

ПРИРОДНИЙ (ГЕОЛОГІЧНИЙ) ВОДЕНЬ ЯК НОВА КОРИСНА КОПАЛИНА: СТАН, ПЕРСПЕКТИВИ, ВИКЛИКИ ТА РИЗИКИ

Юрій Віхоть^{1,2}, Соломія Кріль^{2,1}

¹Львівський національний університет імені Івана Франка, вул. Грушевського, 4, Львів, Україна, 79005

e-mail: yuvik@ukr.net

²УкрНДІгаз, АТ «Укргазвидобування», вул. Стрийська, 144, Львів, Україна, 79000

e-mail: solia_kr@ukr.net

Водень дедалі частіше згадується як один з головних елементів енергетичної безпеки розвинутих країн. Глобальний попит на водень за даними IEA (International Energy Agency) досягнув 100 млн т у 2024 році й продовжує зростати. Він набуває ключового значення в енергетичних стратегіях зеленого переходу для забезпечення зменшення викидів CO₂. Безвуглецеве виробництво водню є одним із визначальних елементів глобального енергетичного переходу, проте воно потребує дорогих технологічних рішень.

Промисловий видобуток природного водню різного генезису (напр., білий, золотий водень) сприятиме зменшенню використання викопного палива (газ, вугілля), що виділяє багато CO₂. Такий водень зможе забезпечити швидкий, економічно менш затратний, порівняно з виробництвом зеленого водню, перехід до декарбонізації економіки зі зменшенням викидів вуглецю, або досягти нейтрального балансу.

Особливо важливим є геологічний, або так званий білий, водень природного походження, що має значний потенціал для забезпечення країни недорогою безвуглецевою енергією. Природний водень H₂, як нова корисна копалина та відновлювальне джерело енергії, зможе стати потенційною дешевою альтернативою для майбутніх напрямів розвитку безвуглецевої економіки в Європі та інших країнах світу в разі виявлення його покладів і промислової експлуатації.

У статті проаналізовано сучасний стан, тенденції, перспективи пошуку та розвідки природного – геологічного, або білого водню – у європейських та інших країнах світу на основі опублікованих результатів досліджень у статтях та інших доступних джерелах даних. Продemonстровано його важливість як корисної копалини, а також місце та значення серед інших видів водню з так званої водневої веселки.

Великим досягненням і значним прогресом України є те, що вона стала країною, де «водень природний» офіційно у 2025 р. внесли в перелік корисних копалин загальнодержавного значення. Саме тому вирішення проблем із критеріями пошуку, розвідки геологічного водню, дослідження ймовірних природних резервуарів, перспектив, ризики видобутку, зберігання та транспортування набуло актуальності.

Стаття висвітлює можливості пошуку геологічного водню як альтернативної корисної копалини, демонструє актуальні досягнення, можливі подальші перспективи пошуку та розвідки, а також ризики на основі водневої тенденції та досягнень у європейських країнах й інших регіонів світу.

Природний (геологічний) водень у майбутньому посяде важливе місце як відновлювальне джерело енергії без викидів або з нейтральним CO₂. Білий водень зможе стати альтернативою дорожчого виробництва водню із застосуванням різноманітних відновлювальних джерел або там, де немає можливості розвинути інфраструктуру під зелений водень. Успішний промисловий видобуток геологічного водню зможе замінити частину його потреб, зменшити потреби в природному газі в багатьох сферах енергетики, промисловості, транспорту.

Ключові слова: природний водень, геологічний водень, білий водень, золотий водень, H₂, зелений водень, безвуглецева економіка, водневі тенденції.

Постановка проблеми. У багатьох країнах світу пошуки природного, геологічного водню перетворилися в «золоту лихоманку» після появи інформації про перший комерційний видобуток водню зі свердловини в Малі [11]. Геологічний водень, як потенційно нове джерело низьковуглецевої енергії, став об'єктом зацікавлення для значної кількості провідних нафтогазовидобувних приватних та державних компаній, стартапів, що шукають швидкого успіху в можливості знахідок скупчень акумульованого водню. Природний водень є потенційно новим джерелом енергії для низьковуглецевої економіки, тому став об'єктом для активних пошуків аномального вмісту в усіх частинах світу з оцінкою можливостей його промислового освоєння.

Недостатня кількість або відсутність архівних даних про вміст водню тільки підтверджує, що розвідці природного (геологічного) водню в багатьох країнах та регіонах світу нафтогазовидобувні компанії не приділяли значної уваги. Причинами була низка факторів, серед них: відсутність попиту та значних потреб у водні, можливість нехтування високими викидами вуглецю, недостатнє розуміння природи й поведінки водню, складність визначення вмісту водню через його високу реакційну здатність, дифузію, складність відбору та транспортування проб.

Молекулярний водень є одним із найпоширеніших елементів у земній корі. Він фіксується у вигляді викидів на поверхню в суміші з іншими газами (азотом, метаном, гелієм). Наприклад, відомими в Туреччині є викиди газу, що містять водень (приблизно 10 %), метан, азот, гелій, які постійно горять і не припиняються – так звана Хімера (Chimaera), або гора Янарташ (турецькою Yanartaş), поблизу села Чиралі (Анталійська затока) [5]. Підтверджено, що водень мігрує з надр землі у вільному газоподібному стані, який можна фіксувати аналізаторами, а не тільки як елемент у складі органічних сполук, сумішей газів або розчиненого у воді [3; 13].

Поява інформації про ймовірні пошуки та розвідку природного (геологічного) водню серед публікацій приватних та державних нафтогазовидобувних світових компаній, багатьох стартапів, міжнародних пілотних проєктів, що фінансуються ЄС та іншими організаціями, звітів міжнародних компаній викликає зацікавлення новим видом корисної копалини і в Україні.

Не так давно перелік корисних копалин загальнодержавного значення доповнено актуальними корисними копалинами різного походження, враховуючи тенденції сучасності та потреб. До переліку горючих, газоподібних додано корисну копалину «водень природний» відповідно до змін, внесених до постанови Кабінету міністрів України від 12.12.1994 № 827 «Про затвердження переліків корисних копалин загальнодержавного та місцевого значення» (у редакції постанови Кабінету Міністрів України від 23 травня 2025 р. № 600) [2].

Зважаючи на складний воєнний час, пов'язаний з агресією росії та частим руйнуванням газової інфраструктури, така корисна копалина стає об'єктом зацікавлення у державних та приватних нафтогазовидобувних компаніях, наукових установ й університетів. Питання пошуку та розвідки водню для нафтогазопромислових й інших регіонів західної частини України стало особливо актуальним, а збір та узагальнення даних і будь-якої інформації про генерацію, міграцію і ймовірне накопичення стало першочерговим.

