

## 4. НАУКИ ПРО ЗЕМЛЮ

УДК 504.062.2

DOI <https://doi.org/10.32782/naturalspu/2024.1.15>

### АНАЛІЗ РІЗНИХ МЕТОДІВ ВИРОБНИЦТВА ВОДНЮ В АСПЕКТІ НАДІЙНОСТІ Й ЕФЕКТИВНОСТІ ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ

**Васильєва Ірина Вікторівна,**  
молодший науковий співробітник  
Інституту геологічних наук НАН України  
ORCID ID: 0000-0002-5487-9896

*Інтерес до забезпечення виробництва енергії з відновлюваних джерел вищий, ніж будь-коли, через щоденне спостереження за наслідками зміни клімату. Використання енергії відновлюваних джерел (ВДЕ) на тепер є одним із пріоритетних напрямів розвитку світової енергетики. Проблема водневої енергетики в даному аспекті останнім часом привертає все більше уваги. Водень ( $H_2$ ) як носій енергії може відігравати важливу роль у різних секторах промисловості, які важко скоротити, але для мінімізації їхнього негативного впливу на довкілля водень, що постачається, має бути надійним, його виробництво повинно мати низький рівень викидів і бути недорогим.*

*Щоб зменшити глобальні викиди парникових газів і зупинити зростання глобальної температури, технологію без викидів необхідно швидко масштабувати. Тоді як електрифікація в поєднанні зі збільшенням використання відновлюваних джерел енергії може допомогти в усуненні викидів у будівлях, пасажирських транспортних засобах і системах низькотемпературного опалення, інші види палива з нульовим рівнем викидів можуть знадобитися для таких галузей, як цементна та сталеливарна промисловість, які важко зменшити, разом із морським судноплавством і наземним транспортом на великі відстані. Водень ( $H_2$ ) є одним із таких видів палива з нульовими викидами, яке можна використовувати для мінімізації викидів у цих секторах, а також в інших.*

*За оцінками Міжнародного енергетичного агентства (МЕА), глобальний попит на водень може зрости з 94 мільйонів метричних тон (ММТ) у 2021 році до 660 мільйонів метричних тон у 2050 році та може привести до скорочення сукупних викидів на 80 мільярдів метричних тон вуглекислого газу ( $CO_2$ ).*

**Ключові слова:** водень, відновлювані джерела енергії, зменшення викидів, зростання глобальної температури.

#### ***Vasylieva Iryna. Analysis of various ways of hydrogen production in terms of reliability and emission reduction efficiency***

*Interest in ensuring the production of energy from renewable sources is higher than ever due to the daily observation of the effects of climate change. The use of energy from renewable sources (RES) is currently one of the priority directions for the development of world energy. The problem of hydrogen energy in this aspect has recently attracted more and more attention.*

*The use of energy from renewable sources (RES) is currently one of the priority directions for the development of world energy. The problem of hydrogen energy in this aspect is attracting more and more attention. Hydrogen ( $H_2$ ), as an energy carrier, can play an important role in various industrial sectors. They are difficult to reduce, but to minimize their negative impact on the environment, the hydrogen supplied must be reliable, have low emissions and be inexpensive.*

*To reduce global greenhouse gas emissions and stop global temperature increases, zero-emissions technology must scale rapidly. While electrification with increased use of renewable energy sources can help eliminate emissions in buildings, passenger vehicles and low-temperature heating systems, other zero-emission fuels may be needed in hard-to-reduce industries such as the cement and steel industries, together with sea shipping and long-distance land transport. Hydrogen ( $H_2$ ) is one such zero-emission fuel that can be used to minimize emissions in these sectors as well as others.*

*The International Energy Agency (IEA) estimates that global hydrogen demand could increase from 94 million metric tons (MMT) in 2021 to 660 MMT in 2050 and could lead to a reduction in total emissions of 80 billion metric tons of carbon dioxide ( $CO_2$ ).*

