

ДЕЯКІ ПРОБЛЕМИ ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Отримано 21 чер. 2024 р.; рекомендовано до публікації 16 вер. 2024 р.
Доступно онлайн 01 жов. 2024 р.

Скосар В. Ю.¹

Автор для кореспонденції: Скосар В'ячеслав,
e-mail: skosarslava@gmail.com

¹ ст. наук. співроб.<https://orcid.org/0000-0002-2151-3417>

¹ Інститут транспортних систем і технологій
НАН України, м. Дніпро, Україна

Стаття присвячена, по-перше, систематизації нових космогонічних, геологічних даних про нашу планету та її енергетичні ресурси, про водневу дегазацію і кліматичні аномалії. Дослідження фундаментального аспекту необхідне для кращого розуміння перспектив відновлюваної енергетики, для подолання екологічної кризи. По-друге, стаття присвячена питанням пошуку геологічного водню, а також новим розробкам у галузі відновлюваної енергетики. Рекомендовано проводити дослідження екосистем з водневими бактеріями з метою розробки способів зменшення викидів водню в атмосферу, генерації електрики з природного водню, отримання біомаси.

Ключові слова: екологічна криза; внутрішня структура Землі; воднева дегазація Землі; геологічний водень; перспективні технології відновлюваної енергетики.

SOME PROBLEMS OF HYDROGEN ENERGY

Received Jun. 21, 2024; accepted Sep. 16, 2024
Available online Oct. 01, 2024

Skosar V.¹

Author for correspondence: Skosar Vyacheslav,
e-mail: skosarslava@gmail.com

¹ senior of science collaborator<https://orcid.org/0000-0002-2151-3417>

¹ Institute of Transport Systems and Technologies
of the NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine

The article is devoted, firstly, to the systematization of new cosmogonic, geological data about our planet and its energy resources, about hydrogen degassing and climatic anomalies. The study of the fundamental aspect is necessary for a better understanding of the prospects of renewable energy, to overcome the environmental crisis. Secondly, the article is devoted to the search for geological hydrogen, new developments in the field of renewable energy. It is recommended to conduct research on ecosystems with hydrogen bacteria in order to develop ways to reduce hydrogen emissions into the atmosphere, generate electricity from natural hydrogen, and obtain biomass.

Keywords: ecological crisis; the internal structure of the Earth; hydrogen degassing of the Earth; geological hydrogen; promising technologies of renewable energy.

Вступ. Для водневої енергетики існують проблеми, які стають дедалі гострішими в міру розвитку екологічної та енергетичної криз, а також у зв'язку зі збільшуваною небезпекою цивілізаційної кризи. Перша проблема зумовлена неповнотою нашого знання про структуру Землі та механізми, які забезпечують процеси в надрах планети, а також вихід потоків речовини / енергії на поверхню і вплив на кліматичні явища. Ми часто забуваємо, що наша планета вивчена менше, ніж, наприклад, Сонце. І тому запасів внутрішнього тепла й потоків геологічного водню може вистачити на більший період часу, ніж запасів термоядерної енергії нашого світила, а не навпаки, як багато

хто думає. Друга проблема має технологічний характер і зумовлена недосконалістю існуючих способів видобутку та утилізації викопного водню і геотермальної енергії. Щоправда, відновлювана енергетика стрімко розвивається у світі; в Україні видано чудові монографії та підручники для підготовки фахівців у цій галузі [1, 2]. До початку 80-х років вже склалася цілісна картина формування Сонячної системи і Землі, хімічного складу нашої планети та уявлення про основні тектонічні процеси. Вважалося, що Сонячна система і Земля виникли з газопилової туманності внаслідок процесів гравітаційного стиску та акреції («небулярні» гіпотези). Було оцінено хімічний склад

початкової газопилової туманності, виходячи зі складу Сонця, складу земної кори і більшості метеоритів – хондритів, що випали на Землю. Численні дані сейсмічного зондування, лабораторні дані щодо властивостей основних земних мінералів і порід при різних тисках і температурах дали змогу створити правдоподібну модель внутрішньої структури Землі та запропонувати найімовірніші механізми теплогенерації в надрах і механізми утворення мінеральних та енергетичних ресурсів [3, 4]. Однак протягом минулих десятиліть було запропоновано альтернативні моделі Землі, наприклад [5], отримано нові дані про Сонячну систему, отримано результати сейсмотомографії Землі. Виявлено явища, пов'язані з виходом із надр Землі великої кількості водню. Почався видобуток водню зі свердловин та розвиток водневої енергетики [6, 7]. Розробляються ефективніші технології видобутку та утилізації геотермальних ресурсів [8]. Усе це потребує переосмислення. Наскільки надійними є наші уявлення про те, що потоки речовини / енергії через поверхню Землі відносно

стабільні, і нам достатньо покладатися на результати геотермії? Наскільки правильні знання у сфері корисних копалин? Чи безпомилково ми розуміємо причини глобального потепління? Чи не очікують Землю в найближчому майбутньому інтенсивні викиди водню з надр, руйнування озонового шару з кліматичними аномаліями? Це також необхідно досліджувати для корегування стратегії розвитку відновлюваної енергетики. Можливо, ми маємо шанс зменшити викиди в атмосферу геологічного водню шляхом його утилізації й за рахунок цього пригальмувати глобальне потепління (рис. 1).

Мета. Провести аналіз нових космогонічних та геологічних даних про нашу планету, про енергетичні ресурси Землі (родовища водню і вуглеводнів, геотермальне тепло), про водневу дегазацію і кліматичні аномалії. Розглянути особливості нових розробок в галузі відновлюваної енергетики.

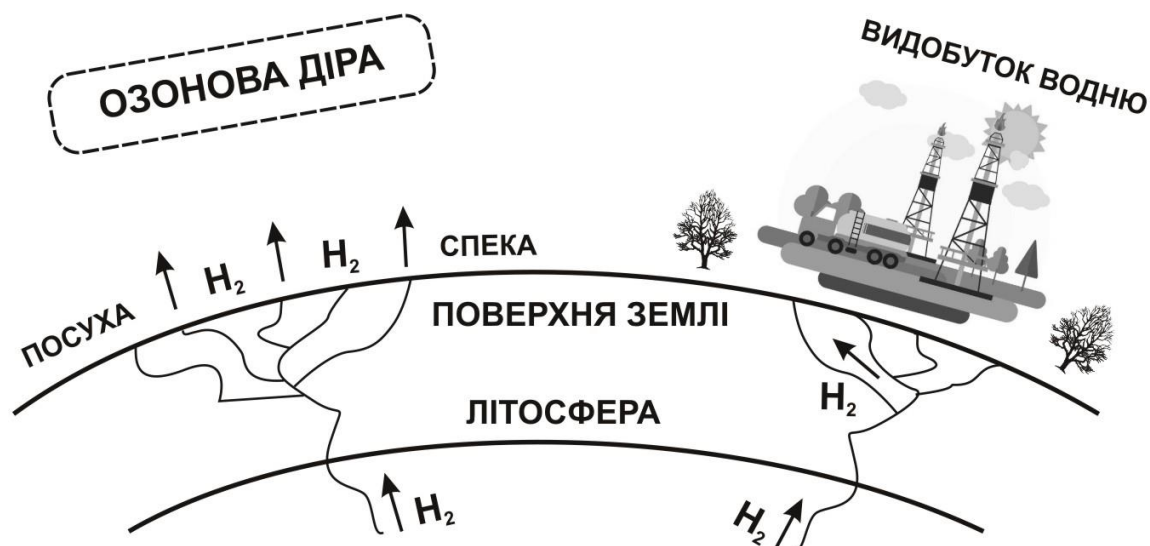


Рис. 1. Дегазація водню як імовірна причина потепління та посухи, згідно з [46]. Видобуток та утилізація геологічного водню як шанс урятувати клімат

Fig. 1. Hydrogen degassing as a probable cause of warming and drought, according to [46]. Extraction and utilization of geological hydrogen as a chance to save the climate

Нові дані космогонії, геології та інших наук

Вважалося, і досі вважається, що сегрегація хімічних елементів у «небулі» проходила переважно через вплив сонячного випромінювання за критерієм відмінностей елементів та речовин за температурою конденсації. Така гіпотеза дозволила оцінити загальний хімічний склад Землі та планет земної групи, включно з недоступними нам надрами [3, 9]. Домінувала думка, що Земля і планети земної групи в процесі акреції та сегрегації елементів втратили значну частину легких і летких елементів та речовин, і тому складені з більш важких та тугоплавких елементів та речовин. Оскільки вміст легких і летких елементів у надрах вважався дуже малим, то загальний хімічний склад Землі може бути таким, ваг. %: Fe – 32,1; O – 30,1; Si – 15,1; Mg – 13,9; S – 2,9; Ni – 1,8; Ca – 1,5; Al – 1,4; на

