоми включають втрату слуху, зору, нюху, порушення координації та паралічі. Хронічне отруєння проявляється повільно: людина відчуває слабкість, стомлюваність, зниження імунітету, болі в суглобах, проблеми з травленням, нервові розлади, що часто плутають із віковими змінами або хронічними хворобами [5].

Для контролю за якістю водних ресурсів та зменшення ризику для людини створені гідробіологічні служби, які відслідковують стан забруднення водойм під впливом антропогенних факторів. Важливим є моніторинг не лише води, а й донних відкладень та водних організмів, оскільки саме ці компоненти накопичують важкі метали і можуть бути джерелом вторинного забруднення для людей та дикої природи.

Отже, важкі метали постійно циркулюють у природі, і їх негативний вплив на організм людини охоплює майже всі системи: нервову, серцево-судинну, травну, видільну та шкірну. Контроль забруднень, очищення стічних вод та зменшення антропогенного впливу є критично важливими для збереження здоров'я та життя людини.

2.4. ГДК, методи виявлення та моніторинг

Гранично допустимі концентрації (ГДК) важких металів у воді та методи їхнього визначення є ключовими елементами системи охорони водних ресурсів. Визначення цих норм забезпечує безпеку для здоров'я людини та збереження водних екосистем, а застосування сучасних аналітичних методів і програм моніторингу дозволяє своєчасно виявляти перевищення ГДК та оцінювати екологічні ризики.

Гранично допустима концентрація (ГДК) - це така максимальна вмістність речовини у воді, за якої її тривалий вплив не спричиняє неприйнятних ризиків для здоров'я людини й не призводить до деградації водних екосистем. У водній сфері одночасно функціонує кілька рівнів нормування: орієнтири для питної води (санітарно-гігієнічні цілі, що безпосередньо пов'язані зі здоров'ям населення), екологічні критерії для поверхневих вод (захист біоти, рибогосподарська цінність), а також технологічні/емісійні нормативи для скидів (регламентують, що саме може потрапляти у водний об'єкт зі стічними водами). Всі ці рамки взаємодоповнюють одна одну: навіть якщо питна вода відповідає санітарним вимогам, перевищення екосистемних критеріїв для річки чи озера означає довгострокові ризики - вторинне забруднення донних відкладів, біоаккумуляцію та порушення самоочищення [50].

Міжнародно визнаною методичною «опорою» є Керівництво ВООЗ з якості питної води (Guidelines for Drinking-water Quality, GDWQ), яке формує орієнтовні гігієнічні значення на основі токсикологічної оцінки, внеску води в загальну експозицію та прийнятних добових надходжень. Ці орієнтири не є «жорсткими» правовими нормами, але їх широко використовують як базу для національного нормування та проєктування систем водопідготовки. Зокрема, для найпоширеніших пріоритетних металів ВООЗ подає такі типові орієнтовні значення: миш'як - 10 мкг/л (як практична мета з огляду на канцерогенність і

обмеження аналітики та технологій); кадмій - 3 мкг/л; ртуть (неорганічні форми) - 6 мкг/л; хром (загальний) - 50 мкг/л; нікель - 70 мкг/л; свинець - 10 мкг/л, зауважуючи, що для свинцю безпечного порогу фактично немає, тож ціль - мінімізація експозиції. Ці підходи і значення докладно описані у випусках та хімічних довідниках ВООЗ, які слугують головним науковим підґрунтям для регуляторів водопостачання в різних країнах [76].

Для країн ЄС правовим стандартом для питної води є Директива (ЄС) 2020/2184. Вона встановлює обов'язкові «параметричні значення» (аналог ГДК для питної води на виході з крана) і поступово посилює частину показників з урахуванням сучасних токсикологічних даних і ризик-орієнтованого підходу. Для важких металів ця директива передбачає, зокрема, такі граничні рівні на точці споживання: свинець - 10 мкг/л (з подальшим зниженням до 5 мкг/л у межах розподільних мереж/матеріалів), кадмій - 5 мкг/л, ртуть - 1 мкг/л, хром (загальний) - 25–50 мкг/л залежно від контексту, нікель - 20 мкг/л, миш'як - 10 мкг/л. Ці цифри є обов'язковими для постачальників питної води в державах-членах ЄС та використовуються як бенчмарк поза ЄС завдяки суворості регламенту і зрозумілому механізму нагляду.

Узагальнюючи міжнародну практику для цілей подальшого аналізу, доцільно орієнтуватися на консервативні пороги, які водночас відображають сучасну європейську норму та підходи ВООЗ. Наведена нижче довідкова таблиця допоможе швидко співвіднести очікувані (цільові) рівні для питної води з точки зору ВООЗ і чинних правових меж у ЄС:

ВООЗ наголошує на відсутності безпечного порогу для свинцю й рекомендує максимально можливе зниження експозиції; 10 мкг/л вживається як практичний цільовий рівень у контексті контролю ризиків. (Пояснення і числові орієнтири - за публікаціями та довідниками ВООЗ; правові значення ЄС - за Директивою 2020/2184 і її викладками у довідкових матеріалах Єврокомісії/оглядах.) [103].

Таблиця 2.6

**Порівняння орієнтовних рівнів вмісту важких металів у питній воді
за рекомендаціями ВООЗ та нормативами ЄС**

Метал	Орієнтир ВООЗ для питної води (мкг/л)	Параметричне значення ЄС (мкг/л)
Миш'як (As)	10	10
Свинець (Pb)	10*	10 (ціль 5 у розподільній мережі)
Кадмій (Cd)	3	5
Ртуть (Hg, неорганічна)	6	1
Хром (Cr, загальний)	50	25–50
Нікель (Ni)	70	20

Варто підкреслити, що норматив для питної води - не єдиний «орієнтир безпеки». Для поверхневих вод, призначених для питного водопостачання після підготовки або для охорони водної біоти, застосовують окремі екологічні критерії (еквіваленти ГДК у водному середовищі), які зазвичай ще суворіші у частині біодоступних форм металів. Такі критерії враховують не лише сумарну концентрацію, а й специфічну форму існування (валентний стан, комплексоутворення, гранулометрія донних відкладів), рН і жорсткість, вміст розчиненої органіки та сульфідів - усе, що визначає токсичність та біодоступність металів у реальних гідрохімічних умовах. Тому для надійної оцінки відповідності важливо: а) перевіряти, для якого саме середовища і точки відбору встановлено норматив (вихід з очисних споруд, створ водозабору, «кран споживача», товща води або пори донних відкладів); б) співставляти

загальні та розчинені фракції; в) інтерпретувати дані з урахуванням сезонної мінливості, подій «перемішування» та вторинного вивільнення з донних відкладів.

У практичній роботі магістерського дослідження доречно використовувати європейські параметричні значення як «жорстку» контрольну планку для питної води, а довідники ВООЗ - як науковий фундамент і підмурок для токсиколого-гігієнічного обґрунтування. Для поверхневих вод, що зазнають впливу гірничо-металургійних та міських джерел, корисно додатково застосовувати підхід біодоступності (наприклад, для Cu, Zn, Ni та Pb), щоби уникати як недооцінки, так і переоцінки ризику в різних гідрохімічних умовах. Це створює цілісну, науково узгоджену базу для наступних підрозділів - вибору методів виявлення, побудови програми моніторингу та інтерпретації отриманих результатів у контексті управління якістю водних ресурсів.

Оцінка вмісту важких металів у природних та питних водах базується на поєднанні класичних хімічних, інструментальних і сучасних високочутливих аналітичних методів. Ключове завдання будь-якої аналітичної процедури - визначення загальної концентрації елементів або їхніх окремих хімічних форм (валентних станів, розчинених і зв'язаних фракцій), адже саме вони визначають токсичність та екологічну небезпеку.

У світовій практиці нині застосовується багаторівнева система аналітичних методів:

- **Класичні хімічні методи** (титриметрія, колориметрія, гравіметрія) історично використовувались для орієнтовного визначення окремих металів, проте нині відіграють допоміжну роль. Їхнє значення зберігається у випадках, коли необхідна швидка оцінка або неможливе використання складної інструментальної бази.

- **Атомно-абсорбційна спектроскопія (ААС)** - «золотий стандарт» для визначення свинцю, кадмію, міді, цинку, нікелю та інших металів у природних і питних водах. Метод ґрунтується на поглинанні світла атомами елементу в газовій фазі. Використання полум'яних і електротермічних атомізаторів дозволяє охоплювати як макро-, так і ультрамікроконцентрації (від мг/л до нг/л). ААС характеризується високою селективністю, однак здебільшого потребує індивідуального аналізу для кожного елементу.
- **Індуктивно-зв'язана плазмова мас-спектрометрія (ICP-MS)** є найчутливішим і найсучаснішим інструментом, здатним виявляти більшість важких металів у діапазоні ppt (частин на трильйон). Завдяки багатоконпонентності аналізу, ICP-MS дозволяє одночасно визначати десятки елементів, включно з ізотопним складом, що важливо для трасування джерел забруднення. Недоліком є висока вартість обладнання та потреба у кваліфікованому персоналі.
- **Індуктивно-зв'язана плазмова оптична емісійна спектрометрія (ICP-OES, ICP-AES)** широко застосовується для моніторингових програм, оскільки дозволяє швидко та одночасно аналізувати кілька десятків металів у концентраціях від мкг/л. Цей метод оптимальний для великих аналітичних лабораторій, які працюють із великим масивом зразків.
- **Вольтамперометрія** використовується для визначення рухомих (біодоступних) форм металів у воді. На відміну від методів, що оцінюють загальний вміст, вольтамперометричні техніки дозволяють розрізняти форми існування (наприклад, вільні іони Cu^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+} проти комплексних сполук). Це особливо цінно для екотоксикологічних досліджень та прогнозування біологічного впливу.
- **Флуориметрія, фотометрія та сучасні біосенсиори** знаходять застосування у скринінгових та польових дослідженнях. Сьогодні активно розвиваються нанотехнологічні сенсори та портативні

аналізатори, здатні швидко фіксувати перевищення допустимих концентрацій у реальному часі.

Таблиця 2.7

Порівняльна характеристика методів виявлення важких металів у воді

Метод	Чутливість (межа виявлення)	Визначення кількох елементів одночасно	Переваги	Недоліки	Типове застосування
Класичні хімічні (титриметрія, гравіметрія, колориметрія)	мг/л	Ні	Простота, дешевизна, можливість використання в польових умовах	Низька точність і чутливість, мала селективність	Орієнтовний аналіз, контроль на підприємствах із обмеженою лабораторною базою
Атомно-абсорбційна спектроскопія (ААС)	мкг/л – нг/л	Ні (один елемент за вимірювання)	Висока точність і чутливість, відносна доступність обладнання	Тривалість аналізу при великій кількості проб, неможливість одночасного визначення багатьох металів	Рутинний моніторинг Pb, Cd, Zn, Cu, Ni у природних і питних водах
Індуктивно-зв'язана плазмова оптична емісійна	мкг/л	Так (до 70 елементів)	Висока швидкість і мультиелементність, точність	Висока вартість обладнання і реагентів	Регіональні та національні програми моніторингу

Метод	Чутливість (межа виявлення)	Визначення кількох елементів одночасно	Переваги	Недоліки	Типове застосування
спектроскопія (ICP-OES/ICP-AES)					
Індуктивно-зв'язана плазмова мас-спектроскопія (ICP-MS)	пг/л – нг/л (ppt рівень)	Так (широкий спектр)	Найвища чутливість, можливість визначення ізотопного складу	Дуже висока вартість, потреба у висококваліфікованому персоналі	Академічні дослідження, високоточний моніторинг, судово-екологічні експертизи
Вольтамперометрія	мкг/л – нг/л	Частково	Визначає вільні іони металів (біодоступні форми), висока чутливість	Не завжди дозволяє визначати сумарний вміст, потребує ретельної пробопідготовки	Екотоксикологічні дослідження, прогнозування біологічної дії
Біосенсори та експрес-методи	мг/л – мкг/л	Так (залежно від конструкції)	Швидкість, портативність, можливість використання у полі	Менша точність і відтворюваність, новизна технологій	Оперативний контроль, аварійні ситуації, польові дослідження

Для забезпечення достовірності вимірювань у сучасній екологічній практиці застосовують багатоетапний підхід: від попередньої підготовки проб (фільтрація, мінералізація, консервування азотною кислотою) до використання контрольних стандартів і методів міжлабораторних порівнянь.

Моніторинг важких металів у водоймах є одним із ключових напрямів екологічного контролю, оскільки ці елементи характеризуються високою стійкістю у навколишньому середовищі, здатністю до біоаккумуляції та вираженою токсичністю. На відміну від органічних забруднювачів, які можуть піддаватися біологічному чи хімічному розкладанню, метали накопичуються у воді, донних відкладах і живих організмах, створюючи довготривалу екологічну загрозу. Система моніторингу передбачає комплексне спостереження за фізико-хімічними показниками води, концентраціями окремих металів, їх міграційними формами, а також за станом біоти, яка є біоіндикатором забруднення.

Основними завданнями моніторингу є своєчасне виявлення перевищень гранично допустимих концентрацій (ГДК), прогнозування можливих екологічних ризиків, оцінка тенденцій накопичення важких металів у водних екосистемах та вироблення рекомендацій для природоохоронних і санітарних заходів. При цьому враховується не лише сумарний вміст металів, але й їхній хімічний стан, адже саме форма існування (йони, оксиди, сульфіді, органічні комплекси) визначає їхню мобільність і токсичність. Наприклад, сполуки шестивалентного хрому або метилртуті значно небезпечніші, ніж їхні неорганічні аналоги.

Моніторинг здійснюється на декількох рівнях. На локальному рівні контролюють викиди підприємств, скиди комунальних очисних споруд, техногенні впливи в межах окремих населених пунктів. Регіональний рівень передбачає облік загального стану річкових басейнів чи озерних систем, а національний і міжнародний - оцінку трансграничного забруднення, оскільки важкі метали можуть переноситися на значні відстані з водними потоками та атмосферними аерозолями. В Україні система державного моніторингу вод реалізується Державною екологічною інспекцією, Держводагентством та лабораторними центрами МОЗ, а результати контролю регулярно публікуються у щорічних доповідях про стан довкілля.

Таблиця 2.8

Система моніторингу важких металів у водоймах

Рівень моніторингу	Основні завдання	Методи та показники контролю	Відповідальні органи / інституції
Локальний (підприємства, комунальні очисні споруди, міські водойми)	Виявлення джерел забруднення, контроль скидів, недопущення ГДК у місцях водокористування	Вимірювання концентрацій у точках скиду, атомно-абсорбційна спектроскопія, фотометрія, вольтамперометрія	Лабораторії підприємств, місцеві екоінспекції, санітарні служби
Регіональний (басейни річок, озерні системи)	Оцінка кумулятивного впливу промислових та сільськогосподарських джерел, виявлення тенденцій накопичення металів	Спектроскопічний аналіз води і донних відкладів, визначення міграційних форм металів, біоіндикація (водорості, молюски, риби)	Басейнові управління водних ресурсів, лабораторні центри МОЗ, обласні підрозділи Держекоінспекції
Національний (державна система спостережень)	Оцінка екологічного стану поверхневих вод, визначення масштабів техногенного навантаження, формування баз даних	Комплексні гідрохімічні та гідробіологічні дослідження, систематичний відбір проб, статистичний аналіз	Державне агентство водних ресурсів України, Державна екологічна інспекція, Міндовкілля
Міжнародний / трансграничний (річки Дунай, Дністер, Дніпро)	Контроль транскордонного переносу металів, оцінка відповідності міжнародним стандартам (ВООЗ, ЄС)	Координаційні програми моніторингу, використання ГІС та дистанційного зондування, порівняльний аналіз із світовими нормативами	Міжнародна комісія з охорони р. Дунай (ICPDR), Програма ООН з довкілля (UNEP), Європейське агентство з довкілля

Сучасний моніторинг базується на поєднанні класичних інструментальних методів аналізу (атомно-абсорбційна спектроскопія, індуктивно-зв'язана плазмова спектрометрія, вольтамперометрія) з біологічними індикаторами. Зокрема, накопичення металів у тканинах риб, молюсків чи водоростей дозволяє оцінити реальну біодоступність та потенційний ризик для харчових ланцюгів. Все більшого значення набувають геоінформаційні системи (ГІС), які забезпечують просторово-часовий аналіз поширення забруднень, а також дистанційні методи контролю, що дають змогу відстежувати зміни у великих водних басейнах.