Аналіз попередніх даних. Інформація про комерційний видобуток канадською компанією Hydroma Inc. (колишня Petroma) природного водню на першому та поки єдиному родовищі водню в Малі, де витоки невідомого газу (водню) випадково виявлені під час буріння свердловини на воду, а згодом після 2012 р. використані для місцевого енергопостачання селища Буракебуг [11], привернуло особливу увагу до водню як нової та дешевшої корисної копалини. Відтоді свердловина постійно видобуває чистий водень (98–99 %, без домішок CO₂ та метану) [11].

Численні дослідження в Омані, Філіппінах, Туреччині, Малі, США (Південна Кароліна, Канзас), Бразилії, Австралії, Канаді та деяких регіонах Європи (Франція, Іспанія) також виявили значні прояви природного водню [10; 11; 23]. Проте видобуток геологічного водню, як виявилось, є технічною проблемою, але малійський випадок є першим успішним шляхом до промислової експлуатації і підтверджує існування покладів [10; 11].

Актуальні питання, які викликають зацікавлення останніми роками в дослідників різних країн та працівників нафтогазовидобувних компаній, є пошук інформації і вирішення проблем генерації, міграції, можливості формування підземних покладів геологічного водню, економічно рентабельних для видобутку, розуміння водневих систем, критерії пошуку потенційних водневих покладів, значення польових досліджень з визначення вмісту водню в ґрунтовому газі для картування водневих аномалій, визначення основних джерел водню, та багато ін. [4; 10; 11; 16–20; 23].

Мета статті – дати загальний аналіз сучасному стану та проблемі природного водню у світі та в Україні. Основні питання та завдання, що розглядаються та вирішуються в статті:

- 1) поняття геологічного водню, його місце серед інших способів генерації та значення для безвуглецевої економіки та енергетики;
- 2) узагальнення сучасних уявлень про генерацію, міграцію та виявлені ознаки наявності природного геологічного водню;
- 3) визначення ймовірних перспектив природного водню як нової корисної копалини, на основі світових тенденцій та досягнень;
- 4) встановлення основних викликів та ризиків, що пов'язані з видобутком, а також перспективи подальших досліджень.

Виклад основного матеріалу. До цього часу природний геологічний водень, або «білий», як прийнято його зараз називати, переважно ігнорувався, оскільки вважався рідкісним – найменша молекула газу, легка, швидко реагує з утворенням сполук, та таким, який нечасто самостійно накопичується у вигляді вільного газу.

Якщо загалом оцінити інтерес до водню, до перших десятиліть XXI ст., зі сторони нафтогазовидобувних компаній під час буріння нафтових та газових свердловин, то він не викликав особливого зацікавлення й часто ігнорувався. Так, у межах нафтогазових провінцій в Україні, під час опробування складу газу із дійсних свердловин або під час буріння, уміст водню в складі газу взагалі не визначався або трапляються поодинокі результати аналізів з лабораторії або польових хроматографів станцій ГТД, що часто сумнівні й потребують перевірки їх достовірності (що часто неможливо зробити). Визначення вмісту водню в лабораторіях часто було технічно неможливим (вимагало спеціального переналаштування хроматографа) або непотрібним (першочергово досліджувалися вуглеводні), оскільки стаціонарний хроматограф був обладнаний та налаштований виключно на визначення вуглеводнів. Водночас навіть відбір проб свердловинного газу в пробовідбірники для дослідження вмісту водню вимагає особливого підходу через високу міграційну здатність водню. Наприклад, стандартні металеві пробовідбірники не здатні тривалий час забезпечувати достатній рівень герметичності для транспортування та зберігання проб з воднем.

Крім того, основна увага в минулому столітті була приділена штучно виробленому водню з доступних традиційних джерел (природний газ, вугілля), якого було достатньо для задоволення потреб ринку у водні, але не так зосереджували увагу на високих викидах вуглецю.

Завдяки збільшенню попиту на водень в останні десятиліття і забезпеченню виконанню міжнародних програм зі зменшення викидів CO₂, нарощується виробництво

зеленого водню шляхом електролізу води з використанням сучасних джерел відновлювальної енергії (вітрових, сонячних, геотермальних або гідроелектростанцій), що суттєво сприяє зменшенню викидів вуглекислого газу. Частка виробництва водню таким способом незначна (хоча суттєво збільшується з кожним роком) і не може повністю покрити потреби. Більша частина водню, що виробляється сьогодні, все-таки походить від викопного палива, хоча є прогрес у частковій заміні водню з інших безвуглецевих джерел.

Завдяки різноманіттю джерел походження та способів виробництва водню з'явилася ціла воднева «веселка» (рис. 1, табл. 1), що наочно ілюструє можливості генерації водню [8; 9; 22]. Необхідність класифікації водню стала неминучою. Вона почалася з присвоєння зеленого та сірого кольорів водню, щоб відрізнити екологічно чисте виробництво водню від виробництва, що пов'язано з викидами вуглекислого газу.

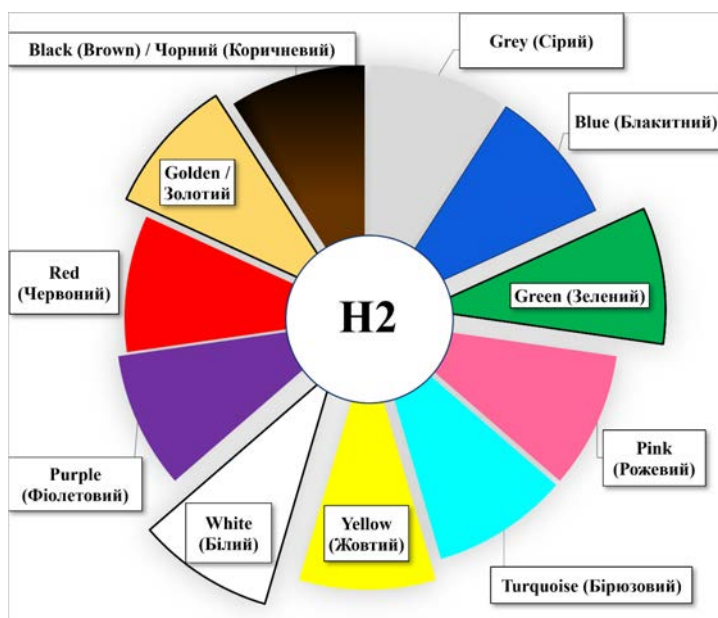


Рис. 1. Воднева «веселка» різного за джерелами виробництва та походженням водню за даними [8; 9; 22]

Так, система кольорового кодування використовується для опису механізмів виробництва або видобутку водню. Символічно кольори застосовують для позначення різного за походженням водню: кожен колір відповідає певному джерелу енергії або процесу, що був використаний для отримання водню (див. рис. 1 та табл. 1). Розглянемо кілька типів водню та місце природного, або білого, водню. Зауважимо, що немає єдиної затвердженої кольорової «веселки» водню.

