

<https://doi.org/10.15407/gpimo2023.02.019>

В.Д. Соловйов, канд. геол.-мін. наук, пров. наук. співроб.

e-mail: solvalera@ukr.net

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України
03142, Київ, пр. Палладіна, 32

М.А. Якимчук, д-р фіз.-мат. наук, проф.

e-mail: yakymchuk@gmail.com

Інститут прикладних проблем екології, геофізики і геохімії
02000, Київ, пров. Лабораторний, 1

І.М. Корчагін, д-р фіз.-мат. наук, проф.

e-mail: korchagin.i.n.@gmail.com

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України
03142, Київ, пр. Палладіна, 32

ГАЗОВІ ФАКЕЛИ ТА ПРОЦЕСИ СУЧАСНОЇ ДЕГАЗАЦІЇ В МОРЯХ АРКТИКИ (ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ЧАСТОТНО-РЕЗОНАНСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ)

Розглянуто нові результати застосування модифікованих методів частотно-резонансних (ЧР) технологій (обробка та декодування супутникових знімків і фотографій з вертикальним скануванням розривів) для дослідження джерел і процесів утворення сипів і покмарків у Північному, Норвезькому та Баренцовому морях. Показано, що інтенсивність і динаміка утворення сипів і покмарків значною мірою залежать від надходження газофлюїдів із глибинних джерел через активні процеси дегазациї. Застосування технологій ЧР-зондування дозволило дистанційно визначати просторові закономірності формування зон інтенсивного газовиділення та ймовірні глибини геологічних джерел міграції. Результати дослідження полів сипів і покмарків підтверджують значний, але недостатньо врахований вплив корово-мантіїних газових флюїдів на особливості процесів дегазациї в структурах континентальних окраїн. Ці дані є вагомими аргументами на користь «вулканічної моделі» формування різноманітних структурних елементів в Арктичному регіоні. Матеріали ЧР-досліджень показали можливість використання сипів і покмарків у зонах активної міграції газів як індикаторів мілководних і більш глибоких родовищ вуглеводнів. Дані ЧР-зондувань можуть бути використані для створення моделей глибинної будови та можливих механізмів утворення абіогенних вуглеводнів у окраїнних структурах Арктики. Ми припускаємо, що вуглеводні через глибинні канали (з глибини 57 км) мігрують у верхні горизонти земної кори, де можуть утворювати родовища. Під час цієї міграції на дні моря фіксуються газові сипи і покмарки, з частковою міграцією газу в атмосферу. Дослідження сучасних центрів дегазациї в полярних регіонах підтвердили наявність зон активної міграції газів в атмосферу, що є важливим чинником впливу на динаміку глобальних процесів

Цитування: Соловйов В.Д., Якимчук М.А., Корчагін І.М. Газові факели та процеси сучасної дегазациї в морях Арктики (за результатами частотно-резонансних досліджень). *Геологія і корисні копалини Світового океану*. 2023. 19, № 2: 19–34. <https://doi.org/10.15407/gpimo2023.02.019>

зміни клімату на Землі. Досвід використання ЧР-технологій у галузі дослідження метанових сипів і покмарків, виявлених у структурах полярних морів Арктики, показав їх універсальність і можливість використання при дослідженні процесів дегазації у структурах різних регіонів.

Ключові слова: дистанційні методи, мобільні технології, сипи, покмарки, Північне море, Баренцове море, Шпіцберген, Арктика.

Вступ

Нові технології інтерпретації даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) суттєво доповнюють результати комплексних геолого-геофізичних досліджень на різних етапах проведення пошуків та розвідки родовищ багатьох видів корисних копалин у важкодоступних районах та шельфових структурах полярних морів Арктики. До них належать і мобільні ЧР-технології обробки та дешифрування даних ДЗЗ, які дозволяють вже на початкових етапах досліджень оперативно виділяти найперспективніші ділянки для їх детального обстеження традиційними геофізичними методами [1, 6, 7, 33].

Об'єктами наведених в роботі досліджень стали центри сучасної емісії газів в структурах північних морів і полярних регіонів Арктики та окремі поля сипів і покмарків, процеси дегазації в яких можуть помітно змінювати загальну концентрацію парникових газів в атмосфері Землі і руйнівним чином впливати на озоновий шар планети [3, 4, 11, 26, 28, 32].

У складі газових емісій переважає метан, присутні CO_2 , іноді сірководень [3, 4, 5]. Висота газових факелів найчастіше дорівнює 100—200 м, а в глибоководних морях вона може перевищувати 500—800 м. Частина метану, що виділяється в мілководних (на глибинах до 20 м) зонах, мігрує в атмосферу. З глибин понад 200—300 м в атмосферу потрапляє лише незначна частина газів, що виділяються в центрах емісії. Локальні центри емісії на морському дні формуються у вигляді грязьових скупчень і кратерів (покмарків)—поглиблень розміром від декількох до багатьох сотень метрів і глибиною до десятків метрів [18].

Використання ЧР-технологій дає можливість отримати додаткові і незалежні дані про структуру приповерхневих і глибинних джерел емісії, а також дистанційно виявляти ділянки, де відбувається активна емісія газів в атмосферу.

Загальний принцип і методи

Використані в роботі експрес-технології включають модифіковані методи ЧР-обробки та декодування даних ДЗЗ і фотографій, які базуються на експериментально доведеному припущенні, що велика кількість однорідної речовини створює характерне для цієї речовини електромагнітне поле, потужність випромінювання якого пропорційна її концентрації [1, 33].

Відповідно до нової парадигми проведення геофізичних досліджень, їх результатом є виявлення у розрізі конкретних речовин — нафти, газу, рудних корисних копалин, водоносних горизонтів. Принципово важлива особливість ЧР-методів полягає в тому, що вони дають можливість наповнювати розріз еталонними комплексами осадових, метаморфічних і магматичних порід безпосередньо в процесі реєстрації сигналів спеціально розробленими апаратуровимірвальними пристроями [6, 7, 33].

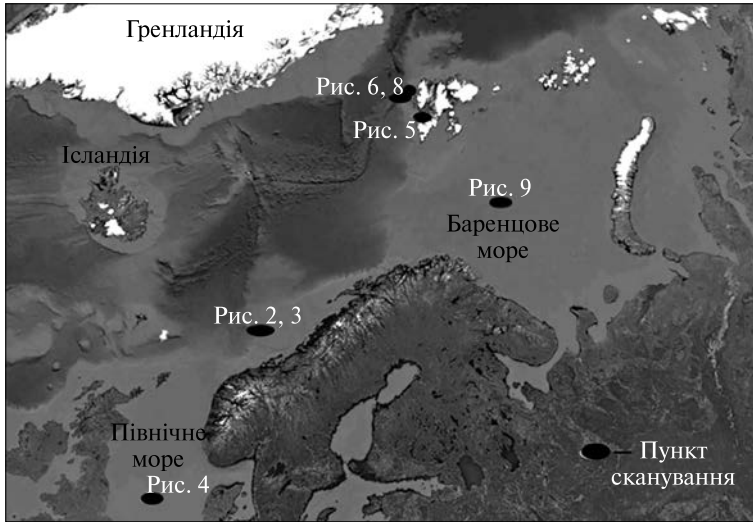


Рис. 1. Схематична карта розташування пунктів сканування в структурах континентальних окраїн північних районів Арктики

Важливими компонентами у модифікаціях прямопошукових методів є бази хімічних елементів, мінералів, зразків нафти та конденсату, а також осадових, магматичних та метаморфічних порід, класифікованих та розділених на окремі типи та групи, резонансні частоти яких використовуються у процесі обробки супутникових знімків та фотознімків. Базова колекція включає 117 зразків нафти, 15 зразків газоконденсату, 12 груп осадових порід та 18 груп магматичних та метаморфічних порід. Фотографії використаних наборів зразків осадових, метаморфічних та магматичних порід взяті із сайту <http://rockref.vsegei.ru/petro/> [7, 33].