інші елементи припадає 1,2 ваг. % (H – 33 ppm, He – 111 ppm, C – 446 ppm...). Ядро складається з Fe – 88,8 ваг. %, Ni – 5,8 ваг. %, S – 4,5 ваг. % та близько 1 ваг. % інших елементів [9]. Другий приклад – загальний хімічний склад Землі, згідно з [3], наведений на рис. 2. Ядро може мати такий склад: внутрішнє – Fe – 80 ваг. % і Ni – 20 ваг. %; зовнішнє – Fe – 86 ваг. %, S – 12 ваг. %, Ni – 2 ваг. %. Сектор «H₂O, органіка та інше = 8 %» невизначений і введений, відповідно, до складу вуглих хондритів [3]. Наша планета могла втратити ці елементи й речовини або частково, або суттєво. Тоді цей сектор стане менше 8 % або стягнеться до нуля. Однак якщо спиратися на гіпотезу, що сегрегацію елементів визначало магнітне поле «небулі» й потенціали іонізації елементів і речовин, то загальний хімічний склад Землі виглядатиме зовсім інакше [10]. На рис. 2 вказані відповідні дані.

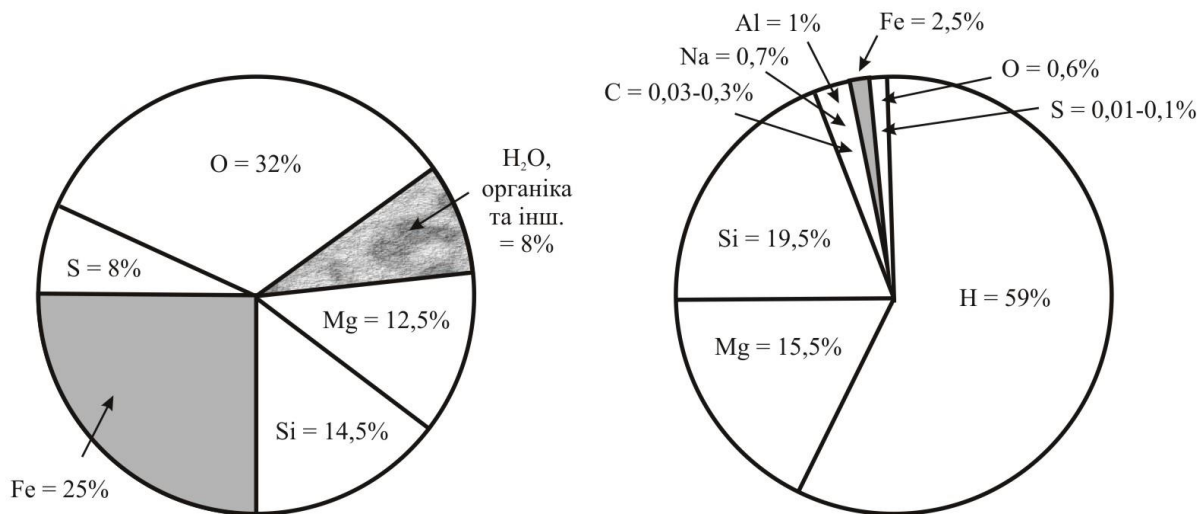


Рис. 2. Хімічний склад Землі (ат.%). Ліворуч – згідно з [3]; праворуч – згідно з [10]

Fig. 2. Chemical composition of the Earth (at.%). On the left, according to [3]; on the right, according to [10]

Але можливі й інші варіанти формування Сонячної системи й Землі, тому було запропоновано альтернативні моделі нашої планети, в яких передбачається надлишок водню у земних надрах. Цей водень міг бути захоплений з «небули», оскільки водень є найпоширенішим елементом у всесвіті. Докладніше про моделі Землі [5, 10–12] автор писав у [13]. У моделі [5] припускається, що весь кисень розташований у мантиї та корі, а його вміст – 33–35 ваг.% Землі. В залізо-нікелевому ядрі містяться: у внутрішньому ядрі – гідриди й карбіди металів (Fe, Ni, Co, Mg, Cu тощо), а також з'єднання заліза з азотом-вуглецем-воднем; у зовнішньому ядрі – суміш тих самих металів, водень, метан, з'єднання заліза з азотом-вуглецем-воднем, остаточні гідриди і карбіди. Вміст водню в ядрі може бути 2–5 ваг.%, тобто 0,7–1,7 ваг.% Землі [5]. Якщо «небула» мала надзвичайно великі розміри, а тиск водню в «небулі» було набагато більше, ніж традиційно вважається, то Земля могла «просочитися» воднем до самого ядра, і тому надра нашої планети дуже багаті на водень [11, 12]. Альтернативні моделі Землі [5, 10–12], на думку автора, вказують правильний напрям досліджень з метою доповнення основних моделей Землі, оскільки вони акцентують увагу на надлишку водню та інших легких елементів у ядрі Землі, й виходу потоків тепла, геотермальних вод і водню на поверхню планети. Передбачалося, що метеорити, які впали на Землю, адекватно характеризують склад протопланетного диска і загальний хімічний склад Землі, виходячи з хондритової моделі. Однак нові дані ставлять під сумнів це твердження. Ті метеорити, що впали на Землю, можуть становити лише незначну частину орбітального простору Сонячної системи [14], а тому не є представницькою вибіркою. Це ставить під сумнів загальний хімічний склад Землі, якій оцінено, виходячи з хондритової моделі. Раніше вважалося, що термін формування Сонячної системи – 10–20 млн років, але нові результати дослідження ізотопів молібдену в хондритах вказують на термін формування не більше 200 тис. років [15]. Це

також впливає на склад Землі. Сюрприз вченим зробив астероїд Аррокот, сфотографований апаратом «Нові горизонти» в поясі Койпера. Цей астероїд виглядає як картоплина, і являє собою два злиплі кулясті тіла. Дослідження астероїду показали, що акреція в ранній Сонячній системі проходила в дуже щадному режимі, шляхом ніжного злипання. Це підтверджує гіпотезу «ніжного злипання» всупереч панівному погляду, згідно з яким протопланетні тіла стикалися жорстко і сильно [16]. А це може означати, що леткі елементи могли зберегтися в надрах планет з моменту початку формування, оскільки не було перегріву через жорсткі удари. Також здивував дослідників близький до Землі астероїд Рюгу, з якого зонд «Хаябуса-2» зміг доставити зразки ґрунту. Виявилось, що астероїд за складом близький до вуглистих хондритів, і в його ґрунті міститься безліч складних органічних речовин: всі двадцять основних амінокислот, аліфатичні аміни, карбонові кислоти, ароматичні вуглеводні та азотовмісні гетероциклічні сполуки [17]. Величезна кількість органіки говорить на користь того, що рання Земля могла отримати з протопланетного диска основну частину своєї води і навіть абіогенної нафти. Це підтверджено результатами лабораторних досліджень [18], де вдалося синтезувати воду і абіогенну нафту з органічних сполук, які характерні для космічного середовища. Таким чином, існує велика вірогідність того, що надра Землі містять набагато більше водню, вуглецю та інших легких елементів, ніж вважалося. Також це свідчить на користь абіогенного походження родовищ вуглеводнів. Окремою великою проблемою залишається загадка формування Місяця. Тут є багато невирішених питань, зокрема щодо вмісту водню, води та легких елементів, які могли залишитися в надрах Землі. Основною тектонічною концепцією була й залишається теорія тектоніки літосферних плит, згідно з якою тверді плити на поверхні Землі рухаються за рахунок конвекції речовини, що відбувається в мантиї. Конвекція обумовлена тепловим потоком із глибин на поверхню та

фазовими / хімічними перетвореннями речовини мантії [3]. Проте вже до кінця XX століття стало очевидним, що глобальна модель динаміки нашої планети має відповідати отриманим знанням про мантійні плюми, про циклічність геологічних процесів, про процеси активного обміну речовиною / енергією між геосферами Землі. Необхідне ясне розуміння того, що Земля є відкритою, нерівноважною, самоорганізованою системою [19]. Одним з видатних відкриттів, зроблених методами сейсмотомографії, є виявлення двох великих областей (Тихоокеанської та Африканської) з низькою швидкістю

зсуву (LLSVP) у нижній мантії Землі [20–22]. Области LLSVP назвали суперплюмами за аналогією з мантійними плюмами, які є гарячими «краплями» мантійної речовини, що піднімаються від межі ядро – мантія і теж характеризуються зниженими швидкостями хвиль зсуву. Спрощена модель суперплюма і плюмів наведена на рис. 3. Ширина суперплюма досягає декількох тисяч кілометрів. Суперплюм піднімається від кордону ядро-мантія на тисячу кілометрів. А на менших глибинах суперплюм ділиться на гілки – мантійні плюми. Пунктирними лініями зображені глибини 2000 і 1000 км у мантії.