Сірий водень – високозатратний продукт електролізу, отриманий на основі вуглеводневої викопної сировини – метану. З виробництвом сірого водню генерується надзвичайно велика кількість шкідливих забрудників довкілля – викидів CO_2 .

Зелений водень, який характеризується найменшим вуглецевим слідом, виробляється переважно шляхом електролізу води з використанням відновлюваної електроенергії вітрових, геотермальних, сонячних або гідроелектростанцій. На цьому етапі технологічного розвитку виробництва для електролізерів тенденція полягає в досягненні гігаватного масштабу виробництва чистої енергії та відповідного зростання виробництва водню.

Таблиця 1

Символічний колір водню, або так звана воднева веселка, механізми виробництва або видобутку водню, екологічний вплив

Колір Водню (англ. / укр.)	Основний спосіб виробництва	Схема (спрощено)	Екологічний Вплив / Особливості
Grey / Сірий	Паровий риформінг метану (SMR) з природного газу	Природний газ + Пара → Водень + CO ₂ (викиди)	Високий вуглецевий слід
Blue / Блакитний	Паровий риформінг метану (SMR) з уловлюванням вуглецю (CCUS)	Природний газ + Пара → Водень + CO ₂ (уловлювання та зберігання)	Значно нижчий вуглецевий слід порівняно із сірим воднем
Green / Зелений	Електроліз води з використанням відновлюваної енергії	Вода + Електрика (з ВДЕ) → Водень + Кисень	Нульовий вуглецевий слід
Pink / Рожевий	Електроліз води з використанням ядерної енергії	Вода + Електрика (з АЕС) → Водень + Кисень	Нульові викиди CO ₂ , але питання щодо ядерних відходів
Turquoise / Бірюзовий	Піроліз метану	Метан → Водень + Твердий вуглець	Потенційно низький вуглецевий слід (залежить від джерела енергії та утилізації вуглецю)
Yellow / Жовтий	Електроліз води з використанням сонячної енергії	Вода + Електрика (переважно сонячна) → Водень + Кисень	Залежить від частки сонячної енергії в загальному балансі
White / Білий	Природний видобуток з підземних родовищ	Природні підземні родовища → Видобуток водню	Дуже низький вуглецевий слід при видобутку, обмежена поширеність
Purple / Фіолетовий	Електроліз / термічні процеси з використанням ядерної енергії	Вода + Електрика (з АЕС) → Водень + Кисень	Синонім рожевого водню
Red / Червоний	Газифікація біомаси	Біомаса → Водень + Супутні продукти	Потенційно низький вуглецевий слід, залежить від управління біомасою
Golden / Золотий	Газифікація відходів / змішані технології	Газифікація або піроліз різних відходів (наприклад, муніципальних, промислових) для отримання водню (на виснажених родовищах)	Низький вуглецевий слід, сприяє циклічній економіці
Black (Brown) / Чорний (Коричневий)	Газифікація кам'яного або бурого вугілля	Кам'яне вугілля перетворюється на газ при високих температурах, з якого потім виділяється водень	Високий вуглецевий слід, через високі викиди CO ₂ від вугілля

Виробництво водню з більш екологічно чистих джерел є напрямом інтенсивних досліджень протягом останніх років. Тому зелений водень на сьогодні залишається най-більш затребуваним штучним паливом. Обладнання для його виробництва надзвичайно вартісне, потребує великої кількості енергії, відведення значних площ земель, водних

ресурсів, надійних сховищ, транспортних шляхів доставки кінцевого продукту до внутрішніх та зовнішніх ринків збуту. Очікується (згідно зі стратегією зеленого переходу у світі), що до 2050 року зелений водень стане найпопулярнішим методом виробництва та економічно конкурентоспроможним із цінами на природний газ.

Інший, золотий водень має особливо унікальний метод виробництва. Цей вид водню може видобуватися з виснажених нафтових родовищ. Такі свердловини містять залишкові запаси нафти, які наразі нерентабельно видобувати. Для отримання золотого водню у виснажені свердловини закачують фірмові суміші поживних речовин і бактерій. Потім бактерії розщеплюють залишки нафт на H_2 і CO_2 . Цей процес може дати нове життя свердловинам, а однією з переваг може бути наявна інфраструктура. Однак забезпечення того, щоб CO_2 можна було вловлювати зі свердловин, є пріоритетним завданням для забезпечення вуглецевої нейтральності цього типу водню.

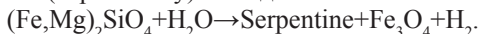
Найбільший інтерес для геологів має білий, природний або геологічний водень, що безперервно утворюється в надрах Землі і на якому надалі зосередимось у цій статті.

Геологічний водень – небіогенний або абіотичного походження, безперервно генерується завдяки різним природним фізико-хімічним механізмам, відповідно до процесів, які досі погано вивчені. Встановлення основних механізмів його формування передбачає проведення комплексних досліджень, що поєднують геологічні дані, ізотопні аналізи, аналізи тиску та складу газів і т. д. для з'ясування ймовірного походження, міграції, накопичення водню.

Проаналізувавши публікації щодо утворення, поширення, накопичення водню [4; 10–12; 16; 22; 23], а також результати власних польових досліджень і спостережень [13; 14], стає зрозуміло, що водневу систему в геологічному середовищі потрібно описувати подібно до вуглеводневих систем осадових басейнів із виділенням етапів генерації, міграції та акумуляції, але чи аналогічні процеси з вуглеводнями – питання є не вирішеним до кінця й залишається актуальним для подальших досліджень.

Генерація геологічного водню. Утворення водню пов'язане з різними геохімічними процесами [21], основними з яких є такі:

1) серпентинізація – ключовий механізм генерації водню, що відбувається при взаємодії води з залізовмісними мінералами ультраосновних порід (наприклад, олівіном та піроксенами) за високих температур і тиску. Результатом є утворення гідроксильних мінералів (серпентину) та виділення вільного водню:



Цей процес активно відбувається в офіюлітових комплексах, що є фрагментами давньої океанічної кори, а також у зонах серединно-океанічних хребтів;

2) радіоліз води – розпад молекул води під впливом радіоактивного випромінювання від природних радіоактивних елементів (U, Th, K). Цей процес може відбуватися в кристалічних щитах та древніх кратонах, де зосереджені граніти та інші магматичні породи з підвищеним вмістом радіоактивних елементів;

3) термогенні процеси – розкладання органічної речовини (наприклад, керогену) за високих температур;

4) тектонічні процеси – деякі дослідження вказують на те, що водень може утворюватися під час інтенсивних тектонічних рухів у зонах розломів, де відбувається взаємодія між водою та SiO_2 порід.

