

Едуард КУЗЬМЕНКО^{1а}, Ігор ЧУДИК², Сергій БАГРІЙ^{1б}, Андрій ЯРЕМА³,
Юрій НЕСПЛЯК⁴, Ігор ЧЕПУРНИЙ^{1в}, Володимир АРТИМ⁵

¹ Кафедра геодезії та землеустрою, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, Івано-Франківськ, 76019, Україна, тел. +38(0342)50-47-61, ел. пошта: gbg2020@ukr.net; ^{1а} <https://orcid.org/0000-0002-1994-0970>, ^{1б} <https://orcid.org/0000-0003-1190-6222>, ^{1в} <https://orcid.org/0000-0003-2109-3827>

² Ректор, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, Івано-Франківськ, 76019, Україна, тел. +380 (342) 72-47-16, ел. пошта: rector@nung.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-7402-6962>

³ Кафедра геології та розвідки нафтових і газових родовищ, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, Івано-Франківськ, 76019, Україна, тел. +38 (0342) 72-71-21, ел. пошта: 05.03.1982@ukr.net

⁴ Кафедра буріння свердловин, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, Івано-Франківськ, 76019, Україна, тел. +38 0342 72-71-37, ел. пошта: y.nespliak@gaz.net.ua;

⁵ Кафедра будівництва та енергоефективних споруд, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, Івано-Франківськ, 76019, Україна, тел. +38 (0342)57-24-04, ел. пошта: viartym@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8938-552X>

<https://doi.org/10.23939/jgd2024.01.085>

ВИКОРИСТАННЯ КОМПЛЕКСУ ГАЗОГРУНТОВОЇ ЗЙОМКИ ТА ГЕОФІЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ У ЗАДАЧІ ОКРЕСЛЕННЯ ТЕРИТОРІЇ ГРЯЗЬОВОГО ВУЛКАНІЗМУ В МЕЖАХ РОЗВАДІВСЬКОЇ ПЛОЩІ ЛЬВІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Мета досліджень – обґрунтувати наукові засади виникнення грязьового вулкана в межах конкретної ділянки Передкарпатського прогину у зв'язку з наявністю прирозломного малоглибинного газового покладу на Розвадівській площі та відображення його елементів у полях газогрунтового знімання та електрометрії. Актуальність роботи визначається необхідністю вирішення екологічної проблеми забруднення навколишнього середовища вуглеводневими газами, а також встановлення та прогнозування ступеня викидів газогрязевої суміші. Визначено наявність (чи відсутність) зв'язку впливу між масивом, порушеним за рахунок розбурювання Рудниківської газоперспективної площі, та зазначеним Розвадівським покладом, за допомогою зіставлення результатів газогрунтового та геофізичного знімань у великому регіоні, що охоплює зазначені площі. Методика досліджень полягає у: 1) виконанні досліджень із різним фізичним обґрунтуванням (газогрунтове знімання та електрометрія); 2) порівнянні результатів знімань, виконаних на одній площі та по однаковій сітці спостережень; 3) виявленні аномалій у межах дослідженої території та їх тлумаченні із погляду розвитку грязьового вулканізму. Результати досліджень. Інформаційну основу гозометрії становлять безпосередні вимірювання вільного газу в регулярній системі спостережень в атмосфері ґрунтового середовища, їх статистичні характеристики та розрахункові показники загазованості. Тому карти розподілу загазованості є інформативними. Виконані дослідження методом природного імпульсного електромагнітного поля Землі дали змогу диференціювати площу за ступенем інтенсивності електромагнітного випромінювання, зважаючи на різну глибинність джерел і, у результаті, виявити ділянки напружено-деформованого стану гірських порід та кваліфікувати їх згідно із причинами. Наукова новизна полягає у визначенні: 1) відсутності зв'язків між порушеним за рахунок буріння масивом та природним катаклізмом; 2) причин природного катаклізму, його обґрунтованого механізму та класифікації події як грязьового вулкана. Практична значущість. Інтерпретація одержаних результатів дає можливість визначити причини надзвичайної геологічної події на Розвадівській площі Львівської області, класифікувати подію та її наслідки як прояв елементів грязьового вулканізму, встановити відсутність зв'язку зазначеної події із техногенним порушенням (бурінням) геологічного середовища на сусідніх ділянках.

Ключові слова: газогрунтова зйомка; інтенсивність випромінювання електромагнітного поля; напружений стан; гірничий масив; деформації; свердловина; грязьовий вулкан.

Вступ

Актуальною екологічною проблемою територій населених пунктів, розташованих у межах нафтових і газових родовищ, є забруднення навколишнього середовища (ґрунтів, вод, повітря, приміщень) вуглеводневими газами. Порівняно незначні

витоки і прояви вуглеводневих газів здатні створювати вибухонебезпечні ситуації в житлових та виробничих зонах, розташованих у контурах нафтогазових родовищ, як тих, що розробляються, так і тих, що не відкриті. Такі випадки відомі й на Прикарпатті.

Ці обставини змушують проявляти обережність стосовно житлово-комунального функціонування населених пунктів, розташованих безпосередньо поблизу нафтогазових родовищ. Це стосується і села Розвадів Стрийського району Львівської області, розташованого поряд із Рудниківською нафтогазовою площею (рис. 1).

У ніч з 26 на 27 квітня 2023 року в південно-західній частині с. Розвадів відбулася небезпечна подія, що характеризується як прояв грязьового вулканізму. Конкретно на площі приблизно 0,041 км² зафіксовано газо-грязьові викиди заввишки 6–7 м. В декількох десятках колодязів з рівнем води глибиною приблизно 6 м спостерігався викид газу із кипінням. Після викидів газо-грязьової суміші на їх місці подекуди спостерігались провали земної поверхні завглибшки декілька метрів. Спостерігалось кипіння води в р. Дністер, яка обмежує ділянку деформацій поверхні з півдня. Були пошкоджені декілька будинків, господарські споруди та дорожнє полотно. Під час пошкоджень в с. Розвадові здійснювали проходження свердловини на відстані близько одного кілометра від села (небезпечна зона згідно з нормами становила 500 м і більше від свердловини). У свердловині проходили газовий поклад на глибині близько 500 м і зростав пластовий тиск, який стабілізували збільшенням

густини бурового розчину. Отже, на перший погляд, наочною причиною грязьового вулканізму [Korfi, 2002; Panahi, 2005; Mazzini, 2009; