

<https://doi.org/10.15407/gpimo2021.04.021>

С.В. Гошовський, д-р техн. наук, гол. наук. співроб.

E-mail: oceanjournal@ukr.net

ORCID 0000-0002-8312-6244

ДУ «Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України»

м. Київ, пр. Академіка Глушкова, 42,

О.В. Зур'ян, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.

E-mail: alexey_zuryan@ukr.net

ORCID 0000-0002-2391-1611

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,

м. Київ, вул. Гната Хоткевича 20-а

ВНЕСОК ГІДРОТЕРМАЛЬНИХ «КУРЦІВ», ГРЯЗЬОВИХ ВУЛКАНІВ ТА ГАЗОВИХ СИПІВ У ПАРНИКОВИЙ ЕФЕКТ ЗЕМЛІ

Розглядається проблема зростання концентрації у атмосфері одного з небезпечних парникових газів — метану, основного компонента природного газу. Зараз у багатьох країнах, особливо розвинених, спостерігається тенденція жорсткішого ставлення до викидів парникових газів і зростання інтересу до низьковуглецевих технологій, зокрема, при впровадженні принципів сталого розвитку, підвищення енергоефективності та розроблення технологій, які забезпечують зменшення викидів парникових газів в атмосферу Землі. Наведено основні природні та антропогенні джерела емісії метану. Виконано аналіз антропогенних та природних викидів метану, проведено оцінку співвідношення різних джерел викидів. Зосереджено увагу на загальну емісію метану в атмосферу і зростання концентрації метану в останні роки. Науково обґрунтовано, що одним із джерел дегазації Землі є просочування метану з морського дна Світового океану на водну поверхню. Встановлено основні джерела емісії метану з морського дна, до яких відносяться: грязьові вулкани; макро- та мікропросочування (сипи), геотермальні підводні джерела та магматичні вулкани (курці). Узагальнено та проаналізовано дані літературних джерел, що стосуються різних підходів, які використовуються для вивчення формування потоків метану та оцінки його глобальної емісії геологічними джерелами. Встановлено співвідношення емісії CH_4 наземними та морськими геологічними джерелами. Обґрунтовано фактори, що впливають на емісію. Пропонуються можливі шляхи зниження емісії геологічного походження в атмосферу. Зроблено висновок щодо перспективи подальших досліджень стосовно розробки методичних та технічних засобів збору, транспортування та зберігання газу метану з морських нетрадиційних покладів вуглеводнів.

Ключові слова: парникові гази, метан, емісія метану, низьковуглецеві технології, дегазація Землі.

Цитування: Гошовський С.В., Зур'ян О.В. Внесок гідротермальних «курців», грязьових вулканів та газових сипів в парниковий ефект Землі. *Геологія і корисні копалини Світового океану*. 2021. 17, № 4: 21—31. <https://doi.org/10.15407/gpimo2021.04.021>

Вступ

Світ живе в умовах клімату, що інтенсивно змінюється. Одним із факторів такої зміни є зростання вмісту в атмосфері парникових газів. Метан (CH_4) — це вуглеводень, що є основним винуватцем «парникового ефекту», оскільки його присутність сприяє утриманню тепла в атмосфері і у такий спосіб впливає на температуру та клімат Землі. Метан стоїть на другому місці після двоокису вуглецю (CO_2) у ряді парникових газів, що виділяються в результаті господарської діяльності людини. Він у 23 рази ефективніше утримує тепло в атмосфері Землі, ніж CO_2 . Метан — відносно недовговічний газ, його присутність у атмосфері становить приблизно 12 років і скорочення його викидів ефективно вплинуло б на запобігання глобальному потеплінню в найближчі роки (наступні 25 років). Природно виникає необхідність управління хімічними і фізичними процесами, пов'язаними з утворенням метану.

При потраплянні молекул метану в атмосферу, вони залучаються до процесів перенесення та вступають у хімічні реакції, які досить добре вивчені як якісно, так і кількісно. Управління процесами зменшення CH_4 безпосередньо в атмосфері у глобальному масштабі практично виключено [2]. До цього часу спрямований вплив на атмосферний склад вдавалося здійснювати лише шляхом зміни інтенсивності дії антропогенних джерел. Тому дуже важливо навчитись знижувати природне і антропогенне джерело утворення метану і вміти оцінювати їх потужність з достатньою мірою достовірності. Дослідження показують, що природні фактори впливають на клімат набагато більше, ніж антропогенні. Але з економічних та політичних причин природні фактори кліматичних змін та фактори, що компенсують природним шляхом антропогенний вплив на клімат, практично не розглядалися. Метою даної роботи є аналіз та узагальнення даних літературних джерел, що стосуються різноманітних підходів, які використовуються для вивчення формування потоків метану та оцінки його глобальної емісії різними геологічними джерелами загалом та з підводних джерел зокрема.