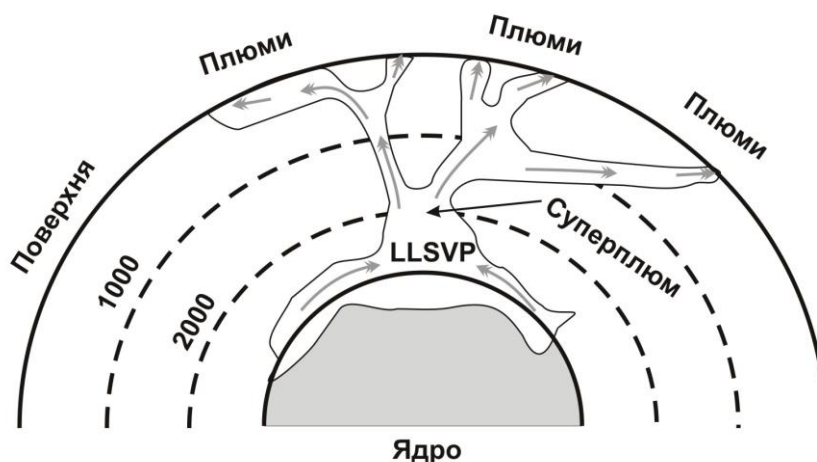


Рис. 3. Спрощена модель суперплюма і плюмів, згідно з [20–22]

Fig. 3. A simplified model of the superplume and plumes, according to [20–22]

Сьогодні основною гіпотезою утворення областей LLSVP є накопичення океанічних літосферних плит, які занурилися через субдукцію. В надрах плита частково розплавляється, утворюючи важкий розплав, тоді як легка частина матеріалу потім піднімається вгору. В результаті цих процесів на межі ядро-мантія формуються невеликі скупчення малих плюмів, які зливаються, утворюючи більші плюми, а потім – суперплюми. Тихоокеанський та Африканський LLSVP спочатку створюються в результаті викиду тепла з ядра в набагато холоднішу мантію, а розплавлені фрагменти літосфери допомагають керувати суперплюмом і конвекцією. Вказані процеси також можуть свідчити про наявність радіогенних нуклідів у ядрі Землі, що генерують тепло [23]. Проте існує друга гіпотеза походження LLSVP, яка пояснює їх утворення зіткненням Землі з гіпотетичною планетою під назвою Тея, внаслідок чого міг утворитися Місяць. Передбачається, що LLSVP є фрагментами мантії цієї планети, які опустилися до межі ядро – мантія Землі. Зіткнення з Теєю могло запустити всю геодинаміку Землі: тектоніку, вулканізм, вихід потоків речовини / енергії. Згідно з обома гіпотезами LLSVP може бути прихованим резервуаром, збагаченим елементами, що виробляють тепло і формують вихід на поверхню різноманітних речовин [20, 24]. Було розроблено термохімічну модель мантійного плюму, яка добре узгоджується з оцінкою потужностей Гавайського ($3,0 \cdot 10^8$ кВт) та Ісландського ($3,8 \cdot 10^8$ кВт) плюмів. Відповідно до моделі, з межі ядро – мантія відбувається викид струменя водню та/або метану, що взаємодіє з мінералами нижньої мантії, які містять залізо і кисень. У

результаті виділяються тепло, вода і вуглекислий газ, які знижують температуру плавлення мантійної речовини всередині плюму. Це дозволяє плюму швидко проплавити всю мантію до виходу на поверхню протягом ≈ 3 – 5 млн років. На поверхню плюм виносить тепло, водяну пару та безліч газів [25–26]. Відповідно до сучасних уявлень, основними глибинними процесами слід вважати: конвекцію у зовнішньому рідкому ядрі (вона визначає зростання внутрішнього твердого ядра, народження та варіації геомагнітного поля, нагрівання та повільну конвекцію нижньої мантії); взаємодію ядра та нижньої мантії (тут виділення газів визначає народження плюмів, які суттєво доповнюють мантійну конвекцію). Головне внутрішнє джерело тепла розташовано в ядрі Землі, і це може бути: залишкове тепло після акреції; взаємодія внутрішнього та зовнішнього ядра; розпад радіоактивних елементів; окиснення флюїдів на межі ядро – мантія [26]. Розглянемо властивості ядра Землі. Оскільки густина залізо-нікелевого ядра Землі на 5–10 % менша, ніж густина сплавів Fe-Ni, то вважається, що ядро містить домішку легких елементів, серед яких можуть бути: S, O, Si, C, P, H [27]. Але крім вказаних елементів, за думкою автора, потрібно ще враховувати гелій, оскільки він другий за розповсюдженістю елемент всесвіту і газоподібних туманностей. Так, нові дослідження феномена виходу He^3 із серединно-океанічних хребтів свідчать про те, що в ядрі Землі міститься джерело He^3 у кількості 10^{15} г. Імовірно, гелій був захоплений під час акреції Землі й тепер виноситься на поверхню [28], оскільки в надрах планети, як вважається, He^3 не генерується. Але якщо вважати, що вміст

гелію-4 у протопланетному диску був значно більший, $\sim 10^5$ разів, ніж гелію-3 (це звичайне співвідношення ізотопів гелію), то він також був захоплений Землею, і кількість гелію в ядрі планети може становити набагато більше, тобто $\sim 10^{20}$ г. А це приблизно 10^{-7} маси ядра ($\sim 1,4 \cdot 10^4$ ат.%). Гелій дійсно може утримуватися в ядрі Землі у великих кількостях. Це засвідчили результати моделювання. Виявляється, в умовах ядра Землі стабільним є рідкісне з'єднання FeO_2He . Розрахунок сейсмічних хвиль у FeO_2He непогано узгоджується з даними щодо сейсмічних властивостей ядра [29]. Було запропоновано цікаву концепцію (на рівні гіпотези) про водневу та гелієву дегазацію з ядра Землі, як основного джерела енергії для ендеогенних процесів планети. Згідно з цією концепцією Земля захопила з протопланетного диска водень і гелій у великих кількостях, і вони потім стали виходити назовні. Водень та гелій здатні утворювати метастабільні сполуки в умовах великих тисків та підвищених температур. При підйомі метастабільні сполуки водню і гелію розпадаються на інші метастабільні сполуки, з виділенням великих кількостей енергії. Зазначені процеси живлять енергією решту ендеогенних процесів у надрах, а також забезпечують вихід на поверхню потоків водню, вуглеводнів і потоків тепла [30]. Така модель добре корелює з моделлю [5] і моделлю [11, 12]. І хоча, згідно з сучасними даними, водень навряд чи існує в ядрі Землі у вигляді гідридів (а вуглець – навряд чи у вигляді карбідів), загалом моделі Землі [5, 11, 12] не суперечать новим геологічним, геодезичним, геофізичним і палеомагнітним даним. На жаль, модель [10], яка передбачає сильне розширення планети за час її геологічної історії, не підтверджується новими геологічними, геодезичними, геофізичними даними. Нові дані підтверджують тектоніку плит і плюм-тектоніку, і не підтверджують розширення Землі [31, 32]. Отже, в ядрі Землі можуть міститися значні кількості водню й вуглецю, що добре корелює з моделлю [5]. Наприклад, в дослідженні [33] в умовах 30–60 Гпа і 3100–4600 К здійснили імітацію зовнішнього рідкого ядра Землі й нижньої мантії та встановили, що 0,3–0,6 ваг.% водню може бути включено до Fe-ядра. Це пояснює 30–60 % дефіциту густини ядра, а також аномалії швидкості сейсмічних хвиль, відносно чистого Fe-ядра (зовнішнього). Це також свідчить, що водень може бути важливою складовою металевих ядер планет земної групи і Місяця. При зниженні тиску (в ядрі) водень виходитиме з нього. В дослідженні [34] зроблено порівняльний аналіз комп'ютерних моделей і даних сейсмографії стосовно складу вуглецю в зовнішньому ядрі Землі. Це було перше дослідження, яке уточнює діапазон оцінки вуглецю, беручи до уваги інші легкі елементи – такі як кисень, сірка, кремній, водень і азот – для оцінки складу зовнішнього ядра Землі. Встановлено, що 0,3–2,0 ваг.% вуглецю у зовнішньому залізнному ядрі найкраще відповідає сейсмічним даним. Це приблизно $(5,5\text{--}36,8) \cdot 10^{24}$ г. Це також означає, що в зовнішньому (і внутрішньому) ядрі Землі міститься 93–95 % вуглецю усій планети. Зазначені дослідження показують, що водень і вуглець в ядрі планети можуть перебувати у вигляді розплавів і твердих розчинів. У екстремальних умовах ядра можливе існування «несумісних» елементів і речовин. Кисень може існувати не тільки у зовнішньому

рідкому ядрі, але й у твердому внутрішньому ядрі у вигляді сполук Fe_nO , де $n = 2$ і більше [35]. Дискутуються механізми виходу легких елементів з ядра до мантії і далі – на поверхню.