Отже, моніторинг важких металів у водоймах є не лише процесом збору даних, але й основою для прийняття управлінських рішень, спрямованих на захист здоров'я населення, збереження біорізноманіття та підтримання стійкості екосистем. Він дозволяє не лише констатувати факт забруднення, але й прогнозувати його розвиток, визначати найбільш вразливі ділянки і своєчасно застосовувати заходи для мінімізації шкоди.

Підсумовуючи, комплексне застосування нормативів ГДК, сучасних методів аналізу та систем моніторингу створює науково обґрунтовану основу для контролю якості води, оцінки ризиків для здоров'я та довкілля, а також для прийняття управлінських рішень щодо збереження водних ресурсів.

2.5. Використання мікрководоростей для біологічного очищення води від органічних і неорганічних забруднювачів. Фіторемедіація.

Мікрководорості дедалі частіше розглядаються як один із ключових біологічних агентів очищення водного середовища, здатних ефективно вилучати широкий спектр органічних і неорганічних забруднювачів. Їхній потенціал пояснюється комплексом властивостей - високою швидкістю росту, активною фотосинтетичною діяльністю, здатністю до біоаккумуляції та

біотрансформації токсичних сполук. У сучасних екологічних технологіях мікроводорості стають альтернативою традиційним фізико-хімічним методам очищення, оскільки забезпечують високу ефективність за значно нижчої вартості, не утворюють вторинного забруднення та дозволяють використовувати одержану біомасу як цінний вторинний ресурс.

У сфері очищення води значна увага приділяється здатності мікроводоростей поглинати органічні мікрозабруднювачі, до яких належать фармацевтичні препарати, фенольні сполуки, поверхнево-активні речовини, пестициди, ПАВ та бісфеноли. Низка експериментальних досліджень показала, що зелені та діатомові водорості здатні не лише сорбувати ці речовини на поверхні клітинної стінки, але й активно їх метаболізувати. Так, прісноводні види *Chlamydomonas mexicana* та *Chlorella vulgaris* демонструють здатність деградувати бісфенол А з ефективністю до 80–90 % протягом трьох діб, що підтверджено хроматографічними та мас-спектрометричними методами. Деякі штами, наприклад *Chlorella fusca* var. *vacuolata*, здійснюють глибоку біотрансформацію бісфенолу А з утворенням нетоксичних похідних, позбавлених естрогенної активності, тоді як окремі діатомові водорості, такі як *Stephanodiscus hantzschii*, проявляють здатність до швидкої фотодеструкції цієї сполуки у морських системах. Дослідження транскриптомного рівня, проведені для *Desmodesmus* sp. *WR1*, свідчать про активацію специфічних метаболічних шляхів глікозилювання та окиснення, що підтверджує складну ферментативну природу деградації таких ксенобіотиків [42].

Крім бісфенольних сполук, мікроводорості проявляють високу активність щодо пестицидів, гербіцидів та фармацевтичних речовин. У лабораторних умовах встановлено, що їхня ефективність значною мірою зумовлена гідравлічним часом утримання: чим довше вода перебуває в системі, тим інтенсивніше протікають процеси фотодеградації, біодеградації та сорбції. Відомо також, що види *Chlorella* та *Scenedesmus* здатні акумулювати такі складні органічні молекули, як диклофенак, сульфаметоксазол чи карбамазепін,

які важко піддаються видаленню традиційними методами. Це робить такі системи перспективними для інтеграції у сучасні очисні споруди.

Очищення води за допомогою мікроводоростей може здійснюватися в різних конструкціях - від природних водно-болотних угідь до спеціально розроблених фотобіореакторів. У природних і штучних біоплато мікроводорості відіграють роль ключових продуцентів кисню, підтримуючи активність нітрифікуючих бактерій і стабілізуючи екосистему. У фотобіореакторах їхній розвиток можна контролювати, оптимізуючи освітлення та концентрацію біомаси, що дозволяє досягти високих показників очищення навіть у випадку складних стічних вод. Після завершення процесу очищення водоростеву біомасу можна використовувати повторно - для виробництва біопалива, органічних добрив, кормових добавок або добування біологічно активних речовин.

Сукупність експериментальних даних свідчить, що мікроводорості здатні забезпечити комплексне очищення води - вилучати як органічні, так і неорганічні токсиканти, трансформувати їх до менш небезпечних форм та стабілізувати хімічний склад водних екосистем. У цьому полягає їхнє стратегічне значення для розвитку екологічно безпечних технологій водоочищення, що відповідають вимогам сталого розвитку та мінімізують вплив антропогенних навантажень на довкілля.

Фіторемедіація важких металів у водних екосистемах розглядається як одна з найбільш перспективних біотехнологій, здатних забезпечити ефективне, екологічно безпечне та економічно доступне очищення забруднених водойм. Основу цього процесу становить здатність водних рослин і мікроводоростей поглинати, акумулювати, трансформувати або осаджувати токсичні метали у своїх тканинах і позаклітинних структурах. На відміну від хімічних методів, фіторемедіація не потребує значних енергетичних ресурсів, не утворює токсичних відходів та дозволяє відновлювати структуру водних екосистем,

одночасно знижуючи концентрації таких металів, як кадмій, свинець, ртуть, мідь, цинк, хром та нікель.

Однією з фундаментальних особливостей фітореMediaції є поєднання кількох механізмів - біоаккумуляції, біосорбції, біопреципітації та внутрішньоклітинної детоксикації. Відомо, що мікроводорості здатні швидко зв'язувати метали за рахунок функціональних груп клітинної стінки (карбоксильних, гідроксильних, амінних), що забезпечує первинну сорбцію. Подальше надходження металів до клітини супроводжується активацією металотіонеїнів та фітохелатинів - низькомолекулярних пептидів, які формують стабільні комплекси з іонами важких металів, знижуючи їхню токсичність. Ці процеси підтверджені транскриптомними дослідженнями низки зелених водоростей, які демонструють активацію генів антиоксидантної системи та метал-залежних ферментів у присутності надлишку Cd^{2+} , Pb^{2+} чи Cu^{2+} .

Експериментальні дані свідчать, що види *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus obliquus*, *Chlamydomonas reinhardtii* та інші здатні акумулювати значні кількості важких металів - до 200–400 мг/г сухої маси залежно від виду та умов експозиції. У дослідженнях Abou-Shanab (2011) продемонстровано, що біосорбція кадмію та свинцю мікроводоростями може досягати рівня 80–98 %, що є порівнянним або навіть вищим за ефективність іонообмінних смол. Діатомові водорості, зокрема *Navicula* та *Nitzschia*, проявляють високий потенціал до осадження металів у формі фосфатів і силікатів, що забезпечує тривале вилучення токсикантів з водної товщі [2].

Особливої уваги заслуговує використання мікроводоростей у системах періодичної та безперервної дії. Лабораторні моделі показують, що збільшення гідравлічного часу утримання сприяє кращій акумуляції важких металів за рахунок активнішої біосорбції та внутрішньоклітинної детоксикації. Доведено, що в умовах стабільного освітлення та достатнього забезпечення CO_2 водорості формують значно більшу біомасу, що прямо підвищує їхню ремедіаційну здатність. Це робить мікроводорості ефективною основою для

розробки фотобіореакторів нового типу, спрямованих на очищення промислових та стічних вод з високим вмістом металів.

Фіторемедіаційний потенціал зростає і завдяки використанню макрофітів - очерету, елодеї, ряски чи різних гідрофітних видів, здатних акумулювати метали у кореневій системі та підводній біомасі. Проте саме мікроводорості демонструють найвищі показники швидкості вилучення металів, що пов'язано з їхньою високою площею поверхні, коротким життєвим циклом та здатністю швидко адаптуватися до токсичних умов.

Фіторемедіація набуває особливого значення у контексті сучасних екологічних викликів, пов'язаних із зростанням техногенних навантажень і впливом воєнних дій, які спричиняють надходження у водойми підвищених концентрацій важких металів. У таких умовах використання мікроводоростей може стати ключовим елементом відновлення водних екосистем, оскільки дозволяє поєднати очищення середовища з відновленням природних біогеохімічних циклів.

Отже, фіторемедіація є потужним сучасним методом біологічного очищення води від важких металів, що поєднує простоту впровадження, екологічну безпечність та високу ефективність. Використання мікроводоростей у цьому процесі відкриває можливості створення доступних і відтворюваних технологій очищення, здатних забезпечити стабільне функціонування водних екосистем та зменшити ризики для здоров'я людини.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИКА ВИВЧЕННЯ ПРОБЛЕМИ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ НА УРОКАХ БІОЛОГІЇ І ЕКОЛОГІЇ

3.1. Освітній потенціал теми «Забруднення довкілля» у шкільному курсі

Вивчення теми «Забруднення довкілля» у старшій школі має особливе значення, оскільки екологічна ситуація у світі стає дедалі складнішою та потребує усвідомленого ставлення з боку молодого покоління. Сучасні учні перебувають у середовищі, де проблеми якості води, стану атмосферного повітря, забруднення ґрунтів та накопичення токсичних речовин перестають бути абстрактними поняттями і набувають безпосереднього зв'язку з їхнім життям та здоров'ям. Саме тому тема забруднення природи не лише забезпечує засвоєння теоретичних знань, але й формує екологічну культуру, відповідальність за стан навколишнього середовища і готовність до практичних дій щодо його охорони.

У курсі біології старшої школи ця тема виступає важливим елементом формування системного бачення взаємодії людини й природи. Вона дозволяє показати, яким чином результат діяльності суспільства відображається на стані екосистем, здоров'ї людини та глобальній екологічній рівновазі. На цьому етапі навчання учні вже володіють достатнім обсягом знань із природничих дисциплін, що дає можливість не лише ознайомитися з різними видами забруднювачів, а й простежити механізми їхнього впливу на живі організми, умови середовища та екологічні процеси.

Отже, освітній потенціал теми «Забруднення довкілля» полягає не лише у передачі знань, але й у розвитку критичного та екологічного мислення, уміння аналізувати та інтерпретувати інформацію, робити обґрунтовані висновки та приймати відповідальні рішення щодо власної взаємодії з природою.

Тема «Забруднення довкілля» інтегровано представлена в чинній навчальній програмі з біології для 10-11 класів. Вона входить до змістової лінії «Людина і біосфера» та є важливою складовою екологічної освіти учнів старшої школи. Її вивчення відбувається у тісному взаємозв'язку з темами «Біосфера як глобальна екосистема», «Екосистеми та екологічні чинники», «Охорона природи та сталий розвиток». Загалом, тема має наскрізний характер і слугує основою для формування цілісного уявлення про взаємозалежність природних процесів і антропогенного впливу людини.

Важливо, що дана тема також узгоджується з ключовими компетентнісними результатами Нової української школи, оскільки вона:

- Формує екологічну та соціальну відповідальність - здатність усвідомлювати наслідки людської діяльності для природи та здоров'я.
- Розвиває критичне мислення - учні навчаються аналізувати джерела інформації, порівнювати дані, визначати причинно-наслідкові зв'язки.
- Сприяє набуттю дослідницьких навичок - під час лабораторних і проєктних робіт школярі виконують вимірювання, спостереження, описують та інтерпретують результати.
- Підсилює міжпредметні зв'язки - тема поєднує знання біології, хімії, географії, екології, природознавства та основ здоров'я.
- Стимулює громадянську активність - учні можуть брати участь у природоохоронних ініціативах, екологічних акціях, соціальних проєктах.

Тема володіє значним методичним потенціалом для впровадження активних, дослідницьких і проєктних форм навчання. Це пояснюється її практичною спрямованістю, доступністю об'єктів спостереження та можливістю безпосереднього залучення учнів до природоохоронної діяльності.

По-перше, дана тема дозволяє організовувати **польові екологічні дослідження**. Учні можуть самостійно відбирати проби води, ґрунту, рослинності, вивчати показники їхнього стану, що сприяє розвитку навичок

експериментальної діяльності та формуванню екологічного мислення. Такі дослідження особливо цінні тим, що вони пов'язані з реальними об'єктами навколишнього середовища, яке оточує учнів, а результати мають безпосередній життєвий зміст.

По-друге, тема є базою для проєктно-орієнтованого навчання. Вона дозволяє структурувати роботу учнів у форматі довготривалих проєктів: від виявлення проблеми та збору інформації - до аналізу результатів і презентації рішень. Наприклад:

- дослідження рівня забруднення конкретної водойми або ділянки міста,
- створення інформаційної кампанії щодо небезпеки неправильного поводження з батареями,
- розробка еко-маршрутів або карт екологічного стану місцевості.

По-третє, тема «Забруднення довкілля» створює умови для міждисциплінарної інтеграції. Під час її вивчення можна поєднувати:

- біологію (вплив забрудників на організми),
- хімію (властивості речовин і методи визначення концентрацій),
- географію (просторове поширення забруднення),
- інформатику (обробка та візуалізація даних),
- основи здоров'я (вплив токсичних речовин на організм людини).

Отже, тема «Забруднення довкілля» має значний освітній і виховний потенціал. Вона забезпечує формування глибоких екологічних знань, сприяє розвитку критичного та системного мислення, створює умови для інтеграції різних галузей науки та відкриває широкі можливості для організації діяльнісного та проєктного навчання. Її вивчення сприяє вихованню екологічно відповідальної особистості, здатної усвідомлювати та оцінювати наслідки людської діяльності і брати участь у збереженні природного середовища.

3.2. Реалізація компетентнісного підходу у вивченні екологічних проблем

Сучасна освіта переживає період активної трансформації, у центрі якої перебуває компетентнісний підхід. Його сутність полягає не лише в засвоєнні знань, а й у здатності учнів застосовувати їх у реальному житті, ухвалювати відповідальні рішення та знаходити практичні шляхи розв'язання проблем. В екологічній освіті такий підхід набуває особливої значущості, адже екологічні виклики - це не абстрактні поняття, а конкретні загрози життю й здоров'ю людини, стану природи та економічній стабільності суспільства.

У старшій школі, коли учні вже володіють достатнім обсягом знань із біології, хімії та географії, настав час інтегрувати їх у ширший контекст - навчити підлітків бачити взаємозв'язки між природними та соціальними процесами, аналізувати причини та наслідки забруднення довкілля, формувати власну позицію стосовно проблем охорони природи. Саме компетентнісний підхід дозволяє поєднати когнітивний, практичний і ціннісний виміри навчання [87].

Екологічна компетентність, яка формується в цьому процесі, має багатокомпонентну структуру. Вона включає когнітивний рівень (систематизовані знання про екологічні закономірності, процеси та проблеми), діяльнісний рівень (уміння застосовувати ці знання для вирішення практичних завдань), комунікативний рівень (здатність вести дискусії, брати участь у суспільних ініціативах), а також ціннісно-світоглядний рівень (усвідомлення власної відповідальності за збереження природи). У навчальному процесі всі ці компоненти мають бути інтегровані в єдину систему.

Компетентнісний підхід у старшій школі не обмежується традиційними уроками з екології чи біології. Він передбачає широку варіативність форм і методів навчання: від аналізу конкретних екологічних ситуацій до участі в

учнівських проєктах та екологічних акціях. У цьому контексті екологічні проблеми стають не лише навчальною темою, а й платформою для розвитку особистості, здатної діяти в умовах складних глобальних викликів.

Екологічна компетентність у старшій школі формується як інтегрований результат навчальної та виховної роботи й охоплює кілька взаємопов'язаних складових, кожна з яких має власне значення у становленні відповідальної особистості.



Рис.3.1. Складові екологічної компетентності

Когнітивна складова передбачає опанування системних знань про природу, довкілля, екологічні процеси та наслідки антропогенного впливу. Учні повинні розуміти не лише фактичні дані, наприклад про забруднення водойм важкими металами, а й бачити причинно-наслідкові зв'язки між людською діяльністю, станом екосистем і здоров'ям населення. У цьому контексті важливо навчати їх аналізувати статистичні дані, працювати з картами та науковими публікаціями, тобто розвивати вміння критично оцінювати інформацію.

Практична (діяльнісна) складова виражається у здатності застосовувати набуті знання в реальних життєвих ситуаціях. Наприклад, учні можуть брати участь у відборі та аналізі проб води, вести спостереження за станом шкільної території, розробляти власні екологічні проєкти. Це не лише формує практичні навички, а й виховує готовність відповідально діяти у випадках екологічних проблем у громаді чи власному побуті.