Міграція та акумуляція водню. Розуміння особливостей міграції, ролі водню в геохімічних процесах, підтвердження акумуляції водню є основою для пошуку його потенційних покладів. Міграція водню з надр Землі та його акумуляція є складною та важливою проблемою, вирішення якої потребує фундаментальних досліджень з урахуванням усіх процесів та умов формування в комплексі. Вирішення таких проблем у світі перебуває

на початковому етапі, оскільки залежно від джерел набір умов формування покладів відрізнятиметься.

Водень може мігрувати по розломах і тріщинах у гірських породах, що забезпечують швидке переміщення до поверхні. Він відіграє важливу роль у геохімічних процесах на глибинах та під час руху на поверхню.

Збільшення кількості публікацій у світі по різних регіонах свідчать про те, що активно досліджують процеси міграції в різних тектонічних регіонах, оцінюються можливі місця акумуляції водню для кращого розуміння його ролі у геохімічних процесах.

Водень, наприклад, утворюється внаслідок процесів серпентинізації в глибоких водоносних горизонтах, що контактують з фундаментом, багатих на залізо. Згодом газ мігрує на поверхню через мережу розломів, тріщин або ділянок, що за своїми властивостями не утримують його. Молекулярний водень можна фіксувати в ґрунтовому газі спеціалізованими портативними газоаналізаторами з водневими сенсорами [13]. Геохімічні дослідження ґрунту показують, що водень переважно просочується по всьому профілю ґрунту [13]. Витоки водню можуть бути пов'язані із зонами розломів, які, найімовірніше, діють як канал для висхідної його міграції.

Проте є одне підтверджене водневе родовище, яке свідчить про своєрідні умови накопичення водню. Водень родовища Буракебугу (Малі) накопичений у протерозойських пісковиках, що перекриті непроникними шарами (глинами та долеритами). Імовірне джерело водню – серпентинізація або реакції «вода – порода» в ультраосновних породах, які виділяють водень. Газ утримується під тиском у куполоподібній структурі [11].

За матеріалами [11], на основі даних з нових свердловин у межах родовища Буракебугу підтверджена наявність водневого покладу. Поклад формується щонайменше з п'яти складених інтервалів, що містять значну кількість водню, які охоплюють площу, що перевищує 8 км у діаметрі. Воднева система представлена генерацією у фундаменті, а резервуари водню містять сліди метану, азоту і гелію. Стратиграфічно накопичення водню пов'язане з наявністю багат шарових долеритових силів і наявністю водоносних горизонтів, які, найімовірніше, відіграють вагомую роль у запобіганні міграції та витоків водню до поверхні [11].

Стік або природні витoki водню на поверхні. Початком зовсім нових досліджень, пов'язаних із пошуком водню або картування аномальних зон із підвищеним вмістом водню, на відміну від опробування свердловини, можуть бути ділянки з поверхневими природними витокami водню. Такі витoki можна зафіксувати портативними газовими аналізаторами в ґрунтовому газі [13] або під час складнішого відбору та аналізу з води. Імовірні витoki водню регулярно створюють на поверхні легко помітні сліди, які часто називають магічними колами (fairy circles), або круглими чи напівкруглими заглибленнями (circular depression) (рис. 2) [6; 12; 15; 16; 21].

Такі «магічні кола», або напівкруглі заглиблення, часто заповнені водою без рослинності, яка є тільки по краях. «Магічні кола» знайдені по всьому світу, зокрема в Малі, Бразилії, Сполучених Штатах, Австралії та ін. [21; 6; 12; 15]. Проте не так давно (2023 р.) компанією Natural Hydrogen Energy LLC у співпраці з HyTerra Ltd [7] пробурена перша wild cat-свердловина для розвідки природного геологічного (білого) водню – Hoarty NE3 у штаті Небраска США (проект Женева) у центрі такого – fairy circle.

Свердловина Hoarty NE3 поки не дала комерційного видобутку водню, але виявила підвищену концентрацію водню та гелію і підтвердила потенціал природного водню в цьому регіоні США. Для оцінки комерційного потенціалу ресурсу потрібні подальші випробування, включно з розширеним випробуванням свердловини. За отриманими результатами з'явилось ще одне невирішене запитання – як водень та гелій поведуть себе під час формування водневих покладів і яка роль гелію.

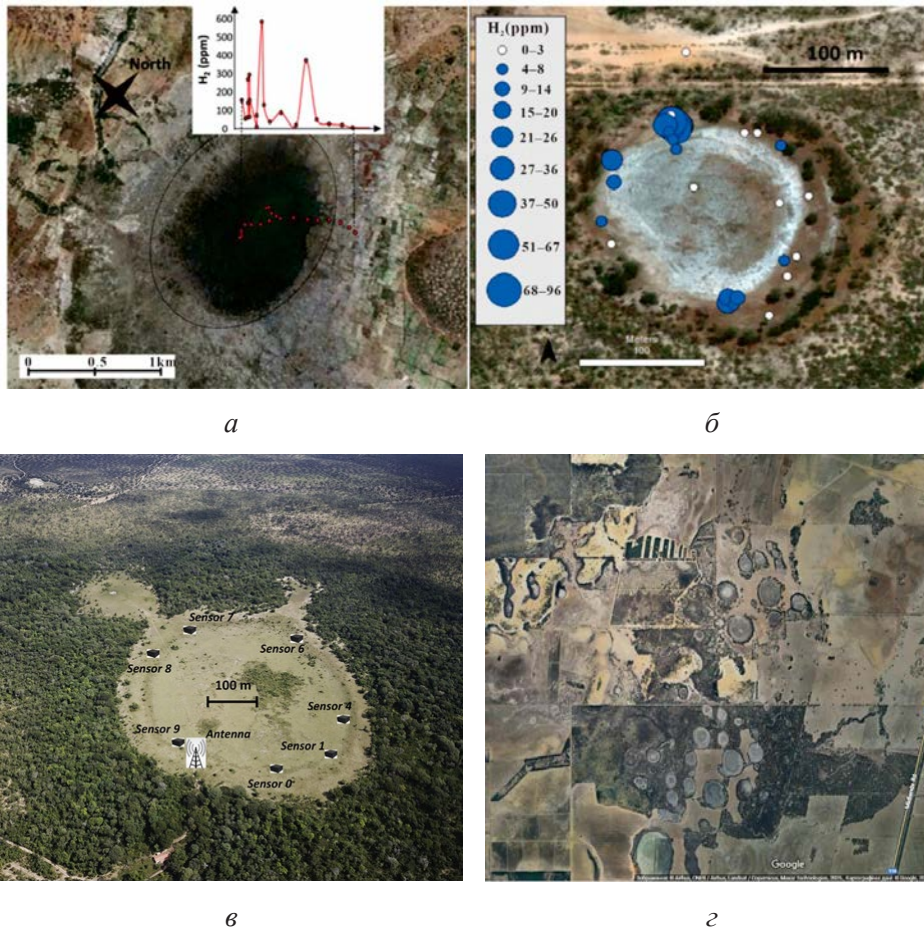


Рис. 2. Імовірні так звані магічні кола (fairy circles), або круглі / напівкруглі заглиблення (circular depression), у Малі, Австралії, Бразилії [21, 6, 12, 15]: *а* – велике скупчення витоків природного водню в Буракебугу (Малі) із замірами його вмісту; *б* – природні витоків водню, виявлені в басейні Північного Перту, Західна Австралія [6]; *в* – фото та розташування станцій моніторингу водню в circular depression (басейн Сан-Франциско, Бразилія) [12]; *г* – фрагмент з карти Google з кулеподібними утвореннями (на північний захід від Мура, Західна Австралія), які пов'язують з природними витоків водню [15]