Існують суперечності щодо величин теплових потоків в надрах Землі та на її поверхні. Наприклад, в монографії [3] вказано, що теплоперенесення з ядра в мантію дорівнює $\sim 10^{13}$ Вт (10 ТВт), а тепловий потік з мантії у кору $4 \cdot 10^{13}$ Вт (40 ТВт). Як вказано в роботі [36], на сьогодні більшість авторів оцінюють глобальний тепловий потік із надр на поверхню в 44–47 ТВт, але в надрах оцінки потоків різняться. Наприклад, загальний тепловий потік від ядра Землі має розбіжності від 5 до 20 ТВт. Теплогенерація кори Землі оцінюється в 6,93–8,10 ТВт. Загальний тепловий потік від розпаду радіоактивних елементів має розбіжності в оцінках від 9 до 36 ТВт. Дискутується можливість існування природного ядерного реактора в глибоких надрах [36]. Було переглянуто температуру внутрішнього ядра Землі, що істотно впливає на потік тепла. Попередні дослідження 1990-х років показали, що температура внутрішнього ядра приблизно 5000 °C, з огляду на температуру плавлення заліза в умовах ядра. Однак за рахунок точнішого розуміння властивостей заліза в ядрі ця оцінка змінена до приблизно 6000 °C [37].

Нові дані щодо мантійних плюмів, геотермального тепла, родовищ водню та вуглеводнів, нових технологій відновлюваної енергетики

Відомо, що плюм – висхідний речовинно-енергетичний потік у мантії (потік тепла і речовини), якій відносно стабільний в часі, – зумовлює активізацію вулканізму в «гарячих точках» і може відповідати за формування магматичних провінцій, вулканічних континентальних окраїн, формування лавових плато (трапів), ланцюгів океанічних островів, континентальних рифтів [38]. Плюм «пропалює» мантію і «пробиває» жорстку літосферу, створюючи рифтові та розломні зони. У цих регіонах високий потенціал геотермальної енергії, можуть бути потужні гідротермальні джерела. Наприклад, це о. Ісландія, Єллоустоунський національний парк тощо. Ймовірно, плюми – головні «труби» глибинної дегазації планети – визначають основні характеристики нафтогазоносних басейнів, родовищ газу, водню та гелію. Наприклад, основний за запасами вуглеводнів басейн у Дніпровсько-Донецькій западині розташований над Дніпровсько-Донецьким плюмом, який своєю чергою є дериватом (наслідком) ще більшого, найдавнішого Сарматського плюму [39], а останній – наслідком Африканського суперплюму. В роботі [40] представлена сейсмічна візуалізація плюмів у мантії під територією України. У минулому нижньоархейські породи Українського кристалічного щита, ймовірно, формувалися в умовах дрібнокомірчастої конвекції та густій мережі плюмів [41]. Мантійні плюми і конвекція в мантії сприяють тому, що в глибоких надрах міститься великий обсяг води, як у зв'язаному стані в мантійних мінералах, так і у вільному стані [13]. Наприклад, у кристалах алмазів, які зібрані на родовищах у ПАР, Китаї, Заїрі та Сьєрра-Леоне, вдалося виявити мікротрещини водного льоду в рідкісній кубічній фазі льоду VII (високобаричний лід). Вчені доходять висновку, що формування цих кристалів відбувалося на глибинах 610–800 км

(перехідна зона мантії), де раніше взагалі не малася на увазі вода. За тих високих тисків і температур рідка вода утворює високобаричний лід VII. Поки що невідомо, як багато води міститься в мантії, проте сама її наявність змусить геологів переглянути енергетичний баланс мантії та процеси, що розвиваються в її породах [42]. Підіймаючись вище, вода може утворювати надкритичний флюїд, а на поверхню виходити у вигляді пари, пароводяної суміші або гарячої рідини, тобто речовин, які можуть використовуватися геотермальними станціями як теплоносії. Крім води плюми і конвективні мантіїні потоки можуть виносити на поверхню водень, вуглеводні, гелій і леткі елементи, та інші речовини [5, 11–13, 26–30].

Сьогодні водень необхідної якості одержують в світі електролітичним методом з води, так само планують робити в Україні. В роботі [43] розглянуто питання виробництва електролітичного водню за допомогою вітрової енергії. Представлено найефективніші електролізери для промислового електролізу води. Запропоновано створити вітроводневу енергетику як нову енергетичну підгалузь, яка зможе забезпечити значну частку потреб в екологічно чистих енергоносіях різних галузей економіки держави. Але водень можна не тільки виробляти з води, а й прямо добувати з надр. Це може не тільки істотно здешевити отримання водню, а й підвищити гнучкість та надійність усієї енергосистеми України. У дослідженні [44] виконано аналіз перспектив нарощування видобутку вуглеводнів в Україні, зокрема за рахунок надглибокого буріння. Підкреслено, що освоєння досить значного газового потенціалу надр має значення для перспективного видобування водню і гелію. Струмінне виділення водню встановлено, наприклад, на залізорудних родовищах Кривого Рогу, при цьому їх газонасність з глибиною зростає. У роботах [45, 46] наведено численні дані про водневу дегазацію Землі, про місця виходу водню на поверхню з утворенням «кільцевих структур» (зі зниженням рівня ґрунту, утворенням озер та боліт) [45], про руйнування озонового шару в атмосфері над регіонами потужної водневої дегазації (рифти,

розломні зони) [46], про викликані цим кліматичні аномалії (аномальне тепло, посуха, спека) [46]. Ці явища необхідно використовувати як прогностичні під час пошуку родовищ водню. При цьому необхідно враховувати, що виділення водню є непостійним у часі, і сильно залежить від припливних явищ і від інших не відомих факторів. Однак, судячи з відомих даних, за останні десятиліття воднева дегазація планети загалом посилилася (!). А це може призвести до катастрофічного руйнування озонового шару, до збільшення посухи і спеки [46]. Така ситуація зображена на рис. 1, ліворуч. Щорічні втрати глибинного метану та глибинного (геологічного) водню оцінюються приблизно в $(2500-3000) \cdot 10^{24}$ г та $(70-80) \cdot 10^{24}$ г, відповідно, а може, й набагато більше [46]. У роботі [36] підкреслено, що визначення потоків водню є складним завданням, землетруси сильно змінюють проникність тріщинно-розломних зон, з яких іде дегазація водню, при цьому дегазація водню може зростати на 5-6 порядків. Тому необхідно проводити подальші дослідні роботи в перспективних регіонах у пошуках родовищ водню, і є великий шанс знайти багаті родовища на території України. На сьогодні існують дві групи гіпотез щодо походження геологічного водню. Перша: виникнення водню внаслідок розкладання води при контакті з дивалентним залізом у складі олівіну; при радіолізі води. Все це відбувається при магматичній активізації переробки порід у верхній мантії. Друга: вихід на поверхню глибинного водню (зокрема, з ядра), який було накопичено при формуванні планети. Це реалізується за рахунок конвективного теплопереносу. При цьому автори другої групи гіпотез не виключають виникнення водню згідно з першою групою гіпотез, але останні процеси вважаються лише вторинним утворенням водню [36]. На рис. 4 наведена спрощена схема генерації водню, яка не враховує вплив біосфери. (Також на схемі не вказано, що з поверхні планети виділяються не тільки H_2O , H_2 , але й CO_2 , і в менших кількостях – CH_4 , CO . Також на схемі не вказано, що до літосфери знизу підходять потоки не тільки H_2 , H_2O , але й CH_4 , CO_2) [5]. Зрозуміло, що окислення глибинного водню генерує багато тепла.