Газові флюїди як індикатори процесів дегазації в арктичних морях

Результати досліджень показали, що викиди газу із центрів сучасної емісії в різних структурах полярного шельфу можуть помітно впливати на загальну концентрацію «парникових газів» в атмосфері Землі і процеси глобального потепління на планеті [3, 4, 11, 26, 28, 32].

Важливим джерелом їх надходження в атмосферу вважається сучасна техногенна діяльність людини, проте аналіз результатів моніторингу розподілу газів в атмосфері арктичного регіону показав, що необхідно шукати й інші джерела емісії, оскільки саме на шельфі Арктики були виявлені ділянки з аномально високими (найбільшими на всій планеті) максимумами емісії метану [11, 28].

Нижче розглянуті приклади використання ЧР-технологій для отримання більш обґрунтованих характеристик окремих центрів емісії метану, виявлених у полярних районах Арктики і обумовлених значною мірою процесами глибинної дегазації Землі.

Покмарки Ньєсга, Норвезьке море. Ділянка покмарків Ньєсга розташована на шельфі континентального схилу (рис. 1; 2, а) у південній частині плато Воринга, де глибина дна коливається від 600 до 800 м. Тут виявлено понад 230 покмарків, діаметр яких досягає 600 метрів, а глибина — 15 м [18, 22, 23].

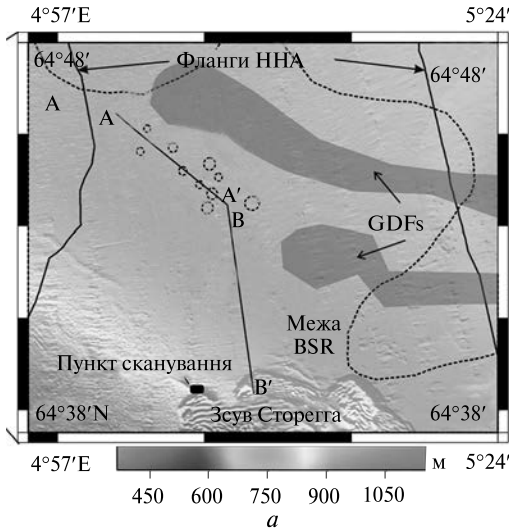
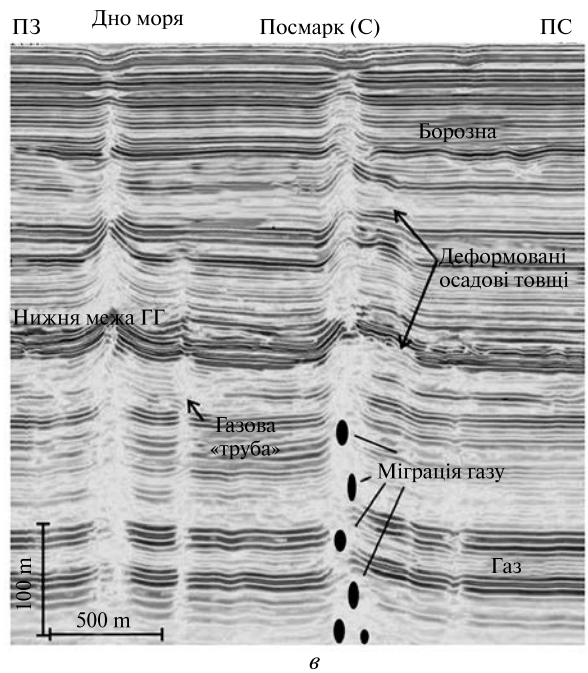
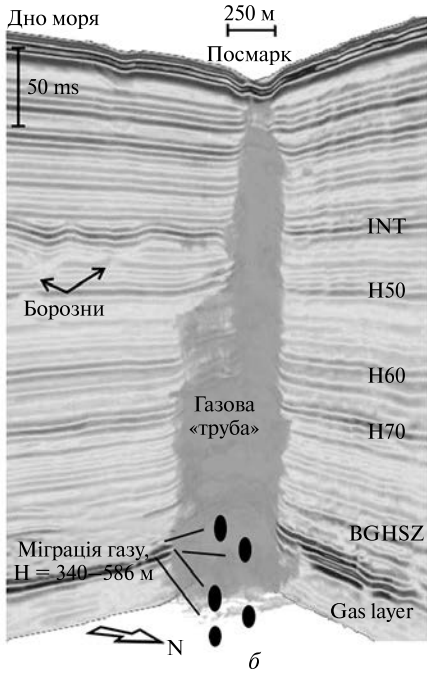
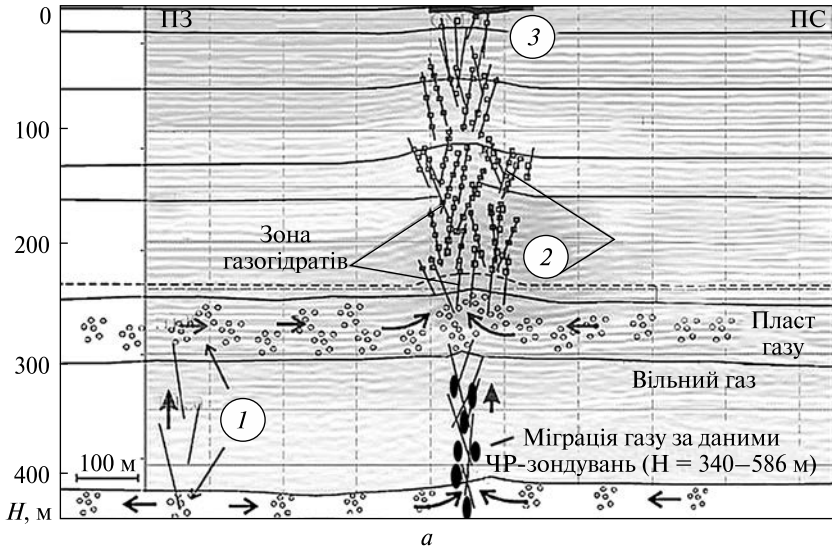


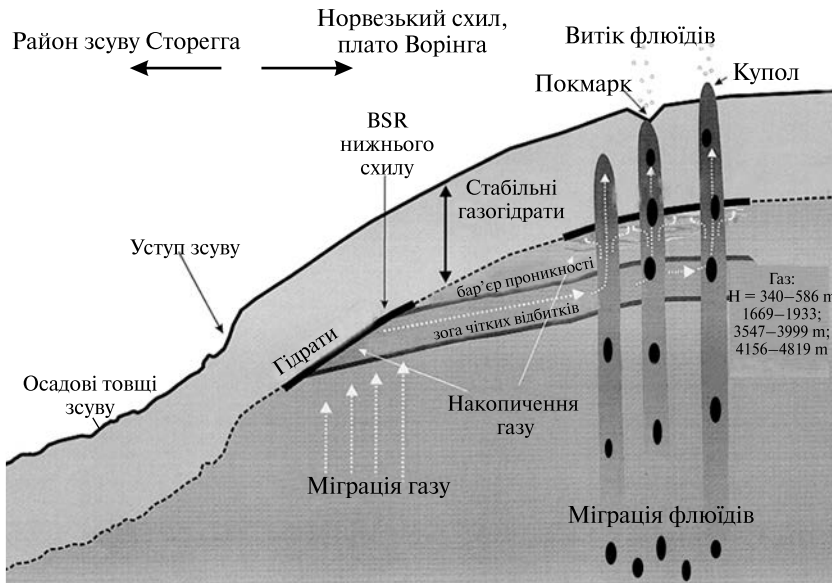
Рис. 2. Карта розташування покмарків Ньєгга (а) на північному фланзі зсуву Сторегга на континентальній окраїні Норвегії та ділянка досліджень (б); «газові труби» з покмарками (в) на профілі А—В [23], GDFs — поховані льодовикові уламкові потоки, ННА — Helland Hassen Arch