Водночас ці компанії останніми роками розширюють свої водневі проекти (у комплексі з гелієм), наприклад, у рифтовій структурі в межах штату Канзас (США) – проект Nemaha (Немаха) (рис. 3) [7].

Імовірні перспективи, розташування та потенціал водню. Молекулярний водень трапляється у вигляді розчиненого газу, у включеннях та у вигляді вільного газу (рис. 4) за даними [10; 23]. Найбільше значення для промислової оцінки має водень у вільному газі. Знаходження підвищеного вмісту водню може мати комерційне зацікавлення.

В Україні з її геологічною будовою є теж сприятливі умови для накопичення й можливого виявлення природного геологічного білого водню. Проте пошук та перевірка достовірності інформації, аналіз даних, проведення поверхневих геохімічних досліджень

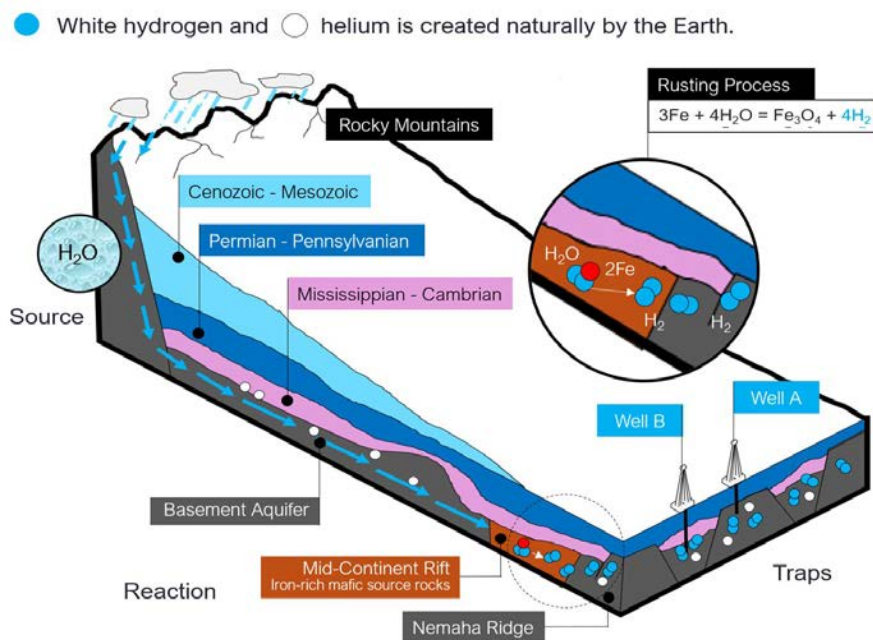


Рис. 3. Схематична геологічна модель формування покладів, що є основою проєкту компанії HyTerra Ltd – водневого (у комплексі з гелієм) проєкту Nemaha (Немаха, штат Канзас, США) згідно з даними [7] (блакитні кружечка вказують на водень та ймовірну його міграцію та накопичення, а білі – гелію)



Рис. 4. Природний водень (як розчинений газ, як газ у включеннях або як вільний газ) на карті світу, станом на 2020 р. [10] за даними [23]

та ін. перебуває на початковому етапі й викликає зацікавлення в державних та деяких приватних нафтогазовидобувних компаніях.

Основні невирішені питання та проблеми: розуміння геологічних умов накопичення – ідентифікація водневих пасток, добір комплексу геохімічних та геофізичних методів розвідки або розробка нових підходів для виявлення «водневих» родовищ у кожному перспективному регіоні.

Низка публікацій про водень, гучні заявки з повідомлень в інтернеті про підвищений вміст водню у світі (в Україні) потребує ретельної перевірки достовірності отриманих даних та перегляду інформації.

За попередніми результатами власних польових геохімічних досліджень та аналізом публікацій [1; 13; 14] перспективними для пошуку водню в межах України (або, насамперед, для проведення поверхневих геохімічних робіт, аналізу складу газу свердловин чи в подальшому можливого буріння нових) можуть бути осадові басейни Волино-Подільської плити, Дніпровсько-Донецької западини, Передкарпатського та Закарпатського прогинів.

Завдяки тому як дедалі більше компаній запускають водневі пілотні проекти, розмови про роль водню в енергетичному балансі та можливість його знаходження лише прискорюються. Компанії, що займаються розвідкою природного водню у світі, паралельно, вивчають архівні дані із «сухих» вуглеводневих та інших свердловин, щоб з'ясувати, чи випадково не знайшли водень. Одним із першочергових напрямів може бути опробування на вміст водню старих та інших (експлуатаційних, не експлуатуються, нерентабельних, виснажених) свердловин, у яких зафіксовано низький уміст метану, але наявні інші гази (азот, гелій). Такі свердловини можуть бути об'єктами дослідження для ймовірного виявлення підвищеного вмісту водню хоча б у деяких із них.

Що стосується виявлення поверхневих витоків водню в межах нафто- та газоперспективних регіонах, то такі знахідки теж не автоматично відкривають шлях до оголошення комерційної знахідки. Навпаки, сам факт витoku може свідчити про те, що газ неефективно утримується під поверхнею. Тому потрібні додаткові дослідження, щоб підтвердити та виявити ймовірні поклади, якщо такі умови для їх формування є. Знайти водневий резервуар можна в місцях, де менше розломів, і якщо переважають сприятливі умови накопичення, близько розташоване джерело генерації, то, відповідно, можуть формуватися пастки.

Геологічний водень утворюється завдяки процесам, що відрізняються від вуглеводнів, а отже, місця, які ніколи не були об'єктом зацікавлення для розвідки газу та нафти, цілком можуть бути перспективними на водень [16], що стосується й території України.