На сьогодні як зарубіжними, так і вітчизняними вченими опубліковано велику кількість робіт, присвячених дослідженню викидів CH_4 різними геологічними джерелами [22]. Публікацій, що стосуються проблематики оцінки викидів метану сукупністю всіх аквальних джерел значно менше, при цьому вони, як правило, характеризуються вузькою спрямованістю, а узагальнюючих робіт, заснованих на сучасних оцінках його сумарної емісії, дуже мало.

Виклад основного матеріалу

Головна мета Паризької угоди полягає у застосуванні глобальних заходів щодо боротьби зі зміною клімату — стримати підвищення глобальної температури в цьому столітті в межах $+2^\circ\text{C}$ по відношенню до доіндустріального рівня та спробувати знизити даний показник до $+1,5^\circ\text{C}$. Для цього країни-учасниці визначають свою частку у досягненні задекларованої спільної мети в індивідуальному порядку та переглядають їх раз на п'ять років. Зараз у багатьох країнах, особливо розвинених, спостерігається тенденція жорсткішого ставлення до викидів парникових газів і зростання інтересу до низьковуглецевих технологій, особливо при впровадженні принципів сталого розвитку та підвищення енергоефек-

тивності. Цей процес, безперечно, позначиться на формуванні нових міжнародних ініціатив і програм [12].

Серед низки парникових газів, що впливають на зміну клімату, вклад метану не є домінуючим. Основним чинником, звісно, є зростання концентрації вуглекислого газу. Однак і проблема росту кількості метану в атмосфері вже значною мірою усвідомлюється світовою спільнотою. Так, у 2012 р. було оголошено про нову глобальну ініціативу щодо боротьби зі зміною клімату, покращення якості повітря та захисту здоров'я населення — формування «Коаліції за клімат та чисте повітря» (Climate and Clean Air Coalition). Діяльність цієї організації спрямована на зниження вмісту в атмосфері так званих «швидкодіючих факторів зміни клімату». Так називають речовини з невеликим терміном дії в атмосфері — близько 10 років та менше. Насамперед, це метан, а також чорний вуглець і багато гідрофторвуглеців, які разом відповідальні за приблизно третину сучасного глобального потепління.

У даний час глобальні концентрації метану в поверхневому шарі Землі досягли 1800 ppb (млрд⁻¹) і більше [9]. Основними антропогенними джерелами метану є: домашні тварини, рисові поля, відходи, стічні води, вугільна промисловість, горіння біомаси та палива, видобуток, переробка, транспортування, зберігання і розподіл природного газу та нафти та ін. Основними природними джерелами метану є: заболочені території, поверхневі водні об'єкти (в т. ч. озера та річки), пожежі, жуйні тварини, комахи, моря та океани [1]. Отже, метан є важливим представником органічних речовин у атмосфері. Виявили його в атмосфері порівняно недавно — у 1947 р. Концентрація його в атмосфері невелика і з 1999 р. стабілізувалася на рівні 1,75 ppm (млн⁻¹). Для порівняння — концентрація CO₂ в атмосфері становить 400 ppm.

В атмосфері метан перебуває, в основному, у приземному шарі, в тропосфері, товщина якого становить 11—15 км. Концентрація метану практично не залежить від висоти, оскільки в межах 0—12 км велика швидкість перемішування (1 місяць) у порівнянні з часом наявності метану в атмосфері [1]. Концентрація метану в атмосфері, визначена шляхом вивчення крижаного покриву на станції «Схід» в Антарктиді, засвідчила, що за останні 150000 років загальний вміст CH₄ в атмосфері становить близько 5 млрд т. Щорічне збільшення газу в атмосфері оцінюються в 592—785 млн т і, практично, дорівнює викидам — 542—852 млн т. Аналіз утворення метану в природі показує, що основним джерелом є болота (21 %), наступне — рисові поля (20 %), які насправді є такими ж болотами, лише рукотворними. Якщо це джерело метану ліквідувати, з'являються загрози продовольчій безпеки. Така ж проблема пов'язана з викидами від жуйних тварин (корів) — 15 % від загальної емісії метану [1].

У таблиці 1 наведено дані оціночних доповідей Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (*Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*) про загальний викид метану від природних та антропогенних джерел.

