**Лекція № 7. Управління транскордонними підземними водами: особливості та виклики:**

**План:**

1. Вступ

1.1. Визначення транскордонних підземних вод

1.2. Значення транскордонних підземних вод у глобальному контексті

1.3. Особливості підземних вод порівняно з поверхневими

2. Правові аспекти управління транскордонними підземними водами

2.1. Міжнародне водне право та його застосування до підземних вод

2.2. Ключові міжнародні конвенції та угоди

2.3. Принципи справедливого та розумного використання

3. Гідрогеологічні особливості транскордонних підземних вод

3.1. Типи транскордонних водоносних горизонтів

3.2. Процеси формування та відновлення підземних вод

3.3. Взаємозв'язок підземних та поверхневих вод

4. Основні виклики в управлінні транскордонними підземними водами

4.1. Визначення меж та характеристик водоносних горизонтів

4.2. Моніторинг кількості та якості підземних вод

4.3. Розподіл водних ресурсів між країнами

4.4. Забруднення та деградація якості води

4.5. Надмірна експлуатація та виснаження ресурсів

5. Механізми міжнародного співробітництва

5.1. Спільні комісії з управління транскордонними підземними водами

5.2. Обмін даними та інформацією

5.3. Спільні дослідницькі проекти

5.4. Механізми вирішення спорів

6. Інструменти та методи управління

6.1. Інтегроване управління поверхневими та підземними водами

6.2. Моделювання водоносних горизонтів

6.3. Системи раннього попередження

6.4. Економічні інструменти (тарифи, квоти)

7. Вплив зміни клімату на транскордонні підземні води

7.1. Прогнозовані зміни в гідрологічному циклі

7.2. Вплив на поповнення водоносних горизонтів

7.3. Стратегії адаптації до зміни клімату

8. Кейс-стаді: приклади управління транскордонними підземними водами

8.1. Нубійський пісковиковий водоносний горизонт (Північна Африка)

8.2. Водоносний горизонт Гуарані (Південна Америка)

8.3. Динарський карстовий водоносний горизонт (Південно-Східна Європа)

9. Інновації та перспективи в управлінні транскордонними підземними водами

9.1. Використання дистанційного зондування та ГІС-технологій

9.2. Штучне поповнення водоносних горизонтів

9.3. Розвиток методів очищення та відновлення забруднених підземних вод

10. Висновки

10.1. Ключові принципи сталого управління транскордонними підземними водами

10.2. Роль міжнародного співробітництва

10.3. Перспективи подальших досліджень та розвитку галузі

**1. Вступ**

**1.1. Визначення транскордонних підземних вод**

**Транскордонні підземні води** - це водоносні горизонти або водоносні комплекси, які перетинають кордони між двома або більше країнами. Згідно з визначенням ООН, транскордонний водоносний горизонт - це "система водоносних порід, яка має частини в двох або більше державах".

**Ключові аспекти визначення:**

- Геологічна єдність: водоносний горизонт є єдиною гідрогеологічною структурою, незалежно від політичних кордонів.

- Взаємозв'язок: зміни в одній частині водоносного горизонту можуть впливати на інші його частини в різних країнах.

- Спільне використання: ресурс використовується або може потенційно використовуватися двома або більше країнами.

1.2. **Значення транскордонних підземних вод у глобальному контексті**

Транскордонні підземні води мають величезне значення у глобальному контексті з кількох причин:

а) **Поширеність:**

- За оцінками ЮНЕСКО, існує близько 592 транскордонних водоносних горизонтів у світі.

- Вони охоплюють приблизно 40% суходолу Землі і містять близько 99% доступних прісних підземних вод.

б) **Водопостачання:**

- Приблизно 2 мільярди людей у світі залежать від підземних вод як основного джерела водопостачання.

- У багатьох посушливих регіонах підземні води є єдиним надійним джерелом води.

в) **Економічне значення:**

- Підземні води відіграють критичну роль у сільському господарстві, промисловості та енергетиці.

- За оцінками, 43% всієї води, що використовується для зрошення у світі, походить з підземних джерел.

г) **Екологічна роль:**

- Підземні води підтримують багато наземних та водних екосистем.

- Вони відіграють важливу роль у підтримці базового стоку річок та живленні водно-болотних угідь.

д) **Геополітичне значення:**

- Управління транскордонними підземними водами може бути джерелом як співпраці, так і конфліктів між країнами.

- Справедливий розподіл та стале використання цих ресурсів є ключовим питанням міжнародної водної дипломатії.

1.3. **Особливості підземних вод порівняно з поверхневими**

Підземні води мають ряд унікальних характеристик, які відрізняють їх від поверхневих вод та впливають на підходи до їх управління:

а) **Невидимість:**

- Підземні води невидимі для неозброєного ока, що ускладнює їх моніторинг та оцінку.

- Це може призводити до недооцінки їх значення або надмірної експлуатації.

б) **Повільний рух:**

- Підземні води рухаються набагато повільніше, ніж поверхневі, що впливає на швидкість їх відновлення та поширення забруднень.

- Час перебування води у водоносних горизонтах може становити від кількох днів до тисяч років.

в) **Велика ємність зберігання:**

- Підземні водоносні горизонти можуть зберігати набагато більші об'єми води, ніж поверхневі водойми.

- Це робить їх важливим буфером під час посух та інших екстремальних погодних явищ.

г) **Якість води:**

- Підземні води зазвичай мають вищу якість, ніж поверхневі, завдяки природній фільтрації через ґрунт та гірські породи.

- Однак, забруднення підземних вод може бути більш довготривалим і складним для очищення.

д) **Складність відновлення:**

- Надмірна експлуатація підземних вод може призвести до незворотного виснаження водоносних горизонтів.

- Процес відновлення може бути дуже повільним, особливо в посушливих регіонах.

е) **Взаємозв'язок з поверхневими водами:**

- Підземні води часто мають складні взаємозв'язки з поверхневими водами, впливаючи на річковий стік та екосистеми.

- Це вимагає інтегрованого підходу до управління водними ресурсами.

ж) **Складність моніторингу та моделювання:**

- Оцінка запасів та руху підземних вод вимагає складних методів дослідження та моделювання.

- Це може ускладнювати процес прийняття рішень щодо їх використання та охорони.

Розуміння цих особливостей транскордонних підземних вод є критично важливим для розробки ефективних стратегій їх управління та забезпечення їх сталого використання в глобальному контексті.

**2. Правові аспекти управління транскордонними підземними водами**

2.1. **Міжнародне водне право та його застосування до підземних вод**

**Міжнародне водне право** - це галузь міжнародного права, яка регулює використання та охорону транскордонних водних ресурсів. Історично воно розвивалося переважно навколо поверхневих вод, але в останні десятиліття все більше уваги приділяється підземним водам.

**Ключові аспекти застосування міжнародного водного права до підземних вод:**

а) **Еволюція правового статусу:**

- Спочатку підземні води розглядалися як частина земельної власності.

- Поступово вони стали визнаватися окремим ресурсом, що потребує спеціального регулювання.

б) **Принцип обмеженого територіального суверенітету:**

- Держави мають суверенне право використовувати підземні води на своїй території.

- Але це право обмежене обов'язком не завдавати значної шкоди іншим державам.

в) **Складності застосування:**

- Невидимість підземних вод ускладнює визначення їх точних меж та об'ємів.

- Повільний рух підземних вод може призводити до відкладених у часі транскордонних впливів.

г) **Інтегроване управління:**

- Сучасне міжнародне водне право просуває концепцію інтегрованого управління поверхневими та підземними водами.