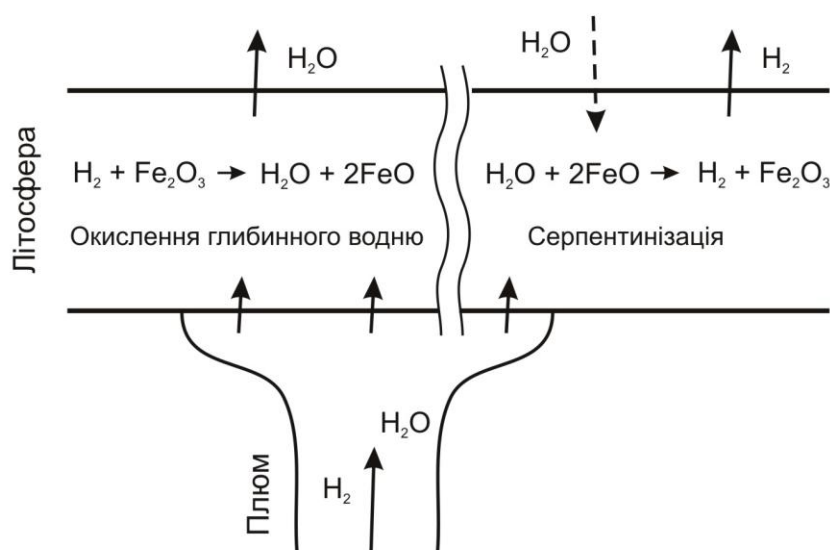


Рис. 4. Спрощена схема геохімічних процесів генерації водню, згідно з [5, 25, 36]

Fig. 4. The simplified diagram of the geochemical processes of hydrogen generation, according to [5, 25, 36]

У 2023 році в Лотарингії (Франція) в районі відпрацьованих вугільних шахт на глибині приблизно 1 км виявлено величезні запаси водню, від 46 до 260 млн тонн природного водню. Планується продовжити пошукове буріння у 2027–2028 роках. Можливо, там найбільші у світі запаси геологічного водню [47]. Як показує дослідження 2024 року, у відпрацьованій хромовій копальні в Албанії може виходити назовні водень з іще більшого природного скупчення газу. Тут виявлено гірські породи офіоліти, які можуть генерувати водень при взаємодії з водою, при цьому в потоці газу міститься 84 % водню решта – метан і азот [48]. Якщо згадати історію відкриття багатого родовища водню в Малі (Африка) чи Канзасі, то спочатку буріння свердловин проводилося під воду, або під нафту/газ, а згодом виявлено H_2 [6]. Отже необхідно (!) проводити розвідку бурінням. За оцінками фахівців (2024 р.), у підземних резервуарах по всьому світу міститься 5,5 трлн тонн водню, і навіть якщо доступно виявиться невелика його частина, цього вистачає на прогнозований попит, 500 млн тонн на рік, ще надовго [49]. Водень необхідно активно шукати. Однак проблема в тому, що дифузійні та хімічні властивості водню ускладнюють його виявлення. Ймовірно, водень швидко залишає місце генерації й не може довго утримуватись у геологічних пастках. Крім того, водень швидко «з'їдається» мікроорганізмами, які поширені в ґрунтах та верхніх шарах земної кори. Зростаюча воднева дегазація Землі, як вже підкреслено вище [46], призводить до руйнування озонового шару в атмосфері над регіонами потужної водневої дегазації, до таких кліматичних аномалій, як потепління, посуха, спека. Наприклад, незважаючи на заборону використання хлорфторвуглеців (фреонів), антарктична озонова діра знову зростає [50]. Але справжньою причиною

цього може бути те, що біля Антарктиди найбільші виходи водню з океанічних рифтів [46]. Також періодично виникають озонові діри над іншими регіонами. А в Каліфорнії (США) існує рифтова зона, з якої виходить водень, і там часто трапляються посухи й пожежі [46]. Вірогідний механізм впливу водневої дегазації на потепління такий: водень вступає в реакцію з озоном і зменшує його концентрацію в озоновому шарі, тобто виникає озонова діра. Крізь озонову діру ультрафіолетове випромінювання Сонця досягає поверхні планети й розігріває її в регіоні під озоновою дірою [46]. Це призводить до інтенсифікації генерації вуглекислого газу й метану, якщо відбувається окислення органіки, танення вічної мерзлоти і розпад газогідратів. А це своєю чергою ще більше розігріває планету (рис. 1, ліворуч). Чи існує у нас можливість зменшити небезпеку таких явищ, наприклад за рахунок видобутку та утилізації геологічного водню (рис. 1, праворуч)? Ці питання потребують дослідження.

Також необхідно проводити дослідження екосистем з водневими бактеріями, які здатні окислювати водень у ґрунтах, поблизу гідротермальних джерел тощо [51]. Імовірно, ефективне використання таких бактерій дозволить поглинати водень з ґрунтів, земної кори, океану, що зменшить його викиди в атмосферу. Позитивним наслідком також буде отримання біомаси, яку можна використовувати для виготовлення харчових продуктів і кормів (рис. 5). Можливо, вдасться розробити технологію отримання електрики з водню за допомогою водневих бактерій, як це розпочали дослідники [52], що вже отримали позитивні результати.

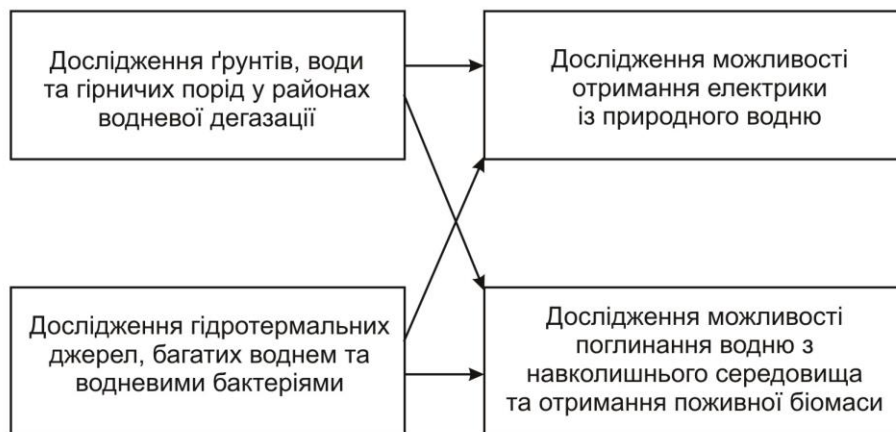


Рис. 5. Перспективні дослідження в галузі відновлюваної енергетики

Fig. 5. The prospective research in the field of renewable energy

У світі існують цікаві проекти видобутку геотермального тепла, які необхідно мати на увазі для застосування у водневій енергетиці. Наприклад, міжнародна консалтингова компанія CGG, яка розробляє геонаукові технології, пропонує розташування геотермальних свердловин поблизу серединно-океанічних хребтів. Там максимальні теплові потоки, й, отже, забезпечена максимальна генерація електроенергії. Але

існує проблема з доставкою електроенергії, яку буде вироблено. Для вирішення проблеми пропонується гарячу воду геотермальних станцій перетворювати на водень за допомогою електролізерів, і таким чином акумулювати електроенергію на місцях. Водень (або аміак, який вироблено за допомогою водню) можна буде відправляти замовнику як еквівалент електричної енергії [8].

Висновки

Численні дані космогонії та наук про Землю свідчать на користь того, що в залізо-нікелевому ядрі нашої планети в надлишку є водень, гелій, вуглець, кисень, сірка, кремій, фосфор, азот та інші елементи, які здатні залишати ядро. Це спричинює формування потужних потоків речовини / енергії від ядра до поверхні Землі за рахунок мантийних плюмів і мантийної конвекції. На поверхню планети виходять вода, водень, метан, вуглекислий газ та інші речовини. Утворюються запаси вуглеводнів, води, водню та інших корисних копалин. Також запаси водню утворюються за рахунок серпентинізації деяких гірських порід (наприклад, олівіну) при їх взаємодії з водою.