Відмінність між водневою та вуглеводневою системою існує, викликає низку питань і нез'ясована до кінця [16]. Оскільки H_2 є найменшою та найлегшою молекулою, то в усіх випадках, коли водень вивільняється на великій глибині, він може повільно просочуватися майже будь-де в земній корі та повільно безперервно дифундувати до поверхні певними шляхами, але чи ті шляхи є постійними чи змінюються залежно від впливу інших факторів. До кінця не з'ясованим є ці шляхи міграції та в яких геологічних резервуарах, а головне – за яких умов, може безперервно накопичуватися геологічний водень, утворювати повноцінні промислові поклади і скільки потрібно на це часу.

Оцінка перспектив та проведення подальших досліджень. Для оцінки перспектив та проведення подальших дослідження на виявлення покладів водню потрібне детальне картування потенційних «водневих» провінцій в Україні (у світі), розробка та апробація нових геохімічних і добір комплексу геофізичних методів, спеціально адаптованих для пошуку водню, оцінка можливість інтеграції водню в наявні енергетичні системи, вивчення

екологічних наслідків видобутку водню, створення міжнародної правової та регуляторної бази для його освоєння – наявність у переліку корисних копалин може пришвидшити цей процес.

Серед вирішення найважливіших питань для оцінки перспектив природного геологічного водню – розкрити його потенціал, імовірне промислове освоєння, зосередившись на такому: геохімії природного утворення водню, генерації, накопиченні та міграції водню; доборі геофізичних методів для дослідження та пошуку природного водню; ідентифікації природних джерел водню; виявлення природних резервуарів водню; можливості в технологіях, інфраструктурі, впливу на навколишнє середовище, а також кінцеву вартість та рентабельність видобутку.

Виклики та ризики, що пов'язані з освоєнням геологічного водню як корисної копалини. Незважаючи на значні перспективи, освоєння природного геологічного водню стикається з низкою викликів та ризиків:

1) наукова невизначеність: бракує всеосяжного розуміння геохімічних процесів формування водню та механізмів його накопичення у великих обсягах;

2) технологічна незрілість: технології розвідки, буріння та видобутку водню все ще перебувають на початковій стадії розробки;

3) безпека: водень – вибухонебезпечний газ, що вимагає відповідних заходів безпеки при його можливому видобуванні, зберіганні та транспортуванні;

4) інфраструктура: відсутність широкомасштабної інфраструктури для транспортування та розподілу білого водню є значною перешкодою, але розвиток зеленого водню тільки сприятиме;

5) регуляторна база: відсутність чітких законодавчих норм та стандартів для видобутку геологічного водню може стримувати інвестиції.

6) екологічні ризики: незважаючи на «чистоту» кінцевого продукту, сам процес видобутку може мати певні екологічні наслідки, які потребують ретельного вивчення.

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Природний геологічний водень є перспективною новою корисною копалиною, яка може відіграти ключову роль у декарбонізації світової економіки та забезпеченні енергетичної безпеки. Його унікальні характеристики – відновлюваність та ймовірна потенційно низька собівартість видобутку – роблять його привабливою альтернативою традиційним вуглеводням.

Проте станом на сьогодні вирішення низки нез'ясованих питань вимагає значних інвестицій у фундаментальні та прикладні наукові дослідження. Розуміння геохімічних процесів, що призводять до генерації та накопичення водню в різних регіонах світу з урахуванням усіх чинників, розроблення більш ефективних методів розвідки та видобутку, створення безпечної та надійної інфраструктури для його транспортування й зберігання є одними із найактуальніших завдань.

Пошук і розвідка природного геологічного, білого водню, як нового виду корисної копалини з нульовим або нейтральним викидом вуглекислого газу, є досить складним і часто неоднозначним із багатьма нез'ясованими питаннями, що пов'язані зі складною поведінкою, накопиченням, міграцією та особливостями водню в надрах Землі. Не такими однозначними є і критерії пошуку та комплекс геолого-розвідувальних робіт, необхідний для виявлення покладів водню, що значно відрізняється від пошуку та розвідки на вуглеводні. Зважаючи на те, що є різні джерела водню, то комплекс методів виявлення покладів, безсумнівно, може відрізнитися або мати свої особливості чи специфіку.

Незважаючи на прогрес у пошуку водню в різних країнах світу та навіть наявність одного активного родовища в Малі, обсяг даних все ще недостатній для створення всеосяжної картини потенційних світових ресурсів, механізмів формування та накопичення покладів.

Більшість досліджень перебуває на початковій стадії, фокусуючись на фундаментальних процесах і локальних аномаліях, пошуку джерел безперервної генерації водню. Виявлення потенційних покладів, придатних для комерційної експлуатації, є питанням часу, що пропорційне кількості та якості досліджень із застосуванням комплексним інструментів дослідження.

Перед працівниками нафтогазовидобувних компаній, що займаються пілотними проєктами, пов'язаними з пошуком та розвідкою природного водню або науковців, що працюють над фундаментальними роботами щодо водню, виникає низка нез'ясованих запитань і неможливість швидкого вирішення певних технологічних проблем.

Природний (геологічний) водень, як альтернативне джерело енергії, на фоні щорічного збільшення використання та популярності міг би забезпечити потреби в різних галузях енергетики, промисловості та зробити значний внесок в економіку України з нульовими викидами вуглецю або з меншими витратами. Білий водень – невід'ємна частина на шляху переходу до безвуглецевої економіки й багатообіцяльна за умови виявлення значних покладів та успішної експлуатації.

Пошук та розвідка природного водню для такої сприятливої в геологічному й тектонічному відношенні країни як України, може дати позитивні результати при оцінці його, насамперед, перспективності. Але лише з урахуванням світових водневих тенденції та сучасних досягнень, що націлені на розробку та вдосконалення унікальних для цієї корисної копалини, методики і критеріїв пошуку та розвідки, що відмінні від традиційних при пошуку та розвідці вуглеводнів у нафтогазовій промисловості, може бути отриманий позитивний результат та ймовірна промислова експлуатація в майбутньому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Мельничук В. Г. Обґрунтування перспектив на водень неопротерозойських формацій Поліської сідловини і північної частині Волино-Подільської монокліналі. *Проблеми геології України: збірник наукових праць*. Львів, 2024. С. 85–97.
2. Про затвердження переліків корисних копалин загальнодержавного та місцевого значення : Постанова Кабінету Міністрів України, 23. 05. 2025р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/827-94-%D0%BF#Text>. Дата звернення 23.08.2025 р.
3. AGA. Natural hydrogen has been underestimated [Online]. 2023. URL: <https://www.aga.org/natural-hydrogen-has-been-underestimated/>
4. Ballentine C.J., Karolytė R., Cheng A. et al. Natural hydrogen resource accumulation in the continental crust. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2025. 6, P. 342–356. URL: <https://www.nature.com/articles/s43017-025-00670-1>
5. Etiopie G. (2023). Massive release of natural hydrogen from a geological seep (Chimaera, Turkey): Gas advection as a proxy of subsurface gas migration and pressurised accumulations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023. 48(25), P. 9172–9184. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.025>.
6. Frery E., Langhi L., Maison M., Moretti I. Natural hydrogen seeps identified in the north Perth basin, western Australia. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46.61. P. 31158–31173. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.023>
7. Hyterra Project. URL: <https://hyterra.com/projects/>
8. Incer-Valverde J., Korayem A., Tsatsaronis G., & Morosuk, T. “Colors” of hydrogen: Definitions and carbon intensity. *Energy conversion and management*, 2023. 291. P. 117294. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100732>
9. Kay A. The Hydrogen Rainbow. AGA, 2023. URL: <https://www.aga.org/the-hydrogen-rainbow/>
10. Patonia A., Lambert M., Lin N., Shuster M. Natural (geologic) hydrogen and its potential role in a net-zero carbon future: Is all that glitters gold? Oxford Institute for Energy Studies.