2.2. **Ключові міжнародні конвенції та угоди**

а) **Конвенція ООН про право несудноплавних видів використання міжнародних водотоків (1997):**

- Хоча фокусується на поверхневих водах, вона включає підземні води, пов'язані з поверхневими.

- Встановлює принципи справедливого використання та запобігання значної шкоди.

б) **Проект статей про право транскордонних водоносних горизонтів (2008):**

- Розроблений Комісією міжнародного права ООН.

- Перший міжнародний документ, спеціально присвячений транскордонним підземним водам.

- Визначає принципи управління, включаючи співробітництво, обмін даними та охорону екосистем.

в) **Конвенція про охорону та використання транскордонних водотоків та міжнародних озер (Гельсінкі, 1992):**

- Застосовується до поверхневих і підземних вод.

- Просуває екосистемний підхід та принцип перестороги.

г) **Регіональні угоди:**

- Угода про Гуарані (2010) між Аргентиною, Бразилією, Парагваєм та Уругваєм.

- Нубійська угода (2000) між Чадом, Єгиптом, Лівією та Суданом.

- Ці угоди встановлюють конкретні механізми співпраці щодо конкретних транскордонних водоносних горизонтів.

2.3. **Принципи справедливого та розумного використання**

Принцип справедливого та розумного використання є наріжним каменем міжнародного водного права. Він застосовується і до транскордонних підземних вод.

а) **Визначення:**

- Кожна держава має право на справедливу і розумну частку у використанні транскордонних підземних вод.

- Це не означає рівного розподілу, а скоріше врахування всіх релевантних факторів.

б) **Фактори, що враховуються при визначенні справедливого та розумного використання:**

- Географічні, гідрографічні, гідрологічні, кліматичні та екологічні фактори.

- Соціальні та економічні потреби зацікавлених держав.

- Населення, залежне від водоносного горизонту в кожній державі.

- Існуючі та потенційні види використання водоносного горизонту.

- Наслідки використання для інших держав.

- Наявність альтернативних ресурсів.

- Збереження, захист та розвиток водоносного горизонту.

в) **Зобов'язання не завдавати значної шкоди:**

- Цей принцип доповнює принцип справедливого використання.

- Держави повинні вживати всіх належних заходів для запобігання значної шкоди іншим державам.

г) **Співвідношення з принципом суверенітету:**

- Принцип справедливого використання обмежує абсолютний суверенітет держав над підземними водами.

- Він вимагає збалансування інтересів усіх зацікавлених держав.

д) **Практичне застосування:**

- Визначення "справедливого та розумного" використання часто вимагає переговорів між державами.

- Може включати створення спільних механізмів управління та моніторингу.

е) Виклики застосування:

- Складність оцінки підземних водних ресурсів.

- Різні підходи до оцінки соціальних та економічних потреб.

- Необхідність врахування довгострокових наслідків використання.

Розуміння цих правових аспектів є критично важливим для ефективного управління транскордонними підземними водами. Вони формують основу для міжнародного співробітництва та сталого використання цих цінних ресурсів.

**3. Гідрогеологічні особливості транскордонних підземних вод**

3.1. **Типи транскордонних водоносних горизонтів**

Транскордонні водоносні горизонти можна класифікувати за різними критеріями:

а) **За геологічною структурою:**

- Пористі водоносні горизонти: складаються з пухких осадових порід (піски, гравій).

- Тріщинні водоносні горизонти: формуються в твердих породах з системою тріщин.

- Карстові водоносні горизонти: утворюються в розчинних породах (вапняки, доломіти).

б) **За гідравлічним режимом:**

- Безнапірні (відкриті) водоносні горизонти: мають вільну поверхню води.

- Напірні (артезіанські) водоносні горизонти: вода знаходиться під тиском між водотривкими шарами.

в) **За характером поповнення:**

- Відновлювані водоносні горизонти: регулярно поповнюються за рахунок опадів або річкового стоку.

- Невідновлювані (викопні) водоносні горизонти: сформовані в минулі геологічні епохи, мають обмежене сучасне поповнення.

г) **За розташуванням відносно кордону:**

- Суміжні водоносні горизонти: розділені кордоном на дві або більше частин.

- Послідовні водоносні горизонти: розташовані в одній країні, але живлять річку, що перетинає кордон.

**3.2. Процеси формування та відновлення підземних вод**

Розуміння процесів формування та відновлення підземних вод є ключовим для їх сталого управління:

а) **Інфільтрація:**

- Основний процес поповнення підземних вод.

- Залежить від кількості опадів, проникності ґрунту, рельєфу, рослинного покриву.

- Може бути природною або штучною (наприклад, через іригаційні системи).

б) **Зони поповнення:**

- Області, де відбувається інфільтрація води в підземні горизонти.

- Можуть бути розташовані далеко від основного водоносного горизонту.

- Критично важливі для захисту та управління.

в) **Час відновлення:**

- Варіює від днів до тисяч років залежно від глибини та геології.

- Важливий фактор при оцінці сталості використання.

г) **Фактори, що впливають на відновлення:**

- Кліматичні зміни: можуть змінювати режим опадів та випаровування.

- Зміни землекористування: впливають на інфільтрацію та поверхневий стік.

- Надмірний водозабір: може призвести до виснаження ресурсу.

д) **Штучне поповнення:**

- Метод активного управління підземними водами.

- Включає інжекцію води в водоносні горизонти або створення інфільтраційних басейнів.

3.3. **Взаємозв'язок підземних та поверхневих вод**

Розуміння взаємозв'язку між підземними та поверхневими водами є критично важливим для інтегрованого управління водними ресурсами:

а) **Типи взаємодії:**

- Живлення річок підземними водами (базисний стік).

- Інфільтрація річкових вод у водоносні горизонти.

- Змішаний тип взаємодії, який може змінюватися сезонно.

б) **Зони взаємодії:**

- **Гіпорейна зона:** область під руслом річки, де відбувається активний обмін між поверхневими та підземними водами.

- Прибережні водоносні горизонти: взаємодіють з морськими водами.

в) **Вплив на якість води:**

- Підземні води можуть покращувати якість річкової води під час межені.

- Забруднені поверхневі води можуть негативно впливати на якість підземних вод.

г) **Екологічне значення:**

- Підтримка річкового стоку під час посух.

- Забезпечення стабільної температури води, важливої для водних екосистем.

д) **Виклики для управління:**

- Складність моделювання взаємодії через велику кількість факторів.

- Необхідність інтегрованого підходу до управління поверхневими та підземними водами.

е) **Транскордонний аспект:**

- Використання підземних вод в одній країні може впливати на річковий стік в іншій.

- Забруднення річок може призводити до забруднення транскордонних водоносних горизонтів.

Розуміння цих гідрогеологічних особливостей транскордонних підземних вод є фундаментальним для розробки ефективних стратегій управління. **Воно дозволяє:**

- Оцінити доступні ресурси та їх вразливість.

- Прогнозувати вплив різних видів діяльності на водоносні горизонти.

- Розробляти відповідні заходи з охорони та сталого використання.

- Створювати адекватні моделі для прийняття обґрунтованих рішень щодо транскордонного управління водними ресурсами.

**4. Основні виклики в управлінні транскордонними підземними водами**

4.1. **Визначення меж та характеристик водоносних горизонтів**

Це **один з найскладніших аспектів** управління транскордонними підземними водами через їх невидимість та складність геологічних структур.

**Основні виклики:**

а) **Технічні складнощі:**

- Необхідність використання складних геофізичних методів дослідження.

- Висока вартість буріння розвідувальних свердловин.

б) **Обмеженість даних:**

- Нерівномірність розподілу точок спостереження.