В Україні потрібно розробляти методи пошуку геологічного водню та оцінки його запасів, методи добування викопного водню. Ймовірно, викопний водень потрібно шукати у рифтогенно-розломних зонах, місцях концентрації виходу на поверхню у вигляді «кільцевих структур», у відпрацьованих і діючих шахтах та копальнях, де високий вміст водню в газах.

Потрібно також проводити дослідження екосистем з водневими бактеріями. Ймовірно, це дасть змогу розробити методи поглинання водню з ґрунту, земної кори, океану, що зменшить його викиди в атмосферу й дозволить використовувати додаткову біомасу в господарстві. Не виключено, що ми також отримаємо технологію генерації електрики з водню за допомогою водневих бактерій.

ПОСИЛАННЯ

1. Відновлювані джерела енергії / За заг. ред. С. О. Кудрі. Київ: ІВЕ НАНУ. 2020. 392 с.
2. Кудря С. О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії: Підруч. Київ: НТУУ КПІ. 2012. 492 с.
3. Браун Д., Массет А. Недоступная Земля. Пер. с англ. М.: Мир. 1984. 262 с.
4. Аллисон А., Палмер Д. Геология. Пер. с англ. М.: Мир. 1984. 568 с.
5. Семененко Н. П. Кислородно-водородная модель Земли. Киев: Наук. думка. 1990. 248 с.
6. Prinzhofer A., Cisse Ch. S. T., Diallo A. B. Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebou-gou (Mali). *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018. Vol. 43. Issue 42. Pp. 19315–19326. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.193>.
7. Професор Степан Кудря: Ми працювали над водневими технологіями ще 30 років тому (10.02.2020. Автор Яніна Ткачук). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://kosatka.media/category/blog/news/professor-stepan-kudrya-my-rabotali-nad-vodorodnymi-technologiyami-eshche-30-let-nazad>. (дата звернення: 11.06.2024).
8. Blain Loz. Massive geothermal potential found offshore, where the Earth splits (19.02.2024). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://newatlas.com/energy/offshore-geothermal-cgg>. (дата звернення: 11.06.2024).
9. John W. Morgan and Edward Anders. Chemical composition of Earth, Venus, and Mercury. *Proc Natl Acad Sci USA*. 1980 Dec; 77(12): 6973–6977. <https://doi.org/10.1073/pnas.77.12.6973>.
10. Ларин В. Н. Наша Земля (происхождение, состав, строение и развитие изначально гидридной Земли). М.: «Арап». 2005. 248 с.
11. Маракушев А. А. Происхождение и эволюция Земли и других планет Солнечной системы. М.: Наука. 1992. 203 с.
12. Маракушев А. А., Маракушев С. А. Происхождение и флюидная эволюция Земли. *Пространство и время*, 2010, № 1. С. 98–118 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/338015431_Proishozhdenie_i_fluidnaa_evolutcia_Zemli. (дата звернення: 11.06.2024).
13. Скосарь В. Ю. Энергетические и экологические следствия из моделей Земли с флюидным металлическим ядром / В. Ю. Скосарь. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. 2018. № 10(1). С. 15–23. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/mnj_2018_10\(1\)_5](http://nbuv.gov.ua/UJRN/mnj_2018_10(1)_5) (дата звернення: 11.06.2024).
14. Fredrik Terfelt and Birger Schmitz. Asteroid break-ups and meteorite delivery to Earth the past 500 million years. *PNAS*. June 15. 2021. 118 (24) e2020977118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2020977118>.
15. Gregory A. Brennecka et al. Astronomical context of Solar System formation from molybdenum isotopes in meteorite inclusions. *Science*. 2020. Vol. 370. Issue 6518. Pp. 837–840. <https://doi.org/10.1126/science.aaz8482>.
16. Pallab Ghosh. New Horizons spacecraft 'alters theory of planet formation' (13 February 2020). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.bbc.com/news/science-environment-51295365>. (дата звернення: 11.06.2024).
17. Hiroshi Naraoka et al. Soluble organic molecules in samples of the carbonaceous asteroid (162173) Ryugu. *Science*. 2023. Vol. 379. Issue 6634. <https://doi.org/10.1126/science.abn9033>.
18. Nakano H., Hirakawa N., Matsubara Y. et al. Precometary organic matter: A hidden reservoir of water inside the snow line. *Sci Rep* 10, 7755 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64815-6>.

19. Хаин В. Е. Об основных принципах построения подлинно глобальной модели динамики Земли. Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 6. С. 753–760.
20. Cottaar S., Lekic V. Morphology of seismically slow lower-mantle structures. *Geophysical Journal International*. 2016. Vol. 207. Issue 2. Pp. 1122–1136. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw324>.
21. Hamed Gamal El Dien, Luc S. Doucet, Zheng-Xiang Li. Global geochemical fingerprinting of plume intensity suggests coupling with the supercontinent cycle. *Nature Communications*. 10, 5270 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13300-4>.
22. Luc S. Doucet, Zheng-Xiang Li, Richard E. Ernst, Uwe Kirscher, Hamed Gamal El Dien, Ross N. Mitchell. Coupled supercontinent–mantle plume events evidenced by oceanic plume record. *Geology*. 2019. <https://doi.org/10.1130/G46754.1>.
23. Maruyama; Santosh; Zhao. Superplume, supercontinent, i post-perovskite: Mantle dynamis and anti-plate tectonics на Core-Mantle Boundary. *Gondwana Research*. 2007. Vol. 11. No. 1-2. Pp. 7–37. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2006.06.003>.
24. Qian Yuan, Michael Gurnis, Paul D. Asimow, Yida Li. A Giant Impact Origin for the First Subduction on Earth. *Geophysical Research Letters*. 2024. Vol. 51. Issue 9. e2023GL106723. <https://doi.org/10.1029/2023GL106723>.
25. Добрецов Н. Л. Геологические следствия термохимической модели плюмов. *Геология и геофизика*. 2008. Т. 49, № 7. С. 587–604.
26. Добрецов Н. Л. Глобальная геодинамическая эволюция Земли и глобальные геодинамические модели. *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51, № 6. С. 761–784.
27. Formation of Earth's Core / D. C. Rubie, F. Nimmo, H. J. Melosh (2007). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://web.archive.org/web/20131012015248/http://es.ucsc.edu/~fnimmo/website/treatise3.pdf> (дата звернення: 05.06.2024).
28. Peter L. Olson, Zachary D. Sharp. Primordial Helium-3 Exchange Between Earth's Core and Mantle. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2022. Vol. 23. Issue 3. e2021GC009985. <https://doi.org/10.1029/2021GC009985>.
29. Jurong Zhang, Jian Lv, Hefei Li, Xiaolei Feng, Cheng Lu, Simon A. T. Redfern, Hanyu Liu, Changfeng Chen, and Yanming Ma. Rare Helium-Bearing Compound FeO₂He Stabilized at Deep-Earth Conditions. *Phys. Rev. Lett.* 2018. 121, 255703. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.255703>.
30. Gilat A., Vol A. Degassing of primordial hydrogen and helium as the major energy source for internal terrestrial processes. *Geoscience Frontiers*. 2012. Vol. 3. Issue 6. Pp. 911–921. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2012.03.009>.
31. Gintov O. B. Temporal sequence of geodynamic development processes in the territory of Ukraine from the Eoarchean to Anthropogen. *Geophysical Journal*. Vol. 39 No. 1 (2017). Pp. 17–40. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i1.2017.94009>.
32. X. Wu, X. Collilieux, Z. Altamimi, B. L. A. Vermeersen, R. S. Gross, I. Fukumori. Accuracy of the International Terrestrial Reference Frame origin and Earth expansion. *Geophysical Research Letters*. 2011. Vol. 38. Issue 13. <https://doi.org/10.1029/2011GL047450>.
33. Tagawa S., Sakamoto N., Hirose K. et al. Experimental evidence for hydrogen incorporation into Earth's core. *Nature Communications*. 12, 2588 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22035-0>.
34. Bajgain S. K., Mookherjee M., Dasgupta R. Earth's core could be the largest terrestrial carbon reservoir. *Commun Earth Environ* 2, 165 (2021). <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00222-7>.
35. Jin Liu et al. Iron-rich Fe–O compounds at Earth's core pressures. *The Innovation*. 2022. Vol. 4. Issue 1. 100354. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2022.100354>.
36. Shestopalov V. M. On geological hydrogen. *Geophysical Journal*. Vol. 42 No. 6 (2020). Pp. 3–35. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i6.2020.222278>.
37. Anzellini S., Dewaele A., Mezouar M., Loubeyre P., Morard G. Melting of Iron at Earth's Inner Core Boundary Based on Fast X-ray Diffraction. *Science*. AAAS, 2013. Vol. 340. Issue 6131. Pp. 464–466. <https://doi.org/10.1126/science.1233514>.
38. Плюм мантийний. *Геологічний словник*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://geodictionary.com.ua/node/4585>. (дата звернення: 11.06.2024).
39. Лукин А. Е. Система «суперплюм – глубокозалегаючі сегменти нафтогазоносних басейнів» – неісчерпаємий джерело вуглеводородів. *Геологічний журнал*. 2015. №. 2. С. 7–20. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/geojur_2015_2_3. (дата звернення: 11.06.2024).
40. Цветкова Т. А., Бугаєнко І. В., Заєц Л. Н. Сейсмічна візуалізація плюмов і свертхглибинних флюїдів в мантиї під територією України. *Геофізичський журнал*. 2017. Т. 39. № 4. С. 42–54. <https://dx.doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i4.2017.107506>.
41. Ponomarenko, O., Gintov, O., Stepanyuk, L. (2018). On the so-called “leukogranulite formation” and “greenlevada suite” of Early Precambrian of the Ukrainian