Геофізичні дослідження показали, що особливості будови та можливий вік покмарків ділянки пов'язані із структурою «газових труб» (рис. 2, б), утвореною в результаті тривалої еволюції просочування глибинних потоків газоподібних флюїдів через осадову товщу [23]. Покмарки часто виражені в рельєфі локальними структурами, хоча не всі «газові труби», заповнені високошвидкісними газогідратами з концентрацією 14–27 % від загального об'єму [22], сягають поверхні дна (рис. 2, в; 3). Зазначимо той факт, що у представлених моделях «газових труб» основним джерелом формування газогідратів та газових флюїдів є скупчення газів та газові пласти, що залягають у розрізі нижче зони газогідратів на глибинах 400–500 м (див. рис. 2, 3).



а



б

Рис. 3. Модель формування та можливі етапи еволюції «газової труби» з газогідратами (а) на ділянці Ньегга [23, спрощено]: етап 1 — вертикальна міграція глибинного газу по розломах та через проникні породи у стратиграфічних та структурних пастках; етап 2 — міграція газу з надлишковим тиском через тріщини, з утворенням газогідратів; етап 3 — зменшення надходження глибинного газу, утворення гідратів по всій зоні стабільності газогідратів та аутигенних карбонатів поблизу морського дна; схематична модель розвитку BSR (б) в районі Ньегга з імовірними глинистими діпірами та ознаками надходження флюїдів у товщу осадків [12, спрощено] та результати ЧР-зондувань для визначення глибин джерел дегазації, D — куполоподібні структури та покмарки на морському дні

На глибинах більше 1500 м тут можуть існувати умови для утворення термогенного метану, тому автори досліджень схилиються до думки, що деякі покмарки виникли у результаті імпульсних надходжень флюїдів із газових скупчень, збагачених метаном і розташованих біля подошви осадової товщі [12, 22, 23]. Наш досвід вивчення «газових труб» показав, що багато потоків газових флюїдів та процеси дегазації у структурах континентальних окраїн мають первинне корове та мантийне походження.

При рекогносцирувальній ЧР-обробці всієї ділянки Ньєгга зафіксовані сигнали на частотах водню, червоного фосфору, водневих бактерій, живої води, мергелів і кремністих осадових порід, а також сигнали від базальтів і ультрамафічних порід.

При зондуванні покмарка в точці з координатами $64^{\circ}40'02''$ N; $05^{\circ}07'32''$ E отримані відгуки для кількох груп осадових порід, газогідратів, вуглеводнів, вуглекислого газу, жовтого фосфору.

Процеси дегазації зафіксовані на водній поверхні, а також для глибин 340—586 м, 1669—1933 м, 3547—3999 м, 4156—4819 м (глибше зондування не проводилося).

Глибина залягання газогідратів (555 м) у точці зондування значно перевищує модельні значення прийнятої глибини подошви зони стабільності газогідратів на цій ділянці (див. рис. 2, 3).

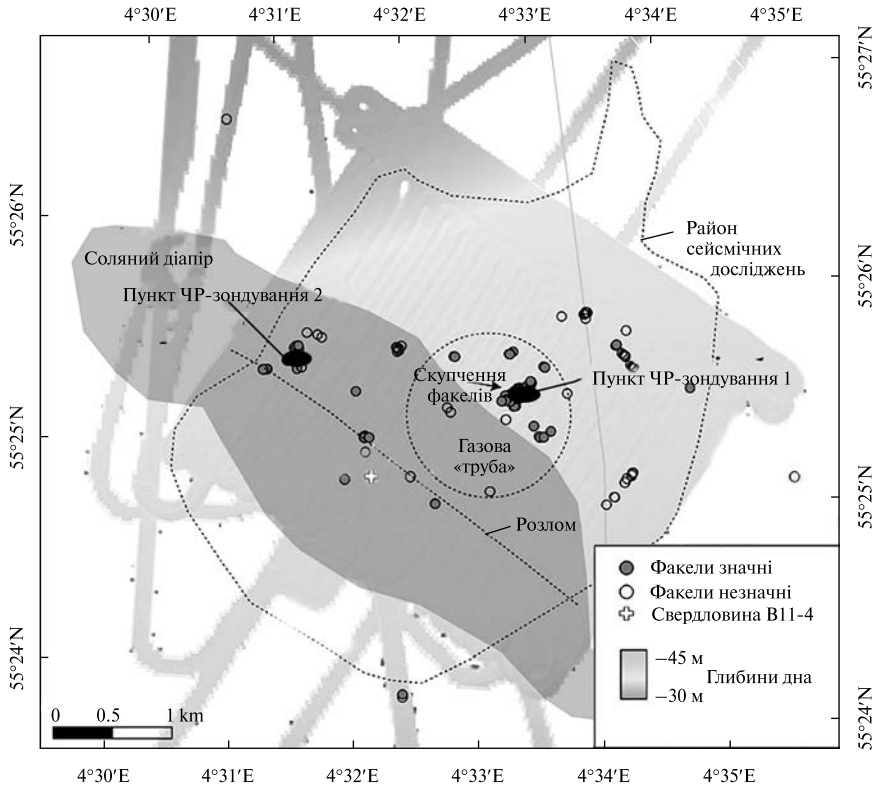
Отримані результати дають підстави стверджувати, що у формуванні покмарків на ділянці Ньєгга беруть участь газові флюїди різних горизонтів всієї (до 5 км) осадової товщі. Не виключено, що процеси дегазації можуть існувати і в більш глибинних горизонтах, проте зондування було проведено лише до глибини 4819 м.

Результати застосування ЧР-технологій показали, що покмарки ділянки Ньєгга є важливою та характерною частиною системи геофлюїдів та газогідратів на континентальному схилі Норвегії, у формуванні якої значну роль відіграють потоки глибинного метану, виділені раніше в інших структурах Арктики [8, 32].

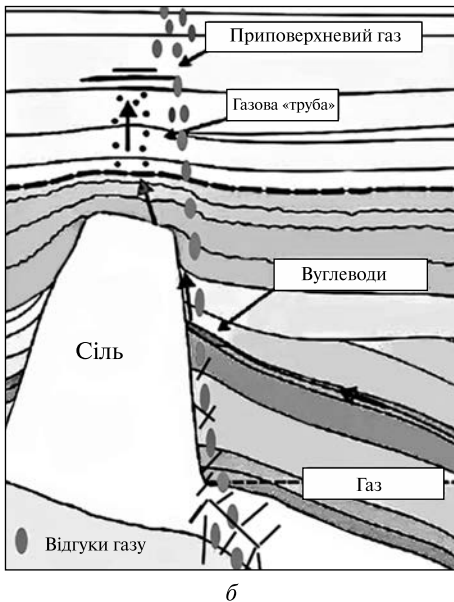
Скупчення сипів на ділянці «Берта» (північний захід німецької частини Північного моря). Район, що досліджувався розташований в межах Центрального грабену мезозойської рифтової структури північно-західної частини німецького сектора Північного моря, де широко розповсюджені соляні вулкани (діапіри) пізньоюрського віку, і яку вважають однією з великих провінцій, перспективних на вуглеводні [18]. Їх зростання призвело до появи субвертикальних розломів, порушення суцільності осадків та формування шляхів міграції газів у процесі глибинної дегазації. Імовірно, активна міграція газових флюїдів з великих глибин до поверхні могла здійснюватися лише вздовж найбільш виражених розломів, що підтверджується вибіркоvim розташуванням сипових скупчень уздовж східної краю соляного вулкана «Берта» (рис. 4).

