# Комплексна оцінка геотермальних і мінеральних ресурсів за класифікацією UNFC

Рамкова класифікація ресурсів Організації Об'єднаних Націй (UNFC) - це універсальна система, яка дає змогу здійснювати комплексну оцінку енергетичних (наприклад, геотермальних) і мінеральних ресурсів (наприклад, літію) в межах єдиної класифікаційної моделі. Такий підхід враховує рівень технологічної готовності, суспільне сприйняття, політичні та регуляторні обмеження, а також фінансові ризики для всіх складових проєкту. Хоча звітність відповідно до стандартів CRIRSCO, PERC і JORC зосереджена виключно на мінеральній сировині та є необхідною для розкриття інформації на ринках капіталу, UNFC забезпечує значно вищий рівень сумісності для багаторесурсних проєктів і дозволяє класифікувати ресурси, які наразі ще не є економічно доцільними для освоєння.

Для уникнення дублювання оцінок у разі застосування двох різних систем було розроблено документ, що встановлює взаємозв'язок між ними («bridging document») (UNECE, 2024; CRM-geothermal Deliverable D4.1; Falck & Correia, 2025). Однією з головних переваг UNFC є можливість комплексної оцінки ресурсів у проєктах із супутнім видобутком (co-production), що є ключовим для концепції CRM-geothermal. У таких випадках обсяг мінеральної сировини неможливо достовірно визначити заздалегідь, оскільки вихід корисних компонентів залежить від дебіту геотермального флюїду та концентрації розчинених речовин, які змінюються з часом.

**Виклики видобутку з геотермальних флюїдів**

Хоча системи класифікації вуглеводневих ресурсів мають спільні риси з таким підходом, стандарти UNFC для нафти й газу поки що не повною мірою охоплюють видобуток мінеральної сировини з рідких флюїдів. Особливо це стосується петротермальних систем, у яких природного флюїду недостатньо для ефективної експлуатації, тому необхідно забезпечувати його штучну циркуляцію (рис. 1).

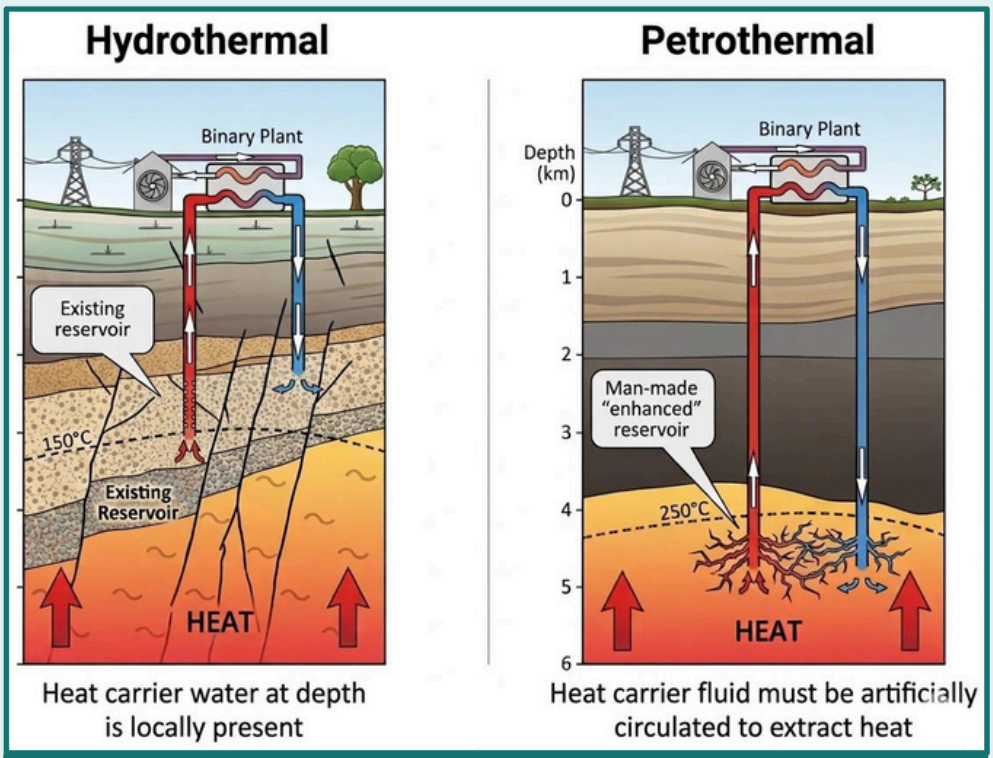


**Рисунок 1. Відмінності між гідротермальними та петротермальними системами**

Funded by the European Union

Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or HADEA. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

# Комплексна оцінка геотермальних і мінеральних ресурсів за класифікацією UNFC

У цих системах період підземного вилуговування (in situ leaching) є відносно коротким і триває від кількох днів до кількох тижнів. Натомість у гідротермальних системах взаємодія флюїду з породою відбувається у геологічних часових масштабах. У таких умовах надзвичайно важливо моделювати час надходження реінжектованої води до експлуатаційної свердловини. Навіть за відсутності термічного прориву (thermal breakthrough) концентрація літію в реінжектованій воді зазвичай є значно нижчою, ніж у пластовій воді, яка перебувала в резервуарі протягом тисячоліть.

Крім того, під час аналізу необхідно враховувати не лише термодинамічну рівновагу, а й кінетичні процеси. Збагачення літієм може перевищувати концентрацію в реінжектованій воді завдяки:

- змішуванню та розбавленню регіональними підземними водами;
- розчиненню мінералів у системі тріщин.