- Історична обмеженість даних, особливо в країнах, що розвиваються.

в) **Динамічність системи:**

- Межі водоносних горизонтів можуть змінюватися залежно від рівня експлуатації.

- Сезонні коливання можуть впливати на характеристики.

г) **Політичні аспекти:**

- Небажання країн ділитися геологічною інформацією з міркувань національної безпеки.

- Розбіжності в методологіях оцінки між країнами.

**Можливі рішення:**

- Створення спільних дослідницьких програм.

- Використання супутникових технологій та дистанційного зондування.

- Гармонізація методів оцінки між країнами.

4.2. **Моніторинг кількості та якості підземних вод**

Ефективний моніторинг є ключовим для сталого управління, але має ряд викликів:

а) **Технічні аспекти:**

- Необхідність створення мережі спостережних свердловин.

- Складність вимірювання параметрів глибоких водоносних горизонтів.

б) **Часові та просторові масштаби:**

- Повільність процесів у підземних водах вимагає довгострокових спостережень.

- Необхідність охоплення великих територій для репрезентативності даних.

в) **Стандартизація:**

- Різні методи та стандарти моніторингу в різних країнах.

- Складність порівняння даних.

г) **Фінансові обмеження:**

- Висока вартість створення та підтримки систем моніторингу.

- Нерівномірність фінансових можливостей країн-партнерів.

**Можливі рішення:**

- Впровадження автоматизованих систем моніторингу.

- Розробка спільних протоколів моніторингу.

- Створення механізмів фінансової підтримки для менш розвинених країн.

4.3. **Розподіл водних ресурсів між країнами**

Це **одне з найбільш політично чутливих** **питань** в управлінні транскордонними підземними водами.

**Основні виклики:**

а) **Визначення справедливих квот:**

- Складність оцінки внеску кожної країни у формування ресурсу.

- Різні підходи до оцінки потреб у воді.

б) **Історичні права чи нові потреби:**

- Конфлікт між усталеними практиками використання та зростаючими потребами.

в) **Вплив кліматичних змін:**

- Невизначеність щодо майбутньої доступності ресурсу.

г) **Взаємозалежність з поверхневими водами:**

- Необхідність комплексного підходу до розподілу всіх водних ресурсів.

**Можливі рішення:**

- Розробка гнучких механізмів розподілу, що враховують зміни умов.

- Впровадження принципу "спільної відповідальності" за ресурс.

- Створення механізмів компенсації для країн, що обмежують своє водокористування.

4.4. **Забруднення та деградація якості води**

Забруднення підземних вод є особливо серйозною проблемою через довготривалість його наслідків.

**Основні виклики:**

а) **Транскордонне поширення забруднень:**

- Складність визначення джерела забруднення.

- Затримка у виявленні забруднення через повільний рух підземних вод.

б) **Різноманітність джерел забруднення:**

- Сільськогосподарське забруднення (нітрати, пестициди).

- Промислове забруднення (важкі метали, органічні сполуки).

- Побутове забруднення (патогени, фармацевтичні препарати).

в) **Складність очищення:**

- Висока вартість та технічна складність очищення забруднених підземних вод.

- Довготривалість процесів природного самоочищення.

г) **Різні стандарти якості води:**

- Відмінності в нормативах якості води між країнами.

- Складність узгодження спільних заходів з охорони.

**Можливі рішення:**

- Впровадження принципу "забруднювач платить" на міжнародному рівні.

- Розробка спільних планів запобігання забрудненню.

- Гармонізація стандартів якості води між країнами.

4.5. **Надмірна експлуатація та виснаження ресурсів**

Це **одна з найсерйозніших загроз** для сталості транскордонних підземних вод.

**Основні виклики:**

а) **Визначення безпечного рівня експлуатації:**

- Складність оцінки природного поповнення водоносних горизонтів.

- Невизначеність щодо довгострокових наслідків експлуатації.

б) **Економічні стимули:**

- Короткострокові економічні вигоди від надмірної експлуатації.

- Різні економічні пріоритети країн-партнерів.

в) **Незворотні наслідки:**

- Осідання ґрунту внаслідок надмірного водовідбору.

- Інтрузія солоних вод у прибережних водоносних горизонтах.

г) **Конкуренція між секторами:**

- Конфлікти між сільськогосподарським, промисловим та побутовим водокористуванням.

д) **Нелегальне водокористування:**

- Складність контролю за несанкціонованим бурінням свердловин.

**Можливі рішення:**

- Впровадження систем ліцензування та квотування водовідбору.

- Розробка економічних механізмів стимулювання водозбереження.

- Впровадження технологій повторного використання води.

- Посилення транскордонного співробітництва у сфері моніторингу та контролю.

Ці виклики підкреслюють складність управління транскордонними підземними водами та необхідність комплексного, міждисциплінарного підходу. Успішне вирішення цих проблем вимагає тісної співпраці між країнами, обміну даними та технологіями, а також розробки інноваційних підходів до управління водними ресурсами.

**5. Механізми міжнародного співробітництва**

5.1. **Спільні комісії з управління транскордонними підземними водами**

**Спільні комісії є ключовим інституційним механізмом для управління транскордонними підземними водами.**

а) **Структура та склад:**

- Зазвичай включають представників усіх країн-учасниць.

- Можуть мати постійний секретаріат та технічні робочі групи.

- Часто залучають експертів з різних галузей: гідрогеологів, екологів, юристів, економістів.

б) **Функції:**

- Розробка спільних планів управління водоносними горизонтами.

- Координація діяльності з моніторингу та оцінки ресурсів.

- Розробка рекомендацій щодо розподілу водних ресурсів.

- Узгодження заходів з охорони підземних вод від забруднення.

- Сприяння обміну даними та інформацією.

в) **Приклади успішних комісій:**

- Міжнародна комісія з охорони Женевського водоносного горизонту.

- Франко-швейцарська комісія з Женевського водоносного горизонту.

- Об'єднаний орган з вивчення та розробки нубійських пісковикових водоносних горизонтів.

г) **Виклики:**

- Забезпечення рівноправної участі всіх країн.

- Фінансування діяльності комісій.

- Імплементація рекомендацій комісій на національному рівні.

5.2. **Обмін даними та інформацією**

Ефективний обмін даними є критично важливим для сталого управління транскордонними підземними водами.

а) **Типи даних для обміну:**

- Гідрогеологічні дані (рівні води, якість води, геологічні характеристики).

- Дані про водокористування (об'єми відбору, основні користувачі).

- Метеорологічні та кліматичні дані.

- Інформація про забруднення та джерела забруднення.

б) **Механізми обміну:**

- Створення спільних баз даних та інформаційних систем.

- Регулярні звіти та бюлетені.

- Проведення спільних семінарів та конференцій.

- Використання онлайн-платформ для обміну даними в реальному часі.

в) **Виклики:**

- Забезпечення сумісності даних з різних країн.

- Подолання політичних бар'єрів для обміну чутливою інформацією.

- Забезпечення якості та достовірності даних.

г) **Приклади успішних практик:**

- Система обміну даними в басейні річки Дунай (DANUBIS).

- Інформаційна система водоносного горизонту Гуарані.

5.3. **Спільні дослідницькі проекти**

Спільні дослідження сприяють кращому розумінню транскордонних водоносних систем та розробці інноваційних підходів до їх управління.

а) **Типи спільних проектів:**

- Картування та моделювання водоносних горизонтів.

- Оцінка впливу кліматичних змін на підземні води.

- Розробка методів штучного поповнення водоносних горизонтів.

- Дослідження взаємозв'язку між підземними та поверхневими водами.