*This study makes a consistent side-by-side comparison of the cost-effectiveness of producing pure, zero-emission hydrogen using different methods based on electricity and fossil fuel usage. For electricity- and fossil-fuel-based hydrogen production systems, a life-cycle GHG emission assessment and a preliminary schematic assessment were performed, assuming possible technology developments and emission projections over the next decade.*

**Key words:** hydrogen, renewable energy sources, emission reduction, global temperature rise.

**Вступ.** Інтерес до забезпечення виробництва енергії з відновлюваних джерел вищий, ніж будь-коли, через щоденне спостереження за наслідками зміни клімату. Водень ( $H_2$ ) як носій енергії може відігравати важливу роль у різних секторах промисловості, для мінімізації їхнього негативного впливу на довкілля водень, що постачається, має бути надійним, мати низькі викиди та бути недорогим. Тоді як електрифікація в поєднанні

зі збільшенням використання відновлюваних джерел енергії може допомогти в усуненні викидів у будівлях, пасажирських транспортних засобах і системах низькотемпературного опалення, інші види палива з нульовим рівнем викидів можуть знадобитися для таких галузей, як цементна та сталеливарна промисловість [1, с. 2–4].

Щоб досягти такого рівня скорочення викидів, водень має вироблятися з майже нульовими викидами

та надійним способом. Це буде складним завданням, оскільки 98% нинішнього глобального виробництва водню відбувається з викопних палив без установалення уловлювальних систем для  $\text{CO}_2$ , а розроблення шляхів електролізу, які використовують періодичну відновлювану електроенергію, є ненадійним без витрат на щоденне та сезонне зберігання.

Метою дослідження було проведення послідовного взаємного порівняння вигідності виробництва надійного водню з нульовими викидами різними способами на основі електроенергії та викопного палива. Потрібно також визначити, чи можливе поєднання вказаних методів для отримання більш високих результатів.

**Матеріали та методи.** Для проведення досліджень була використана наявна інформація про різні шляхи пошуку й отримання водню, як умовно чистого відновлюваного джерела енергії. Був проведений аналіз цих методів, що враховує надійність, доступність використання, можливе вдосконалення різних ступенів виробництва з метою підвищення обсягів кінцевої сировини та водночас мінімізації негативного впливу на довкілля.

Почнемо з огляду можливих систем виробництва водню на основі електроенергії та викопного палива. Для кожного із цих шляхів виробництва проведено оцінку викидів парникових газів протягом життєвого циклу та попередню схематичну оцінку, припускаючи можливий розвиток технологій і прогнози викидів наступного десятиліття. Для шляхів виробництва водню на основі електроенергії була використана модель лінійної оптимізації з найменшими витратами, яка враховує власне оцінку викидів і технологічне моделювання.

Використання води також розглядається, хоча не враховано, як ці витрати змінюються залежно від місця розташування, маючи на увазі географічну мінливість доступу до води та її якості. Викиди парникових газів від споживання електроенергії враховуються на

основі життєвого циклу, тобто втілені викиди (викиди від видобутку матеріалів, виробництва, будівництва тощо) для сонячної фотоелектричної системи й інших джерел електроенергії в мережі розглядаються у процесах виробництва, заснованих на електроенергії. На рисунку 1 зображено додаткову інформацію про конфігурацію системи, а також розуміння щодо утворення викидів.

У багатьох звітах з розрахунку вартості водню на основі електроенергії надійність доставки водню або не враховується, або до кінця незрозуміла. Зазвичай це означає, що результати витрат представлені лише на річних рівнях надійності, що можна інтерпретувати як витрати на виробництво деякої загальної кількості водню протягом року. Тобто об'єкт моделюється для виробництва продукції протягом року, але якщо використовується фотоелектрична електроенергія, фактична потужність буде змінюватися протягом вказаного року (більша потужність удень і влітку, менше вночі та взимку). Таку мінливість виходу можна пом'якшити, зберігаючи електроенергію, як вхідний матеріал для виробництва водню, або ж зберігаючи вироблений водень. У даній моделі припускається, що водень можна виробляти за допомогою електроенергії від сонячної фотоелектричної установки на місці або від сонячної фотоелектричної установки та мережі.