Невеликі (30—50 м) глибини сприяли потраплянню частини метану у верхні шари водної товщі, а також емісії газів в атмосферу [24]. Виявлені сейсмічні «газові труби» шириною 200—300 м, а також характерний зв'язок скупчень газу з розломами соляно-купольних структур, можуть свідчити про глибинну природу мігруючих газів (див. рис. 4).

Основна частина сипів пов'язана з соляним вулканом (діапіром) «Берта», на східній окраїні якого (приблизно за 150—450 м на північний схід) спостерігається найактивніший прояв метанових факелів (див. рис. 4). Всі факели зареєстро-



а



б

Рис. 4. Схематична карта сипів (а) з пунктами ЧР-зондування в районі «Берта» [24]; схематичний глибинний розріз ділянки (б) за результатами інтерпретації сейсмічних даних [19, спрощено] і матеріалів ЧР-зондування

вані поблизу соляної структури або над її верхньою частиною, що розташована на глибині близько 2 км [19].

Автори [19, 24] вважають, що вуглеводні могли накопичуватися в зонах контактів пісковиків середньої юри із цехштайнськими соляними куполами, а також мігрувати вздовж соляних куполів і палеогенових розломів (див. рис. 4, б).

Результати застосування ЧР-технологій (пункт зондування 1) показали, що джерелами надходження газу є не лише придонні, а й глибинні його скупчення (газові кишені), розташовані на глибинах від 1094 м до 6000 м (і нижче). Загальна потужність серії газоносних горизонтів показує наявність великого скупчення (родовища) на східному краю соляного вулкана «Берта», розташованого в межах «газової труби» та локалізованого скупчення сипів (див. рис. 4, б).

Відсутність сигналів газу у пункті зондування 2 (див. рис. 4, а) підтверджує зв'язок шляхів міграції глибинних газів із локальною зоною розломів глибинного закладення, розташованою поза соляно-купольною структурою.

Центральна частина Шпіцбергена (район Ісфіорден). В Ісфіордені виявлено понад 1300 покмарків (діаметром від 14 до 265 м, глибиною від 1 до 11 м і частотою поширення до 20 на км²), 535 покмарків виявлено в Нордфьордені [25].

Розподіл покмарків в Ісфіордені має мозаїчний характер, а найбільш активно виражені їх поля просторово пов'язані з відомими зонами активних розломів (рис. 5).

Геохімічний аналіз вуглеводневих аномалій у приповерхневих морських відкладах фьордів вказує на термогенну та біогенну природу газів [25].

За результатами застосування ЧР-технологій на ділянці визначено комплекс осадових порід з коренем на глибині 470 км. Зареєстровані сигнали від нафти, газу, газоконденсату, вуглекислого газу, метаноокислюючих бактерій, жовтого фосфору, сланцю, газогідратів, антрациту.

Зондування було виконано до глибини 4789 м, відгуки на частоті газу отримані з карбонатних порід (вапняків) на глибинах: 1335—1932 м; 2459—3321 м; 3933—4467 м.

Інструментальними вимірами підтверджено міграцію жовтого фосфору, вуглекислого газу, кисню, азоту до атмосфери.

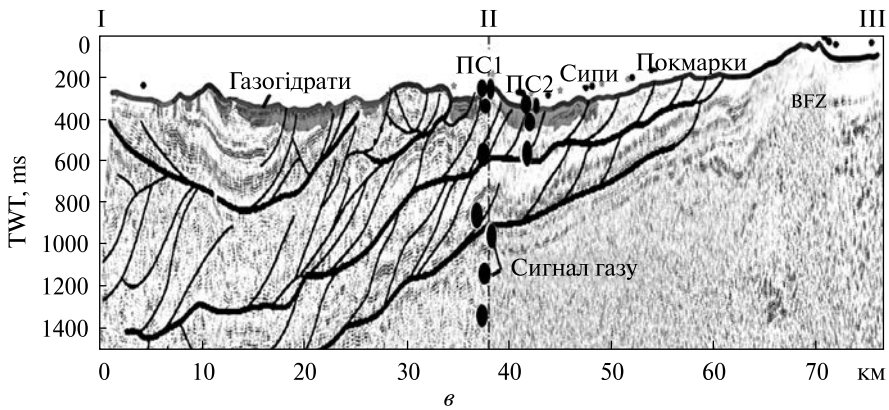
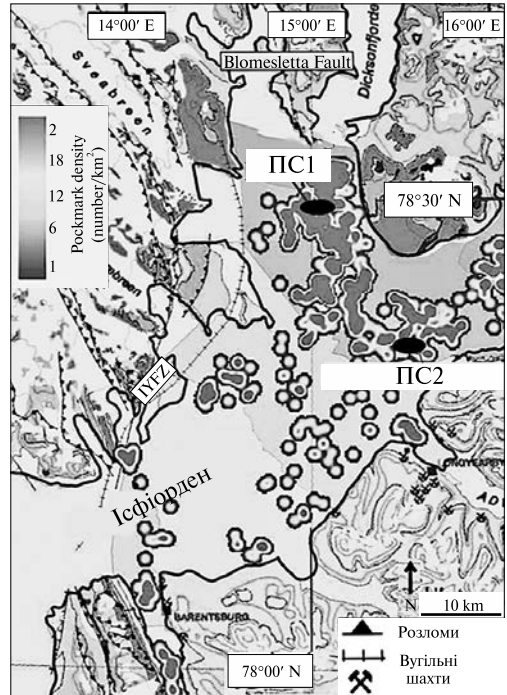
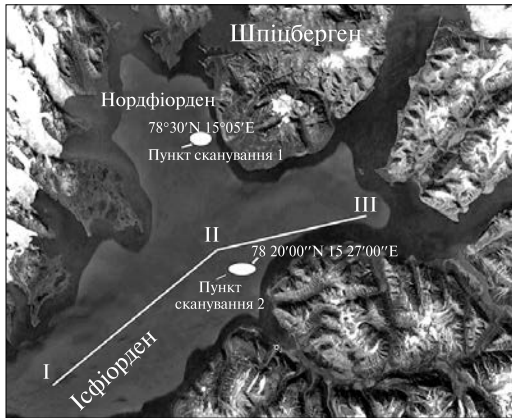
Детальний аналіз геофізичних даних у Нордфьордені показав наявність газових факелів лише над частиною покмарків, що може бути пов'язане з дискретним характером сучасних процесів дегазації, а також зі зміною напрямків глибинної міграції флюїдів.

Для ПС1 (див. рис. 5) зареєстровані сигнали від нафти, газу, газового конденсату, вуглекислого газу, метаноокислюючих бактерій, жовтого фосфору, горючих сланців, газогідратів, антрациту, азоту, кисню, вуглецю, льоду. Відгуки на частоті газу одержані для глибин: 1335—1932 м; 2459—3321 м; 3933—4467 м. Зондування у точці (ПС1) проводилося до глибини 4789 м.