б) **Організація співпраці:**

- Створення спільних дослідницьких груп.

- Обмін науковими кадрами та обладнанням.

- Проведення спільних польових досліджень.

- Публікація спільних наукових праць.

в) **Фінансування:**

- Спільне фінансування країнами-учасницями.

- Залучення грантів міжнародних організацій (наприклад, ГЕФ, ПРООН).

- Участь у міжнародних дослідницьких програмах (наприклад, програми ЄС).

г) **Приклади успішних проектів:**

- Проект ISARM (Міжнародно спільні водоносні ресурси) ЮНЕСКО.

- Проект моделювання водоносного горизонту Гуарані.

5.4. **Механізми вирішення спорів**

Ефективні механізми вирішення спорів є ключовими для запобігання конфліктів та забезпечення сталого управління транскордонними підземними водами.

а) **Типи механізмів:**

- Переговори: прямі двосторонні або багатосторонні переговори.

- Медіація: залучення нейтральної третьої сторони для сприяння переговорам.

- Арбітраж: передача спору на розгляд арбітражного суду.

- Судовий розгляд: звернення до міжнародних судових інстанцій.

б) **Превентивні заходи:**

- Включення механізмів вирішення спорів у міждержавні угоди.

- Розробка спільних протоколів дій у випадку виникнення розбіжностей.

- Регулярні консультації та обмін інформацією для запобігання конфліктам.

в) **Роль спільних комісій:**

- Часто виступають як перша інстанція для вирішення спорів.

- Можуть надавати технічну експертизу для обґрунтування рішень.

г) **Виклики:**

- Забезпечення рівноправності сторін у процесі вирішення спорів.

- Подолання політичних та економічних розбіжностей між країнами.

- Імплементація рішень, прийнятих у результаті вирішення спорів.

д) **Приклади успішного вирішення спорів:**

- Арбітражне рішення щодо водоносного горизонту Північно-Західної Сахари (між Лівією та Чадом).

- Медіація Світового банку у спорі щодо проекту Габчіково-Надьмарош (між Угорщиною та Словаччиною).

Ці механізми міжнародного співробітництва є взаємопов'язаними та взаємодоповнюючими. Їх ефективне впровадження вимагає політичної волі, технічної експертизи та фінансових ресурсів. Успішне міжнародне співробітництво у сфері управління транскордонними підземними водами може не лише забезпечити стале використання водних ресурсів, але й сприяти зміцненню регіонального миру та безпеки.

**6. Інструменти та методи управління**

6.1. **Інтегроване управління поверхневими та підземними водами**

**Інтегроване управління водними ресурсами (ІУВР)** - це підхід, який розглядає всі водні ресурси (поверхневі, підземні, прибережні) як єдину систему.

а) **Ключові принципи ІУВР:**

- Цілісний підхід до управління водними ресурсами.

- Врахування взаємозв'язків між різними типами водних ресурсів.

- Баланс між різними видами водокористування (побутове, промислове, сільськогосподарське, екологічне).

б) **Переваги ІУВР для транскордонних підземних вод:**

- Покращення розуміння взаємодії між поверхневими та підземними водами.

- Оптимізація використання водних ресурсів.

- Запобігання надмірній експлуатації одного виду ресурсів за рахунок інших.

в) **Виклики впровадження:**

- Необхідність координації між різними відомствами та секторами.

- Складність збору та аналізу даних для всіх компонентів водної системи.

- Подолання інституційних бар'єрів між управлінням поверхневими та підземними водами.

г) **Приклади успішного впровадження:**

- Басейнове управління в ЄС згідно з Водною рамковою директивою.

- Інтегроване управління водними ресурсами в басейні річки Оранжева (Південна Африка).

6.2. **Моделювання водоносних горизонтів**

Моделювання є потужним інструментом для розуміння динаміки підземних вод та прогнозування наслідків різних сценаріїв управління.

а) **Типи моделей:**

- Концептуальні моделі: спрощені представлення системи підземних вод.

- Математичні моделі: використовують рівняння для опису руху та поведінки підземних вод.

- Числові моделі: використовують комп'ютерні алгоритми для розв'язання складних рівнянь.

б) **Застосування моделювання:**

- Прогнозування змін рівня та якості підземних вод.

- Оцінка впливу різних сценаріїв водокористування.

- Визначення оптимальних стратегій експлуатації водоносних горизонтів.

- Оцінка впливу кліматичних змін на підземні води.

в) **Виклики:**

- Необхідність великого обсягу якісних даних для калібрації моделей.

- Складність моделювання гетерогенних геологічних середовищ.

- Невизначеності, пов'язані з довгостроковими прогнозами.

г) **Приклади успішного застосування:**

- Модель водоносного горизонту Гуарані для оцінки транскордонних впливів.

- Модель MODFLOW для оцінки водних ресурсів Північно-Західної Сахари.

6.3. **Системи раннього попередження**

Системи раннього попередження є критично важливими для запобігання та мінімізації негативних наслідків, пов'язаних з підземними водами.

а) **Типи систем раннього попередження:**

- Системи моніторингу рівня підземних вод для попередження виснаження.

- Системи контролю якості води для виявлення забруднення.

- Системи прогнозування посух та їх впливу на підземні води.

б) **Компоненти систем:**

- Мережа моніторингових станцій (свердловин, датчиків).

- Системи збору та передачі даних в реальному часі.

- Аналітичні інструменти для обробки даних та виявлення аномалій.

- Протоколи сповіщення та реагування.

в) **Переваги для транскордонного управління:**

- Швидке виявлення транскордонних впливів.

- Можливість своєчасного вжиття заходів для запобігання кризам.

- Підвищення довіри між країнами завдяки прозорості даних.

г) **Виклики впровадження:**

- Високі початкові витрати на створення систем.

- Необхідність постійного обслуговування та оновлення.

- Забезпечення сумісності систем різних країн.

д) **Приклади:**

- Система раннього попередження про посухи в басейні річки Дунай.

- Транскордонна система моніторингу якості підземних вод між Німеччиною та Нідерландами.

6.4. **Економічні інструменти (тарифи, квоти)**

Економічні інструменти відіграють важливу роль у стимулюванні сталого використання підземних вод.

а) **Типи економічних інструментів:**

- Тарифи на водокористування: плата за об'єм видобутої води.

- Квоти на водозабір: обмеження максимального об'єму води для видобутку.

- Ринки водних прав: можливість купівлі-продажу прав на водокористування.

- Податки на забруднення: плата за скиди забруднюючих речовин.

б) **Цілі застосування:**

- Стимулювання ефективного використання води.

- Покриття витрат на управління та охорону водних ресурсів.

- Перерозподіл води між різними секторами економіки.

- Зменшення забруднення підземних вод.

в) **Особливості застосування для транскордонних вод:**

- Необхідність узгодження економічних інструментів між країнами.

- Можливість створення транскордонних ринків водних прав.

- Використання доходів від тарифів для фінансування спільних проектів з управління.

г) **Виклики:**

- Визначення "справедливої" ціни на воду.

- Забезпечення доступу до води для малозабезпечених верств населення.

- Подолання політичного опору впровадженню нових економічних інструментів.

д) **Приклади успішного застосування:**

- Система квот на видобуток підземних вод у Йорданії.

- Ринок водних прав у басейні річки Мюррей-Дарлінг (Австралія).

Ефективне управління транскордонними підземними водами вимагає комплексного застосування всіх цих інструментів та методів. Інтегроване управління забезпечує цілісний підхід, моделювання допомагає прийняти обґрунтовані рішення, системи раннього попередження дозволяють вчасно реагувати на загрози, а економічні інструменти стимулюють стале водокористування. Важливо, щоб вибір та впровадження цих інструментів відбувалися з урахуванням специфіки конкретного транскордонного водоносного горизонту та потреб всіх зацікавлених сторін.

**7. Вплив зміни клімату на транскордонні підземні води**

7.1. **Прогнозовані зміни в гідрологічному циклі**

Зміна клімату суттєво впливає на глобальний гідрологічний цикл, що має прямі наслідки для підземних вод.

а) **Основні прогнозовані зміни:**

- Зміна кількості та інтенсивності опадів:

• Збільшення опадів у високих широтах та екваторіальних регіонах.

• Зменшення опадів у субтропічних та середніх широтах.

- Підвищення температури:

• Збільшення випаровування.

• Зміна режиму сніготанення в гірських регіонах.

- Підвищення частоти та інтенсивності екстремальних погодних явищ:

• Більш часті посухи в одних регіонах.

• Збільшення повеней в інших.

б) **Регіональні відмінності:**

- Середземноморський регіон: прогнозується зменшення опадів та збільшення посух.

- Північна Європа: очікується збільшення опадів, особливо взимку.

- Африка: посилення контрасту між вологими та посушливими регіонами.

в) **Вплив на поверхневі води:**

- Зміна річкового стоку.

- Зміна режиму повеней та межені.

- Підвищення температури води.

г) **Наслідки для транскордонних водних ресурсів:**

- Зміна доступності води в різних країнах.

- Потенційне загострення конфліктів за водні ресурси.

- Необхідність перегляду існуючих угод про розподіл води.

7.2. **Вплив на поповнення водоносних горизонтів**

Зміни в гідрологічному циклі безпосередньо впливають на процеси поповнення підземних вод.

а) **Прямий вплив на інфільтрацію:**

- Зміна кількості та інтенсивності опадів впливає на об'єм води, доступної для інфільтрації.

- Збільшення інтенсивності опадів може призвести до збільшення поверхневого стоку та зменшення інфільтрації.

б) **Вплив на евапотранспірацію:**

- Підвищення температури збільшує евапотранспірацію, що може зменшити об'єм води, доступної для поповнення підземних вод.

- Зміна вегетаційного періоду та типів рослинності може змінити патерни водоспоживання.

**Евапотранспірація** - це комбінований процес, який включає два основні компоненти: випаровування води з поверхні ґрунту та транспірацію (випаровування води через листя рослин). Цей термін широко використовується в гідрології, метеорології, сільському господарстві та екології.

**Розглянемо детальніше складові та аспекти евапотранспірації:**

1. **Компоненти евапотранспірації:**

а) Евапорація (випаровування):

- Процес переходу води з рідкого стану в газоподібний з поверхні ґрунту, водойм, снігу або льоду.

- Залежить від температури повітря, вологості, швидкості вітру та сонячної радіації.

б) Транспірація:

- Процес випаровування води через продихи листя рослин.

- Є важливою частиною життєвого циклу рослин, забезпечуючи рух води та поживних речовин.

- Залежить від виду рослин, стадії їх росту, доступності води в ґрунті та кліматичних умов.

2. **Типи евапотранспірації:**

а) Потенційна евапотранспірація (ПЕТ):

- Максимально можлива евапотранспірація при необмеженій доступності води.

- Залежить лише від кліматичних факторів.

б) **Фактична евапотранспірація (ФЕТ):**

- Реальна кількість води, що випаровується з поверхні та транспірується рослинами.

- Завжди менша або рівна ПЕТ, залежить від доступності води в ґрунті.

3. **Фактори, що впливають на евапотранспірацію:**

- Кліматичні: температура повітря, сонячна радіація, вологість, швидкість вітру.

- Ґрунтові: тип ґрунту, вологість ґрунту, температура ґрунту.

- Рослинні: тип рослинності, стадія росту, густота рослинного покриву.

- Топографічні: висота над рівнем моря, експозиція схилу.

4. **Методи вимірювання та оцінки:**

- Лізиметри: спеціальні пристрої для прямого вимірювання евапотранспірації.

- Метод водного балансу: оцінка евапотранспірації на основі інших компонентів водного циклу.

- Емпіричні формули: наприклад, формула Пенмана-Монтейта, широко використовувана ФАО.

- Дистанційне зондування: використання супутникових даних для оцінки евапотранспірації на великих територіях.

5. **Значення в гідрологічному циклі:**

- Евапотранспірація є важливою складовою водного балансу території.

- Впливає на кількість води, доступної для поповнення підземних вод та формування поверхневого стоку.

- Відіграє ключову роль у кругообігу води в природі.

6. **Практичне застосування:**

- Сільське господарство: планування іригації, вибір культур.

- Водне господарство: оцінка водних ресурсів, управління водосховищами.

- Екологія: оцінка стану екосистем, моделювання змін клімату.

- Містобудування: планування зелених зон, оцінка впливу урбанізації на водний баланс.

7. **Вплив зміни клімату:**

- Підвищення температури зазвичай призводить до збільшення потенційної евапотранспірації.

- Зміни в режимі опадів можуть впливати на фактичну евапотранспірацію.

- Зміни в евапотранспірації можуть мати значний вплив на водні ресурси та екосистеми.

Розуміння процесу евапотранспірації є ключовим для ефективного управління водними ресурсами, особливо в контексті зміни клімату та зростаючого попиту на воду. Це особливо важливо для управління транскордонними підземними водами, де зміни в евапотранспірації можуть впливати на поповнення водоносних горизонтів та доступність води для різних країн.

в) **Зміни в сезонності поповнення:**

- У регіонах зі сніговим покривом, раннє танення снігу може змінити час та інтенсивність весняного поповнення.

- Зміна режиму опадів може призвести до зміщення періодів поповнення.

г) **Вплив на якість води:**

- Зміна режиму поповнення може вплинути на концентрацію забруднювачів у підземних водах.

- Підвищення рівня моря може призвести до інтрузії солоної води в прибережні водоносні горизонти.

д) **Регіональні особливості:**

- У посушливих регіонах очікується зменшення поповнення підземних вод.

- У вологих регіонах можливе збільшення поповнення, але з більшою варіабельністю.

е) **Вплив на транскордонні водоносні горизонти:**

- Зміни в поповненні можуть бути нерівномірними в різних частинах транскордонного водоносного горизонту.

- Це може призвести до зміни напрямків потоку підземних вод та їх якості.

7.3. **Стратегії адаптації до зміни клімату**

Розробка та впровадження стратегій адаптації є критично важливими для забезпечення сталого управління транскордонними підземними водами в умовах зміни клімату.

а) **Покращення знань та моніторингу:**

- Розширення мереж моніторингу підземних вод.

- Інтеграція кліматичних моделей з гідрогеологічними моделями.

- Проведення регулярних оцінок вразливості водоносних горизонтів до зміни клімату.

б) **Диверсифікація джерел водопостачання:**

- Розвиток комбінованого використання поверхневих та підземних вод.

- Впровадження технологій повторного використання води.

- Розвиток альтернативних джерел води (наприклад, опріснення).

в) **Управління попитом на воду:**

- Впровадження водозберігаючих технологій.

- Розробка економічних стимулів для ефективного водокористування.

- Підвищення обізнаності населення щодо водозбереження.

г) **Посилення стійкості водоносних горизонтів:**

- Впровадження методів штучного поповнення підземних вод.

- Захист зон поповнення водоносних горизонтів.

- Управління ландшафтом для оптимізації інфільтрації.

д) **Адаптація сільськогосподарських практик:**

- Впровадження посухостійких культур.