Електроенергію, вироблену мережею та фотоелектричною енергією, можна скоротити, зберігати в акумуляторі або використовувати безпосередньо для виробництва водню за допомогою електролізера. Після виробництва водню його можна або безпосередньо доставити споживачу, або стиснути в резервуар для зберігання під тиском 200 бар перед кінцевим використанням. У поточній формі моделі не враховано обмеження простору для великих системних компонентів, як-от сонячна фотоелектрична установка або сховище водню,

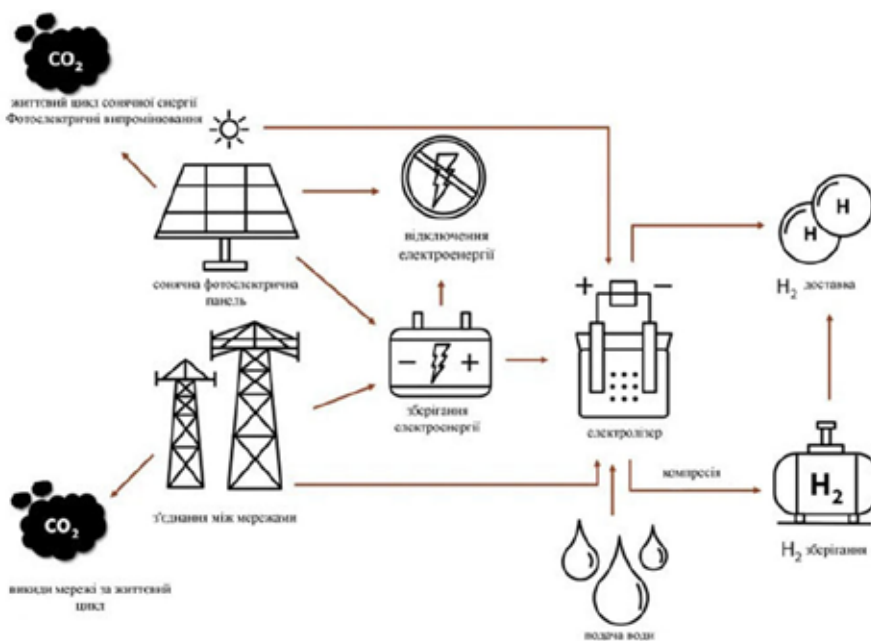


Рис. 1. Схема виробництва водню на основі електроенергії

але визначено, що це також може вплинути на оптимальний розмір об'єкта, метод виробництва та місце для нового заводу з виробництва водню. Тому вказані чинники також треба враховувати в більш детальних дослідженнях.

Окрему увагу треба приділити можливості використання викопного водню як джерела альтернативної енергетики. Але натепер у світовій практиці майже відсутні обґрунтування пошуків промислових скопчень водню і, як наслідок, технології його видобутку. У 2012 р. в Малі була пробурена перша газова свердловина, з якої отримано не метан, а практично чистий 98%-й водень, який утворюється в земній корі. Цей випадок не поодинокий. Високі концентрації природного водню отримано зі свердловин у різних частинах світу [5; 6].

Водночас нещодавно були відкриті геологічні формації, які дегазують водень на поверхні Землі у великих обсягах – десятки тисяч кубометрів на день. Такі геологічні структури були виявлені у фанерозойських комплексах деяких країн, зокрема у США. Трапляються, хоча й досить рідко, зони водневих аномалій, зафіксовані на нафтогазових родовищах. У Швеції, під час буріння свердловини Гравберг-1 завглибшки 6 770 м, нижче 4 000 м відзначено істотне підвищення вмісту водню [2].