З таблиці видно, що водні ресурси займають лідируючу позицію з природних викидів метану в доквіллі. При цьому важливо відзначити, що роль метану в кліматичній системі необхідно розглядати разом з іншими природними та антропогенними процесами намагаючись об'єктивно оцінити внесок кожного елемента системи.

Зазвичай джерела виділення CH₄ диференціюють [14] за розташуванням (підводним або наземним), розміром і приуроченістю до двох геологічно різних регіонів — геотермальних областей або вуглеводневмісних осадових басейнів.

Таблиця 1. Джерела викидів метану в атмосферу, млн т/рік [9]

Природні викиди		Антропогенні викиди	
Джерела	млн т/рік	Джерела	млн т/рік
Болота	217	Жуйні тварини	89
Океан	54	Відходи	75
Озера та річки	40	Нафтогазова галузь	50
Дикі тварини	15	Рисові поля	36
Терміти	11	Спалення біомаси	35
Гідрати	6	Інше	46
Пожежі	3		
Вічна мерзлота	1		
Разом, млн т/рік	347	Разом, млн т/рік	311
Разом, %	57,9	Разом, %	45,1

Для геотермальних областей характерні безпосередні виділення CH_4 від магматичних вулканів, геотермальних виходів (отворів, жерл) та при дегазації ґрунтів. Для осадових нафтогазоносних або вуглеводневмісних басейнів характерні виділення CH_4 від грязьових вулканів, а також шляхом просочування від місць скупчення вуглеводнів у земній корі через шари гірських порід. Слід зазначити, що не весь мігруючий із земної кори CH_4 досягає атмосфери, іноді він повністю поглинається середовищем, через яке проходить. Так, у разі підводних джерел, його емісія знижується за рахунок окислення та поглинання (розчинення, сорбції) CH_4 у шарах відкладів, що залягають вище та водної товщі океану, а у разі наземних джерел, метан перехоплюється поверхневим ґрунтовим шаром, який може містити як метаногенні археї, так та метанотрофні бактерії [5].

Грязьові вулкани є геологічними структурами, що являють собою заглиблення на поверхні землі (сальзи), або конусоподібні піднесення з кратером (гязьова сопка), з якого постійно або періодично на поверхню вивергаються грязьові маси і гази, що часто супроводжуються водою і нафтою. Грязьові вулкани, як правило, зустрічаються в осадових басейнах і зазвичай пов'язані з родовищами газу і нафти. Тому значна частина газу, що виділяється з грязьових вулканів, представлена метаном, частка інших вуглеводнів і діоксиду вуглецю незначна [10]. Глобальна вибірка понад 140 наземних грязьових вулканів, що була проведена у 12 країнах [20], показала, що у середньому CH_4 становить 90 % від газів, що виділяються грязьовими вулканами.

На відміну від високотемпературних магматичних вулканів, грязевулканічні викиди характеризуються відносно низькою температурою. Замість рідкої магми глибоко всередині земної кори утворюється напіврідкий грязьовий осад. Ця грязьова маса потім пропускається через вузькі довгі отвори або тріщини, утворюючи на поверхні грязьовулканічний конус, а в деяких випадках — грязьові на шарування («гязьовий пиріг»). Формування грязьових вулканів може бути пов'язане з глибинним тиском, наприклад зі структурним або тектонічним стисненням земної кори.

Приблизно 1100 грязьових вулканів зафіксовано на суші та на мілководді континентальних шельфів [13]. Десь від 1000 до 100000 грязьових вулканів може

існувати нижче поверхні океану на континентальних схилах та абісальних рівнинах [33]. Вулкани, як правило, групуються у пояси, пов'язані з активними крайовими областями літосферних плит. Великі наземні та морські грязьовулканічні пояси також проходять вздовж східної та західної сторони Тихого океану та вздовж Карибського узбережжя Центральної та Південної Америки [6].

Оцінки щорічної емісії CH_4 окремими грязьовими вулканами варіюють у широкому діапазоні [14]. З грязьових вулканів при спокійному стані виділяється зазвичай невелика кількість газу — від кількох кубічних метрів до десятків кубометрів на добу. Таким чином, одиночні отвори або кратери малих грязьових вулканів (від 1 до 5 м заввишки) щороку можуть виділяти близько десятків тонн CH_4 . Один великий грязьовий вулкан, що складається з десятків або навіть сотень отворів (жерл), може виділяти сотні тонн CH_4 на рік. При виверженні грязьових вулканів за кілька годин може виділятися тисяча тонн CH_4 .