- 2024, P. 1–33. URL: <https://www.oxfordenergy.org/publications/natural-geologic-hydrogen-and-its-potential-role-in-a-net-zero-carbon-future-is-all-that-glitters-gold/>
11. Prinzhofer A., Tahara Cissé C. S., Diallo A. B. Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali). *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018. Vol. 43, no. 42. P. 19315–19326. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.193>.
 12. Prinzhofer A., Moretti I., Francolin J. B. L., Pacheco C., d'Agostino A. et al. Natural hydrogen continuous emission from sedimentary basins: The example of a Brazilian H₂-emitting structure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019. 44(12). P. 5676–5685.
 13. Skakun L., Kril S., Tari G., Vikhot Yu., Moroz Ye. Natural Hydrogen Measurements in Soil Gas: A Methodological Case Study in the Carpathian Foredeep, Ukraine. *AAPG Europe Region Conference, Energy Transition*. Krakow, Poland, May 28-29, 2024, p. 221.
 14. Skakun L., Kril S., Tari G., Gunda M., Mykhalevych I., Moroz Yu. (2024) Hydrogen Systems of the Major Sedimentary Basins of Ukraine. Hydrogen Systems of the Major Sedimentary Basins of Ukraine. *AAPG Europe Region Conference, Energy Transition*. Krakow, Poland, May 28-29, 2024. Krakow, 2024. P. 220.
 15. Stalker L. The earth might hold huge stores of natural hydrogen – and prospectors are already scouring South Australia for it. 5 July 2023. URL: <https://www.csiro.au/en/news/All/Articles/2023/July/Natural-hydrogen>
 16. Tari G. Chapter 3 Natural hydrogen exploration: some similarities and differences with oil and gas exploration. In: Rezaee R. and Evans B. ed. *Natural Hydrogen Systems: Properties, Occurrences, Generation Mechanisms, Exploration, Storage and Transportation*. De Gruyter, 2025. pp. 75–104. <https://doi.org/10.1515/9783111437040-003>
 17. Vikhot Y., Kril S. Natural Hydrogen as an Alternative Energy Source. *6th International Conference on Innovative Academic Studies (ICIAS 2025)*, March 12-13, 2025: Konya, Turkey, P. 600.
 18. Vikhot Y., Kril S. Gold Hydrogen: Importance and Ways of Migration. *5th International Conference on Engineering, Natural and Social Sciences (ICENSOS 2025)*, April 15-16, 2025, Konya, Turkey, P. 74.
 19. Vikhot Y., Kril S. White Hydrogen as a New Carbon-Free Mineral Resource – Current Status. *6th International Conference on Engineering, Natural and Social Sciences (ICENSOS 2025)*, August 10-11, 2025: Konya, Turkey, P. 65.
 20. Vikhot Y., Kril S. Hydrogen of Natural Origin as a New Mineral Resource: Myth or Reality? *8th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences (ICAENS 2025)*, August 22-23, 2025: Konya, Turkey, p. 108.
 21. Wang L., Jin Z., Chen X., Su Y., Huang X. The Origin and Occurrence of Natural Hydrogen. *Energies*. 2023, 16(5). P. 2400. <https://doi.org/10.3390/en16052400>
 22. Willige A. The colors of hydrogen: Expanding ways of decarbonization, 2022. URL: <https://spectra.mhi.com/the-colors-of-hydrogen-expanding-ways-of-decarbonization>.
 23. Zgonnik V, The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review. *Earth-Science Reviews*, 2020. 203. P.103–140.

REFERENCES

1. Melnychuk, V. G. (2024) Obgruntuvannya perspektyv na voden neoproterozoiskykh formatsii Poliskoi sidlovyny i pivnichnoi chastyni Volyno-Podilskoi monoklinali [Substantiation of the prospects for hydrogen in the Neoproterozoic formations of the Polissya saddle and the northern part of the Volyn-Podilsky monocline]. *Problemy heolohii Ukrainy: zbirnyk naukovykh prats*. Lviv. P. 85–97 [in Ukrainian].
2. Pro zatverdzhennia perelikiv korysnykh kopalyn zahalnodержavnoho ta mistsevoho znachennia: Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy [On approval of lists of minerals of national and local importance: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine],