Оскільки ці процеси мають часову залежність, для коректного моделювання ресурсів необхідно враховувати кінетичну складову.

**Стратегічні переваги системи UNFC**

Рамкова класифікація ресурсів ООН (UNFC) забезпечує низку стратегічних переваг для інтегрованих проєктів у сфері геотермальної енергетики та критичної мінеральної сировини (CRM) (рис. 2).
Насамперед вона дає змогу застосовувати комплексний підхід до класифікації ресурсів, забезпечуючи одночасну оцінку геотермального потенціалу та ресурсної бази критичної мінеральної сировини. Це сприяє кращому розумінню взаємозв'язків і синергії в інтегрованих проєктах, зокрема під час вилучення літію з геотермальних розсолів.

**Рисунок 2. Стратегічні переваги системи UNFC для комплексного використання геотермальної енергії**

Крім того, система підтримує стратегічне планування завдяки уніфікованій класифікації, яка допомагає органам державної влади та розробникам проєктів узгоджувати свої ініціативи з національними стратегіями забезпечення мінеральною сировиною, цілями розвитку відновлюваної енергетики та кліматичними зобов'язаннями, зокрема цілями Європейського зеленого курсу (EU Green Deal).

UNFC також сприяє управлінню ризиками та зниженню інвестиційних ризиків. Завдяки тому, що в системі осей E, F і G враховано фактори невизначеності та екологічні, соціальні й управлінські (ESG) аспекти, UNFC сприяє підвищенню стійкості проєктів і довіри інвесторів.

Зрештою, UNFC забезпечує більшу прозорість для інвесторів завдяки єдиному стандарту звітності, що полегшує порівняння різних проєктів. Це особливо важливо для комплексних проєктів, економічна ефективність яких залежить від кількох видів продукції, наприклад виробництва електроенергії та одночасного вилучення літію.

Funded by the European Union
Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or HADEA. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

# Комплексна оцінка геотермальних і мінеральних ресурсів за класифікацією UNFC

## Методологія та висновки

Гідродинамічне моделювання та моделювання перенесення речовини є базовими інструментами для оцінки комплексних проєктів відповідно до класифікації UNFC. Комплексна оцінка має передбачати окреме визначення обсягів кожного виду ресурсу, одночасно оцінюючи екологічну, соціальну та технічну здійсненність комплексного проєкту (рис. 3).
З методологічної точки зору застосовується принцип «найменшого спільного знаменника»: (lowest common denominator): підсумкова класифікація проєкту визначається компонентом із найнижчою оцінкою.
З економічної точки зору життєздатність проєкту слід оцінювати комплексно. Наприклад, проєкт може залишатися економічно доцільним, якщо виробництво теплової та електричної енергії є прибутковим, навіть за умови, що видобуток літію на поточному етапі ще не є економічно рентабельним.

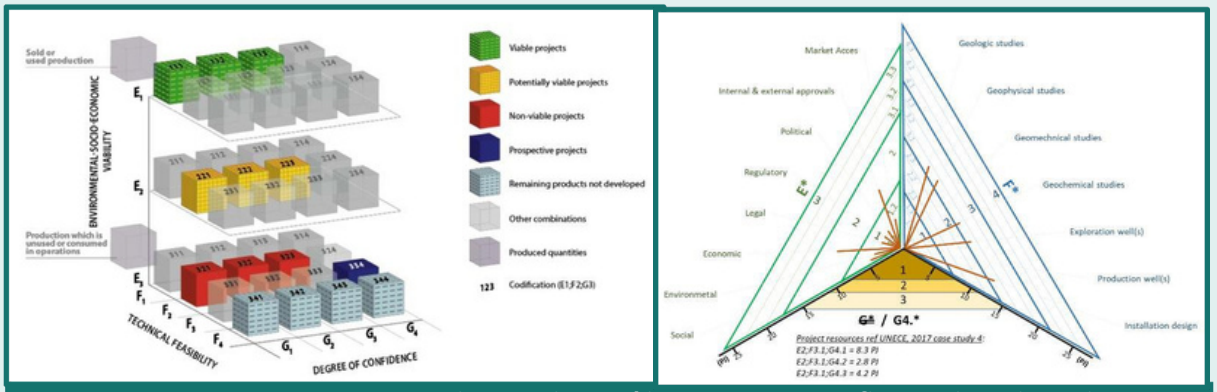


**Рисунок 3. Класи UNFC-2009 (ліворуч) і «профіль UNFC» (UNFC fingerprint) відповідного проєкту (за Mijnlieff та ін., 2019).**

Нарешті, наявність великих масивів даних, насамперед отриманих у ході геотермальної та нафтогазової розвідки, створює можливості для застосування методів машинного навчання та сучасного петрофізичного аналізу. Очікується, що стрімке впровадження технологій штучного інтелекту в моделювання пластових резервуарів стане важливим чинником розвитку практичного застосування комплексної оцінки ресурсів за класифікацією UNFC.

**Більше інформації:**
**Deliverable 2.5: Report onresource calculation according to the UNFC**

**Deliverable 4.1: ESG due diligence of the combined extraction of CRMs and energy, incl. UNFC/UNRMS compatible reporting and policy recommendation**

**Контакти:**
**Janos Szanyi– University of Miskolc -szanyi@iif.u-szeged.hu**

Funded by the European Union

*Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or HADEA. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.*