- Shield. *Geofizicheskiy zhurnal*, 40(5), 47–70.
<https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i5.2018.147474>.
42. Tschauner O. et. al. Ice-VII inclusions in diamonds: Evidence for aqueous fluid in Earth's deep mantle. *Science*. 2018. Vol. 359. Issue 6380. Pp. 1136–1139.
<https://doi.org/10.1126/science.aao3030>.
43. Кудря С. О., Яценко Л. В., Шинкаренко Л. Я., Ткаленко М. Д. Електролітичне виробництво водню для вітроводневих станцій. *Відновлювана енергетика*. 2023. № 3. С. 92–100. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3\(74\)92-100](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3(74)92-100).
44. Лукін О. Ю., Крижанівський Є. І., Геєць В. М. Про перспективи нарощування видобутку нафти і газу в Україні. *Вісник Національної академії наук України*. 2019. № 1. <https://doi.org/10.15407/visn2019.01.038>.
45. Larin Nicolay. Constitution of Earth and Hydrogen Energy. *Journal of Environmental Earth and Energy Study (JEEES)*. No. 3 (2021). Pp. 43–61.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.5547009>.
46. Syvorotkin Vladimir. Hydrogen Degasation and Environmental Problems. *Journal of Environmental Earth and Energy Study (JEEES)*. No. 4 (2021). Pp. 75–90.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.5547023>.
47. Романова Кс. Величезний запас енергії у нас під ногами. У Франції знайшли найбільші поклади водню (04.12.2023). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://focus.ua/uk/technologies/610479-velicheznyy-zapas-energiji-u-nas-pid-nogami-u-franciji-znayshli-naybilshi-zalezhi-vodnyu>. (дата звернення: 11.06.2024).
48. Taub B. World's Largest Deposit of Natural Hydrogen Gas Discovered In Albanian Mine (03.2024). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iflscience.com/worlds-largest-deposit-of-natural-hydrogen-gas-discovered-in-albanian-mine-73210>. (дата звернення: 11.06.2024).
49. Loz Blain. Trillions of tons of buried hydrogen: Clean energy gold rush begins (21.02.2024). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://newatlas.com/energy/geologic-hydrogen-gold-rush/>. (дата звернення: 05.06.2024).
50. Victoria Gill. The return of the ozone crisis: Why Earth's atmospheric hole poses a huge threat (again) (30.05.2024). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sciencefocus.com/nature/ozone-layer-environment>. (дата звернення: 11.06.2024).
51. Koskinen P. E. P., Beck S. R., Orlygsson J., Puhakka J. A. (November 2008). «Ethanol and hydrogen production by two thermophilic, anaerobic bacteria isolated from Icelandic geothermal areas». *Biotechnology and Bioengineering*. 101 (4): 679–90.
<https://doi.org/10.1002/bit.21942>.
52. Chris Greening. Soil Bacteria Discovery Could Allow Us to Produce Electricity From 'Thin Air' (09.03.2023). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sciencelert.com/soil-bacteria-discovery-could-allow-us-to-produce-electricity-from-thin-air>. (дата звернення: 11.06.2024).

REFERENCES

- Vidnovluvani dgerela energii / Za zag. red. S. O. Kudryi. Kyiv: IVE NANU. 2020. 392 p.
- Kudrya S. O. Netradicijni ta vidnovluvani dgerela energii. *Pidruch*. Kyiv: NTUU KPI. 2012. 492 p.
- Brown G., Mussett A. *The Inaccessible Earth*. London: George Allen@Unwin. 1981.
- Allison I., Palmer D. *Geology*. McGraw-Hill Book Company. 1980.
- Semenenko N. P. *Kislородno-vodorodnaya model Zemli*. Kyiv: Nauk. dumka. 1990. 248 p.
- Prinzhofer A., Cisse Ch. S. T., Diallo A. B. Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali). *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018. Vol. 43. Issue 42. Pp. 19315–19326.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.193>.
- Profesor Stepan Kudrya: Mi pracuvali nad vodnevimi tehnologijami she 30 rokiv tomu (10.02.2020. Avtor Yanina Tkachuk). [Electronic resource]. – Access mode: <https://kosatka.media/category/blog/news/professor-stepan-kudrya-my-rabotali-nad-vodorodnymi-tehnologiyami-eshche-30-let-nazad>. (date of application: 11.06.2024).
- Blain Loz. Massive geothermal potential found offshore, where the Earth splits (19.02.2024). [Electronic resource]. – Access mode: <https://newatlas.com/energy/offshore-geothermal-cgg>. (date of application: 11.06.2024).
- John W. Morgan and Edward Anders. Chemical composition of Earth, Venus, and Mercury. *Proc Natl Acad Sci USA*. 1980 Dec; 77(12): 6973–6977.
<https://doi.org/10.1073/pnas.77.12.6973>.
- Larin V. N. *Nasha Zemlia (proishogdenie, sostav, stroenie i razvitie iznachalno gidridnoj Zemli)*. M.: «Agar». 2005. 248 p.
- Marakushev A. A. *Proishogdenie i evolustija Zemli i drugih planet Solnechnoj sistemy*. M.: Nauka. 1992. 203 p.
- Marakushev A. A., Marakushev S. A. *Proishogdenie i fluidnaja evolustija Zemli. Prostranstvo i vremia*. 2010. No 1. P. 98–118. [Electronic resource]. – Access mode: https://www.researchgate.net/publication/338015431_Proishozdenie_i_fluidnaa_evolution_Zemli. (date of application: 11.06.2024).