Емісія метану грязьовими вулканами походить не тільки з видимих кратерів та отворів; значні обсяги газу виділяються також внаслідок дифузної дегазації через ґрунти (так зване, мікрovidілення). Кількість газу, що виділяється в атмосферу таким чином, розраховується за площею грязьових вулканів, і часто становить більшу частку ніж безпосередньо на виході з кратерів і отворів [17]. Середньорічний потік метану для територій грязьових вулканів, включаючи мікропросочування та виходи з отворів (але без епізодичних вивержень), коливається від 100 до 1000 т на km^2 [14].

Протягом останніх десятиліть оцінка величини світової емісії метану грязьовими вулканами була дискусійна. За оцінкою [35], що не враховує розчинення та окислення CH_4 в товщі води, величина емісії наземними та мілководними шельфовими грязьовими вулканами знаходиться в діапазоні від 10,2 до 12,6 Тг/рік. За оцінкою [32] — 33 Тг/рік, зокрема 15,9 Тг/рік виділяється протягом періодів спокою і 17,1 Тг/рік під час вивержень грязьових вулканів. Із загального обсягу емісії CH_4 , що становить 33 Тг/рік, 6 Тг/рік безпосередньо надходить в атмосферу з наземних і мілководних шельфових грязьових вулканів, а 27 Тг/рік, що залишилися, виділяються в товщу води глибоководними грязьовими вулканами. За досить детальною оцінкою [24], заснованою на експериментальних вимірах потоків CH_4 , яка враховує вплив різних факторів, глобальна емісія в атмосферу наземними та мілководними грязьовими вулканами становить від 6 до 9 Тг/рік.

Макропросочування (макросипи) в нафтогазоносних та вуглеводневих осадових басейнах відносяться до великих джерел емісії газів, відмінних від грязьових вулканів. Серед макросипів виділяють водні та сухі сипи. Їх зазвичай пов'язують з міграцією вгору газових бульбашок у зонах розломів та тріщинуватих порід. Тому, макросипи набагато частіше зустрічаються в регіонах з розривними дислокаціями, що сприяють міграції газу з підземних резервуарів на поверхню, і фіксуються, зокрема, за метановими аномаліями в приземній атмосфері, що в кілька разів і навіть на порядки перевищують фонові концентрації метану в атмосфері Землі.

В водному середовищі CH_4 також може частково або повністю розчинитись та окислитись, не досягнувши її поверхні. Ступінь розчинення газу у воді залежить, головним чином, від глибини та температури води, а для бульбашкового перенесення також і від розміру бульбашок газу, що піднімаються до поверхні [22].

Розмір бульбашок, що досягають поверхні водного об'єкта, є результатом балансу між темпами розчинення бульбашок, припливом кисню до стінок бульбашок з навколишньої водної товщі та збільшенням розміру бульбашок через зменшення гідростатичного тиску внаслідок їх підняття. Кількість метану, що надходить в атмосферу від підводних джерел, може бути оцінено як функція глибини до дна, розміру бульбашок, концентрації розчиненого CH_4 навколо бульбашкового потоку, температури води та перемішування вод [7].

Вважається, що в мілководних басейнах виходи бульбашок газу CH_4 , розташованих на глибинах менше 20 м, досягають атмосфери. Для більш глибоководних зон (близько 50 м), щонайменше 50 % газових бульбашок радіусом понад 5 мм досягають атмосфери. Підводні бульбашкові виходи газу, розташовані на глибинах понад 100—300 метрів, є значним джерелом емісії CH_4 в атмосферу [21].

Такі підводні структури, як покмарки (оспини), газові сипи та газогідратні відкладення досить добре відомі. Покмарки, що є конусоподібними заглибленнями на дні морів та океанів, через які відбувається виділення газу та води, приурочені до глини, мулу та пісків, і розташовані на глибинах до 1 км. Типові покмарки варіюють у діаметрі від менше 1 до 500 м і заглиблені нижче морського дна на 20—30 метрів. Гігантські покмарки діаметром від 100 м і більше зареєстровані у затоці Белфаст (штат Мен, США) та Баренцевому морі (Норвегія). Інші райони поширення покмарків і сипів були знайдені на східному канадському континентальному шельфі, у Чорному, Адріатичному, Балтійському, Охотському та Японському морях, Північному Льодовитому океані, Онезькому озері та ін.

В результаті дослідження трьох морських сипів різних розмірів, виявлених на прибережній вугільно-нафтовій ділянці в протоці Санта-Барбара (Каліфорнія) [29], показано, що у основі струменевого потоку, що виділяється, бульбашки містили близько 90% метану, в той час як на поверхні — 60 %. В результаті моделювання бульбашкового перенесення газу встановлено [31], що тільки бульбашки певного середнього розміру, а саме 4—5 мм, можуть досягти поверхні; дрібніші бульбашки швидко розчиняються, великі бульбашки розбиваються на дрібні, після чого також розчиняються.