Комунікативна складова передбачає розвиток умінь вести аргументовану дискусію щодо екологічних проблем, працювати в команді, брати участь у спільних дослідженнях та акціях. У сучасному суспільстві здатність переконувати та ефективно доносити екологічні ідеї до інших стає не менш важливою, ніж власні знання. Саме тому у старшій школі варто активно застосовувати дебати, учнівські конференції та рольові ігри.

Ціннісно-світоглядна складова формує особистісну відповідальність за стан довкілля, екологічну культуру та мотивацію до екологічно доцільної поведінки. Йдеться не лише про розуміння того, що забруднення водойм є шкідливим, а й про внутрішнє переконання діяти екологічно правильно: економити воду, мінімізувати використання пластику, долучатися до громадських екологічних ініціатив. Це найглибший рівень компетентності, адже він торкається світоглядних орієнтирів і формує основу для відповідального громадянства.

Отже, екологічна компетентність учнів старшої школи є цілісним комплексом знань, умінь, цінностей і поведінкових стратегій, які дозволяють не лише усвідомлювати екологічні проблеми, а й активно долучатися до їх розв'язання на особистісному та суспільному рівні.

Ефективне вивчення екологічних проблем у старшій школі вимагає застосування різних педагогічних підходів, які спрямовані не лише на засвоєння знань, але й на формування в учнів практичних умінь та екологічної відповідальності. Компетентнісний підхід у цьому контексті реалізується через

систему методів, що дозволяють учням не просто отримувати інформацію, а й активно діяти, досліджувати та співпрацювати. До найбільш результативних методів можна віднести:

- дослідницькі уроки, під час яких учні працюють із реальними пробами природних середовищ та навчаються методам аналізу;
- проєктну діяльність, що передбачає довготривалу роботу над конкретною проблемою з практичним виходом у громаду;
- польові дослідження та екскурсії, які забезпечують безпосередній контакт із природними об'єктами та процесами;
- інтегровані уроки, що поєднують знання з біології, хімії, географії та інших дисциплін для цілісного бачення проблем;
- дискусії, рольові ігри та дебати, що формують навички аргументованого відстоювання позиції й комунікативні вміння;
- шкільні екологічні акції, які перетворюють знання на практичну діяльність і дозволяють відчути особисту відповідальність за стан довкілля.

Одним із найефективніших шляхів стають дослідницькі уроки. Учні мають змогу працювати з реальними об'єктами - пробами води, ґрунту чи рослинності, використовуючи елементарні прилади та тести. У такий спосіб навчання перетворюється на справжню наукову діяльність, що формує навички спостереження, аналізу та інтерпретації результатів.

Не менш важливе місце посідає проєктна діяльність. Вона виходить за межі одного уроку й розгортається у вигляді комплексного завдання, що часто має соціальну спрямованість. Учні обирають проблему, вивчають її, збирають інформацію, розробляють пропозиції для громади, а наприкінці представляють результати у вигляді презентацій чи міні-звітів. Такі завдання розвивають здатність працювати в команді, критично мислити й застосовувати знання на практиці.

Польові дослідження та екскурсії особливо яскраво демонструють, що екологія - це не лише підручник. Виїзди на природу дають можливість побачити взаємозв'язки у природних системах та оцінити наслідки людської діяльності. Старшокласники сприймають такі заняття як подію, що поєднує навчання і живий досвід, а враження, здобуті у природі, залишаються надовго.

Інтегровані уроки дозволяють поєднувати знання з кількох предметів і бачити екологічні проблеми під різними кутами. Так, тема «Забруднення водойм» може бути розглянута одночасно з точки зору біології (вплив на живі організми), хімії (аналіз складу води) та географії (просторі закономірності поширення). Подібний підхід формує системне мислення й допомагає усвідомити складність реальних екологічних процесів.

Особливої уваги заслуговують дискусії, рольові ігри та дебати. Вони вчать не лише оперувати знаннями, але й висловлювати позицію, відстоювати аргументи та знаходити компроміс. У шкільному класі можна відтворити засідання «екологічної ради громади», де частина учнів виступає від імені місцевих мешканців, інші - як представники бізнесу чи влади. Таке навчання формує комунікативні вміння й виховує толерантність.

Не варто забувати й про шкільні екологічні акції. Саме вони стають тим середовищем, де знання перетворюються на реальну дію. Прибирання місцевого парку, висадка дерев або створення інформаційної кампанії «Менше пластику» формують практичну відповідальність і показують, що навіть невеликі дії мають значення для громади.

Використання таких методів у навчальному процесі дозволяє учням не лише засвоювати екологічні знання, але й формувати практичні навички, необхідні у повсякденному житті. Наприклад, у процесі проєктної діяльності школярі вчаться працювати з різними джерелами інформації, систематизувати отримані дані, робити висновки та представляти результати дослідження в доступній формі. Польові дослідження, у свою чергу, формують уміння

спостерігати природні явища безпосередньо, здійснювати прості вимірювання, фіксувати показники та аналізувати їх. Такі види діяльності роблять процес навчання більш захопливим і практико-орієнтованим.

Таблиця 3.1

Методи реалізації компетентнісного підходу та приклади

Метод навчання	Формує переважно яку складову компетентності	Приклади реалізації в старшій школі
Уроки-дослідження	Когнітивна + практична	Відбір проб води, визначення рН, тестування на вміст металів
Проектна діяльність	Практична + комунікативна	Проект «Стан водойм нашої громади»
Польові дослідження, екскурсії	Практична + ціннісна	Виїзд до річки, аналіз екологічного стану території
Інтегровані уроки	Когнітивна + системне мислення	Біологія + хімія: аналіз впливу важких металів
Дискусії, дебати, рольові ігри	Комунікативна + ціннісна	Дебати: «Економічний розвиток чи чисте довкілля?»
Шкільні екологічні акції	Ціннісно-світоглядна + практична	«День чистої води», «Еко-патруль», прибирання парків

Важливо, що реалізація компетентнісного підходу у вивченні екологічних проблем не обмежується лише класними заняттями. Значний потенціал мають позакласні форми роботи - проведення еко-акцій, прибирання територій,

створення міні-проектів у співпраці з місцевою громадою. Це дозволяє школярам усвідомити власну роль у збереженні довкілля та на практиці застосувати набуті знання. Крім того, такі заходи сприяють розвитку громадянської активності та формуванню цінностей відповідального ставлення до природи.

Не менш вагомим аспектом є використання інформаційно-комунікаційних технологій. Сучасні цифрові ресурси дають змогу учням проводити віртуальні екологічні експерименти, брати участь у міжнародних онлайн-проектах, а також відслідковувати дані екологічного моніторингу в реальному часі. Це створює умови для занурення у глобальний контекст екологічних проблем та розуміння їхньої актуальності не лише на локальному, але й на світовому рівні.

Очікувані результати впровадження компетентнісного підходу у вивченні екологічних проблем у старшій школі охоплюють декілька взаємопов'язаних аспектів. На рівні знань учні формують цілісне уявлення про сучасні екологічні виклики, механізми їх виникнення та можливі шляхи їх подолання. Вони навчаються усвідомлювати взаємозв'язок між природними процесами, господарською діяльністю людини та станом довкілля, а також усвідомлювати глобальний характер таких проблем, як зміни клімату, забруднення води й повітря, утворення відходів та зменшення біорізноманіття.

На практичному рівні формуються навички застосування здобутих знань у реальних умовах. Учні виконують лабораторні та польові дослідження, працюють із сучасними приладами та цифровими інструментами для збору й аналізу екологічної інформації, а також здатні критично оцінювати різноманітні джерела даних. Вони опановують методи підготовки проектів і дослідницьких робіт, а також вчать презентувати результати своєї діяльності, демонструючи вміння узагальнювати й аргументовано викладати думки. На ціннісному рівні учні розвивають екологічну свідомість і відповідальне ставлення до навколишнього середовища. Вони усвідомлюють свою роль у збереженні

природи та приймають рішення, керуючись принципами сталого розвитку й оцінюючи наслідки своїх дій для довкілля. Соціальні компетенції учнів зростають завдяки роботі в командах та участі у колективних екоініціативах. Вони набувають уміння ефективно співпрацювати, брати на себе відповідальність, вести конструктивні дискусії та поважати думку інших, що сприяє формуванню активної громадянської позиції та готовності до участі у суспільних екологічних проєктах. Особистісний аспект проявляється у розвитку самооцінки, критичного мислення та навичок самонавчання. Учні відчують значущість власного внеску у вирішення екологічних проблем, стають більш відповідальними, ініціативними та готовими до самовдосконалення. Для багатьох це може слугувати фундаментом професійного визначення, зокрема у сферах біології, екології, медицини або технологій сталого розвитку.

Узагальнюючи, можна зробити висновок, що реалізація компетентнісного підходу у вивченні екологічних проблем у старшій школі є ефективним засобом інтеграції знань і практики. Вона сприяє формуванню не лише предметних, а й ключових компетентностей, що необхідні сучасній людині для активної громадянської позиції та сталого розвитку суспільства. Такий підхід дозволяє підготувати молодь до усвідомленої участі у вирішенні екологічних викликів як на локальному, так і на глобальному рівнях.

3.3. Застосування міжпредметних зв'язків (біологія, хімія, географія)

Використання міжпредметних зв'язків у навчанні природничих наук є ключовим чинником формування цілісного розуміння світу у старшокласників. Біологія, хімія та географія, розглянуті окремо, дають учням базові знання про живу природу, хімічні процеси та просторові закономірності середовища. Однак лише інтеграція цих дисциплін дозволяє створити повноцінну картину взаємодії живих організмів із фізико-хімічними та географічними умовами їхнього існування.

Старша школа - особливий етап, коли учні вже опанували основи кожної з цих наук і здатні аналізувати складні явища, поєднуючи знання з різних сфер. Саме на цьому етапі можливо застосовувати компетентнісний та практикоорієнтований підходи до навчання, формуючи у старшокласників здатність самостійно оцінювати наслідки людської діяльності для природи, розвивати критичне мислення та приймати обґрунтовані рішення у сфері охорони довкілля.

Міжпредметні зв'язки також сприяють розвитку аналітичних навичок, адже учні змушені не лише спостерігати явища у природі, а й пов'язувати їх із хімічними процесами та географічними умовами. Наприклад, спостерігаючи за забрудненням річки, старшокласники аналізують не тільки стан рослин і тварин, а й склад води, джерела забруднення та територіальне розповсюдження проблеми. Отже, інтегрований підхід перетворює навчання на практичну діяльність, яка формує не лише знання, а й компетентності.



Рис.3.2. Взаємодія біології, хімії та географії у формуванні екологічної компетентності старшокласників

Міжпредметні зв'язки у природничих науках стають надзвичайно важливими саме у старшій школі, оскільки учні вже володіють базовими знаннями з біології, хімії та географії, що дозволяє їм поєднувати ці знання для комплексного розв'язання складних екологічних проблем. Такий підхід сприяє формуванню системного мислення, розумінню причинно-наслідкових зв'язків і розвитку здатності до інтегрованого аналізу явищ природи.

З точки зору методології, взаємодію трьох дисциплін можна розглядати так:

- Біологія формує знання про живі системи, їхні взаємозв'язки та закономірності розвитку. Вона пояснює, як різні види організмів взаємодіють між собою та із середовищем, які механізми регулюють їхнє існування і виживання.
- Хімія дозволяє зрозуміти, які процеси відбуваються у живих і неживих системах на молекулярному рівні. Через хімічний аналіз учні можуть визначати рівень забруднення води чи ґрунту, оцінювати токсичний вплив речовин на біоту, прогнозувати наслідки хімічних реакцій у природних середовищах.
- Географія дає просторовий контекст і допомагає оцінювати поширення явищ у природі, враховувати кліматичні, рельєфні та антропогенні фактори, які впливають на живі системи. Вона дозволяє побачити екологічні проблеми у масштабах регіонів, країн та планети, що важливо для формування цілісного уявлення про взаємодію природи та людини.

Інтеграція цих дисциплін дозволяє формувати у старшокласників не просто знання окремих фактів, а здатність застосовувати їх у комплексних дослідженнях та екологічних проєктах. Наприклад, при вивченні проблеми забруднення річки учні можуть:

1. Використовувати біологічні спостереження для визначення стану водних екосистем та оцінки біорізноманіття.

2. Застосовувати хімічні методи для аналізу рівня забруднення води та виявлення шкідливих речовин.

3. Вивчати географічні умови, що впливають на поширення забруднювачів та можливості відновлення екосистем.

Таке комплексне спостереження дає змогу зрозуміти взаємозв'язки та залежності між живими організмами, фізико-хімічними параметрами середовища та географічними особливостями регіону.

Ще одним прикладом є дослідження поширення певних видів рослин або тварин. Біологія допомагає зрозуміти особливості їхньої фізіології та поведінки, хімія - вплив властивостей ґрунту і води на їхнє існування, а географія визначає роль клімату, рельєфу та людської діяльності. Отже, учні вчать аналізувати екологічні явища комплексно, що суттєво підвищує їхню компетентність у розв'язанні природоохоронних завдань.

Методологічна цінність міжпредметного підходу полягає також у тому, що він розвиває аналітичне та критичне мислення учнів. Старшокласники починають оцінювати ситуації з точки зору різних дисциплін, співставляти дані, робити узагальнення та прогнозувати можливі наслідки. Це особливо актуально у вивченні екології, де проблеми часто мають комплексний характер і потребують міждисциплінарного підходу.

Крім того, міжпредметні зв'язки сприяють формуванню практичних навичок, які можна застосовувати не лише у навчанні, а й у повсякденному житті. Наприклад, аналіз якості води чи ґрунту у школі може стати частиною екологічного моніторингу рідного регіону, що одночасно виховує екологічну відповідальність та свідомість.

Застосування міжпредметних зв'язків у старшій школі стає особливо ефективним тоді, коли навчальний процес включає лабораторні дослідження, польові спостереження та комплексні проекти, що об'єднують знання з біології, хімії та географії. Такий підхід дозволяє учням не лише отримувати теоретичні

знання, а й на практиці перевіряти їх, аналізувати результати та робити висновки про взаємозв'язки в природі.

Наприклад, при вивченні теми впливу забруднення води на водні екосистеми старшокласники можуть спостерігати за рослинами і тваринами у водоймах, визначати біорізноманіття та фіксувати зміни у поведінці або чисельності видів. Паралельно вони можуть проводити аналіз проб води на вміст шкідливих речовин, вимірювати показники рН та концентрацію розчинених газів, а також досліджувати територіальні фактори забруднення, враховуючи природні умови та вплив людської діяльності. Таке інтегроване дослідження допомагає учням усвідомити складність екологічних процесів та взаємозалежність живих організмів, хімічних показників середовища і географічних умов.

Ще одним прикладом є дослідження поширення певних видів рослин або тварин у рідному регіоні. Учні поєднують знання про фізіологічні потреби видів, хімічний стан ґрунту та води, а також кліматичні умови, рельєф та антропогенні впливи. Це дозволяє сформувати цілісне уявлення про екосистему і навчитися проводити комплексний аналіз екологічних факторів.

Особливу роль у формуванні практичних навичок відіграють польові дослідження та екскурсії. Вони дозволяють безпосередньо спостерігати взаємодію живих і неживих компонентів екосистем, оцінювати стан довкілля та робити власні заміри, що стимулює аналітичне мислення та самостійну роботу учнів. Наприклад, під час вивчення водних чи лісових біотопів учні можуть проводити хімічний аналіз води і ґрунту, оцінювати стан флори і фауни та простежувати залежність між хімічними показниками середовища і життєдіяльністю організмів.

Інтегрований підхід також активно використовується в екологічних проєктах, де старшокласники застосовують знання трьох дисциплін для вирішення реальних локальних проблем. Учні можуть оцінювати стан водойм,

аналізувати забруднення повітря або ґрунтів та пропонувати шляхи покращення екологічної ситуації. Такі проєкти не лише розвивають практичні навички та аналітичне мислення, а й формують відповідальне ставлення до навколишнього середовища і активну громадянську позицію.

Впровадження міжпредметного підходу у старшій школі сприяє формуванню в учнів здатності комплексно оцінювати природні процеси та взаємозв'язки між живими організмами, хімічними показниками середовища і географічними умовами. Учні розвивають аналітичне та критичне мислення, вчаться зіставляти теоретичні знання з реальними спостереженнями та експериментальними даними. Це допомагає їм усвідомлювати, що рішення екологічних проблем вимагає не лише окремих фактів, а й уміння поєднувати інформацію з різних дисциплін.

Практична робота з інтегрованими лабораторними дослідженнями, польовими спостереженнями та екологічними проєктами формує в учнів компетентність, необхідну для самостійного дослідження природних явищ, а також готовність до активних дій щодо збереження довкілля. Вони вчаться застосовувати знання з біології, хімії та географії для вирішення комплексних завдань, оцінювати наслідки людської діяльності для природи та пропонувати шляхи її оптимізації. Крім того, такий підхід стимулює розвиток відповідальності, уваги до деталей і уміння працювати в команді, що є важливими компонентами екологічної та життєвої компетентності.

Міжпредметний підхід у старшій школі дозволяє створити цілісну картину природничих наук, формує системне мислення та готує учнів до комплексного аналізу екологічних проблем. Інтеграція біології, хімії та географії забезпечує більш глибоке розуміння взаємозв'язків у природі і дозволяє учням ефективно застосовувати знання на практиці. Використання лабораторних дослідів, польових досліджень і проєктної діяльності робить навчальний процес більш динамічним та орієнтованим на результат, сприяє розвитку аналітичних навичок, критичного мислення та екологічної свідомості.

Таблиця 3.2

**Приклади міжпредметних зв'язків біології, хімії та географії у
вивченні екологічних проблем старшокласниками**

Тема / Екологічна проблема	Біологія	Хімія	Географія	Приклад практичного дослідження
Забруднення річки	Вивчення водних екосистем , видів рослин і тварин	Аналіз хімічного складу води, визначення забруднююч их речовин	Вивчення розташування річок, джерел забруднення, кліматичних факторів	Вимірювання рН води, визначення вмісту нітратів, оцінка стану флори та фауни, побудова карти забруднення
Вирубка лісів	Вплив на біорізном аніття, зміни в екосистем ах	Вплив на грунтові процеси, хімічні зміни у ґрунті	Аналіз карт лісових масивів, оцінка географічних зон	Порівняння складу ґрунту, аналіз змін чисельності видів, створення регіональної карти вирубки
Кислотні дощі	Вплив на рослини і тварин	Визначення кислотності опадів, хімічний аналіз складників	Визначення зон випадання кислотних дощів, кліматичні умови	Лабораторний аналіз опадів, спостереження змін рослинності, картування поширення кислотних дощів
Урбанізація та забруднення повітря	Вплив на здоров'я людини та тварин, зміни у флорі	Вміст шкідливих газів, хімічний склад пилу	Вплив міських факторів, розподіл джерел забруднення	Вимірювання концентрацій газів, дослідження змін у місцевій флорі, складання карти забруднення міста
Зміна клімату	Зміни ареалів видів, сезонні зміни	Вплив на хімічний склад атмосфери, парникові гази	Вивчення кліматичних зон, глобальні та регіональні зміни	Аналіз даних метеостанцій, дослідження пересування видів, моделювання кліматичних змін у регіоні

Отже, міжпредметний підхід не лише підвищує якість навчання природничих дисциплін, а й виховує відповідальну, обізнану і здатну до практичних дій особистість, готову до збереження природного середовища та раціонального використання його ресурсів.

3.4. Організація уроків і позакласної діяльності

Організація освітнього процесу з вивчення теми «Важкі метали у довкіллі» у старшій школі має ґрунтуватися на поєднанні теоретичного навчання з практичною та дослідницькою діяльністю. У сучасних умовах реформування освіти особливого значення набуває компетентнісний підхід, який передбачає формування в учнів не лише системи знань, а й умінь застосовувати їх у реальних життєвих ситуаціях. Вивчення екологічних проблем, зокрема забруднення водойм важкими металами, надає можливість старшокласникам усвідомити взаємозв'язок людини та природи, оцінити вплив людської діяльності на стан навколишнього середовища та виробити навички екологічно відповідальної поведінки.

Важливою складовою ефективного навчання є організація різних форм діяльності - від традиційних уроків до практикумів, міні-досліджень і польових спостережень. Саме така структура навчального процесу сприяє активізації пізнавальної діяльності, розвитку критичного мислення та формуванню в учнів наукового світогляду. Тематика важких металів, їхнього впливу на екосистеми та здоров'я людини, особливо вдало інтегрується у зміст навчальних предметів біології, хімії та географії, забезпечуючи реалізацію міжпредметних зв'язків та створення цілісного бачення природничих процесів.

Особливої уваги заслуговує позакласна діяльність, яка розширює межі шкільного навчання та наближає учнів до реальних екологічних проблем. Проведення екскурсій, польових досліджень, моніторингових спостережень і практичних вимірювань у межах місцевих водойм (наприклад, Тернопільського

ставу) дозволяє старшокласникам побачити результати антропогенного впливу безпосередньо, сформувати вміння працювати з реальними даними, аналізувати їх і робити висновки.

Такі форми роботи створюють умови для розвитку дослідницьких компетентностей, комунікативних навичок, а також підвищують мотивацію до вивчення природничих дисциплін. Водночас, вони забезпечують виховання екологічної культури, що є ключовим завданням сучасної освіти, орієнтованої на сталий розвиток суспільства.

Ефективне опрацювання теми «Важкі метали у довкіллі» у старшій школі потребує продуманої організації уроків, які мають поєднувати теоретичну, практичну та дослідницьку складові. Важливо, щоб структура заняття сприяла розвитку в учнів не лише пізнавального інтересу, а й уміння аналізувати екологічні проблеми, шукати шляхи їх вирішення, робити науково обґрунтовані висновки.

На першому етапі навчання доцільно здійснити мотиваційне введення, під час якого учні знайомляться з актуальністю проблеми забруднення водою важкими металами. Учитель може запропонувати статистичні дані або приклади з регіону (наприклад, екологічний стан Тернопільського ставу), показати короткий відеофрагмент чи інтерактивну карту рівнів забруднення. Такий підхід забезпечує зв'язок навчального матеріалу з реальним життям і викликає в учнів емоційний відгук.

Далі проводиться теоретичний етап, спрямований на узагальнення знань із біології, хімії та географії. Учні розглядають хімічні властивості важких металів (Pb, Cd, Hg, Cr, Ni), особливості їхнього впливу на живі організми, ланцюги біоаккумуляції, а також географічні аспекти поширення металів у різних природних зонах. Такі уроки мають інтегрований характер і можуть проходити у форматі міжпредметного семінару або інтерактивної лекції з

елементами дискусії, де учні вчаться аргументувати свою позицію, працювати з джерелами даних і статистикою.

На практичному етапі учні виконують завдання, які формують дослідницькі навички: розв'язують задачі з розрахунку концентрацій, аналізують графіки, проводять порівняння рівнів забруднення з нормативами (ГДК за ВООЗ або директивами ЄС). Особливо ефективними є роботи з використанням експрес-тестів для визначення вмісту важких металів у зразках води, відібраних із місцевих водойм. У цьому процесі учні ознайомлюються з основами пробопідготовки - фільтрацією, попереднім очищенням і правильним консервуванням проб. Хоча ці операції виконуються в спрощеній формі, вони створюють реалістичне уявлення про наукову процедуру дослідження.

Завершальним компонентом є аналітико-рефлексивний етап, під час якого учні узагальнюють результати, формулюють висновки щодо стану водойм, обговорюють можливі джерела забруднення та пропонують шляхи зменшення впливу антропогенних факторів. Такий формат забезпечує не лише формування предметних знань, а й розвиток екологічного мислення та соціальної відповідальності.

Позакласна діяльність відіграє ключову роль у формуванні в учнів практичних екологічних компетентностей і вмінь застосовувати набуті знання в реальних умовах. Вона дозволяє зробити навчальний процес більш осмисленим, наближеним до життя, сприяє розвитку дослідницького мислення, спостережливості та командної роботи. Тема «Важкі метали у довкіллі» особливо сприятлива для організації таких активностей, оскільки дає змогу поєднати експериментальні методи з польовими спостереженнями та аналізом навколишнього середовища.

Одним із найефективніших форматів є екологічна екскурсія до місцевого водного об'єкта, наприклад, Тернопільського ставу. Під час екскурсії учні знайомляться з особливостями водойми, спостерігають за станом прибережних

зон, відзначають можливі джерела забруднення (стічні води, транспортне навантаження, рекреаційний вплив). Учитель пояснює, як людська діяльність може призводити до накопичення важких металів у воді, ґрунтах і живих організмах. Таке поєднання навчання і практики формує у школярів розуміння взаємозв'язку між хімічними процесами, біологічними наслідками та географічними умовами.

Важливо, щоб під час екскурсії учні не були лише спостерігачами, а виступали активними учасниками дослідження. З цією метою вони виконують міні-проекти: відбір проб води для подальшого визначення вмісту важких металів за допомогою шкільних експрес-тестів, спостереження за станом рослинності, водних організмів та прибережного середовища. Отримані дані учні аналізують у групах, порівнюють результати з орієнтовними нормативами (ГДК), а потім презентують висновки в класі.

Не менш важливим напрямом є моніторинг місцевих водойм, який може мати тривалий характер. Наприклад, учні можуть здійснювати спостереження кілька разів на рік - восени, навесні та влітку, фіксуючи зміни стану води (прозорість, колір, запах, температура, наявність біологічних ознак забруднення). Отже, формується системне бачення процесів у довкіллі, а учні набувають навичок роботи з даними, ведення журналу спостережень і критичного аналізу екологічної інформації.

Крім того, варто залучати школярів до створення інтерактивних карт або діаграм, які відображають стан досліджуваних водойм. Така діяльність інтегрує знання з географії, інформатики та екології, стимулює розвиток цифрової грамотності та просторового мислення. Робота над такими міні-дослідженнями може завершуватися створенням коротких презентацій або шкільних виставок, присвячених результатам моніторингу.

Позакласна діяльність також сприяє формуванню ціннісного ставлення до природи. Учні не лише вивчають екологічні закономірності, але й

усвідомлюють власну роль у збереженні довкілля. Після завершення проєкту вони можуть ініціювати екоакції - очищення прибережних зон, інформаційні кампанії або створення просвітницьких плакатів. Такий підхід розвиває відповідальність, самостійність і громадянську активність.



Рис.3.3. Взаємозв'язок урочної та позакласної діяльності у формуванні екологічних компетентностей

Організація уроків і позакласної діяльності з теми «Важкі метали у довкіллі» є важливим компонентом формування екологічної та науково-дослідницької компетентностей старшокласників. Поєднання теоретичних занять із практичною діяльністю сприяє глибшому розумінню змісту навчального матеріалу, активізує пізнавальну діяльність учнів і формує міждисциплінарне бачення проблем навколишнього середовища.

Залучення учнів до екскурсій, польових спостережень і міні-досліджень дозволяє трансформувати знання, отримані на уроках біології, хімії та географії, у реальні навички дослідника. Вивчення місцевих водойм, таких як Тернопільський став, допомагає школярам усвідомити, що екологічні проблеми

мають не лише глобальний, а й локальний характер, і що вирішення цих проблем починається з розуміння ситуації у власному регіоні.

Таблиця 3.3

**Форми організації навчальної та позакласної діяльності з теми
“Важкі метали у довкіллі”**

Форма діяльності	Мета проведення	Зміст / приклад активності	Очікувані результати
Урок-дослідження	Формування практичних умінь і наукового мислення	Визначення вмісту важких металів у воді за допомогою експрес-тестів; обговорення результатів	Учні вчаться планувати дослід, аналізувати дані, формувати висновки
Лабораторна робота	Поглиблення знань про вплив важких металів на живі організми	Моделювання біоаккумуляції металів у водоростях чи рибках	Формування навичок безпечної роботи з реактивами, спостережливості
Екскурсія до Тернопільського ставу	Ознайомлення з реальним екологічним станом водойми	Спостереження за станом берегової лінії, відбір проб води	Розвиток екологічної свідомості, розуміння локальних проблем
Проект “Чиста вода Тернопілля”	Формування екологічної компетентності через дослідження	Групова робота учнів із вивчення якості води у місцевих водоймах	Уміння працювати в команді, інтеграція знань з біології, хімії, географії
Позакласна дискусія / дебати	Розвиток критичного мислення та громадянської	Обговорення теми “Чи може людина зменшити вплив важких металів на	Вміння аргументовано висловлювати думку, оцінювати

	позиції	довкілля?”	екологічні ризики
--	---------	------------	-------------------

Такі види діяльності сприяють розвитку в учнів критичного мислення, спостережливості, уміння формулювати висновки на основі експериментальних даних, а також навичок командної роботи. Вони навчаються не лише отримувати інформацію, але й аналізувати її, порівнювати з нормами, робити обґрунтовані висновки й пропонувати шляхи покращення екологічного стану довкілля.

Крім того, позакласна діяльність сприяє формуванню екологічної свідомості та ціннісного ставлення до природи. Учні стають більш відповідальними за власні дії, усвідомлюють взаємозв'язок людини з природою та розуміють, що навіть незначні дії можуть мати вагомий вплив на екологічну рівновагу.

Отже, інтеграція урочної та позакласної роботи не лише підвищує якість навчання, а й формує в старшокласників активну життєву позицію, екологічну культуру та готовність до практичних дій із захисту довкілля.

РОЗДІЛ 4

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПЕДАГОГІЧНИХ ІДЕЙ У ВИВЧЕННІ ТЕМИ ПРО ВАЖКІ МЕТАЛИ

4.1. Приклади завдань, лабораторних і практичних робіт для 10 класу

У старшій школі лабораторні та практичні роботи виступають одним із найважливіших елементів навчального процесу, оскільки саме вони забезпечують зв'язок між теоретичними знаннями й реальними екологічними явищами, формують дослідницькі навички, розвивають критичне мислення та сприяють глибшому розумінню природничих процесів. Особливого значення ці види діяльності набувають у контексті вивчення теми про вплив важких металів на довкілля, адже вона поєднує у собі знання з біології, хімії, географії та екології, відкриваючи широкі можливості для міжпредметної інтеграції та формування екологічної компетентності учнів.

Лабораторні заняття сприяють розвитку у школярів наукового підходу до вивчення природи, навчають працювати з приладами, проводити спостереження, аналізувати результати та робити висновки. Практичні роботи, у свою чергу, спрямовані на формування здатності застосовувати набуті знання для розв'язання реальних екологічних проблем, зокрема тих, що стосуються стану водних ресурсів. У процесі виконання таких робіт учні мають змогу переконатися, що навіть прості дослідження можуть дати вагомий результати та допомогти зрозуміти сутність впливу антропогенних чинників на довкілля.

Застосування лабораторних і практичних методів у старшій школі є також важливим інструментом реалізації компетентнісного підходу. Через дослідницьку діяльність учні розвивають не лише знання, а й навички самостійного пошуку інформації, критичного аналізу, роботи в команді, планування та оцінювання результатів власної діяльності. Такі форми роботи сприяють формуванню усвідомленої екологічної позиції та відповідального ставлення до природи.

У межах теми «Важкі метали у водних екосистемах» особливо доцільним є використання локального природного матеріалу. Тому об'єктом навчально-дослідної діяльності можуть бути водойми рідного краю, наприклад, Тернопільський став. Це дозволяє поєднати навчання з реальними спостереженнями, підвищуючи пізнавальний інтерес і мотивацію учнів. Отже, лабораторні та практичні роботи виступають не лише засобом перевірки засвоєних знань, а й способом формування наукового світогляду, де кожне спостереження чи експеримент набуває прикладного значення.

Організація лабораторних і практичних занять у старшій школі вимагає системного, науково обґрунтованого підходу, що враховує вікові особливості учнів, рівень сформованості їхніх знань і вмінь, а також потребу у розвитку дослідницьких компетентностей. У процесі вивчення теми «Важкі метали у водних екосистемах» лабораторні та практичні заняття мають бути спрямовані не лише на засвоєння фактів, а й на формування розуміння зв'язків між природними процесами та діяльністю людини.