Наявність природного водню цілком змінює бачення водневої енергетики. До того ж він є безвуглецевим і невичерпним, оскільки утворюється в результаті природних процесів глибоко в земній корі. Важливим завданням науки є прогнозування, пошуки та розробки економічно вигідних способів добування та використання водню. Для цих завдань стане доцільним використання методу геолого-структурно-термоатмогеохімічних гідрологічних досліджень (далі – СТАГГД). Сутність запропонованого методу СТАГГД полягає

в комплексному підході до проблеми прогнозування пошуків, розвідки та розробки вуглеводневих, газогідратних також, родовищ [2; 3].

Методологічно це розроблення узагальнювальної концепції прогнозу із застосуванням низки методів – тектонічного, стратиграфічного, літологічного, геохімічного, геофізичного, гідрологічного, аерокомогеологічного. Просторовий розподіл атмотермогеохімічних аномалій визначається на основі ґрунтового аналізу геологічної інформації полігонів СТАГГД. Аналізуються особливості розломно-блокової, морфоструктурної, стратиграфічної, літолого-фаціальної, формаційної, геодинамічної будови полігонів. Аналіз отриманої інформації дозволяє створити доказову базу для ґрунтової характеристики особливостей геологічної будови об'єктів, з якими пов'язані поклади вуглеводнів, зокрема й водню ( $H_2$ ).

Для шляхів виробництва водню на основі викопного палива була розроблена модель, яка використовувалася для оцінки викидів парникових газів і техніко-економічної ефективності. Досліджені шляхи виробництва водню на основі викопних копалин включають паровий риформінг метану, паровий риформінг метану з уловлюванням і зберіганням вуглецю й автотермічний риформінг з уловлюванням і зберіганням вуглецю.

Викиди парникових газів, які враховуються у шляхах використання викопного палива, включають викиди, які утворюються безпосередньо з виробничого підприємства, а також викиди протягом життєвого циклу вхідної електроенергії та природного газу.

На рисунку 2 зображено схему виробництва водню на основі викопного палива та шляхів утворення викидів парникових газів. На рисунку показано виробництво водню на основі викопних палив і шляхи його доставки. У даному моделюванні виробництва водню на основі копалин припускається, що водень виробля-

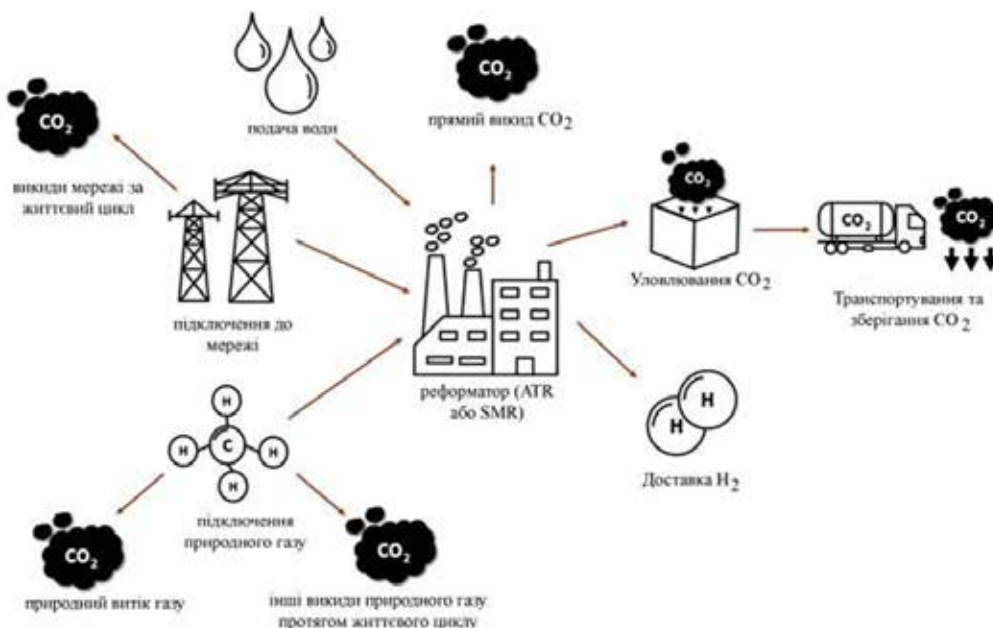


Рис. 2. Схема виробництва водню на основі викопного палива

ється або в паровому риформері метану, або в автотермічному риформері.