Інструментальні вимірювання FR у цій точці підтвердили міграцію газу в атмосферу (див. рис. 5). Також зафіксовані процеси дегазації та міграції газу в атмосферу у точці зондування ПС2. Сигнали газу тут фіксувалися в інтервалах: 290—615 м, 996—1159 м, 1198—1314 м, але глибше зондування не проводилося (див. рис. 5).

Вважається, що у центральній частині Шпіцбергена потік термогенного газу по зонах розломів і великим тектонічним лінеаментам може бути основним геологічним фактором утворення сипів і покмарків, хоча вплив інших факторів (наявність скупчень вільного газу, процеси фільтрації, сейсмічна активність тощо) також може бути важливим. Процеси надходження активних газів у товщу води та атмосферу можуть змінюватись у часі, вони залежать від багатьох параметрів, включаючи вплив водної товщі, температури та динаміки хвиль [32].

Рис. 5. Схематична карта Ісфіордена (а) з пунктами ЧР-зондування і сейсмічним профілем І—ІІІ [10]; карта щільності розподілу покмарків (б) в районі досліджень, ПС — пункт сканування; глибинний сейсмічний розріз (в) уздовж профіля І—ІІІ [10] з результатами інтерпретації даних ЧР-зондування, ПС — проекції пунктів сканування на профіль



Результати використання ЧР-технологій при дослідженні полів сипів та покмарків в центральній частині Шпіцбергена підтверджують суттєвий, але недостатньо врахований, вплив корово-мантієвих газових флюїдів на характер та особливості процесів дегазації в структурах континентальних окраїн.

Континентальна окраїна Західного Шпіцбергена. Формування численних полів метанових сипів свідчить про масштабний характер процесів газовиділення в структурах континентальних окраїн на захід від Шпіцбергена [4, 9, 13—17, 20, 21, 29, 30].

За кілька десятиліть вивчення скупчень газогідратів, сипових полів та покмарків у цьому районі були визначені основні закономірності їх просторового положення та розміщення в структурах земної кори регіону, проведено оцінку різних факторів, що впливають на їх формування та динаміку процесів дегазації

в часі. Особлива увага у цих дослідженнях останніх років приділялася питанням можливої емісії метану в атмосферу та зв'язку руйнування скупчень газогідратів полярних регіонів із процесами «глобального потепління» [11, 16, 32].

Застосування сучасних апаратурних і методичних розробок при виконанні комплексних геолого-геофізичних досліджень дозволило отримати нові, більш детальні та достовірні дані про об'єкти досліджень і природу локальних і регіональних процесів дегазації в структурах цього району [8, 9, 13, 17, 18, 21, 25, 30, 31].

Так, лише на одній ділянці (площею 665 км²) було виявлено понад 250 місць виділень газу та викидів метану у водну товщу, частина з яких потрапляє в атмосферу [14].

Розглянемо деякі результати вивчення сипових полів і покмарків у структурах, розташованих на захід від Шпіцбергена [13, 21, 25].

Протока Фрама: хребет Вестнеса та Святогірський хребет. Хребет Вестнеса — підводний хребет (протяжністю близько 60 км) у протоці Фрама, розташований на океанічній корі хребта Моллоу континентальної окраїни Західного Шпіцбергена і складений постріфтовою товщею осадків потужністю до 5 км [29].

Газогідрати змінної потужності (разом із зонами вільного газу) виявлені в глибинному розрізі вздовж всього хребта, з ними просторово пов'язані численні поля сипів та покмарків. Протяжність покмарків коливається від перших до кількох сотень метрів (до 700 м), а глибини — від 1 до 10 м [29].

До найбільш вивчених локальних структур дегазації на хребті Вестнеса належать покмарки Лунде і Ломві (рис. 6), де з 1994 р. фіксуються активні процеси надходження метану у товщу води. Висота найбільших факелів над покмарками перевищує 900 м над дном моря. Ці факели не досягають поверхні моря, їхня верхня межа знаходиться на глибинах 275—325 м. У сейсмічних розрізах під покмарками фіксуються «газові труби» на глибину до 180—220 м [29].

Дані визначення абсолютного віку карбонатів морського дна та порід керн, отримані в районах розвитку покмарків на хребті Вестнеса, показали, що у їх формуванні виділяється ряд епізодів активної дегазації у четвертинний період. Процеси активного газовиділення, імовірно, були пов'язані зі змінами розмірів льодового покриву, динамікою розломів хребта та тектонікою льодовикових процесів у регіоні [21, 29].

ЧР-зондування покмарків Лунде і Ломві (рис. 6) показало, що скупчення газів виділяються на різних інтервалах (1420—1650—3020 м; 4700—5800—6280 м) глибини зондування, проведеного до 6280 м. У покмарку Лунде вони розташовані на 500 м нижче, ніж у горизонтах покмарка Ломві.

Цілком імовірно, що більш глибинні первинні джерела дегазації [17] цих покмарків не були визначені через обмежену глибину зондування.

Зони надходження вільного газу («газові труби») шириною 200—500 м через області поширення газогідратів є лише верхньою, найбільш вивченою, частиною глибинної системи дегазації, що охоплює товщу осадків у всьому часовому інтервалі від 0,02 до 18,5 млн р. [13, 15]. Вільний газ може надходити в покмарки під віссю хребта Вестнеса із зони скупчень на глибині 1,5—2,0 км [15].

Вважається, що газогідратна система на хребті Вестнеса на захід від Шпіцбергена протягом останніх 2 млн р. підживлювалася за рахунок генерації вуглеводнів з нафтоматеринських порід, що залягають на глибинах понад 2000 м. Потоки термогенного метану, що утворюються при цьому, формують основні