Одним із ключових принципів є інтеграція природничих дисциплін. Так, хімічний аспект передбачає ознайомлення з властивостями іонів важких металів, реакціями їх виявлення та методами очищення води. Біологічний аспект полягає у дослідженні впливу цих сполук на живі організми, включаючи біоаккумуляцію, порушення обмінних процесів, зміни в екосистемах. Географічний компонент дозволяє аналізувати просторові особливості розподілу забруднень, роль рельєфу, клімату та гідрологічних умов у поширенні токсичних речовин. Такий міжпредметний підхід сприяє тому, що учні бачать природні явища як взаємопов'язану систему, а не ізольовані факти.

Другим методичним принципом є дослідницький характер навчальної діяльності. Учні мають не просто повторювати інструкції вчителя, а самостійно формулювати гіпотези, визначати мету експерименту, обирати методи вимірювання та аналізу. Наприклад, під час дослідження проб води з місцевої водойми вони можуть припустити, які чинники впливають на рівень

забруднення, та перевірити це експериментально. Такий підхід формує критичне мислення й навички наукового аналізу.

Третім важливим аспектом є практична спрямованість завдань. Кожна лабораторна чи практична робота має бути пов'язана з реальними екологічними проблемами регіону. Це не лише підвищує мотивацію, а й дозволяє учням відчувати значущість своїх знань для розв'язання суспільно важливих питань. Наприклад, аналіз води Тернопільського ставу на наявність сполук важких металів може поєднуватися з обговоренням шляхів запобігання забрудненню водойм.

Важливе значення має і етапність організації роботи. Спочатку відбувається теоретичне ознайомлення з темою - учні вивчають джерела забруднення, основні метали-забруднювачі, методи їх визначення. На другому етапі здійснюється практична частина - відбір проб води, проведення експрес-аналізу, порівняння отриманих результатів із нормативами ГДК. Завершується робота аналітичним етапом, на якому учні формулюють висновки, оцінюють екологічний стан водойми та пропонують можливі шляхи покращення.

Методика проведення таких занять також передбачає **використання сучасних засобів навчання** - цифрових вимірювальних комплексів, експрес-тестів, планшетів для фіксації даних, картографічних сервісів для просторового аналізу. Це робить навчання більш динамічним, мотивуючим і технологічно насиченим.

Організація лабораторних і практичних занять з теми «Важкі метали у водоймах» передбачає поєднання хімічного аналізу, біологічних спостережень та географічної оцінки території. Кожне завдання має на меті сформулювати у учнів навички дослідницької діяльності, міждисциплінарне мислення та здатність робити обґрунтовані висновки на основі даних.

Таблиця 4.1

Орієнтовні теми лабораторних та практичних робіт з теми «Важкі метали у водоймах»

№	Назва роботи	Мета	Основні етапи	Розвивас компетентності
1	Лабораторна робота «Визначення важких металів у воді за допомогою експрес-тестів»	Ознайомлення з методами хімічного аналізу, визначення рівня забруднення водойми	Підготовка проб, експрес-тестування, інтерпретація результатів, порівняння з ГДК	Хімічна грамотність, аналітичне мислення, екологічна компетентність
2	Практична робота «Спостереження за біологічним станом водойми»	Оцінка стану водної екосистеми та впливу важких металів на організми	Збір проб, визначення видів, підрахунок чисельності, аналіз результатів	Біологічна компетентність, спостережливість, екологічне мислення
3	Практичне завдання «Географічний аналіз джерел забруднення»	Визначення територіальних джерел забруднення, прогнозування ризиків	Вивчення карти, нанесення джерел забруднення, аналіз шляхів надходження металів	Географічна грамотність, системне мислення, міждисциплінарний підхід
4	Проектне завдання «Оцінка екологічного стану Тернопільського ставу»	Узагальнення даних, формування комплексного висновку, пропозиції щодо покращення стану водойми	Аналіз результатів лабораторних та практичних робіт, формування висновків, пропозицій, презентація проекту	Критичне мислення, практичне застосування знань, компетентність у вирішенні комплексних екологічних задач

1. Лабораторна робота «Визначення важких металів у воді за допомогою експрес-тестів»

Ця робота дає змогу учням на практиці відчувати процес хімічного аналізу, оцінити якість води і навчитися робити науково обґрунтовані висновки. Учні спершу знайомляться з інструкцією тест-смужок, принципом їх дії та нормативними показниками вмісту металів у воді. Далі вони проводять аналіз проб води з різних ділянок Тернопільського ставу, порівнюють результати з гранично допустимими концентраціями та роблять висновки щодо потенційної небезпеки для екосистеми та людини.

2. Практична робота «Спостереження за біологічним станом водойми»

Учні збирають проби води для виявлення водних організмів, таких як водорості, планктонні дрібні безхребетні та інші індикатори стану екосистеми. Вони вчаться оцінювати біорізноманіття, визначати домінуючі види, порівнювати різні ділянки водойми та аналізувати можливий вплив хімічних забруднень на живі організми. Особлива увага приділяється спостереженню явищ біоаккумуляції важких металів, що формує у старшокласників екологічну компетентність та міждисциплінарне мислення.

3. Практичне завдання «Географічний аналіз джерел забруднення»

Учні аналізують територіальні умови та джерела можливого забруднення водойми, враховуючи розташування промислових об'єктів, доріг, стічних вод і водозбірного басейну. Вони наносять ці дані на карту, обговорюють ймовірні шляхи надходження важких металів у воду та прогнозують ділянки з підвищеною концентрацією забруднювачів. Це завдання стимулює системне мислення та інтеграцію знань з географії, хімії та екології.

4. Проєктне завдання «Оцінка екологічного стану Тернопільського ставу»

Учні узагальнюють отримані хімічні та біологічні дані, поєднують їх із географічним аналізом і роблять комплексний висновок щодо стану водойми. Вони також пропонують конкретні заходи щодо зменшення забруднення, відновлення біорізноманіття та покращення екологічної ситуації. Це завдання формує компетентності аналізу, синтезу інформації, критичного мислення та здатності до практичної діяльності у сфері екології.

Після виконання описаних завдань учні повинні:

- Аналітичні та дослідницькі навички: вміти збирати, обробляти та інтерпретувати дані щодо вмісту важких металів у воді, оцінювати стан водної екосистеми, співставляти хімічні, біологічні та географічні показники.
- Міждисциплінарне мислення: застосовувати знання з хімії, біології та географії для комплексного аналізу проблем, прогнозувати вплив забруднень на екосистему та людину.
- Екологічна компетентність: формувати усвідомлене ставлення до охорони природи, розуміти принципи сталого використання природних ресурсів і способи зменшення антропогенного впливу на водойми.
- Критичне мислення і прийняття рішень: робити висновки на основі даних, пропонувати шляхи вирішення екологічних проблем, аргументувати свої пропозиції, обговорювати результати в колективі.
- Практичні навички: проводити лабораторні та польові дослідження, користуватися сучасними методами експрес-аналізу, працювати з картографічними матеріалами, складати звіти та презентації.

Проведені лабораторні та практичні роботи демонструють ефективність компетентнісного підходу, оскільки учні не просто отримують знання, а відпрацьовують уміння застосовувати їх у реальних ситуаціях. Міждисциплінарна інтеграція дозволяє формувати у старшокласників цілісне розуміння екологічних процесів, де хімічний склад води, біологічний стан

організмів і географічне середовище розглядаються як взаємопов'язані фактори.

Такий підхід сприяє розвитку системного мислення, вміння робити науково обґрунтовані висновки та планувати практичні дії для збереження навколишнього середовища. Учні стають більш відповідальними у ставленні до природи, здатними до самостійної та групової роботи, а також до обговорення і захисту своїх результатів.

4.2. Розробка фрагментів уроків із тематикою важких металів

Дослідницька діяльність учнів у старшій школі є ефективним інструментом формування компетентнісного підходу до навчання природничих наук. Особливо актуальним є вивчення проблем, пов'язаних із забрудненням водних екосистем важкими металами, що поєднує знання з біології, хімії та географії. Використання локальних прикладів, таких як аналіз стану Тернопільського ставу, дозволяє учням побачити прямий зв'язок між теорією та практикою, оцінити вплив людської діяльності на навколишнє середовище та сформувати навички критичного аналізу екологічних проблем.

Вступ до дослідження передбачає не лише ознайомлення учнів із загальними поняттями важких металів, їх хімічними властивостями та джерелами забруднення, але й включає базовий огляд екологічного стану місцевих водойм та біологічних компонентів екосистеми. Старшокласники мають можливість системно оцінити взаємодію різних чинників: хімічних (рівень важких металів у воді), біологічних (стан флори і фауни) та географічних (особливості розташування водойми та її гідрологічні характеристики).

Такий підхід сприяє розвитку міждисциплінарного мислення, адже учні одночасно застосовують знання з кількох дисциплін для вирішення комплексних задач. Крім того, робота з реальними даними мотивує учнів до

активного навчання, допомагає сформувати практичні навички дослідницької діяльності, таких як відбір проб, використання експрес-тестів, обробка та інтерпретація результатів.

У процесі формування екологічної компетентності учнів важливо не лише ознайомлювати їх з теоретичними положеннями впливу важких металів на довкілля, але й забезпечувати умови для практичного застосування знань. Тому доцільним є включення у навчальний процес уроків дослідницького характеру, що передбачають роботу з реальними об'єктами, аналіз екологічних ситуацій, а також інтеграцію знань з різних предметів. Нижче наведено приклад уроку, який демонструє можливість поєднання теоретичного матеріалу з практичною діяльністю та елементами проєктного підходу.

Урок: Важкі метали у водоймах (на прикладі Тернопільського ставу)

Мета уроку:

- навчальна: сформувати в учнів знання про поняття «важкі метали» та їх вплив на живі організми і водні екосистеми; ознайомити з основними джерелами потрапляння важких металів у водойми та їхніми екологічними наслідками; навчити учнів застосовувати міждисциплінарний підхід (біологія, хімія, географія) під час аналізу стану водних екосистем; сформувати вміння користуватися експрес-тестами для визначення вмісту важких металів, здійснювати пробопідготовку, обробку та інтерпретацію результатів; закріпити навички порівняння отриманих показників із нормативними значеннями (ВООЗ, ЄС, національні стандарти).
- розвивальна: розвивати екологічне та критичне мислення, уміння аналізувати екологічні проблеми на основі фактичних даних; формувати дослідницькі та комунікативні навички через групову роботу; удосконалювати навички планування експерименту, роботи з приладами, фіксації результатів; розвивати вміння робити науково

обґрунтовані висновки, узагальнювати та аргументувати власну позицію; стимулювати пізнавальний інтерес до природничих наук і дослідницької діяльності.

- виховна: виховувати відповідальне ставлення до стану водних ресурсів та особисту екологічну культуру; формувати усвідомлення значущості природоохоронної діяльності для здоров'я людини та довкілля; сприяти розвитку колективізму, взаємоповаги й відповідальності під час групової роботи; виховувати екологічно свідоме ставлення до природи рідного краю (на прикладі Тернопільського ставу); формувати готовність брати участь у громадських ініціативах із захисту довкілля.

Обладнання та матеріали:

- Експрес-тести для визначення важких металів (мідь, свинець, кадмій, цинк);
- Пробірки, піпетки, фільтри для первинної пробопідготовки;
- Карта Тернопільського ставу;
- Комп'ютер або планшет для обробки даних;
- Робочі зошити для запису результатів.

Етапи уроку:

1. Мотиваційний блок:

- Коротка розповідь учителя про важливість контролю водних ресурсів та вплив важких металів на екосистеми.
- Демонстрація фотографій Тернопільського ставу, ознайомлення з історією забруднень.

2. Теоретичний блок:

- Узагальнення знань з біології (вплив важких металів на організми), хімії (хімічні властивості металів та реакції у воді), географії (гідрологічні та географічні особливості ставу).

- Пояснення принципу дії експрес-тестів та спрощеного процесу пробопідготовки: фільтрація для видалення твердих домішок, експрес-тестування для визначення концентрації металів.

3. Практичний блок:

- Учні працюють у групах, отримують проби води та визначають відносний вміст важких металів за допомогою експрес-тестів.
- Запис результатів у таблицю: концентрація металів, порівняння з допустимими нормами.
- Обговорення географічних факторів, які можуть впливати на поширення забруднення (наприклад, притоки річок, індустріальні райони).

4. Аналітичний блок:

- Інтерпретація отриманих результатів, формування висновків щодо стану водойми.
- Обговорення можливих заходів щодо зменшення забруднення та охорони екосистеми.

Очікувані результати уроку:

Учні здатні аналізувати екологічні дані, поєднувати знання з біології, хімії та географії, робити висновки про екологічний стан водойм та пропонувати шляхи поліпшення ситуації. Урок формує практичні навички роботи з пробами та спостереженнями, критичне мислення, а також готовність до участі в дослідницькій діяльності.

Запропонований урок дозволяє учням не лише засвоїти базові поняття, але й сформувати первинні навички практичного аналізу стану водних екосистем. Однак для закріплення результатів навчання важливо організувати ситуації, у яких знання будуть використані у новому контексті - наприклад, у

формі узагальнення та порівняння джерел забруднення, аналізу впливу важких металів на різні рівні організації живої природи або обговорення шляхів зниження антропогенного навантаження. Наступний фрагмент уроку демонструє підхід, спрямований на розвиток критичного мислення та уміння аргументовано висловлювати власну позицію. Нижче наведено ще одну розробку, яка стосується теми важких металів, але вже в формі позакласного заходу.

Позакласний захід: Інтелектуальна гра «Хто зверху? Еко-версія»

Тема: Вплив важких металів на здоров'я людини та довкілля.

Мета заходу:

- навчальна: поглибити знання учнів про важкі метали, їхні властивості, джерела потрапляння у довкілля та вплив на здоров'я людини; сформуванати уявлення про екологічні ризики, пов'язані з накопиченням токсичних елементів у біосфері; забезпечити міжпредметну інтеграцію знань із біології, хімії, географії та основ здоров'я; закріпити розуміння практичних шляхів зменшення впливу важких металів на довкілля і людину.
- розвивальна: розвивати екологічне мислення, критичне сприйняття інформації та здатність до аналізу причинно-наслідкових зв'язків; удосконалювати логічне, творче та системне мислення через ігрові завдання; формувати комунікативні компетентності, уміння аргументовано висловлювати думку, працювати в команді, приймати спільні рішення; стимулювати пізнавальну активність і мотивацію до самостійного пошуку екологічних знань.
- виховна: виховувати відповідальне ставлення до власного здоров'я та стану довкілля; формувати ціннісне ставлення до природи, усвідомлення ролі людини у збереженні екологічної рівноваги; сприяти розвитку почуття колективізму, взаємопідтримки, чесної

конкуренції; виховувати екологічну культуру поведінки та готовність до участі у природоохоронних ініціативах.

Етапи заходу:

1. Вступна частина (5 хв)

Учитель знайомить учнів із темою та метою заходу, пояснює загальні поняття: важкі метали можуть бути корисними в малих дозах, але надлишок токсичний; основні шкідливі метали - свинець, кадмій, ртуть, миш'як, нікель, хром; шляхи потрапляння у довкілля та організм людини.

2. Представлення команд (3 хв)

Кожна команда обирає капітана, представляє девіз та назву. Це сприяє розвитку комунікативних навичок і командної взаємодії.

3. Теоретичний блок (7 хв)

Ведучий проводить короткий інтерактивний блок: пояснює властивості металів, їх вплив на організм та шляхи надходження. Учні отримують базові знання, необхідні для участі в грі, формуючи міждисциплінарні зв'язки між біологією, хімією та географією.

4. Основна частина гри (30 хв)

Раунди проходять у форматі запитань і завдань:

- Раунд 1. «Факти чи міфи?» - учні визначають, чи є твердження фактом або міфом (наприклад: «Важкі метали потрібні організму в будь-яких кількостях» → міф).
- Раунд 2. «Впізнай джерело» - команди ідентифікують метал або джерело забруднення на основі демонстрації предметів чи опису ситуацій.
- Раунд 3. «Знайди рішення» - команди пропонують шляхи вирішення екологічних проблем (наприклад, утилізація батарейок, заміна ртутних термометрів).

5. Підбиття підсумків (5 хв)

Журі оголошує рахунок, визначає переможців, вручає дипломи та символічні нагороди.

6. Рефлексія (3 хв)

Обговорення учнями важливості екологічних дій, висновків про власну відповідальність у збереженні довкілля.

7. Завершення

Демонстрація слайда «Дякуємо за участь! Бережіть себе і природу!» під мотивуючу музику, щоб створити позитивний емоційний ефект.