Енергія, що надходить у риформер, включає електроенергію з мережі та природний газ. Вироблений водень безпосередньо доставляється до споживача. Припускається, що риформер працює з коефіцієнтом потужності 90% із майже постійною продуктивністю для досягнення погодинної надійності доставки, необхідної для таких споживачів, як нафтопереробні заводи та заводи з виробництва аміаку. Вуглекислий газ, який утворюється в риформері, безпосередньо викидається в атмосферу на деяких шляхах виробництва, але також частково уловлюється, транспортується та поглинається на інших шляхах. Для цілей цього дослідження допускається, що буде наявне необхідне мінімальне транспортування CO<sub>2</sub>.

**Результати.** Виробництво водню на основі нульової чистої електроенергії зі змінним споживанням енергії стає все дорожчим із суворішими обмеженнями. Обмеження чистих нульових викидів ставить кліматичні рішення з різними профілями викидів на один рівень з техніко-економічними умовами. Тому заслуговують на увагу значні відмінності між річним і погодинним сценаріями надійності. Без доступного підключення до електромережі лише тропічні чи екваторіальні країни з меншою сезонністю сонячних ресурсів зможуть постачати щогодини надійний водень без громіздкої перебудови. У більш високих широтах обмежені та сезонні сонячні ресурси підвищують відносну привабливість методів виробництва водню на основі викопного H<sub>2</sub>. Однак підключена до мережі електрична система забезпечує підвищену гнучкість у роботі, що зменшує потребу в надбудові системи навіть у місцях з іншою широтою, зберігаючи водночас необхідну надійність постачання водню, яка потрібна на нафтопереробних заводах, заводах з виробництва аміаку, заводах із зрідження, інших об'єктах.

У низці наукових досліджень виявлено, що шляхи виробництва на основі викопного палива є особливо дорогими порівняно з рішеннями, пов'язаними з електромережею, якщо враховувати витрати на видалення залишкових викидів парникових газів і великі витрати природного газу. З урахуванням цих припущень витрати на виробництво викопного палива збільшуються більш ніж удвічі [1]. Нині питання про можливість отримання водню з викопного палива потребує додаткових досліджень, розрахунків і технологічного вдосконалення системи видобутку.

Для початку треба визначити розташування перспективних ділянок для пошуку та видобутку водню. Глобальна попередня інвентаризація інформації про вимірювання концентрації вільного та розчиненого у воді молекулярного водню в земній корі суші дозволила зробити їх регіональну прив'язку зі значенням середньої концентрації водню. Усі резервуари нанесені на карту світу, на якій також показано розташування свердловин на території колишнього СРСР, де зареєстровано присутність водню, що надходить із підземних вод [8].

Найбільша концентрація водню (середнє значення 60,34%) зафіксована в оголовках свердловин, куди він піднімався з підземних флюїдів безпосередньо після завершення буріння [9; 10]. Згодом вона зменшується в кілька разів. Концентрація водню у ґрунті в околицях свердловин у багато разів менше, ніж водню у свердловинах, що надходить із підземних вод. Загалом, основна маса вивчених резервуарів практично не містить водню, оскільки тільки в 16,5% резервуарів різного типу його концентрація перевищує 5%. Зони сучасної геотектонічної активізації, що супроводжуються інтенсивними геотермальними процесами, генерують водень у низькій концентрації (у середньому приблизно 1,5%). У ґрунтових газах концентрація водню коливається в межах 0,03–0,06%.