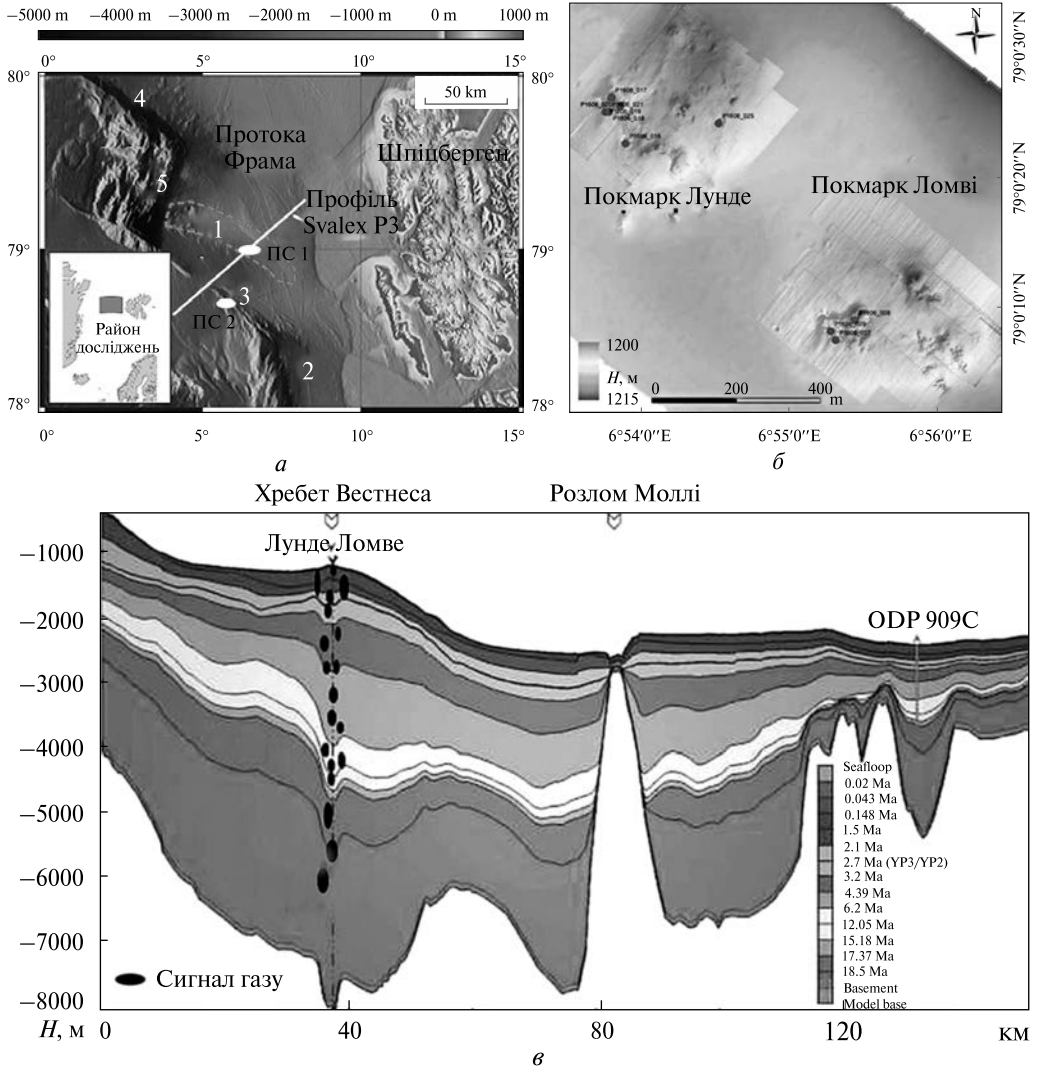


Рис. 6. Рельєф дна (а) у протоці Фрама [13] та положення пунктів сканування (ПС1, ПС2) на захід від Шпіцбергена; рельєф дна (б) в районі покмарків Лунде та Ломві [16]; сеймо-стратиграфічний розріз (в) уздовж профілю Svalex P3 з урахуванням даних свердловини ODP 909C [13] та результати визначення глибин скупчення газів у розрізах покмарків за даними ЧР-зондування. Положення профілю див. на рис. 5, а. Структури: 1 — хребет Вестнеса, 2 — хребет Кніповича, 3 — розлом Моллой, 4 — розлом Шпіцбергена, 5 — хребет Моллой

особливості системи холодної дегазації на шельфі [15]. Імовірно, описаний процес надходження термогенного метану є вторинним і супроводжується у протоці Фраму виділенням більш глибокого, абіотичного метану. Цей метан міг утворитися без участі органічних речовин у процесі високотемпературної (>200 °C) серпентинізації мантієвих діапірів ультраосновних порід [17].

Наявність скупчень газів на великих глибинах, вперше виявлена для області сипових полів і покмарків хребта Вестнеса за даними ЧР-зондувань, підтверджується різноманітністю ізотопних характеристик розчиненого метану, які мають комплексний (біогенний, термогенний та абіотичний) генезис [28].

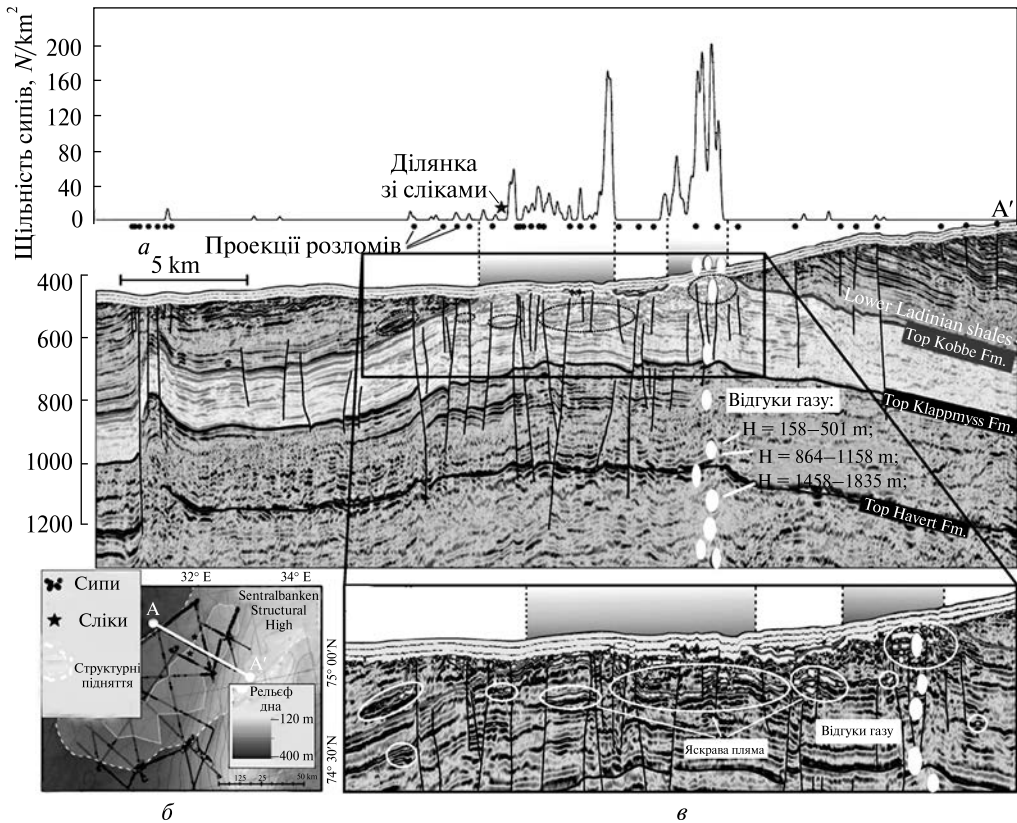


Рис. 7. Глибинний розріз уздовж інтерпретаційного сейсмічного профілю А—А' і графік щільності газових сипів (а) у районі структури Sentralbanken [27]; положення профілю А—А', зони сипів і сліків в районі досліджень (б); детальний сейсмічний розріз (в) верхньої частини осадової товщі підняття [27] і можливі глибини відгуків газу за даними ЧР-сканування

У протоці Фрама ЧР-зондування було також виконано на ділянці, розташованій на Святогірському хребті (див. рис. 6, ПС2).

Формування газогідратної системи, інтенсивність та імпульсний характер підтоків флюїдів та вільного газу на Святогірському хребті визначалися значною мірою динамікою розломів хребта, тектонікою та регіональними особливостями глобальної дегазації Землі [3, 17, 20, 21, 30].

Сейсмічні дослідження показали, що саме з великомасштабними розломами земної кори хребта Святогора пов'язана відокремлена газопо-флюїдна система з надходженням метану, змішаний генезис якого однозначно не визначений. Припускається, що тут раніше існували умови, необхідні для можливого абіотичного утворення метану (внаслідок серпентинізації) та його збереження в товщі осадків [30].

У результаті застосування ЧР-технологій отримані дані про емісію газів в атмосферу, а також виявлені скупчення газів на глибинах: 483—973, 1719—1937 м, 3434—3669 м, 4086—4705 м (нижче зондування не проводилося).

Наведені вище значення, отримані вперше, входять у протиріччя з даними про те, що найбільші глибини газових скупчень тут не перевищують 800—1000 м. Такі глибини значною мірою обмежують, хоч і не виключають, можли-

вості генерації та підтоку термогенного та абіотичного метану вздовж великих розломів.