- Оптимізація іригаційних систем.

- Розвиток методів точного землеробства.

е) **Вдосконалення транскордонного співробітництва:**

- Розробка спільних адаптаційних стратегій.

- Створення механізмів для гнучкого розподілу води в умовах змінної доступності.

- Обмін даними та найкращими практиками адаптації.

ж) **Інтеграція адаптації до зміни клімату в політику та планування:**

- Включення сценаріїв зміни клімату в плани управління водними ресурсами.

- Розробка довгострокових стратегій адаптації на національному та регіональному рівнях.

- Забезпечення фінансування для адаптаційних заходів.

з) **Розвиток інноваційних технологій:**

- Впровадження систем раннього попередження про посухи та повені.

- Використання дистанційного зондування для моніторингу водних ресурсів.

- Розробка стійких до зміни клімату інфраструктурних рішень.

Адаптація до зміни клімату в контексті управління транскордонними підземними водами вимагає комплексного підходу, що враховує як природні процеси, так і соціально-економічні фактори. Успішна адаптація залежить від тісної співпраці між країнами, обміну інформацією та ресурсами, а також від готовності до гнучкого та адаптивного управління в умовах підвищеної невизначеності.

**8. Кейс-стаді: приклади управління транскордонними підземними водами**

8.1. **Нубійський пісковиковий водоносний горизонт (Північна Африка)**

Нубійський пісковиковий водоносний горизонт (НПВГ) є одним з найбільших у світі водоносних горизонтів і розташований під територіями Чаду, Єгипту, Лівії та Судану.

**Характеристики:**

- Площа: приблизно 2 млн км²

- Об'єм води: оцінюється в 150,000 км³

- Тип: переважно невідновлюваний (викопний) водоносний горизонт

**Виклики:**

1. Обмежене поповнення через посушливий клімат.

2. Зростаючий попит на воду в регіоні.

3. Ризик засолення та виснаження.

4. Політична нестабільність в регіоні.

**Управління:**

1. Створення в 2000 році Спільного органу з вивчення та розробки нубійських пісковикових водоносних горизонтів (JASAD-NSAS).

2. Розробка регіональної стратегії використання водних ресурсів.

3. Впровадження системи обміну інформацією між країнами.

**Досягнення:**

- Створення спільної бази даних та інформаційної системи.

- Розробка регіональної моделі підземних вод.

- Підписання угоди про моніторинг та обмін даними в 2013 році.

**Уроки:**

- Важливість довгострокового планування для невідновлюваних ресурсів.

- Необхідність постійного моніторингу та обміну даними.

- Значення міжнародної підтримки (наприклад, від МАГАТЕ та ГЕФ) у сприянні співпраці.

8.2. **Водоносний горизонт Гуарані (Південна Америка)**

Водоносний горизонт Гуарані є одним з найбільших резервуарів прісної води в світі, розташований під територіями Аргентини, Бразилії, Парагваю та Уругваю.

**Характеристики:**

- Площа: приблизно 1,2 млн км²

- Об'єм води: оцінюється в 40,000 км³

- Тип: переважно відновлюваний водоносний горизонт

**Виклики:**

1. Нерівномірне використання ресурсу між країнами.

2. Ризики забруднення в зонах поповнення.

3. Зростаючий попит на воду для сільського господарства та міського водопостачання.

**Управління:**

1. Створення Проекту захисту навколишнього середовища та сталого розвитку системи водоносного горизонту Гуарані (2003-2009).

2. Підписання Угоди про водоносний горизонт Гуарані в 2010 році.

3. Впровадження принципів спільного управління та обміну інформацією.

**Досягнення:**

- Розробка спільної бази знань про водоносний горизонт.

- Створення правової та інституційної основи для співпраці.

- Підвищення обізнаності громадськості про важливість ресурсу.

**Уроки:**

- Важливість наукових досліджень для обґрунтування політичних рішень.

- Необхідність залучення місцевих громад та стейкхолдерів.

- Значення превентивного підходу до управління для запобігання майбутніх конфліктів.

8.3. **Динарський карстовий водоносний горизонт (Південно-Східна Європа)**

Динарський карстовий водоносний горизонт розташований на території кількох країн Балканського півострова, включаючи Албанію, Боснію і Герцеговину, Хорватію, Чорногорію та Словенію.

**Характеристики:**

- Площа: приблизно 200,000 км²

- Тип: карстовий водоносний горизонт з складною системою підземних потоків

- Особливості: висока вразливість до забруднення через швидкий рух води в карстових системах

**Виклики:**

1. Складність визначення меж та шляхів руху підземних вод.

2. Висока вразливість до забруднення.

3. Конкуруючі потреби у воді для туризму, сільського господарства та екосистем.

4. Історичні політичні конфлікти в регіоні.

**Управління:**

1. Створення проекту DIKTAS (Захист та стале використання Динарського карстового транскордонного водоносного горизонту) в 2010 році.

2. Впровадження інтегрованого управління водними ресурсами на рівні карстових басейнів.

3. Розвиток транскордонного співробітництва в рамках процесу євроінтеграції.

**Досягнення:**

- Покращення розуміння гідрогеологічних характеристик системи.

- Розробка спільних протоколів моніторингу.

- Підвищення обізнаності про важливість охорони карстових вод.

**Уроки:**

- Необхідність спеціальних підходів до управління карстовими водами.

- Важливість регіонального співробітництва в контексті євроінтеграції.

- Значення екосистемного підходу в управлінні водними ресурсами.

Ці кейс-стаді демонструють різноманітність підходів до управління транскордонними підземними водами залежно від геологічних, кліматичних, політичних та соціально-економічних умов. Вони підкреслюють важливість міжнародного співробітництва, обміну даними, спільних досліджень та розробки правових та інституційних механізмів для сталого управління цими важливими ресурсами. Кожен випадок також показує, що успішне управління вимагає довгострокового зобов'язання, адаптивного підходу та врахування як локальних, так і регіональних потреб та умов.

8.4. **Водоносний горизонт Женевського озера (Франція-Швейцарія)**

**Характеристики:**

- Площа: приблизно 19 км²

- Розташування: долина річки Арв, що впадає в Женевське озеро

- Тип: алювіальний водоносний горизонт

- Запаси: оцінюються в 3 млн м³

**Виклики:**

1. Інтенсивне використання для водопостачання міста Женева.

2. Ризик забруднення через урбанізацію та сільськогосподарську діяльність.

3. Необхідність узгодження використання між двома країнами.

**Управління:**

1. Створення франко-швейцарської комісії з охорони підземних вод Женевського регіону в 1977 році.

2. Підписання конвенції про охорону, використання та поповнення франко-швейцарського женевського водоносного горизонту в 1978 році.

**Конкретний приклад розподілу та видобутку:**

Конвенція 1978 року встановила чіткий механізм розподілу та видобутку води:

1. **Квоти на видобуток:**

- Швейцарія: 5 млн м³ на рік

- Франція: 2 млн м³ на рік

2. **Система компенсації:**

- Швейцарія платить Франції за кожен м³ води, видобутий понад свою квоту.

- Ставка компенсації переглядається кожні 5 років.

3. **Спільне управління поповненням:**

- Створено систему штучного поповнення водоносного горизонту водою з річки Арв.

- Витрати на підтримку системи поповнення розподіляються пропорційно до квот на видобуток.

4. **Моніторинг та контроль:**

- Встановлено мережу моніторингових свердловин з обох сторін кордону.

- Дані про видобуток та якість води регулярно обмінюються між країнами.

**Досягнення:**

- Стабільне водопостачання міста Женева та прилеглих французьких комун.

- Підтримка сталого рівня водоносного горизонту завдяки системі штучного поповнення.

- Покращення якості води через спільні зусилля з охорони зон поповнення.

**Конкретні результати:**

- За період 1980-2020 рр. середній річний видобуток склав:

• Швейцарія: 4,8 млн м³

• Франція: 1,9 млн м³

- Система штучного поповнення забезпечує в середньому 3,5 млн м³ на рік.

- Якість води залишається стабільно високою, відповідаючи стандартам питної води без необхідності складної очистки.

**Уроки:**

1. Важливість чітких кількісних показників у міжнародних угодах про розподіл води.

2. Ефективність економічних механізмів (система компенсації) для забезпечення справедливого використання.

3. Значення активного управління водоносним горизонтом, включаючи штучне поповнення.

4. Необхідність регулярного перегляду умов угоди для адаптації до змінних умов.

Цей приклад демонструє, як чітко визначені квоти на видобуток, механізми компенсації та спільне управління поповненням можуть забезпечити стале та справедливе використання транскордонних підземних вод. Успіх цієї моделі призвів до її розгляду як потенційного зразка для інших транскордонних водоносних горизонтів у Європі та світі.

**9. Інновації та перспективи в управлінні транскордонними підземними водами**

**9.1. Використання дистанційного зондування та ГІС-технологій**

Дистанційне зондування та ГІС-технології відкривають нові можливості для моніторингу та управління транскордонними підземними водами.

а) **Супутникове дистанційне зондування:**

- GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment):

• Вимірює зміни гравітаційного поля Землі, що дозволяє оцінювати зміни запасів підземних вод.

• Приклад: Використання GRACE для моніторингу виснаження водоносного горизонту в долині Центральна (Каліфорнія, США).

- InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar):

• Дозволяє вимірювати деформації земної поверхні з міліметровою точністю.

• Застосування: виявлення осідання ґрунту через надмірний водовідбір.

• Приклад: Моніторинг осідання в Джакарті (Індонезія) через інтенсивне використання підземних вод.

б) **ГІС-технології:**

- Інтеграція даних:

• Об'єднання геологічних, гідрологічних, метеорологічних та соціально-економічних даних.

• Створення комплексних моделей водоносних горизонтів.

- Просторовий аналіз:

• Виявлення зон ризику забруднення.

• Оптимізація розміщення свердловин для моніторингу.

- Візуалізація:

• Створення інтерактивних карт для прийняття рішень.

• Покращення комунікації між зацікавленими сторонами.

в) **Перспективи розвитку:**

- Інтеграція даних дистанційного зондування з наземними вимірюваннями.

- Розвиток методів машинного навчання для аналізу великих обсягів даних.

- Створення систем раннього попередження на основі даних реального часу.

9.2. **Штучне поповнення водоносних горизонтів**

Штучне поповнення стає все більш важливим методом управління підземними водами, особливо в умовах зміни клімату та зростаючого попиту на воду.

а) **Методи штучного поповнення:**

- Поверхневі методи:

• Інфільтраційні басейни

• Затоплення заплав

- Підповерхневі методи:

• Інфільтраційні свердловини

• Підземні дамби

б) **Інноваційні підходи:**

- Керована акваферна реконструкція (MAR):

• Комплексний підхід, що включає збір, очистку та інфільтрацію води.

• Приклад: Проект MARSOL в Іспанії для поповнення прибережних водоносних горизонтів.

- Використання очищених стічних вод:

• Дозволяє одночасно вирішувати проблеми утилізації стоків та поповнення водоносних горизонтів.

• Приклад: Проект NEWater в Сінгапурі, де очищені стічні води використовуються для поповнення резервуарів.

в) **Транскордонні аспекти:**

- Спільні проекти з штучного поповнення можуть сприяти співпраці між країнами.

- Необхідність узгодження стандартів якості води для поповнення.

г) **Перспективи розвитку:**

- Розробка нових матеріалів для покращення інфільтрації.

- Використання нанотехнологій для очистки води перед інфільтрацією.

- Інтеграція систем штучного поповнення з управлінням поверхневими водами.

9.3. **Розвиток методів очищення та відновлення забруднених підземних вод**

Інновації в очищенні та відновленні підземних вод мають критичне значення для забезпечення довгострокової сталості водних ресурсів.

а) **In situ методи очищення:**

- Біоремедіація:

• Використання мікроорганізмів для розкладання забруднювачів.

• Приклад: Очищення підземних вод від хлорованих розчинників на колишній військовій базі в Естонії.

- Хімічне окислення:

• Введення окислювачів для руйнування органічних забруднювачів.

• Приклад: Використання перманганату для очищення підземних вод від BTEX у Данії.

б) **Інноваційні технології:**

- Нанотехнології:

• Використання наночастинок заліза для очищення від важких металів.

• Приклад: Пілотний проект з використання нанозаліза для очищення підземних вод від хрому в Чехії.

- Фіторемедіація:

• Використання рослин для вилучення забруднювачів з ґрунту та підземних вод.

• Приклад: Використання тополь для очищення підземних вод від трихлоретилену в США.

**Приклад використання фіторемедіації для очищення підземних вод від трихлоретилену (ТХЕ) в США з використанням тополь.**

**Місце проведення:** Форт-Ворт, штат Техас, США

Період: 1996-2016 роки

**Забруднювач:** Трихлоретилен (ТХЕ) - хлорований розчинник, широко використовуваний для знежирення металів

**Передісторія:**

На території військово-повітряної бази Кенсас-Сіті в Форт-Ворті було виявлено значне забруднення ґрунтових вод трихлоретиленом внаслідок багаторічної промислової діяльності. Концентрації ТХЕ в підземних водах досягали 300 мкг/л, що значно перевищувало допустимі норми (5 мкг/л для питної води згідно зі стандартами EPA).

**Вибір методу фіторемедіації:**

Традиційні методи очистки, такі як відкачування та очищення води, виявилися дорогими та малоефективними для даного типу забруднення. Фіторемедіація була обрана як економічно вигідний та екологічно дружній метод.

**Реалізація проекту:**

1. Вибір рослин:

- Були обрані гібридні тополі (Populus deltoides × Populus nigra) через їх швидкий ріст, глибоку кореневу систему та здатність поглинати великі об'єми води.

2. Посадка:

- У 1996 році було висаджено **660 тополь** на площі близько 1 гектара.

- Дерева були посаджені в шаховому порядку з інтервалом 3,7 м.

3. Механізм дії:

- Корені тополь досягають водоносного горизонту (глибина 5-10 м).

- Дерева поглинають забруднену воду разом з ТХЕ.

- ТХЕ метаболізується в тканинах рослин або випаровується через листя.

4. Моніторинг:

- Регулярний відбір проб ґрунтових вод для аналізу концентрації ТХЕ.

- Аналіз тканин дерев та ґрунту на наявність ТХЕ та продуктів його розпаду.

- Вимірювання транспірації дерев для оцінки об'єму очищеної води.

**Результати:**

1. Ефективність очистки:

- За 20 років концентрація ТХЕ в підземних водах знизилася на 95%.

- До 2016 року концентрації ТХЕ в більшості точок моніторингу були нижче 5 мкг/л.

2. **Об'єм очищеної води:**

- Оцінюється, що кожне доросле дерево очищало до 200 літрів води на день в період активної вегетації.

- За весь період проекту було очищено близько 20 мільйонів літрів забрудненої води.

3. **Економічна ефективність:**

- Вартість проекту склала приблизно $100,000 за 20 років.

- Для порівняння, традиційні методи очистки могли б коштувати до $5 мільйонів за той же період.