Концентрація водню у ґрунті зон активних розломів змінюється хаотично вздовж порушень залежно від складу осадових порід, що їх заповнюють. Лише в зонах активних розломів протягом декількох років виникнення в регіоні сильних землетрусів зафіксовані виходи водню на земну поверхню, концентрація яких може перевищувати фонову до 200 разів і може бути винятково низькою (не більше 0,02%). Варто зазначити, що ключову роль в утворенні водню відіграє вода. Його генерація відбувається суто в земній корі в результаті окислення лужною водою двовалентного заліза в основних і ультраосновних породах за різними схемами хімічних реакцій, а водяна пара, що містить водень, завжди присутня в магматичних газах. У поодиноких випадках джерелом водню в незначних кількостях є радіоліз лужної води або радіоактивний розпад урану та торію [10].

**Висновки.** Для максимізації потенціалу декарбонізації та виробництва водню на основі викопного палива в майбутньому необхідно віддавати пріоритет найкращим практикам у поводженні із природним газом і продовжувати дослідження та розробки як власне обладнання для вимірювання газів, так і технологій уловлювання негативних викидів.

Отже, надійні витрати на виробництво водню на основі електроенергії також можна додатково мінімізувати, водночас максимізувати скорочення викидів завдяки розробленню технології зменшення негативних викидів і постійному вдосконаленню відновлюваних джерел енергії та технологій електролізера.

Перед тим, як робити вражаючі далекосяжні прогнози щодо використання геологічного водню як джерела енергії у промисловості, потрібно як мінімум провести доскональну інвентаризацію визначення концентрацій молекулярного вільного й розчиненого у воді водню в земній корі у планетарному масштабі, у кожному випадку розглядаючи всі механізми утворення водню та, нарешті, виявити найбільш популярний серед них.

Вибір носіїв водню зумовлений тим, що видобувати водень із гірських порід і з океанських глибин навряд чи буде рентабельно навіть у віддаленому майбутньому [7; 8].

Виходячи з вищевикладених досліджень, воднево-енергетична революція може докорінно змінити основи світової енергетики й екологічну ситуацію май-

бутнього. Такі дослідження актуальні та мають чітко виражену інноваційну складову частину, важливу для модернізації економіки та сталого соціально-економіч-

ного розвитку, окрім того, можуть бути впроваджені на нафтогазоносних об'єктах і у вугільній видобувній галузі.

#### Література:

1. A cost comparison of various hourly-reliable and net-zero hydrogen production pathways in the United States / Justin M. Bracci et al. *Nature communications*. 2023. P. 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43137-x>.
2. Багрій І.Д. H<sub>2</sub> – водень. Еколого-енергетичні виклики ХХІ сторіччя. Глобальні проєкти. Шляхи реалізації. Київ : ДП «Українська геологічна компанія», 2023. 292 с.
3. Багрій І.Д. Фундаментальні розробки – підґрунтя нових концепцій та високоефективних пошукових технологій (підземні води, вуглеводні). Київ : Фоліант, 2017. 562 с.
4. Fuel cells and the hydrogen revolution: Analysis of a strategic plan in Japan / N. Behling et al. *Economic Analysis and Policy*. 2015. Vol. 48. P. 204–221. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2015.10.002>.
5. Лукин А.Е. Прямые поиски нефти и газа: причины неудач и пути повышения эффективности. *Геолог Украины*. Киев, 2004. № 3. С. 18–43.
6. Нариси дегазації Землі / В.М. Шестопапов та ін. Київ : ПП «Ітексервіс», 2018. 232 с.
7. Багрій І.Д., Кузьменко С.А. Наукове обґрунтування просторового розподілу і картування аномальних проявів водню – енергетичної сировини ХХІ ст. – у нафтогазоносних структурах України і попередження геодинамічних явищ. *Геологічний журнал*. 2019. № 1. С. 59–77. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2019.1.159241>.
8. Русаков О.М. Глобальная инвентаризация измерений концентрации свободного и растворенного в подземных водах молекулярного водорода в земной коре суши. *Геофизический журнал*. Киев : Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, 2020. № 6. Т. 42. С. 59–99.
9. Zgonnik V. The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review. *Earth-Science Reviews*. 2020. P. 203–216.
10. Diffused flow of molecular hydrogen through the Western Hajar mountains / V. Zgonnik et al. *Northern Oman. Arabian Journal of Geosciences*. 2019. P. 71–83.