- 05/23/2025. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/827-94-%D0%BF#Text>. [in Ukrainian].
3. AGA (2023) Natural hydrogen has been underestimated. Retrieved from: <https://www.aga.org/natural-hydrogen-has-been-underestimated/>
4. Ballentine, C.J., Karolytė, R., Cheng, A. et al. (2025) Natural hydrogen resource accumulation in the continental crust. *Nature Reviews Earth & Environment*. 6, 342–356. Retrieved from: <https://www.nature.com/articles/s43017-025-00670-1>
5. Etiope, G. (2023). Massive release of natural hydrogen from a geological seep (Chimaera, Turkey): Gas advection as a proxy of subsurface gas migration and pressurised accumulations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(25). 9172–9184. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.025>.
6. Frery, E., Langhi, L., Maison, M., & Moretti, I. (2021). Natural hydrogen seeps identified in the north Perth basin, western Australia. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(61), 31158–31173. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.023>
7. Hyterra Project. Retrieved from: <https://hyterra.com/projects/>
8. Incer-Valverde, J., Korayem, A., Tsatsaronis, G., & Morosuk, T. (2023). “Colors” of hydrogen: Definitions and carbon intensity. *Energy conversion and management*, 291, 117294. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100732>
9. Kay, A. (2023) The Hydrogen Rainbow. AGA, 2023. Retrieved from: <https://www.aga.org/the-hydrogen-rainbow/>
10. Patonia, A., Lambert, M., Lin, N. & Shuster, M. (2024). Natural (geologic) hydrogen and its potential role in a net-zero carbon future: Is all that glitters gold? Oxford Institute for Energy Studies. 1–33. Retrieved from: <https://www.oxfordenergy.org/publications/natural-geologic-hydrogen-and-its-potential-role-in-a-net-zero-carbon-future-is-all-that-glitters-gold/>
11. Prinzhofer, A., Tahara Cissé, C. S., & Diallo, A. B. (2018). Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali). *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(42), 19315–19326. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.193>
12. Prinzhofer, A., Moretti, I., Francolin, J. B. L., Pacheco, C., d’Agostino, A., [et al.]. (2019). Natural hydrogen continuous emission from sedimentary basins: The example of a Brazilian H₂-emitting structure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(12), 5676–5685.
13. Skakun, L., Kril, S., Tari, G., Vikhot, Yu., Moroz, Ye., 2024. Natural Hydrogen Measurements in Soil Gas: A Methodological Case Study in the Carpathian Foredeep, Ukraine. AAPG Europe Region Conference, Energy Transition, Krakow, Poland, May 28–29, 2024, p. 221.
14. Skakun, L., Kril, S., Tari, G., Gunda, M., Mykhalevych, I., Moroz, Yu. (2024) Hydrogen Systems of the Major Sedimentary Basins of Ukraine. Hydrogen Systems of the Major Sedimentary Basins of Ukraine. AAPG Europe Region Conference, Energy Transition, Krakow, Poland, May 28-29, 2024. Krakow. P. 220.
15. Stalker, L. (2023). The earth might hold huge stores of natural hydrogen – and prospectors are already scouring South Australia for it. 5 July 2023. Retrieved from: <https://www.csiro.au/en/news/All/Articles/2023/July/Natural-hydrogen>
16. Tari, G. (2025). Chapter 3 Natural hydrogen exploration: some similarities and differences with oil and gas exploration. In R. Rezaee & B. Evans (Ed.), *Natural Hydrogen Systems: Properties, Occurrences, Generation Mechanisms, Exploration, Storage and Transportation*. De Gruyter, 75–104. <https://doi.org/10.1515/9783111437040-003>
17. Vikhot, Y., Kril, S. (2025). Natural Hydrogen as an Alternative Energy Source. 6th International Conference on Innovative Academic Studies (ICIAS 2025), March 12-13, 2025: Konya, Turkey, p. 600.
18. Vikhot, Y., Kril, S. (2025). Gold Hydrogen: Importance and Ways of Migration. 5th International Conference on Engineering, Natural and Social Sciences (ICENSOS 2025), April 15-16, 2025, Konya, Turkey, p. 74.
19. Vikhot, Y., Kril, S. (2025). White Hydrogen as a New Carbon-Free Mineral Resource – Current Status. 6th International Conference on Engineering, Natural and Social Sciences (ICENSOS), August 10-11, 2025: Konya, Turkey, p. 65.

20. Vikhot, Y., Kril, S. (2025). Hydrogen of Natural Origin as a New Mineral Resource: Myth or Reality? 8th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences (ICAENS), August 22-23, 2025: Konya, Turkey, p. 108.
21. Wang, L., Jin, Z., Chen, X., Su, Y., & Huang, X. (2023). The Origin and Occurrence of Natural Hydrogen. *Energies*, 16(5), 2400. <https://doi.org/10.3390/en16052400>
22. Willige, A. (2022) The colors of hydrogen: Expanding ways of decarbonization. Retrieved from: <https://spectra.mhi.com/the-colors-of-hydrogen-expanding-ways-of-decarbonization>.
23. Zgonnik, V. (2020). The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review. *Earth-Science Reviews* 203, p.103–140.

NATURAL (GEOLOGICAL) HYDROGEN AS A NEW MINERAL RESOURCE: CURRENT STATE, CHALLENGES, PROSPECTS, RISKS

Yuriy Vikhot^{1, 2}, Solomiia Kril^{2, 1}

¹Ivan Franko National University of Lviv, Hrushevskoho Str., 4, Lviv, Ukraine, 79005

e-mail: yuvik@ukr.net;

²UkrNDIgas, JSC Ukgasvydobuvannya, Stryiska Str., 144, Lviv, Ukraine, 79000

e-mail: solia_kr@ukr.net

Hydrogen is increasingly being mentioned as one of the key elements of energy security for developed countries. According to the IEA (International Energy Agency), global demand for hydrogen reached 100 million tons in 2024 and continues to grow. Hydrogen is becoming key to green transition energy strategies to ensure CO₂ emissions reduction. Carbon-free hydrogen production is one of the defining elements of the global energy transition, but it requires expensive technological solutions.

Industrial extraction of natural hydrogen of various origins (e.g., white, gold hydrogen) will contribute to reducing the use of fossil fuels (gas, coal), which emit large amounts of CO₂. Such hydrogen will enable a rapid and economically less costly transition to a decarbonized economy with reduced carbon emissions or achieve a neutral balance compared to green hydrogen production.

Of particular importance is geological, or so-called “white,” hydrogen of natural origin, which has significant potential to provide the country with inexpensive carbon-free energy. Natural hydrogen H₂, as a new mineral resource and renewable energy source, could become a potentially cheap alternative for future developments in the carbon-free economy in Europe and other countries around the world if deposits are discovered and commercially exploited.

This article analyzes the current state, trends, and prospects for the search and exploration of natural (geological or white) hydrogen in European and other countries based on published research results in articles and other available data sources. Its importance as a mineral resource is demonstrated, as well as its place and significance among other types of hydrogen from the so-called “hydrogen rainbow”.

A major achievement and significant progress for Ukraine is that it has become a country where “natural hydrogen” was officially included in the list of minerals of national importance in 2025. That is why it has become urgent to resolve issues related to search criteria, geological hydrogen exploration, research into potential natural reservoirs, prospects, and the risks of extraction, storage, and transportation.

The article highlights the possibilities of searching for geological hydrogen as an alternative mineral resource, demonstrates current achievements, possible future prospects for search and exploration, and risks, based on hydrogen trends and achievements in European countries and other regions of the world.

Natural (geological) hydrogen will play an important role in the future as a renewable energy source with no emissions or CO₂ neutrality. White hydrogen could become an alternative to expensive hydrogen production using various renewable sources, or where it is not possible to develop infrastructure for green hydrogen. Successful industrial production of geological (white) hydrogen will be able to replace part of the demand for hydrogen and reduce the demand for natural gas in many areas of energy, industry, and transport.

Key words: natural hydrogen, geological hydrogen, white hydrogen, golden hydrogen, H₂, green hydrogen, carbon-free economy, hydrogen trends.

Дата надходження статті: 28.07.2025

Дата прийняття статті: 25.08.2025

Опубліковано: 29.10.2025