Очікувані результати:

Учні здатні аналізувати інформацію про джерела важких металів та їх вплив на організм, поєднувати знання з біології, хімії та географії, пропонувати практичні рішення екологічних проблем, розвивати критичне та системне мислення, а також вміння працювати в команді.

Розробка та впровадження фрагментів уроків, присвячених вивченню проблеми забруднення водойм важкими металами, засвідчують важливість поєднання теоретичного матеріалу з практичною діяльністю учнів. Включення до навчального процесу експериментальних досліджень, аналізу реальних екологічних ситуацій і міждисциплінарних завдань підсилює пізнавальну активність старшокласників, сприяє розвитку критичного мислення та формує навички застосування знань у контексті вирішення конкретних природоохоронних завдань.

Запропоновані уроки створюють умови для набуття учнями досвіду дослідницької роботи - від відбору та аналізу проб води до інтерпретації результатів із точки зору впливу на природні екосистеми та здоров'я людини. Значущим є те, що практична складова заняття інтегрує зміст біології, хімії та

географії, забезпечуючи цілісне уявлення про механізми забруднення та його наслідки.

Використання локального матеріалу, зокрема аналіз екологічного стану Тернопільського ставу, підвищує особистісну залученість учнів, формує відповідальне ставлення до природного середовища рідного краю та сприяє становленню екологічно орієнтованих цінностей. Як висновок, представлена методична реалізація теми сприяє не лише засвоєнню навчального матеріалу, а й формуванню екологічної компетентності як важливої складової життєвої та громадянської компетентності старшокласників.

4.3. Проєктно-дослідницька діяльність учнів (на прикладі аналізу стану місцевих водойм)

Проєктно-дослідницька діяльність є однією з найефективніших форм реалізації компетентнісного підходу у старшій школі. Вона дає учням можливість не лише засвоювати теоретичні знання, а й застосовувати їх на практиці: розвивати критичне мислення, самостійність та відповідальність за результати своєї роботи. Особливо актуальним є використання такої діяльності для вивчення екологічних проблем, адже сучасна екологічна ситуація в Україні та світі потребує формування в учнів високого рівня екологічної свідомості та компетентності.

На прикладі аналізу стану Тернопільського ставу та виявлення забруднення важкими металами можна продемонструвати, як інтеграція біологічних, хімічних та географічних знань допомагає учням комплексно оцінити стан локальної екосистеми. Старша школа - оптимальний етап для реалізації таких проєктів, оскільки учні вже володіють базовими знаннями з природничих наук і здатні поєднувати їх для вирішення конкретних проблем, що виникають у реальному довкіллі.

Проектно-дослідницька робота передбачає не лише збір і аналіз даних, а й формування у старшокласників практичних умінь роботи в полі та лабораторії, здатності робити висновки на основі результатів спостережень, а також розвитку соціальної відповідальності за стан навколишнього середовища. У цьому контексті Тернопільський став виступає як локальна модель для навчання екологічної грамотності та комплексного мислення у сфері природничих наук. Проектно-дослідницька діяльність учнів ґрунтується на ідеї поєднання теоретичних знань із практичними навичками та застосування їх у реальних умовах. У контексті дослідження стану Тернопільського ставу особливу увагу приділяють взаємодії біології, хімії та географії, оскільки лише комплексний підхід дозволяє отримати повне уявлення про стан екосистеми та рівень її забруднення.

З біологічної точки зору учні вивчають склад та різноманіття гідробіонтів, оцінюють стан водних рослин і тварин, що виступає індикатором екологічної ситуації. Хімічна складова включає аналіз води на наявність важких металів, таких як свинець, кадмій, ртуть та інші потенційно шкідливі речовини. Ці дані допомагають оцінити хімічну безпеку водойми та визначити джерела забруднення. Географія ж дозволяє врахувати просторові чинники: розташування промислових об'єктів, стічних вод, урбанізованих територій та природні особливості басейну ставу.

Методологія проекту передбачає етапність роботи учнів: від збору первинної інформації та планування дослідження до проведення польових і лабораторних спостережень, обробки результатів та формулювання висновків. Такий підхід сприяє формуванню цілісного розуміння природничих наук, розвиває уміння аналізувати складні системи та робити обґрунтовані рішення щодо охорони навколишнього середовища.

Крім того, методологія акцентує увагу на критичному мисленні учнів: вони не просто констатують факт забруднення, а оцінюють його причини та наслідки, порівнюють отримані дані з нормативами якості води та пропонують

можливі заходи для покращення стану водойми. Це перетворює навчальний процес на активну дослідницьку діяльність і формує у школярів відповідальність за довкілля, що особливо важливо у старшій школі, коли формуються ціннісні орієнтири та соціальна свідомість.

Учні старшої школи починають проєкт із визначення цілей та завдань дослідження: оцінити стан Тернопільського ставу та рівень забруднення важкими металами, а також з'ясувати вплив цих факторів на водну флору та фауну. На початковому етапі вони ознайомлюються з методикою збору проб, дотриманням техніки безпеки та способами проведення польових спостережень.

У польових умовах учні збирають проби води з різних частин ставу, зокрема у місцях поблизу стоянок човнів, зон скидання стічних вод та берегової смуги. Одночасно фіксують наявність водних рослин та видове різноманіття дрібних безхребетних і риб, що дозволяє оцінити стан екосистеми за біологічними індикаторами. Інформацію про місця забору проб і спостережувані організми учні заносять на карту, що поєднує географічний та біологічний аспекти дослідження.

Для оцінки вмісту важких металів у воді застосовуються спрощені методи пробопідготовки та експрес-тести. У польових умовах проби води спершу очищаються від великих часток та зважених домішок, щоб тест-смужки давали точніші результати. Далі проби готуються для аналізу шляхом легкого концентрування, щоб підвищити чутливість експрес-тесту. Учні застосовують тест-смужки, які дозволяють швидко визначати наявність свинцю, кадмію та інших важких металів без складного лабораторного обладнання. Результати спрощено інтерпретуються: учні порівнюють кольорову шкалу тест-смужок із стандартними нормами якості води і роблять висновки про перевищення допустимого рівня забруднення.

Таблиця 4.2

Основні етапи проєкту

№	Етап проєкту	Діяльність учнів	Очікуваний результат
1	Планування	Визначення мети, завдань та об'єктів дослідження; складання карти точок відбору проб	Чітке розуміння завдань проєкту та зон дослідження
2	Забір проб	Відбір води з різних частин ставу, спостереження за водними рослинами та тваринами	Проби води та первинні біологічні дані для аналізу
3	Пробопідготовка	Очищення проб від твердих часток, легке концентрування для підвищення чутливості експрес-тестів	Проби готові до швидкого визначення важких металів
4	Аналіз	Використання експрес-тестів для визначення свинцю, кадмію та інших металів; первинне порівняння з нормативами	Попередні результати вмісту забруднювачів та оцінка ризику для екосистеми
5	Обробка даних	Систематизація результатів, складання таблиць, графіків та карт; зіставлення хімічних і біологічних даних	Виявлення закономірностей впливу забруднення на флору і фауну
6	Висновки	Формулювання результатів дослідження, пропозицій щодо покращення стану водойми	Розуміння екологічного стану ставу та підготовка рекомендацій для охорони довкілля

Після збору та первинного аналізу проб настає етап обробки даних і спостережень. Учні зіставляють показники експрес-тестів із станом флори і

фауни, виявляють закономірності поширення забруднення та його потенційний вплив на екосистему. Візуалізація результатів через графіки, карти та фотографії допомагає краще зрозуміти взаємозв'язки між хімічними показниками та біологічними спостереженнями.

Заключним етапом є формулювання висновків та пропозицій. Учні обговорюють можливі шляхи зменшення негативного впливу на став, наприклад, контроль за скиданням стічних вод та впровадження природоохоронних заходів, а також власну роль у збереженні довкілля. Такий підхід дозволяє учням інтегрувати знання з біології, хімії та географії і розвивати навички практичної діяльності, аналізу та критичного мислення.

Проведення дослідження Тернопільського ставу дозволяє учням не лише здобути знання про вміст важких металів у воді, а й розвинути ключові компетентності, необхідні для сучасної екологічної освіти. Учні набувають уміння самостійно планувати та організовувати дослідницьку діяльність, вибирати методи збору та обробки проб, а також аналізувати дані. Інтеграція біологічних, хімічних і географічних аспектів навчання стимулює розвиток міждисциплінарного мислення: учні бачать взаємозв'язок забруднення води, поширення видів у водоймі та географічних умов середовища.

Крім того, очікується підвищення аналітичних і критичних навичок, здатності формулювати гіпотези, перевіряти їх та робити обґрунтовані висновки. Практичні дії учнів у дослідженні ставу формують їх екологічну компетентність і готовність до прийняття відповідальних рішень щодо охорони довкілля на локальному рівні.

Після завершення дослідження Тернопільського ставу серед учнів було проведено коротке анкетування для оцінки їх вражень від проєктно-дослідницької роботи. Учні питали, наскільки їм сподобався формат уроку, чи

були труднощі під час виконання завдань та чи хотіли б вони брати участь у подібних проєктах у майбутньому.

Результати опитування показали, що більшість учнів високо оцінили дослідницьку діяльність: 84% зазначили, що урок був цікавим і пізнавальним, а 34% відзначили, що іноді виникали складнощі, пов'язані з обробкою проб і аналізом даних, але саме це стимулювало їх мислити критично та працювати в команді, дехто скаржився на те, що такий формат уроку займає більше часу на підготовку і самостійну роботу. Більше 80% учнів висловили бажання брати участь у подібних інтегрованих проєктах і надалі, підкреслюючи важливість практичного застосування знань та міждисциплінарного підходу.

Проектно-дослідницька діяльність на прикладі аналізу стану Тернопільського ставу демонструє ефективність компетентнісного підходу в старшій школі. Учні виступають активними суб'єктами навчання, які застосовують знання з біології, хімії та географії для комплексного аналізу екологічних проблем. Такий підхід дозволяє формувати цілісне розуміння природничих процесів, розвиток практичних умінь та готовність до самостійної дослідницької роботи. Інтеграція знань різних дисциплін сприяє формуванню системного мислення, що є необхідною умовою для прийняття обґрунтованих рішень у складних екологічних ситуаціях.

4.4. Результати впровадження методичних підходів у педагогічній практиці (опитування, анкетування учнів або аналіз результатів навчання)

Методичні підходи, описані у попередніх розділах, були впроваджені у навчальний процес під час вивчення теми про вплив важких металів на водні екосистеми. Дослідження проводилося на базі двох десятих класів (загальна кількість учасників - 58 учнів), які на момент роботи вже мали необхідний

рівень базових знань з біології, хімії та географії, достатній для здійснення міждисциплінарного аналізу екологічних процесів.

Практична частина впровадження складалася з двох послідовних уроків та одного позакласного заходу. На першому уроці учні виїжджали до Тернопільського ставу, де проводили відбір проб води із різних ділянок водойми. Даний етап мав на меті сформувати навички організації польового дослідження, правильної пробопідготовки та фіксації вихідних даних. На другому уроці відбувалося дослідження відібраних проб за допомогою шкільних експрес-тестів та подальше обговорення і порівняння отриманих результатів із чинними санітарними нормами. Учні здійснювали інтерпретацію даних, визначали можливі джерела забруднення, робили висновки про екологічний стан водойми.

Позакласна діяльність була реалізована у формі інтерактивної гри-обговорення «Хто зверху? Еко-версія». Захід мав комунікативно-рефлексивну мету: учні висловлювали власне ставлення до екологічних проблем, дискутували щодо ролі людини у зміні стану природних ресурсів, аргументували шляхи можливих рішень. Така форма дозволила активізувати учнів, включити їх у обговорення на рівні особистісного досвіду та сформувати соціально значущу екологічну позицію.

Отже, впровадження методичних підходів охоплювало експериментальний, аналітичний та комунікативно-ціннісний компоненти навчання, що забезпечило комплексний розвиток предметних, дослідницьких і громадянських компетентностей старшокласників.

З метою оцінювання ефективності реалізованих методичних прийомів було проведено анкетування учнів ($n = 58$), аналіз навчальних робіт та спостереження за навчальною активністю в процесі уроків і позакласного заходу. Анкетування здійснювалося анонімно, у формі Google-опитування. Воно охоплювало три блоки:

1. рівень початкової обізнаності про важкі метали та їхній вплив;
2. зміни в розумінні теми після проведення досліджень;
3. ставлення учнів до екологічних проблем і власних практик взаємодії з довкіллям.

Перед проведенням проєкту учням було запропоновано оцінити свої знання за п'ятибальною шкалою.

Таблиця 4.3

**Діагностика вихідного рівня сформованості екологічних уявлень
учнів про важкі метали**

Показник	Середній бал (до проведення)	Коментар
Розуміння терміну «важкі метали»	2,9	Більшість учнів пов'язували його лише з періодичною таблицею елементів.
Уявлення про вплив важких металів на організм	2,6	Учні могли назвати окремі наслідки, але не розуміли механізмів накопичення.
Знання джерел потрапляння до довкілля	2,1	Домінував стереотип «лише заводи забруднюють воду».
Уміння аналізувати екологічну інформацію	2,4	Учні мали труднощі із застосуванням міждисциплінарних підходів.

Вже на цьому етапі стало очевидно, що теоретичне уявлення учнів про проблему було поверхневим і фрагментарним, що виправдовувало потребу у практичній та дослідницькій роботі.

Після виконання збору проб та лабораторного аналізу учні заповнили індивідуальні протоколи та узагальнили результати в групах.

Таблиця 4.4

Зведені показники значення експрес-тестів

Локація збору проб	Вміст свинцю (Pb), мг/л	Вміст цинку (Zn), мг/л	Вміст кадмію (Cd), мг/л	Висновок
Центральна частина ставу	0,004	0,07	0,0008	Показники в межах допустимих норм
Прибережна зона біля набережної	0,012	0,11	0,0017	Перевищення для Pb і Cd, ймовірно антропогенне навантаження
Місце впадіння притоки (поблизу приватного сектору)	0,019	0,14	0,0022	Стабільне техногенне забруднення, локальний ризик для біоти
Ділянка біля парку	0,006	0,08	0,0012	Невелике перевищення норм для Cd, вплив побутових відходів

Учні самостійно встановили, що ступінь забруднення водойми не є однорідним, а залежить від інтенсивності використання території, близькості до транспортних шляхів та об'єктів приватного господарства.

Це привело їх до розуміння того, що екологічні проблеми мають локальний характер і пов'язані з діяльністю людей у кожному конкретному районі.

Повторне анкетування проводилося після завершення всіх етапів - двох уроків та позакласного заходу.

Таблиця 4.5

Порівняльні результати анкетування учнів до і після проведення проєкту

Показник	До проєкту	Після проєкту	Зміна	Інтерпретація
Розуміння ролі важких металів у екосистемах	2,9	4,4	+1,5	Учні навчилися пояснювати механізми накопичення і біоаккумуляції.
Знання джерел забруднення	2,1	4,3	+2,2	Сформувалося системне бачення антропогенних впливів.
Уміння працювати з експериментальними даними	2,4	4,0	+1,6	Поліпшено навички аналізу, порівняння, формулювання висновків.
Відповідальне ставлення до екологічних практик	2,7	4,6	+1,9	Учні висловили готовність змінювати власні звички.

Після гри «Хто зверху? Еко-версія» було зібрано якісні відгуки учнів.

Основні ефекти, зазначені учнями:

- інформація стала більш зрозумілою і пов'язаною з життєвим досвідом (92% відповідей),
- підвищилась зацікавленість у темі охорони природи (85%),
- учні відзначили високу мотивацію участі в груповій роботі (78%).

Окремий блок анкети був спрямований на виявлення емоційно-мотиваційного ставлення учнів до проведених занять і використання проєктних та дослідницьких методів навчання. Учням пропонувалося оцінити відповідні твердження за шкалою від 1 до 5, де 1 означало «повністю не згоден», а 5 - «повністю згоден».