#### References:

1. Bracci, Justin M., Sherwin, Evan D., Boness, Naomi L., & Brandt, Adam R. A cost comparison of various hourly-reliable and net-zero hydrogen production pathways in the United States. *Nature communications*, 2023. P. 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43137-x>.
2. Bagriy, I.D. (2023). H<sub>2</sub> – voden. Ekolooho-enerhetychni vyklyky XXI storichchia. Hlobalni proekty. Shliakhy realizatsii [H<sub>2</sub> – Hydrogen. Ecological-Energetic Challenges of the 21'st Century. Global Projects. Ways of Implementation]. Kyiv: DP "Ukrainian Geological Company", 292 p. [in Ukrainian].
3. Bagriy, I.D. (2017). Fundamentalni rozrobky – pidgruntia novykh kontseptsii ta vysokoefektyvnykh poshukovykh tekhnolohii (pidzemni vody, vuhlevodni) [Fundamental Developments – the Basis for New Concepts and Highly Efficient Search Technologies (Underground Waters, Hydrocarbons)]. Kyiv: Foliant, 562 p. [in Ukrainian].
4. Behling, N., Williams, M.C., Managi, S. Fuel cells and the hydrogen revolution: Analysis of a strategic plan in Japan. *Economic Analysis and Policy*, 2015. Vol. 48. P. 204–221. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2015.10.002>.
5. Lukin, A.E. (2004). Priamye poisky nefty y haza: prychny neudach y puty povysheniya efektyvnosti [Direct searches for oil and gas: reasons for failures and ways to increase efficiency]. *Geologist of Ukraine*. Kyiv. № 3. P. 18–43 [in Ukrainian].
6. Shestopalov, V.M., Lukin, A.E., Zgonnyk, V.A., Makarenko, O.M., Larin, N.V., Bohuslavsky, A.S. (2018). *Narysy dehzatsii Zemli* [Essays on degassing the Earth]. Kyiv: PE "Itekservice". 232 p. [in Ukrainian].
7. Bagriy, I.D., Kuzmenko, S.A. (2019). Naukove obgruntuvannia prostorovoho rozpodilu i kartuvannia anomalnykh proiaviv vodniu – enerhetychnoi syrovyny KhKhI st. – v naftohazonosnykh strukturakh Ukrainy i poperedzhennia heodynamichnykh yavysch [Scientific substantiation of spatial distribution and mapping of anomalous manifestations of hydrogen – energy raw material of the 21'st century – in oil and gas-bearing structures of Ukraine and prevention of geodynamic phenomena]. *Geol. Journal*. № 1. P. 59–77 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2019.1.159241>.
8. Rusakov, O.M. (2020). Hlobalnaia ynvetryzatsiia yzmerenyi kontsentratsyyi svobodnoho y rastvorennoho v podzemnykh vodakh molekuliarnoho vodoroda v zemnoi kore sushy [Global inventory of measured concentrations of free and dissolved in groundwater molecular hydrogen in the earth's crust]. *Geophysical Journal*. № 6, Vol. 42. Institute of Geophysics named after S.I. Saturday of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv. P. 59–99.
9. Zgonnik, V. The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review. *Earth-Science Reviews*, 2020. P. 203–216.
10. Zgonnik, V., Beaumont, V., Larin, N., Pillot, D., & Deville, E. Diffused flow of molecular hydrogen through the Western Hajar mountains. *Northern Oman. Arabian Journal of Geosciences*, 2019. P. 71–83.