Для отримання глобальних оцінок емісії CH_4 у водну товщу Світового океану та атмосферу від підводних газовиділень використані різні підходи. Зокрема, у роботі [25] розрахунки були засновані на узагальненні власних експериментальних досліджень, проведених у різних географічних та океанографічних умовах, у той час як у роботі [26] оцінка викидів CH_4 в атмосферу підводними сипами дана на основі узагальнення раніше опублікованих оцінок, а не нових розрахунків. У роботі [29] для оцінки масштабів підводних морських газовиділень CH_4 у водну товщу та атмосферу були застосовані два підходи: 1) аналіз та узагальнення опублікованих оцінок та 2) оцінка, заснована на розрахунках потенційної можливості підводного виділення CH_4 усіма геологічними джерелами та ймовірному періоді «напіврозпаду» геологічного резервуару метану.

На основі перерахованих вище узагальнень була проведена орієнтовна екстраполяція глобальних викидів CH_4 підводними сипами. Згідно з даними підводні сипи виділяють CH_4 у водну товщу від 8 до 65 Тг/рік і від 10 до 30 Тг/рік надходить в атмосферу. Нині середня величина емісії CH_4 у повітря підводними сипами — 20 Тг/рік є загальноприйнятою [14, 20, 26].

Підводні макровиділення газу з локальних розломів, у зонах активної геотермальної вулканічної активності, а також у таких районах підводної активності як серединно-океанічні хребти широко поширені у всьому світі. За даними [12], загальна інтенсивність наземних вивержень щорічно становить $3 \cdot 10^{15}$ — $3 \cdot 10^{17}$ г, при цьому від 1 до 3 % посідає на газові виділення, у тому числі близько 75—80 % становлять пари води, 6—15 % CO_2 та 3—4 % CH_4 .

Підводний вулканізм за обсягом набагато перевершує континентальний і протікає з більшою інтенсивністю. Основна маса підводних газових еманцій розчиняється в морській воді, перерозподіляється дрейфовими та щільними течіями та витрачається в процесі життєдіяльності гідробіонтів. Однак деяка частина CH_4 , внаслідок своєї інертності та легкості, не затримується у морській воді та швидко видаляється в атмосферу.

Навіть коли макровиходи газу знаходяться відносно близько один до одного, співвідношення газів у їх викидах можуть змінюватися в широких межах, тому для обґрунтованих оцінок емісії CH_4 потрібен хімічний аналіз складу газів, що викидаються. Наприклад, як показано в роботі [28], в Єллоустоунському національному парку в газових викидах переважає вуглекислий газ, а в Гранд-Тітон національному парку головною складовою частиною газових виділень є CH_4 , незважаючи на те, що обидва національні парки розташовані в штаті Вайомінг США. Вищі концентрації CH_4 , зазвичай, спостерігаються над розломами в геотермальних регіонах.

Перші оцінки обсягів викидів CH_4 магматичними вулканами, згідно з якими його глобальна емісія становить від 0,8 до 6,2 Тг/рік (в середньому близько 4 Тг/рік), були дані виходячи з відомих обсягів викидів сірки вулканами та співвідношення вмісту у вулканічних газах сірки та метану [30].

Простий розрахунок, заснований на середній величині співвідношення концентрацій CO_2 до CH_4 у вулканічних газах, за глобального обсягу емісії CO_2 вулканами 300 Тг/рік, показує, що глобальна емісія CH_4 вулканами становить менше 1 Тг/рік. Це свідчить про те, що магматичні вулкани є важливим джерелом його емісії [14], проте спорадично окремі вулкани можуть виробляти глобально значущі викиди метану.

Регіональна оцінка емісії метану геотермальними джерелами Європи та, насамперед, Італії, Греції та Ісландії, показала, що геотермальні системи, часто незалежно діючі від вулканів, набагато значніші, ніж вулкани, а саме близько 0.1 Тг CH_4 /рік [16]. Дані концентрацій CH_4 у морських та океанічних басейнах поблизу виходу гідротерм і безпосередньо у гідротермальних флюїдах, а також у районах з підводними вулканічними проявами, показують, що концентрація CH_4 у таких зонах може бути досить високою.

Іншими незначними геологічними джерелами емісії CH_4 є дегазація (природна та/або під впливом гірських робіт) з вуглевмісних порід, кристалічного фундаменту та мантії. Певна частина CH_4 на континентах постійно просочується по тріщинам і розломам, що виникають під час землетрусів. Однак жодних глобальних оцінок емісії CH_4 в атмосферу від цих джерел на сьогодні ще не запропоновано [7].