Протиріччя можна пояснити різною глибиною сейсмічних досліджень, які були обмежені осадовою товщею з часом утворення не старіше 2–4 млн рр. і глибиною в точках ЧР-зондування, де досліджувався розріз з віком порід 18,5 (і більше) мільонів років.

Подібні розбіжності були отримані нами і для хребта Вестнеса, де процеси дегазації характерні для всієї товщі осадків і більш глибинних горизонтів.

Зона підняття Сентралбанкен у північній (норвезькій) частині Баренцова моря. В зоні підняття Сентралбанкен (Sentralbanken) було ідентифіковано 4137 акустичних «факелів» [27] з найвищою щільністю факелів газу в центральній частині цієї структури (рис. 7). Ці дані свідчать про існування додаткових джерел і процесів глибинної дегазації, які можуть пояснити масштаби утворення і прояву полів сипів і покмарків в різних структурах Баренцова та інших морів Арктичного регіону.

Результати ЧР-сканування в районі Sentralbanken показують, що сигнали синтезу вуглеводнів зафіксовані на глибині 57 км. Газовий сигнал фіксується в інтервалах глибин: 158–501 м, 864–1158 м, 1458–1835 м (подаліше зондування не виконувалося). Газові сигнали фіксуються в діапазоні глибин 1835 м — 10 км. Сигнал газогідратів фіксується на глибинах до 400 м.

Зафіксовано процес дегазації з поверхні води в атмосферу.

Виявлення скупчень газу та джерел дегазації на глибинах, що охоплюють (і перевищують) потужність осадкового чохла, може свідчити про додаткове надходження глибинного газу різного (термогенного та абіотичного) генезису.

Обговорення результатів

Результати багаторічних досліджень процесів дегазації в Арктиці показали, що інтенсивне потепління в Арктиці не спричинило помітного зростання придонних температур [11]. З цього випливає, що формування сипових полів та емісія газів у цьому районі визначається значною мірою глибинними джерелами дегазації, положення яких контролюються наявністю мережі тектонічних порушень (поверхневих та глибинних). Очевидним є і те, що виникнення покмарків слід пов'язувати, перш за все, з глибинними структурними процесами, тому що жоден з екзогенних факторів не в змозі пояснити наявність багатокілометрових коренів під покмарками [2, 5].

На користь газифлюїдної моделі походження покмарків говорять і численні дослідження висхідних газів, глибинність яких у багатьох випадках підтверджується наявністю в суміші водню та гелію, а також існуванням у газових виділеннях гомологів метану, які можуть утворюватися лише в умовах високих температур та тисків [2–5, 9].

Додатковим джерелом метану можуть бути його надходження із газогідратів, про що свідчать результати ЧР-зондування в досліджених структурах континентальних окраїн Арктики.

Висновки

Дослідження глибинної будови покмарків у структурах полярних регіонів Арктики підтверджує існування різнопланових та багаторівневих факторів, що впливають на змішаний механізм процесів формування метанових сипів в ре-

зультаті локальної глибинної і придонної дегазації. Результати проведених експериментальних ЧР-досліджень дали можливість отримати уявлення про роль глибинних факторів, що впливають на формування та динаміку вже відомих газо-флюїдних процесів, а також оцінити можливості появи нових центрів дегазації в полярних районах.

Наш досвід застосування ЧР-технологій при вивченні полів сипів та покмарків полярних регіонів підтверджує суттєвий, але недостатньо врахований, вплив коро-мантієвих газових флюїдів на характер та особливості процесів дегазації в структурах полярних континентальних окраїн Арктики. Матеріали ЧР-досліджень показали можливість використання сипів і покмарків як індикаторів мілководних і більш глибоких родовищ вуглеводнів у зонах просочування газів.

Застосування оперативних технологій ЧР-зондувань дозволило дистанційно оцінити глибину геологічних джерел міграції газових флюїдів, не пов'язаних з процесами танення газогідратів в полярних широтах, і визначати просторові закономірності формування зон інтенсивної емісії газів в атмосферу, яка є важливим фактором впливу на динаміку процесів глобальних змін клімату на Землі.

Досвід застосування ЧР-технологій при дослідженнях метанових сипів і покмарків, виявлених в структурах полярних морів Арктики, показав універсальність і можливість їх використання в різних регіонах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагін І.Н. Частотно-резонансний принцип, мобільна геоелектрична технологія: нова парадигма геофізических досліджень. *Геофізический журнал*, 2012. Т. 34, № 4. С. 167—176.
2. Рыбак Е.Н., Ступина Л.В. Покмарки Чёрного моря. *Геол. і кор. копал. Світового океану*, 2019. Т.15, № 2. С. 16—34.
3. Шестопалов В.М., Лукин А.Е., Згоник В.А. и др. Очерки дегазации Земли. Киев: БАДАТА-Интек сервис, 2018. 632 с.
4. Шнюков Е.Ф., Топачевский И.В. Газовые сипы Мирового океана. *Геол. і кор. копал. Світового океану*. 2019. Т. 15, № 2. С. 3-15.
5. Шнюков Е.Ф., Коболев В.П., Пасынков А.А. Газовый вулканизм Черного моря. Киев, 2013. 383 с.
6. Якимчук Н.А., Левашов С.П., Корчагін І.Н. Прямопоисковая мобільна технологія: результати апробации при поисках скоплений водорода и каналов миграции глубинных флюидов, минерального вещества и химических элементов. *Геоинформатика*, 2019. № 2. С. 19—42.
7. Якимчук Н.А., Корчагін І.Н., Бахмутов В.Г., Соловьев В.Д. Геофізические исследования в Украинской морской антарктической экспедиции 2018 г.: мобільна измерительная аппаратура, инновационные прямопоисковые методы, новые результаты. *Геоинформатика*, 2019. № 1. С. 5—27.
8. Baranov B., Galkin S., Vedenin A., et al. Methane seeps on the outer shelf of the Laptev Sea: characteristic features, structural control, and benthic fauna. *Geo-Marine Letters*, April 2020. V. 40. P. 541-557. <https://doi.org/10.1007/s00367-020-00655-7>
9. Berndt C., Feseker T., Treude T., et al., Temporal constraints on hydrate-controlled methane seepage off Svalbard. *Science*, 2014. V. 343, № 6168. P. 284-287.
10. Betlem P., Roy S., Birchall T., et al. Modelling of the gas hydrate potential in Svalbard's fjords. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.104127>
11. Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Nikonov R. A., et al. Earth degassing in the Arctic: the genesis of natural and anthropogenic methane emissions. *Arctica: ecology and economy*, 2020. № 3 (39). P. 6-22. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2020-3-6-22>