13. Skosar V. Yu. Energeticheskija i ekologicheskija sledstvija iz modeley Zemli s fluidnim metallicheskim yadrom. International scientific journal «Internauka». 2018. No 10(1). P. 15-23. [Electronic resource]. – Access mode: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/mnj_2018_10\(1\)_5](http://nbuv.gov.ua/UJRN/mnj_2018_10(1)_5) (date of application: 11.06.2024).
14. Fredrik Terfelt and Birger Schmitz. Asteroid break-ups and meteorite delivery to Earth the past 500 million years. PNAS. June 15. 2021. 118 (24) e2020977118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2020977118>.
15. Gregory A. Brennecka et al. Astronomical context of Solar System formation from molybdenum isotopes in meteorite inclusions. Science. 2020. Vol. 370. Issue 6518. Pp. 837–840. <https://doi.org/10.1126/science.aaz8482>.
16. Pallab Ghosh. New Horizons spacecraft 'alters theory of planet formation' (13 February 2020). [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.bbc.com/news/science-environment-51295365>. (date of application: 11.06.2024).
17. Hiroshi Naraoka et al. Soluble organic molecules in samples of the carbonaceous asteroid (162173) Ryugu. Science. 2023. Vol. 379. Issue 6634. <https://doi.org/10.1126/science.abn9033>.
18. Nakano H., Hirakawa N., Matsubara Y. et al. Precometary organic matter: A hidden reservoir of water inside the snow line. Sci Rep 10, 7755 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64815-6>.
19. Hain V. E. Ob osnovnih principah postroenija podlinno globalnoj modeli dinamiki Zemli. Geologija i geophisika. 2010. Vol. 51. No 6. P. 753–760.
20. Cottaar S., Lekic V. Morphology of seismically slow lower-mantle structures. Geophysical Journal International. 2016. Vol. 207. Issue 2. Pp. 1122–1136. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw324>.
21. Hamed Gamal El Dien, Luc S. Doucet, Zheng-Xiang Li. Global geochemical fingerprinting of plume intensity suggests coupling with the supercontinent cycle. Nature Communications. 10, 5270 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13300-4>.
22. Luc S. Doucet, Zheng-Xiang Li, Richard E. Ernst, Uwe Kirscher, Hamed Gamal El Dien, Ross N. Mitchell. Coupled supercontinent–mantle plume events evidenced by oceanic plume record. Geology. 2019. <https://doi.org/10.1130/G46754.1>.
23. Maruyama; Santosh; Zhao. Superplume, supercontinent, i post-perovskite: Mantle dynamis and anti-plate tectonics на Core-Mantle Boundary. Gondwana Research. 2007. Vol. 11. No. 1-2. Pp. 7–37. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2006.06.003>.
24. Qian Yuan, Michael Gurnis, Paul D. Asimow, Yida Li. A Giant Impact Origin for the First Subduction on Earth. Geophysical Research Letters. 2024. Vol. 51. Issue 9. e2023GL106723. <https://doi.org/10.1029/2023GL106723>.
25. Dobretsov N. L. Geologicheskije sledstvija termohimicheskoy modeli plumov. Geologija i geophisika. 2008. Vol. 49. No 7. P. 587–604.
26. Dobretsov N. L. Globalnaja geodinamicheskaja evolutsija Zemli i globalnije gedinamicheskije modeli. Geologija i geophisika. 2010. Vol. 51. No 6. P. 761–784.
27. Formation of Earth's Core / D. C. Rubie, F. Nimmo, H. J. Melosh (2007). [Electronic resource]. – Access mode: https://web.archive.org/web/20131012015248/http://es.ucsc.edu/~f_nimmo/website/treatise3.pdf (date of application: 05.06.2024).
28. Peter L. Olson, Zachary D. Sharp. Primordial Helium-3 Exchange Between Earth's Core and Mantle. Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2022. Vol. 23. Issue 3. e2021GC009985. <https://doi.org/10.1029/2021GC009985>.
29. Jurong Zhang, Jian Lv, Hefei Li, Xiaolei Feng, Cheng Lu, Simon A. T. Redfern, Hanyu Liu, Changfeng Chen, and Yanming Ma. Rare Helium-Bearing Compound FeO₂He Stabilized at Deep-Earth Conditions. Phys. Rev. Lett. 2018. 121, 255703. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.255703>.
30. Gilat A., Vol A. Degassing of primordial hydrogen and helium as the major energy source for internal terrestrial processes. Geoscience Frontiers. 2012. Vol. 3. Issue 6. Pp. 911–921. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2012.03.009>.
31. Gintov O. B. Temporal sequence of geodynamic development processes in the territory of Ukraine from the Eoarchean to Anthropogen. Geophysical Journal. Vol. 39 No. 1 (2017). Pp. 17–40. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i1.2017.94009>.
32. Wu X., Collilieux X., Altamimi Z., Vermeersen B. L. A., Gross R. S., Fukumori I. Accuracy of the International Terrestrial Reference Frame origin and Earth expansion. Geophysical Research Letters. 2011. Vol. 38. Issue 13. <https://doi.org/10.1029/2011GL047450>.
33. Tagawa S., Sakamoto N., Hirose K. et al. Experimental evidence for hydrogen incorporation into Earth's core. Nature Communications. 12, 2588 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22035-0>.
34. Bajgain S. K., Mookherjee M., Dasgupta R. Earth's core could be the largest terrestrial carbon reservoir. Commun Earth Environ 2, 165 (2021). <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00222-7>.
35. Jin Liu et. al. Iron-rich Fe–O compounds at Earth's core pressures. The Innovation. 2022. Vol. 4, Issue 1. 100354. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2022.100354>.

36. Shestopalov V. M. On geological hydrogen. *Geophysical Journal*. Vol. 42 No. 6 (2020). Pp. 3-35. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i6.2020.222278>.
37. Anzellini S., Dewaele A., Mezouar M., Loubeyre P., Morard G. Melting of Iron at Earth's Inner Core Boundary Based on Fast X-ray Diffraction. *Science*. AAAS, 2013. Vol. 340. Issue 6131. Pp. 464–466. <https://doi.org/10.1126/science.1233514>.
38. Plum mantiyniy. *Goelogichniy slovník*. [Electronic resource]. – Access mode: <https://geodictionary.com.ua/node/4585>. (date of application: 11.06.2024).
39. Lukin A. E. Sistema «superplum – glubokozalegajushie segmenti neftegazonosnih basseynov» – neischerpaemiy istochnik uglevodorodov. *Goelogichniy zhurnal*. 2015. No. 2. P. 7–20. [Electronic resource]. – Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/geojur_2015_2_3. (date of application: 11.06.2024).
40. Tsvetkova T. A., Bugaenko I. V., Zaets L. N. Seysmicheskaja vizualizatsija plumov i sverhglubinnih fluidov v mantii pod territoriej Ukraini. *Geofiziceskij zhurnal*. 2017. No. 4. Vol. 39. P. 42–54. <https://dx.doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i4.2017.107506>.
41. Ponomarenko, O., Gintov, O., & Stepanyuk, L. (2018). On the so-called “leukogranulite formation” and “greenlevada suite” of Early Precambrian of the Ukrainian Shield. *Geofiziceskij zhurnal*, 40(5), 47–70. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i5.2018.147474>.
42. Tschauner O. et. al. Ice-VII inclusions in diamonds: Evidence for aqueous fluid in Earth's deep mantle. *Science*. 2018. Vol. 359. Issue 6380. Pp. 1136–1139. <https://doi.org/10.1126/science.aao3030>.
43. Kudrya S. O., Jatsenko L. V., Shinkarenko L. Ja., Tkalenko M. D. Elektrolitichne virobnistvo vodnu dlj vitrovodnevihi stancij. *Vidnovlyuvana energetika*. 2023. No. 3. P. 92–100. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3\(74\)92-100](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3(74)92-100).
44. Lukin A. E., Kryzhanivskiy Ye. I., Heyets V. M. On the prospects for increasing oil and gas production in Ukraine. *Visn. Nac. Acad. Nauk Ukr.* 2019. No 1. <https://doi.org/10.15407/visn2019.01.038>.
45. Larin Nicolay. Constitution of Earth and Hydrogen Energy. *Journal of Environmental Earth and Energy Study (JEEES)*. No. 3 (2021). Pp. 43–61. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5547009>.
46. Syvorotkin Vladimir. Hydrogen Degassing and Environmental Problems. *Journal of Environmental Earth and Energy Study (JEEES)*. No. 4 (2021). P. 75–90. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5547023>.
47. Romanova Ks. Velicheznij zapas energii u nas pid nogami. U Francii znayshli najbilshi pokladi vodnu (04.12.2023). [Electronic resource]. – Access mode: <https://focus.ua/uk/technologies/610479-velicheznij-zapas-energiji-u-nas-pid-nogami-u-franciji-znayshli-naybilshi-zalezhi-vodnyu>. (date of application: 11.06.2024).
48. Taub B. World's Largest Deposit of Natural Hydrogen Gas Discovered In Albanian Mine (03.2024). [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.iflscience.com/worlds-largest-deposit-of-natural-hydrogen-gas-discovered-in-albanian-mine-73210>. (date of application: 11.06.2024).
49. Loz Blain. Trillions of tons of buried hydrogen: Clean energy gold rush begins (21.02.2024). [Electronic resource]. – Access mode: <https://newatlas.com/energy/geologic-hydrogen-gold-rush/>. (date of application: 05.06.2024).
50. Victoria Gill. The return of the ozone crisis: Why Earth's atmospheric hole poses a huge threat (again) (30.05.2024). [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.sciencefocus.com/nature/ozone-layer-environment>. (date of application: 11.06.2024).
51. Koskinen P. E. P., Beck S. R., Orlygsson J., Puhakka J. A. (November 2008). «Ethanol and hydrogen production by two thermophilic, anaerobic bacteria isolated from Icelandic geothermal areas». *Biotechnology and Bioengineering*. 101 (4): 679–90. <https://doi.org/10.1002/bit.21942>.
52. Chris Greening. Soil Bacteria Discovery Could Allow Us to Produce Electricity From 'Thin Air' (09.03.2023). [Електронний ресурс]. – Access mode: <https://www.sciencealert.com/soil-bacteria-discovery-could-allow-us-to-produce-electricity-from-thin-air>. (date of application: 11.06.2024).