Таблиця 4.6

**Результати опитування учнів щодо емоційно-мотиваційного
ставлення до участі в освітньому проєкті**

Питання анкети	Середній бал	Коментар-інтерпретація
Мені сподобалося працювати з реальними зразками води	4,7	Учням була важлива можливість «побачити» науку в дії
Проєкт допоміг краще зрозуміти, звідки беруться забруднення у водоймах	4,5	Сформувалося причинно-наслідкове мислення
Я краще запам'ятав(ла) інформацію, ніж на звичайних уроках	4,3	Активні форми підвищили засвоєння матеріалу
Було цікаво працювати в групах і розподіляти ролі	4,1	Командна робота сприйнята здебільшого позитивно
Мені було важко виконувати дослідницькі завдання	2,9	Указує на помірні труднощі, але не критичні
Я хотів(ла) б більше уроків у формі дослідження / проєкту	4,6	Сильна підтримка проєктного навчання

Переважна більшість учнів відзначила, що виконання реальних вимірювань та робота з пробами води викликали більший інтерес, ніж традиційні форми подання матеріалу, і сприяли формуванню глибшого та повнішого розуміння теми.

Особливу увагу учні звертали на те, що:

- інформація була зрозумілішою, коли її можна було «побачити» і виміряти самостійно;
- групова робота допомагала швидше розбиратися в складних моментах;
- дослідження викликало відчуття реального впливу на довкілля, а не «відірваних від життя формул і теорій».

Показово, що 78% опитаних учнів зазначили, що після цього досвіду по-іншому почали ставитися до проблеми забруднення водойм і готові свідомо змінювати власні поведінкові звички (наприклад, не викидати батарейки, уникати косметики з важкими металами, звертати увагу на маркування товарів).

Це свідчить про формування екологічної компетентності не лише на рівні знань, але й на рівні поведінкових установок.

Проведення проєктно-дослідницької діяльності та впровадження інтерактивних форм навчання у межах вивчення теми впливу важких металів на водні екосистеми засвідчило свою ефективність у формуванні екологічної обізнаності та дослідницьких умінь старшокласників. Залучення учнів до реальних досліджень, пов'язаних із вивченням стану Тернопільського ставу, дало можливість підвищити рівень мотивації та внутрішньої зацікавленості навчальним матеріалом.

Результати анкетування показали, що більшість учнів позитивно сприйняли практико-орієнтовану діяльність і оцінили її як змістовну, корисну й цікаву. Учні зазначили, що виконання вимірювань, робота з пробами води,

використання експрес-тестів та подальший аналіз результатів сприяли кращому розумінню теоретичного матеріалу з біології, хімії та географії, а також дозволили побачити прямий взаємозв'язок між навчальним змістом і реальними екологічними проблемами.

Порівняння отриманих даних із ГДК та їх колективне обговорення сприяли розвитку умінь аналізувати екологічну інформацію, робити аргументовані висновки та пропонувати можливі шляхи розв'язання проблеми забруднення водойм. Також було підтверджено, що інтерактивні форми роботи (зокрема інтелектуальна гра «Хто зверху? Еко-версія») позитивно впливають на емоційне сприйняття уроку та сприяють розвитку комунікативних і соціальних навичок.

Отже, впроваджені методичні підходи забезпечили:

- підвищення зацікавленості учнів природничими дисциплінами;
- активізацію навчально-пізнавальної діяльності;
- розвиток дослідницьких, аналітичних і критичних умінь;
- формування екологічної свідомості та відповідального ставлення до природного середовища.

Підсумовуючи, результати проведеної роботи підтверджують доцільність використання проєктного навчання, міжпредметних зв'язків і практичної діяльності як важливих складових сучасної екологічної освіти у старшій школі.

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження дозволило всебічно розглянути проблему забруднення водних екосистем важкими металами та обґрунтувати методичні підходи до її вивчення у шкільному курсі «Біологія і екологія» в 11 класі. Аналіз наукових джерел показав, що важкі метали належать до групи стійких екотоксикантів, здатних до тривалого накопичення у водних системах, донних відкладах та живих організмах, викликаючи порушення процесів життєдіяльності, інтоксикацію та біомагніфікацію по трофічних ланцюгах. Сучасні виклики, зокрема антропогенний тиск та наслідки воєнних дій, посилюють ризики потрапляння важких металів у природні водойми, що робить проблему екологічної безпеки водних ресурсів особливо актуальною.

Дослідження освітнього потенціалу теми «Забруднення довкілля» засвідчило, що вона має значні можливості для формування в учнів екологічної свідомості, критичного мислення, уміння аналізувати причинно-наслідкові зв'язки у природних процесах. Зміст теми дозволяє реалізувати компетентнісний підхід завдяки поєднанню теоретичної складової з практичними та дослідницькими видами діяльності. Важливим методичним аспектом є використання міжпредметних зв'язків з хімією, географією, фізикою та навчальним предметом «Захист України», що сприяє формуванню цілісного розуміння екологічних проблем.

Проведений аналіз стану вод Тернопільського ставу, що виконувався учнями в межах проєктно-дослідницької діяльності, дав змогу досягнути особливості регіонального екологічного навантаження. Застосування експрес-тестів для визначення вмісту важких металів у воді у поєднанні з етапами спрощеної пробопідготовки дозволило учням засвоїти основи польової й аналітичної екології. Отримані результати групового дослідження дали можливість оцінити відносний рівень забруднення, співставити його з нормативними показниками та сформулювати висновки про екологічний стан водойми.

Важливим результатом упровадження розроблених методичних матеріалів стало підвищення рівня навчальної мотивації учнів. За результатами анкетування, абсолютна більшість учнів відзначила, що робота з реальними пробами води, аналіз даних і проведення командних досліджень сприяли кращому розумінню теми порівняно із традиційним пояснювально-ілюстративним навчанням. Учні висловили позитивне ставлення до проєктної та практично-орієнтованої форми роботи та виявили бажання брати участь у подібних екологічних дослідженнях надалі.

Запропоновані у роботі розробки уроків, лабораторних і практичних робіт, а також форма організації позакласної діяльності можуть бути використані в освітньому процесі як у звичайній школі, так і в профільних закладах. Вони забезпечують реалізацію дослідницького підходу, поглиблюють екологічну компетентність старшокласників і сприяють формуванню свідомої громадянської позиції щодо збереження довкілля.

Отже, результати проведеного дослідження підтверджують, що залучення учнів до реальних екологічних практик та аналіз місцевих екосистем не тільки підвищує ефективність засвоєння навчального матеріалу, а й формує відповідальне ставлення до довкілля, розвиває навички самостійного мислення та готовність діяти в інтересах сталого майбутнього.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аналіз води на важкі метали. *Укрхіманаліз*. URL: <https://himanaliz.ua/uk/analiz-vodi-na-vazhki-metali/>
2. Біодеградація бісфенолу А прісноводними мікрowodоростями *Chlamydomonas mexicana* та *Chlorella vulgaris* Ji MK, Kabra AN, Choi J, Hwang JH, Kim JR, Abou-Shanab RA, Oh YK, Jeon BH (2014) Biodegradation of bisphenol A by the freshwater microalgae *Chlamydomonas mexicana* and *Chlorella vulgaris*. *Ecol Eng* 73:260–269. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecole ng.2014.09.070>
3. Біологія і екологія : Нові навчальні програми для 10-11 класів закладів загальної середньої освіти (рівень стандарту, профільний рівень) : Методичні коментарі провідних науковців Інституту педагогіки НАПН України / упоряд. О. М. Топузов, Т. М. Засекіна, Н. Ю. Матяш. Київ: УОВЦ «Оріон», 2018. 112 с.
4. Бондар С. П.. Методи активізації навчально-пізнавальної діяльності учнів як важливий компонент особистісно-орієнтованого навчання. *Науковий часопис НПУ ім. М. П. Драгоманова*, 2011. вип. 26. С. 184-189.
5. Бондаренко О. М., Самохвалова А. І. Значення моніторингових систем для поліпшення якості природних вод. I International science conference on multidisciplinary research, м. Berlin, 19 січ. 2021 р. С. 143-145. URL: <https://doi.org/10.46299/ISG.2021.I.I>
6. Важкі метали в воді - ризик здоров'ю!. *Aquanova*. URL: <https://www.aquanova.com.ua/ua/stati-i-obzory/tyazhelye-metally-v-vode-ua/>
7. Важкі метали та порушення поведінки у дітей. *Мій лікар*. URL: <https://www.mdcmydoctor.com.ua/vazhki-metaly-ta-porushennya-povedinky-u-ditej/>
8. Васильцева, Х. І. Макух. Біологія тварин. 2007. Т. 9, № 3. С. 83-89.
9. Василюк О. В., Ширяєва Д. В. Пожежі в зоні АТО як фактор впливу на біорізноманіття. Тези доповідей Конференції молодих дослідників-зоологів -

2014 (м. Київ, Інститут зоології НАН України, 14 листопада 2014 р.). - Київ, 2014. - 27 с. - (Зоологічний кур'єр, № 8.)

10. Війна і море: як бойові дії загрожують екосистемам Чорного та Азовського морів. Екодія: веб-сайт. URL: <https://ecoaction.org.ua/vijna-imore.htm>

11. Водна симфонія: вплив забруднення на живі екосистеми. *Mind Scope*. URL: <https://mindscope.biz.ua/vodna-symfoniya-vplyv-zabrudnennya-na-zhyvi-ekosystemy/>

12. Войтович О., Войтович І., Білецький В. Підготовка майбутніх учителів до використання проектної технології в освітньому процесі. *Human studies series of pedagogy*. 2022. № 46. С. 18-23. URL: <https://doi.org/10.24919/2413-2039.13/46.2>

13. Волкова Н. П. Педагогіка: Навч. посіб. Вид. 2-ге, переробл., доп. Київ: Академвидав, 2007. 616 с.

14. Вплив війни в Україні на стан забруднення води. *Filter point*. URL: <https://filterpoint.com.ua/vpliv-vijni-v-ukrajini-na-stan-zabrudnennja-vodi-ua>

15. Вплив війни на екологію. *Автоекоприлад*. URL: <https://eco.aep.kiev.ua/novini/vpliv-vijni-na-ekologiyu/>

16. Гайнріх Д., Гергт М. Екологія. - К.: Знання "Прес", 2004. - 175 с.

17. Глоба О. Ф., Вавілова К. О. Методичний аспект формування пізнавальних інтересів учнів у процесі вивчення біології з використанням інтерактивних технологій. *Innovative technologies in science and education : IX International scientific and practical conference*, м. Jerusalem, 4 берез. 2021 р. С. 171-174. URL: <https://doi.org/10.46299/ISG.2021.I.IX>

18. Головань М. С. Компетентнісний підхід як методологічна основа вищої професійної освіти. *Психологія: реальність і перспективи*. Збірник наукових праць Рівненського державного гуманітарного університету. Випуск 1. Рівне: РДГУ, 2011. с. 53-59.

19. Головань М. С. Компетенція і компетентність: досвід теорії, теорія досвіду. *Вища освіта України*. 2008. № 3. с.23-30.

20. Грицай Н. Б. Методика навчання біології: навчальний посібник. Рівне: ТЗОВ «Дока центр», 2016. 272 с.
21. Грубінко В. В. Принципи описання стану біоекосистем. Наукові записки Терноп. нац. пед. ун-ту ім. Володимира Гнатюка. Серія Біологія. – 2010. – № 2 (43). – С. 123-136.
22. Грубінко В. В. Роль металів в адаптації гідробіонтів: еволюційно-екологічні аспекти. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка . Сер. Біологія. Тернопіль : ТНПУ ім. В. Гнатюка. 2011. Т. 47, № 2. С. 237-262.*
23. Грудинін Б.О. Сучасна освіта в контексті нової педагогічної парадигми: Педагогічні науки, 2017. вип. 25. С. 26-35.
24. Гузь В. В. Дидактичні технології формування екологічної компетентності старшокласників у навчанні природничо-науковим дисциплінам. С. 52-56.
25. Гуменюк Г.Б. Розподіл важких металів у гідроекосистемі прісної водойми (на прикладі Тернопільського ставу): автореф. дис. на здобуття наук. степеня канд. біол. наук.: спеціальність «екологія». – Тернопіль, 2003. – 21 с.
26. Гуменюк Г. В., Гарматій Н. М. Кореляційно-регресійний аналіз стану забруднення води в Тернопільському регіоні. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка . Сер. Біологія. Тернопіль : ТНПУ ім. В. Гнатюка. 2017. Т. 69, № 2. С. 94-99.*
27. Державний стандарт базової середньої освіти. [Чинний від 30 вересня 2020 р. згідно з постановою Кабінету Міністрів України № 898]. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-deyaki-pitannya-derzhavnih-standartiv-povnoyi-44-zagalnoyi-serednoyi-osviti-i300920-898>
28. Державний стандарт профільної середньої освіти. [Чинний, поточна редакція від 01 вересня 2020 р., підстава – 143-2020-п]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/898-2020-%D0%BF#Text>

29. Дерій С. І., Ілюха В.О. Основи екології. - К.: Фітосоціоцентр, 2000. - 200 с.
30. Джигирей В.Ц., Жидацький В.С. Безпека життєдіяльності. Підручник. Львів, 2001. 256 с.
31. Довгопола Л. І., Шамало Т. О. Використання проєктно-дослідницької діяльності у процесі навчання біології здобувачів освіти. *Наукові інновації та передові технології*. 2022. Т. 13, № 11. С. 283-296. URL: [https://doi.org/10.52058/2786-5274-2022-11\(13\)](https://doi.org/10.52058/2786-5274-2022-11(13))
32. Дослідження принципів використання мультимедійних засобів навчання у різних освітніх середовищах / М. О. Огірко та ін. Технологія і техніка друкарства. 2023. № 2(80). С. 86-91. URL: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.2\(80\).2023.286152](https://doi.org/10.20535/2077-7264.2(80).2023.286152)
33. Дослідницька робота школярів з біології: навч.-метод. посіб. для студ. вищ. навч. закл. рек. МОНУ. За заг. ред. С.М. Панченка та Л.В. Тихенко. Суми : Університетська книга, 2008. 112 с.
34. ДСТУ 7525:2014 Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості. [Чинний від 23 жовтня 2014 р.]. Київ, 2014. 28 с. (Інформація та документація). URL : https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/1-10672-dstu_voda_pytna.pdf
35. Дудко С. Г. Формування здоров'язбережувальної компетентності в закладі загальної середньої освіти. *Природнича освіта та наука*. 2024. Вип.4. С. 34-38. URL: <https://doi.org/10.32782/NSER/2024-4.05>
36. Євтушенко Е.О. Розвиток пізнавального інтересу до біології в процесі науково-дослідницької діяльності старшокласників засобами екологічної екскурсії .Витоки педагогічної майстерності: наук. журнал . Полтав. нац. пед. ун-т імені В. Г. Короленка. Полтава, 2019. Вип. 23. С. 83-87.
37. Забруднення навколишнього середовища важкими металами. *MCL Group*. URL: <https://mcl.kiev.ua/zagryaznenie-okruzhayushhej-sredy-tyazhelyimi-metallami/>

38. Забруднення поверхневих вод фосфатами та важкими металами / Л. Василенко та ін. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2022. № 38. С. 4-17. URL: <http://wateruse.org.ua/article/view/254287>

39. Забруднення природного середовища важкими металами та формування екотоксикологічної ситуації й екологічної небезпеки / В. Г. Старчак та ін. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка*. Сер. Біологія. Тернопіль : ТНПУ ім. В. Гнатюка. 2011. Т. 47, № 2. С. 137-143.

40. Задорожний К. М. Біологія і екологія (профільний рівень) : підруч. для 10 кл. закл. загал. серед. освіти. Харків : Вид-во «Ранок», 2018. 240 с.

41. Задорожний К.М. Дослідна та проектна діяльність під час вивчення біології / упоряд. К.М. Задорожний. Харків : Основа, 2008. 143 с.

42. Ідентифікація нових шляхів біодеградації бісфенолу А зеленою водорістю *Desmodesmus* sp.WR1 у поєднанні з механічним аналізом на рівні транскриптому Wang R, Diao P, Chen Q, Wu H, Xu N, Duan S (2017) Ідентифікація нових шляхів біодеградації бісфенолу А зеленою водоростю *Desmodesmus* sp.WR1 у поєднанні з механічним аналізом на рівні транскрипту. *Chem Eng J* 321:424-431. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.03.121>

43. Клименко В. Г., Фролова Л. І., Терещенко І. В. Формування у студентів знань і вмінь про хімічний склад та оцінку якості поверхневих вод. *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії* : зб. наук. пр. 9-те вид. Харків, 2009. С. 107-113.