12. Bouriak S., Vanneste M., Saoutkine A. Inferred gas hydrates and clay diapirs near the Storegga Slide on the southern edge of the Voring Plateau, offshore Norway. *Marine Geology*, 2000. 163 (1-4), P. 125-148.
13. Daszinnies M., Plaza-Faverola A., Sylta Ø., et al. The Plio-Pleistocene seepage history off western Svalbard inferred from 3D petroleum systems modelling. *Marine and Petroleum Geology*, 2021. V. 128, P. 1-21.
14. Gentz T., Damm E., Schneider von Deimling J., et al. A Water Column Study of Methane Around Gas Flares Located at the West Spitsbergen continental Margin. *Continental Shelf Res.*, 2014. V. 72. P. 107-118. doi:10.1016/j.csr.2013.07.013
15. Goswami B.K., Weitemeyer K.A., Minshull T.A., et al. A joint electromagnetic and seismic study of an active pockmark within the hydrate stability field at the Vestnesa Ridge, West Svalbard margin. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015. V. 120 (10), P. 6797-6822. <https://doi.org/10.1002/2015JB012344>
16. Himmler T., Sahy D., Martma T., et al. A 160,000-year-old history of tectonically controlled methane seepage in the Arctic. *Science Advances*, 2019. V. 5, № 8. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw1450>
17. Johnson J.E., Mienert J., Plaza-Faverola A., et al. Abiotic methane from ultraslow-spreading ridges can charge Arctic gas hydrates. *Geology*, 2015. № 43 (5). P. 371-374. <https://doi.org/10.1130/G36440.1>
18. Judd A., Hovland M. Seabed Fluid Flow. The Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment. Cambridge, 2007. 475 p.
19. Müller S.M. The German Central Graben (North Sea): Tectonostratigraphic evolution and hydrocarbon systems. Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität. Diss. 2023. IX, P. 206. <https://doi.org/10.15488/13228>
20. Panieri G., Fornari D.J., Serov P., et al. Gas Hydrate, Carbonate Crusts, and Chemosynthetic Organisms on a Vestnesa Ridge Pockmark-Preliminary Findings. *Fire in the ice*, 2015. № 15. P. 14-17.
21. Plaza-Faverola A., Büinz S., Johnson J.E., et al. Role of tectonic stress in seepage evolution along the gas hydrate-charged Vestnesa Ridge, Fram Strait. *Geophysical Research Letters*, 2015. № 42 (3). P. 733-742. <https://doi.org/10.1002/2014gl062474>
22. Plaza-Faverola A., Büinz S., Mienert J. Repeated fluid expulsion through sub-seabed chimneys offshore Norway in response to glacial cycle. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011. № 305. P. 297-308.
23. Plaza-Faverola A., Büinz S., Mienert J. Fluid distributions inferred from P-wave velocity and reflection seismic amplitude anomalies beneath the Nyegga pockmark field of the mid-Norwegian margin. *Marine and Petroleum Geology*, 2010. V. 27. № 1. P. 46-60.
24. Römer M., Blumenberg M., Heeschen K., et al. Seafloor Methane Seepage Related to Salt Diapirism in the Northwestern Part of the German North Sea. *Front. Earth Sci.*, 2021. 9:556329. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.556329>
25. Roy S., Senger K., Hovland M., Römer M., Braathen A. Geological controls on shallow gas distribution and seafloor seepage in an Arctic fjord of Spitsbergen, Norway. *Mar. Pet. Geol.*, 2019. V. 107. P. 237-254. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.05.021>
26. Ruppel C.D., Kessler J.D. The interaction of climate change and methane hydrates. *Rev. Geophys.*, 2017. V. 55. P. 126-168. <https://doi.org/10.1002/2016RG000534>
27. Serov P., Mattingsdal R., Winsborrow M., et al. Widespread natural methane and oil leakage from submarine Arctic reservoirs. *Nature Communications*, 2023. 14:1782. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37514-9>
28. Shakhova N, Semiletov I, Salyuk A., et al. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic shelf. *Science*, 2010. V. 327. P. 1246.
29. Smith A. J., Miener J., Büinz S., Greinert J. Thermogenic methane injection via bubble transport into the upper Arctic Ocean from the hydrate-charged Vestnesa Ridge, Svalbard. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2014. V. 15. P. 1945-1959. <https://doi.org/10.1002/2013GC005179>
30. Waghorn Kate, Büinz S., Plaza-Faverola A., et al. 3D Seismic investigation of a gas hydrate and fluid flow system on an active mid-ocean ridge; Svyatogor Ridge, Fram Strait. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2018. P. V. 19 (8). P. 2325-2341. <https://doi.org/10.1029/2018GC007482>

31. Weniger P., Blumenberg M., Berglar K., et al. Origin of near-surface hydrocarbon gases bound in northern Barents Sea sediments. *Mar. Pet. Geol.*, 2018. V. 102. P. 455-476. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.12.036>
32. World Ocean review. Living with the oceans. The Arctic and Antarctic — Extreme, Clinically Crucial and in Crisis, 2019. P. 330. <https://oceanliteracy.unesco.org/resource/world-ocean-review-6-the-arctic-and-antarctic-extreme-climatically-crucial-and-in-crisis/>
33. Yakymchuk N.A., Korchagin I.N., Javadova A. Application of frequency-resonance methods of satellite images processing for hydrogen and living water accumulations searching within local areas in Europe. Conference Paper, WMSESS, September 2021. P. 1-10.

Стаття надійшла 02.07.2023

V.D. Solovyov, Ph.D. (Geol. & Mineral.), Leading Researcher
E-mail: solvalera@ukr.net

S.I. Subbotin Institute of geophysics of the NAS of Ukraine
32 Palladin Ave, Kyiv, 03142, Ukraine

M.A. Yakymchuk, Dr. Sci. (Physics & Mathem.), Professor
e-mail: yakymchuk@gmail.com

Institute of Applied Problems of Ecology, Geophysics and Geochemistry
1 Laboratorny Lane, Kyiv, 02000, Ukraine

I.M. Korchagin, Dr. Sci. (Physics & Mathem.), Professor
e-mail: korchagin.i.n.@gmail.com.

S.I. Subbotin Institute of geophysics of the NAS of Ukraine
32 Palladin Ave, Kyiv, 03142, Ukraine

GAS FLAERS AND MODERN DEGASATION PROCESSES IN THE ARCTIC SEAS (ON THE FREQUENCY RESONANCE RESULTS-BASED)

The newly obtained results of the frequency-resonance (FR) technologies application for the study of the sources and processes of seeps and pockmarks formation in the Arctic Region (Norwegian, Barents Sea) and the North Sea are considered. The experimental study of the seepage processes' source formation was carried out using modified methods of the FR-processing, and decoding of satellite images and photographs with the vertical scanning of the cross-sections. The study results of the methane seeps and pockmarks fields show that the intensity and dynamics of their formation partly depend on the inflow of gas fluids from deep sources because of active degassing processes. The use of FR-sounding technologies allows us to remotely determine the spatial regularities of zones of intense gas emission formation and the geological sources of migration probable depth. The study of seep and pockmark field results confirms the significant, but insufficiently taken into account, the influence of crust-mantle gas fluids on the nature and degassing processes features in the structures of the continental margins. New results confirm the crust-mantle gas fluids influence on the nature and degassing processes features in the scan points of Polar marginal structures. These data are important arguments in favor of the «volcanic model» of various structural elements formation in this Region. The FR-technologies data also showed a possibility of seeps and pockmarks use as shallow and deep hydrocarbon field indicators in gas emission areas. These independent data can be used in modeling the deep lithosphere structure and possible mechanisms of abiogenic hydrocarbon formation in Arctic margin structures. We suppose that hydrocarbons through deep channels migrate (from 57 km deep) to the upper crustal horizons where can form hydrocarbon fields. During this migration, gas seeps and pockmarks are formed on the sea bottom and part of the gas can migrate into the atmosphere. Modern degassing centers' studies have confirmed the presence of zones of active migration of gases into the atmosphere, which is an important influencing factor in the dynamics of global climate change processes on Earth. The experience of FR-technologies used in the fields of methane seeps and pockmarks study found in the structures of the Arctic Polar seas showed versatility and the possibility of their use in the study of large gas emissions in structures of different regions.

Keywords: remote methods, mobile technologies, seeps, pockmarks, North Sea, Spitsbergen, Barents Sea, Arctic Region.