4. **Додаткові переваги:**

- Створення зеленої зони, що покращило естетику території.

- Поглинання CO2 та виробництво кисню деревами.

- Зменшення ерозії ґрунту.

**Виклики та обмеження:**

1. Довгостроковість: метод вимагає багато часу для досягнення результатів.

2. Сезонність: ефективність очистки знижується в зимовий період.

3. Глибина забруднення: метод ефективний лише для відносно неглибоких водоносних горизонтів.

**Висновки та перспективи:**

Цей проект продемонстрував ефективність фіторемедіації як довгострокового, економічно вигідного та екологічно дружнього методу очищення підземних вод від органічних забруднювачів. Успіх проекту призвів до впровадження подібних підходів на інших забруднених територіях в США та інших країнах.

Для застосування в контексті транскордонних підземних вод, фіторемедіація може бути особливо корисною в прикордонних зонах, де традиційні методи очистки можуть бути складними для реалізації через юридичні та логістичні обмеження. Однак, це вимагатиме тісної співпраці між країнами у плануванні, реалізації та моніторингу таких проектів.

Приклади інших рослин, які можна використовувати для очищення підземних вод методом фіторемедіації. Різні рослини мають здатність поглинати та метаболізувати різні типи забруднювачів.

1. **Верба (Salix spp.):**

- Ефективна для видалення важких металів (кадмій, цинк, мідь).

- Приклад: Використання верби для очищення ґрунтових вод від цинку та кадмію на колишньому промисловому майданчику в Швеції.

2. **Соняшник (Helianthus annuus):**

- Здатний поглинати радіонукліди (уран, цезій-137, стронцій-90).

- Приклад: Використання соняшників для очищення ґрунтових вод від урану поблизу Чорнобильської АЕС в Україні.

3. **Очерет звичайний (Phragmites australis):**

- Ефективний для видалення органічних забруднювачів та деяких важких металів.

- Приклад: Використання очерету в системах очищення стічних вод, які потім інфільтруються в підземні води, в Німеччині.

4. **Люцерна (Medicago sativa):**

- Здатна поглинати перхлорати, які часто забруднюють підземні води.

- Приклад: Використання люцерни для очищення ґрунтових вод від перхлоратів на військових об'єктах в США.

5. **Тополя гібридна (Populus × canadensis):**

- Ефективна для видалення нітратів та фосфатів.

- Приклад: Використання гібридних тополь для зниження рівня нітратів у підземних водах сільськогосподарських регіонів Франції.

6. **Індійська гірчиця (Brassica juncea):**

- Здатна акумулювати свинець, хром, кадмій, цинк, нікель.

- Приклад: Використання індійської гірчиці для очищення ґрунтових вод від важких металів на колишніх промислових майданчиках в Індії.

7. **Водяний гіацинт (Eichhornia crassipes):**

- Ефективний для видалення органічних забруднювачів та важких металів.

- Приклад: Використання водяного гіацинту в системах фіторемедіації для очищення забруднених підземних вод в тропічних регіонах, наприклад, в Бразилії.

8. **Осока (Carex spp.):**

- Здатна поглинати різні важкі метали.

- Приклад: Використання різних видів осоки для очищення підземних вод від міді та цинку в районах колишніх шахт у Канаді.

9. **Ячмінь (Hordeum vulgare):**

- Ефективний для видалення селену з ґрунтових вод.

- Приклад: Використання ячменю для зниження концентрації селену в підземних водах сільськогосподарських регіонів Каліфорнії, США.

10. **Канадський золотарник (Solidago canadensis):**

- Здатний акумулювати миш'як та важкі метали.

- Приклад: Використання золотарника для очищення ґрунтових вод від миш'яку в районах з природним забрудненням в Канаді.

Важливо зазначити, що вибір конкретних рослин для фіторемедіації залежить від багатьох факторів, включаючи тип забруднювача, кліматичні умови, глибину залягання підземних вод, та місцеві екологічні особливості. Часто найефективнішим є використання комбінації різних видів рослин для досягнення оптимальних результатів очищення.

в) **Комплексні підходи:**

- Поєднання різних методів очищення для досягнення кращих результатів.

- Інтеграція очищення підземних вод з відновленням екосистем.

г) **Транскордонні аспекти:**

- Необхідність координації зусиль з очищення в транскордонних водоносних горизонтах.

- Розробка спільних стандартів та протоколів очищення.

д) **Перспективи розвитку:**

- Розробка нових біотехнологічних методів очищення.

- Використання штучного інтелекту для оптимізації процесів очищення.

- Розвиток методів "зеленої" хімії для очищення підземних вод.

Ці інновації та перспективи розвитку відкривають нові можливості для більш ефективного та сталого управління транскордонними підземними водами. Вони дозволяють покращити моніторинг, збільшити доступність водних ресурсів та забезпечити їх якість. Однак, для успішного впровадження цих інновацій необхідна тісна співпраця між країнами, обмін технологіями та знаннями, а також адаптація нормативно-правової бази до нових можливостей та викликів.

**10. Висновки**

10.1. **Ключові принципи сталого управління транскордонними підземними водами**

1. Інтегрований підхід: розгляд підземних вод у контексті всього гідрологічного циклу та екосистем.

2. Принцип справедливого та розумного використання: забезпечення рівноправного доступу всіх країн до ресурсу.

3. Зобов'язання не завдавати значної шкоди: країни повинні використовувати ресурс так, щоб не шкодити іншим країнам.

4. Принцип перестороги: вжиття заходів для запобігання можливій шкоді, навіть за відсутності повної наукової впевненості.

5. Спільне управління та моніторинг: створення механізмів для колективного прийняття рішень та обміну даними.

6. Адаптивне управління: гнучкість у підходах з урахуванням змін клімату та соціально-економічних умов.

7. Участь зацікавлених сторін: залучення різних груп користувачів та громадськості до процесу управління.

10.2. **Роль міжнародного співробітництва**

1. Створення правової бази: розробка міжнародних конвенцій та двосторонніх угод.

2. Інституційні механізми: формування спільних комісій та робочих груп.

3. Обмін даними та інформацією: забезпечення прозорості та доступності гідрологічних даних.

4. Спільні дослідження: проведення транскордонних наукових проектів.

5. Розбудова потенціалу: навчання фахівців та обмін досвідом між країнами.

6. Фінансова підтримка: залучення міжнародних фондів для реалізації проектів.

7. Вирішення спорів: створення механізмів для мирного врегулювання конфліктів.

10.3. **Перспективи подальших досліджень та розвитку галузі**

1. Удосконалення методів оцінки запасів: розробка точніших технологій для визначення об'ємів та динаміки підземних вод.

2. Вплив кліматичних змін: поглиблене вивчення впливу глобального потепління на підземні води.

3. Розвиток технологій очистки: інновації в області ремедіації забруднених водоносних горизонтів.

4. Інтеграція з поверхневими водами: вдосконалення підходів до комплексного управління водними ресурсами.

5. Економічна оцінка: розробка методів оцінки економічної цінності підземних вод та екосистемних послуг.

6. Вдосконалення правових механізмів: розвиток міжнародного водного права з урахуванням специфіки підземних вод.

7. Соціальні аспекти: дослідження впливу управління підземними водами на місцеві громади та корінні народи.

8. Інновації в моніторингу: розвиток технологій дистанційного зондування та автоматизованих систем моніторингу.

Ці висновки підкреслюють комплексність та міждисциплінарність підходів, необхідних для сталого управління транскордонними підземними водами, важливість міжнародного співробітництва та постійного наукового прогресу в цій галузі.