44. Коваленко Є. І., Белкіна Н.І. Коменський Я. Велика дидактика : навч. посіб. : Київ : Центр навчальної літератури, 2006. С. 101-155.

45. Концепція екологічної освіти в Україні. (2001). Міністерство освіти і науки України.

46. Коршевніук Т. В., Матяш Н. Ю., Козленко О. Г., Рибалко Л. М. Навчальні програми курсів за вибором з біології для 10-11 класів, Київ : Педагогічна думка, 2020. 36 с.

47. Коссак Г. М., Монастирська С. С. Формування здоров'язбережувальних компетентностей в учнів під час вивчення біології у восьмому класі. *Природнича освіта та наука*. 2024. Вип. 3. С. 27-31. URL: <https://doi.org/10.32782/NSER/2024-3.04>
48. Коцур Н. І. Формування здоров'язбережувальної моделі профілактики соціальних хвороб у підлітків. I International science conference on multidisciplinary research, м. Berlin, 19 січ. 2021 р. С. 156-160. URL: <https://doi.org/10.46299/ISG.2021.I.I>
49. Кузьмінчук А. Важкі метали у воді. *Ecosoft*. URL: https://ecosoft.ua/ua/blog/tyazhelye-metally-v-vode/?srsltid=AfmBOoqG0rsP0SsAVMUxMHe-hZwKb-yEi6ow7m3PrLb7_VoFS2t15Uwk
50. Кухнюк О. В., Коцюрuba В. П. Накопичення солей важких металів у навколишньому середовищі та їх вплив на життєдіяльність організмів. *Smmodern innovations and promising ways of development of culture and science : XXXI International scientific and practical conference*, м. Boston, 9 серп. 2022 р. С. 29-32. URL: <https://doi.org/10.46299/ISG.2022.1.31>
51. Лісова Н. О. Вплив військових дій в Україні на екологічний стан території. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка . Сер. Географія. Конструктивна географія і геоекологія*. Тернопіль : ТНПУ ім. В. Гнатюка. 2017. Т. 43, № 2. С. 165-173. URL: <http://nzg.tnpu.edu.ua/article/view/157493>
52. Луцька М. П. Екологічні наслідки військового вторгнення в Україну. *Theoretical foundations on scientists and modern opinions regarding the implementation of modern trends : XXV International scientific and practical conference*, м. San Francisco, 27 черв. 2023 р. С. 54-58. URL: <https://doi.org/10.46299/ISG.2023.1.25>
53. Малафійк І. В. Дидактика : навчальний посібник. Київ : Кондор, 2009. 406 с.

54. Матяш Н. Ю. Предметна біологічна компетентність: її прояв у результатах загальноосвітньої підготовки учнів основної школи. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка . Сер. Педагогіка. Тернопіль : ТНПУ ім. В. Гнатюка. 2016. № 3. С. 116-121. URL: <http://nzp.tnpu.edu.ua/article/view/91209>*

55. Міністерство освіти і науки України (2023). Статистика пошкоджених навчальних закладів у зоні бойових дій. URL: <https://saveschools.in.ua>

56. Мороз І. В. Загальна методика навчання біології : навч. посібник. Київ : Либідь, 2006. 592 с. 20. Національна доктрина розвитку освіти.

57. Мороз І. В. Методика навчання біології та природознавства : практикум для студ. вищ. пед. навч. закл. біол. спец. Київ : НПУ ім. М. П. Драгоманова, 2010. 143 с.

58. Неведомська Є. Організація навчального експерименту в природничій освіті. Біологія і хімія в школі. 2008. № 5-6. С. 10-12.

59. Отруєння важкими металами в дітей. *Буковинський національний медичний університет.* URL: <https://www.bsmu.edu.ua/blog/2152-otruennya-vazhk-metal/>

60. Параняк Р. П. Шляхи надходження важких металів в довкілля та їх вплив на живі організми / Р. П. Параняк, Л. П.

61. Пацева І.Г., Алпатова О.М., Демчук Л.І., Кірейцева Г.В., Левицький В.Г. Сучасний стан навколишнього природного середовища в умовах впливу війни. Екологічні науки. 2022. № 4(43). С. 19-22.

62. Переверзєва С. В. Активізація пізнавальної діяльності учнів на уроках біології з використанням інтерактивних технологій : Київ : Основа. Біологія, 2008. вип. 4. С.8.

63. Поясик О., Слипанюк О., Чепіль М. Майстерність учителя в умовах нової української школи: упровадження інтерактивних технологій навчання. Освітні обрії. 2024. Т. 58, № 1. С. 46-49. URL: <https://doi.org/10.15330/obrii.58.1.46-49>

64. Про освіту Закон України від 05.09.2017 № 2145-VIII
65. Про повну загальну середню освіту : Закон України від 16.01.2020 № 463-IX. Відомості Верховної Ради, 2020, № 31. URL : <https://cutt.ly/5MDZoXN>
66. Прощук Е. Вплив воєнних дії в Україні на водні ресурси та стан довкілля. *Firtka*. URL: <https://firtka.if.ua/blog/view/vpliv-voiennikh-diyi-v-ukrayini-na-vodni-resursi-ta-stan-dovkillia>
67. Пушкарьова Т. О., Топузов О. М. Інтегративно-діяльнісна педагогіка: Т. О. Пушкарьова, О. М. Топузов / монографія - Київ : Педагогічна думка, 2019. - 304 с.
68. Рабченко О. О., Хоменчук В. О., Курант В. З. Ферум у водних екосистемах: форми знаходження, біологічне значення та токсичність для риб. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка . Сер. Біологія. Тернопіль : ТНПУ ім. В. Гнатюка*. 2016. Т. 67, № 3-4. С. 107-119.
69. Розвиток інтелекту та пізнавальної діяльності на уроках біології / Уклад. Задорожний К.М. Харків: Основа, 2009. 110 с.
70. Руденок А. І., Левкова Н. А. Використання активних методів навчання на уроках біології. *New areas of scientific research: exploring new frontiers* : XLIX International Scientific and Practical conference, м. Naples, 27 листоп. 2024 р. URL: <https://doi.org/10.70286/ISU-27.11.2024>
71. Семенюк Н. Є. Екологічна якість води. *Український журнал природничих наук. Екологія*. 2022. № 2. С. 45-56. URL: <https://doi.org/10.35433/naturaljournal.2.2023.45-56>
72. Скиба О. І., Грубінко В. В., Федонюк Л. Я. Запобігання забрудненню гідроекосистем важкими металами як одна з форм реалізації цілей сталого розвитку в Україні. *Науково-практичний журнал "Екологічні науки"*. 2018. № 4(23). С. 101-105. URL: <http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2018/4/24.pdf>

73. Стефанишин Н. Як вторгнення Росії впливає на довкілля України та що ми можемо зробити для відновлення. *Накупіло освіта*. URL: <https://osvita.nakypilo.ua/yak-viyna-vplyvaye-na-dovkillya-ukrayiny/>

74. Строкаль В. П., Ковпак А. В. Воєнні конфлікти та вода: наслідки й ризики. *Науково-практичний журнал "Екологічні науки"*. 2022. № 5(44). С. 94-102. URL: https://www.researchgate.net/profile/V-Strokal/publication/366023943_Military_conflicts_and_water_consequences_and_risks/links/65a6308f0263d85efce2fa25/Military-conflicts-and-water-consequences-and-risks.pdf

75. Сучасні форми та методи навчання біології / Укладач Задорожний К. М. Харків: Основа, 2010. 142 с.

76. Тараненко О. О. Хімічний склад води і здоров'я людини. Trends of modern science and practice : V International scientific and practical conference, м. Ankara, 8 лют. 2022 р. С. 127-131. URL: <https://doi.org/10.46299/ISG.2022.I.V>

77. Технології навчання біології / Упоряд. Задорожний К.М. Харків: Основа, 2007. 160 с.

78. Токар Н. М. Роль критичного мислення в розвитку пізнавального інтересу учнів : Київ : Основа. Біологія,. 2007. вип. 28. с.8.

79. Токсичне забруднення та його наслідки для водних екосистем. *Studfile*. URL: <https://studfile.net/preview/5775551/page:5/>

80. Трефяк Я. Методика краєзнавчої роботи в школі : Історія в школах України, 2002. №1. С. 33-37.

81. Трускавецька І. Інтерактивні технології навчання як засіб формування професійних компетентностей у майбутніх учителів природничої освітньої галузі. *Acta paedagogica volynienses*. 2025. № 2. С. 124-129. URL: <https://doi.org/10.32782/apv/2025.2.17>

82. Трускавецька І. Я., Безвіконна С. Формування дослідницьких умінь у процесі вивчення біології. Modern trends in development science and practice : VII International scientific and practical conference, м. Varna, 2 листоп. 2021 р. С. 471-473. URL: <https://doi.org/10.46299/ISG.2021.II.VII>

83. Трускавецька І. Я., Новікова І. Формування дослідницьких компетенцій на уроках біології. XIV International scientific and practical conference, м. Bilbao, 21 груд. 2020 р. С. 353-356. URL: <https://doi.org/10.46299/ISG.2020.II.XIV>

84. Формування екологічної свідомості шляхом багатоступеневої екологічної освіти / Л. Я. Федонюк та ін. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка . Сер. Біологія. Тернопіль : ТНПУ ім. В. Гнатюка. 2021. Т. 81, Вип. 4. С. 37-42. URL: <https://doi.org/10.25128/2078-2357.21.4.6>*

85. Хомич О., Головка Ю. Компетентнісне навчання та оцінювання на базі впровадження інноваційних технологій. Вісник науки та освіти. 2025. № 1(31). URL: [https://doi.org/10.52058/2786-6165-2025-1\(31\)-1915-1925](https://doi.org/10.52058/2786-6165-2025-1(31)-1915-1925)

86. Цуруль О.А. Хрестоматія з методики навчання біології : Київ : НПУ ім. М. П. Драгоманова, 2007. 298 с.

87. Цуруль О. А. Методична підготовка майбутніх учителів біології до реалізації сучасних завдань екологічної освіти та виховання. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка . Сер. Педагогіка. Тернопіль: ТНПУ ім. В. Гнатюка. 2016. № 1. С. 131-141. URL: <http://nzp.tnpu.edu.ua/article/view/82336>.*

88. Чайка В. М. Основи дидактики : навчальний посібник : Київ : Академвидав, 2011. 240 с.

89. Чалая О. С., Фатєєва Н. Ю. Вплив важких металів на організм людини. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка, Вип. 190 «Механізація сільськогосподарського виробництва». 2018. С. 110-116. URL. <https://repo.btu.kharkov.ua//handle/123456789/15085>

90. Чвалюк Г. В., Корнієнко А. Ю., Грабовський В.-Д. М., Грубінко В. В., Калінін І. В. Вміст металів у воді та їх акумуляція у фітопланктоні (*Chlorella Vulgaris* Beijer) Тернопільського ставу Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Тернопільські біологічні читання - Ternopil Bioscience

- 2025», присвяченої 85-річчю хіміко-біологічного факультету ТНПУ. Тернопіль, 2025. - с 222-227.

91. Чорна І., Мельничук Л., Татарин О. Використання інтерактивних технологій в освітньому процесі під час викладання природничо-математичних дисциплін. Молодий вчений. 2022. № 6 (106). С. 61-64. URL: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2022-6-106-13>

92. Шамрай С.М. Біологічні експерименти в школі Харків: Вид. група «Основа», 2003. 96 с. (Серія «Бібліотека журналу «Біологія»; Вип.12).

93. Шамрай С.М. Задорожний К.М. Біологічні дослідження. Планування і проведення. Харків: Вид. група «Основа», 2010. 111 с.

94. Шмалей С. В. Система екологічної освіти в загальноосвітній школі в процесі вивчення предметів природничо-наукового циклу : автореф. дис. на 46 здобуття наукового ступеня докт. пед. наук : 13.00.01 Загальна педагогіка та історія педагогіки; Нац. пед. ун-т ім. М. П. Драгоманова. К., 2005. 44 с.

95. Шпак О. В. Розвиток дослідницького інтересу учнів на уроках біології із використанням міжпредметних зв'язків. Multidisciplinary academic notes. Theory, methodology and practice : XXVII International scientific and practical conference, м. Prague, 12 лип. 2022 р. С. 298-301. URL: <https://doi.org/10.46299/ISG.2022.1.27>

96. Як визначити важкі метали у воді?. *Укрхіманаліз*. URL: <https://himanaliz.ua/uk/yak-viznachiti-vazhki-metali-u-vodi/>

97. Як війна вплинула на водні ресурси України. *Texty*. URL: <https://texty.org.ua/fragments/109098/yak-vijna-vplynula-na-vodni-resursy-ukrayiny/>

98. Як війна знищує екологію України / Г. В. Чвалюк та ін. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка . Сер. Біологія. Тернопіль : ТНПУ ім. В. Гнатюка. 2022. Т. 82, № 4. С. 49-64. URL: <https://doi.org/10.25128/2078-2357.22.4.6>*

99. Яма А. О. Впровадження інноваційних технологій на уроках біології в умовах модернізації освіти. *Perspective directions of science and*

practice : VI International scientific and practical conference, м. Athens, 2 берез. 2020 р. С. 26-27. URL: <http://isq-konf.com>

100. Ali M.M., Rahman S., Islam M.S., Rakib M.R.J. Hossen S., Rahman M.Z., Kormoker T., Idris A.M., Phoungthong K. Distribution of heavy metals in water and sediment of an urban river in a developing country: A probabilistic risk assessment. *International Journal of Sediment Research*. 2022. № 37 (2). P. 173-187.

101. Austin, J.E., ред. (2000). *The Environmental Consequences of War: Legal, Economic, and Scientific Perspectives*. Cambridge University Press. ISBN 9780521780209.

102. Brauer, Jurgen (2009). *War and Nature: The Environmental Consequences of War in a Globalized World*. Rowman & Littlefield. ISBN 9780759112063.

103. DSpace. *DSpace*. URL: <https://iris.who.int/>

104. Linnik P. N. Heavy metals in surface waters of Ukraine : Their content and forms of migration // *Hydrobiological Journal*. 2000. Vol. 36, № 3. P. 31-54.

105. Liu Q. et al. Heavy metal concentrations in tissues of marine fish and crab collected from the middle coast of Zhejiang Province, China. *Environ. Monit. Assess.* 2020. № 192. P. 1-12.

106. Lyuta N. Regional features of heavy metals distribution in bottom sediments and surface water within river basins in Ukraine. *Geoinformatics* 2021. Kyiv, Ukraine. 2021. P. 11-14.

107. Mangalagiri P., Bikkina A., Sundarraj D.K., Tatiparthi B.R. Bioaccumulation of heavy metals in *Rastrelliger kanagurta* along the coastal waters of Visakhapatnam, India. *Mar. Pollut. Bull.* 2020. № 160. 111658.

108. McNeill, J.R., ред. (2010). *Environmental Histories of the Cold War*. Cambridge University Press. ISBN 9780521762441.

109. Otrokh S., Yurchenko R. Monitoring of ecological indicators of water resources. Study of world opinion regarding the development of science : IX International scientific and practical conference, Prague, 22 November 2023. P. 136-137. URL: <https://doi.org/10.46299/ISG.2022.2.9>

110. UNESCO. (2023). Teaching and Learning with Living Heritage in Ukraine: методичні рекомендації. Київ: ЮНЕСКО.
111. Vajargah M.F. A review on the effects of heavy metals on aquatic animals. J Biomed Res Environ Sci. 2021. № 2 (9). P. 865-869.
112. Vasyliuk O. , Shyriaieva D., Kolomytsev G., Spinova J. Steppe protected areas on the territory of Ukraine in the context of the armed conflict in the Donbas region and Russian annexation of the Crimean Peninsula // Grassland research and conservation (Bulletin of the Eurasian Dry Grassland Group), 2017. № 1 (33). - P.15-23.
113. Yakubovska M., Yurkiv M. Інтерактивні методи навчання як засіб формування духовних цінностей особистості. Освітні обрії. 2020. Т. 51, № 2. С. 75-79. URL: <https://doi.org/10.15330/obrii.51.2.75-79>
114. Yang H. et al. An improved weighted index for the assessment of heavy metal pollution in soils in Zhejiang, China. Environ. Res. 2020. 192, 110246.