Згідно з найбільш повною оцінкою, наведеною в роботі [17], глобальна емісія CH_4 наземними та морськими геологічними джерелами становить від 40 до 60 Тг/рік, з розбивкою на емісію CH_4 : грязьовими вулканами — від 6 до

9 Тг/рік, мікропросочуваннями, зумовленими дифузною емісією, — від 10 до 25 Тг/рік, геотермальними джерелами — від 2,5 до 6,3 Тг/рік, підводними сипами — приблизно 20 Тг/рік та магматичними вулканами — менше ніж 1 Тг/рік. Ці оцінки [19] у роботі [14] представлені як найімовірніші для емісії метану геологічними джерелами.

Найбільша невизначеність є в оцінці підводної емісії CH_4 у глибоководних районах. Загальна емісія CH_4 підводними геологічними джерелами оцінюється в 20 Тг/рік [18]. За іншими підрахунками [27] глобальна емісія CH_4 підводними геологічними джерелами становить від 16 до 40 Тг/год, у тому числі від 6,6 до 19,5 Тг CH_4 /рік сягає атмосфери. У роботі [28] сумарна емісія CH_4 в атмосферу підводними геологічними джерелами оцінена в 45 Тг/рік, з яких 25 Тг/рік виділяється макросипами, 7 Тг/рік — мікросипами, 5 Тг/рік — грязьовими вулканами та 8 Тг/рік — іншими джерелами, зокрема магматичними вулканами.

З урахуванням зазначеної невизначеності щодо підводних викидів CH_4 діапазон сучасної емісії метану морськими і наземними геологічними джерелами може бути розширений до 32—74 Тг/рік [1].

На відміну від більшості інших природних джерел, виділення CH_4 з геологічних відкладень безпосередньо не залежить від змін клімату та інших природних факторів, які піддаються зміні протягом коротких періодів часу — від десятиліть до століть.

Вважається [1], що єдиним фактором, який впливав на емісію CH_4 геологічними джерелами протягом останнього сторіччя, було збільшення видобутку нафти та газу. На думку [15], масштабний видобуток природного газу та нафти протягом останніх одного—двох століть помітно скоротив емісію CH_4 , пов'язану з просочуваннями від нафтогазових резервуарів, у тому числі через геологічні розломи та тріщини, внаслідок зниження підземного тиску, що видавлює гази до поверхні.

Значні варіації величин викидів CH_4 геологічними джерелами за більш тривалі періоди (близько тисячоліть) можуть бути зумовлені розривними порушеннями та сипами. Зокрема, [3, 4] вважають, що викиди CH_4 геологічними джерелами збільшуються в періоди підвищеної сейсмічної активності.

Враховуючи, що з доіндустріальних часів до теперішнього часу рівень Світового океану виріс майже на 20 см, а до кінця століття збільшиться за прогнозами [34] ще як мінімум на стільки ж, а можливо і більше (до п'яти разів), очікується зниження в найближче століття виділення геологічного CH_4 в атмосферу, оскільки розташовані у прибережних районах геологічні джерела CH_4 будуть розчинятись в воді.

Висновки

1. Метан є одним із чинників «парникового ефекту», оскільки його присутність сприяє утриманню тепла в атмосфері і таким чином впливає на температуру та клімат Землі.

2. Водні ресурси займають лідируючу позицію щодо природних викидів метану в довкіллі.

3. Велика частина метану, що виділяється з підводних джерел, мікробіологічно окислюється у верхніх горизонтах донних осадів і водної товщі, які являють собою бар'єр для CH_4 , що просочується з надр.

4. Сумарна емісія CH_4 в атмосферу підводними геологічними джерелами оцінена в 45 Тг/рік, з яких 25 Тг/рік виділяється макросипами, 7 Тг/рік — мікросипами, 5 Тг/рік — грязьовими вулканами та 8 Тг/рік — іншими джерелами, у тому числі магматичними вулканами.

5. Більшість із наявних оцінок сучасної емісії CH_4 наземними та підводними геологічними джерелами варіюють у діапазоні від 40 до 60 Тг/рік, внесок геологічних джерел у глобальну емісію метану становить у середньому близько 10 %, тобто, після водно-болотних угідь, геологічні джерела є другим за величиною природним джерелом метану.

6. Основним фактором, що впливав на емісію CH_4 геологічними джерелами протягом останнього сторіччя, є збільшення видобутку нафти та газу.

7. Мають перспективу подальші дослідження щодо розробки методичних та технічних засобів збору, транспортування та зберігання газу метану з морських нетрадиційних покладів вуглеводнів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бажин Н.М. Метан в атмосфері. *Соросовский образовательный журнал*, 2000, 6. № 3. С. 52—57.
2. Бажин Н. М. Метан в окружающей среде. *Аналит. обзор. Сер. Экология*. Сиб. отд. РАН. Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2010. Вып. 93. 56 с.
3. Балакин В.А., Гулиев И.С., Фейзуллаев А.А. Опыт экспериментального изучения углеводородного дыхания стратосферы Южно-Каспийской впадины и обрамляющих горных систем с помощью лазерного анализатора «Искатель-2». *ДАН СССР*. 1981. 260. № 1. С. 154—156.
4. Войтов Г.И. О химической и изотопно-углеродной нестабильностях свободных газов (газовых струй) в Хибидах. *Геохимия*. 1991. № 6. С. 769—780.
5. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А. Глобальная эмиссия метана геологическими источниками. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2019. № 3 (81) С. 37—51. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.81.3.006>.
6. Гошовский С.В., Зурьян А.В. Разработка газа метана из сипов, грязевых вулканов и морских месторождений газогидратов. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана*. 2018. № 3. С. 22—36. <https://doi.org/10.15407/gpimo2018.03.022>
7. Гошовський С.В., Зур'ян О.В. Газогідрати — історія відкриття. До 50-річчя відкриття властивості природних газів утворювати поклади в земній корі у твердому газогідратному стані. *Мін. ресурси України*. 2019. № 1. С. 45—49. <https://doi.org/10.31996/mru.2019.1.45-49>.
8. Киселев А. А., Кароль И. Л. С метаном по жизни. Санкт-Петербург: Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова. 2019. 73 с.
9. Роль метана в изменении климата. Под ред. А.Г. Ишкова. Неправительственный экологический фонд имени В.И. Вернадского. НИИПЭ. 2018. 133 с.
10. Шнюков Е. Ф., Старостенко В. И., Коболев В. П. Газогидратоносность донных отложений Черного моря. *Геофиз. журнал*. 2006. 28. № 6. С. 29—38.
11. Шнюков Е.Ф., Коболев В.П., Гошовский С.В. Дорожная карта освоения черноморских газогидратов метана в Украине. *Геол. і корисні копалин. Світового океану*. 2018. 14, № 3. С. 5—21. <https://doi.org/10.15407/gpimo2018.03.005>.
12. Ясаманов Н. А. Эндогенная активность Земли и глобальное потепление. *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2004. № 5. С. 439—446.
13. Dimitrov L.I. Mud volcanoes — the most important pathway for degassing deeply buried sediments. *Earth — Science Reviews*. 2002. Vol. 59(1—4). P. 49—76.
14. Methane and Nitrous Oxide Emissions from Natural Sources. U.S. Environmental Protection Agency Office of Atmospheric Programs, Washington, DC, USA. 2010. 194 p.

15. Etiope G., Milkov A., Derbyshire E. Did geologic emissions of methane play any role in Quaternary climate change? *Global and Planetary Change*. 2008. **22**. № 1–2. P. 79–88.
16. Etiope G., Martinelli G., Caracausi A., Italiano F. Methane seeps and mud volcanoes in Italy: Gas origin, fractionation and emission to the atmosphere. *Geophysical Research Letters*. 2007. **34**. № 14. L 14303.
17. Etiope G. Mud volcanoes and microseepage: The forgotten geophysical components of atmospheric methane budget. *Annals of Geophysics*. 2005. **48**. № 1. P. 1–7.
18. Etiope G. New directions: GEM — Geologic emissions of methane, the missing source in the atmospheric methane budget. *Atmospheric Environment*. 2004. **38**. № 19. P. 3099–3100.
19. Etiope G., Lassey K.R., Klusman R., Boschi E. Re-appraisal of the fossil methane budget and related emission from geologic sources. *Geophysical Research Letters*. 2008. **35**. P. 1–5.
20. Etiope G., Feyzullayev A., Baciu C. Terrestrial methane seeps and mud volcanoes: A global perspective of gas origin. *Marine Petroleum Geology*. 2009. **26**. № 3. P. 333–344.
21. Goshovskiy S.V., Zurian O.V. Gas hydrate deposits: formation, exploration and development. *Geology and Mineral Resources of World Ocean*. 2017. № 4. P. 65–78. <https://doi.org/10.15407/gpimo2017.04.065>.
22. Goshovskiy S.V., Zurian O.V. Methods and technologies for the extraction of methane gas from aquatic gas hydrate formations. *Mineralny resursy Ukrainy*. 2018. № 4. С. 26–31. <https://doi.org/10.31996/mru.2018.4.26-31>
23. Hein R., Crutzen P.J., Heimann M. An inverse modeling approach to investigate the global atmospheric methane cycle. *Global Biogeochemical Cycles*. 1997. **11**. № 1. P. 43–76.
24. Houweling S., Kaminski T., Dentener F., Lelieveld J., Heimann M. Inverse modeling of methane sources and sinks using the adjoint of a global transport model. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*. 1999. 104(D21). P. 26137–26160.
25. Hovland M., Judd A. G., Burke R.A. The global flux of methane from shallow submarine sediments. *Chemosphere*. 1993. 26(1–4). P. 559–578.
26. Judd A. G. Natural seabed gas seeps as sources of atmospheric methane. *Environmental Geology*. 2004. **46**. № 8. P. 988–996.
27. Judd A.G., Hovland M., Dimitrov L.I., Gil S.G., Jukes V. The geological methane budget at continental margins and its influence on climate change. *Geofluids*. 2002. **2**. № 2. P. 109–126.
28. Kvenvolden K.A., Rogers B.W. Gaia's breath. Global methane exhalations. *Marine and Petroleum Geology*. 2005. **22**. № 4. P. 579–590.
29. Kvenvolden K., Lorenson T.D., Reeburgh W.S. Attention turns to naturally occurring methane seepage. *Eos Trans. AGU*. 2001. Vol. 82(40). P. 457–458.
30. Lacroix A. V. Unaccounted-for sources of fossil and isotopically-enriched methane and their contribution to the emissions inventory: A review and synthesis. *Chemosphere*. 1993. **26**. P. 507–557.
31. MacDonald I.R., Leifer I., Sassen R., Stine P., Mitchell R., Guinasso N. Transfer of hydrocarbons from natural seeps to the water column and atmosphere. *Geofluids*. 2002. **2**. № 2. P. 95–107.
32. Milkov A.V., Sassen R., Apanasovich T.V., Dadashev F.G. Global gas flux from mud volcanoes: A significant source of fossil methane in the atmosphere and the ocean. *Geophysical Research Letters*. 2003. **30**. № 2. P. 1037.
33. Milkov A.V. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates. *Marine Geology*. 2000. Vol. 167(1–2). P. 29–42.
34. Rahmstorf S. A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. *Science*. 2007. **315**. P. 368–370.

Стаття надійшла 23.09.2021.

S.V. Goshovskyi, Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher
State Institution «Scientific Hydrophysical Center of the National Academy of Sciences of Ukraine»
Kyiv, Academician Glushkov Ave., 42, Ukraine

E-mail: oceanjournal@ukr.net

ORCID 0000-0002-8312-6244

O.V. Zurian, PhD, Senior Researcher

Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine

Kyiv, st. Hnat Khotkevich 20-A

E-mail: alexey_zuryan@ukr.net

ORCID 0000-0002-2391-1611

THE CONTRIBUTION OF HYDROTHERMAL «SMOKERS», MUD VOLCANOES AND GAS SEEPS TO THE EARTH'S HEAT EFFECT

The problem of increasing the concentration in the atmosphere of one of the dangerous heat gases - methane, the main component of natural gas. Many countries, especially the developed world, are now experiencing a trend towards tougher heat gas emissions and growing interest in low-carbon technologies, including the introduction of sustainable development, energy efficiency and the development of technologies to reduce heat gas emissions. The main natural and anthropogenic sources of methane emissions are given. The analysis of the ratio of anthropogenic and natural methane emissions was performed, the ratio of different emission sources was estimated. The focus is on total methane emissions in the atmosphere and increasing methane concentrations in recent years. It is scientifically substantiated that one of the sources of degassing of the Earth is the leakage of methane from the seabed of the world's oceans to the water surface. The main sources of methane emissions from the seabed have been identified. These include: mud volcanoes; macro- and micro-impregnations, geothermal underwater springs and igneous volcanoes (smokers). The literature data on various approaches used to study the formation of methane flows and estimate its global emissions by different geological sources are summarized and analyzed. The ratio of CH₄ emissions to terrestrial and marine geological sources has been established. Factors influencing methane emissions from geological sources are substantiated. Possible ways to reduce emissions of geological origin into the atmosphere are suggested. It is concluded that further research on the development of methodological and technical means of collecting, transporting and storing methane from offshore unconventional hydrocarbon deposits is promising.

Keywords: methane, methane emissions, low-carbon technologies, degassing of the Earth.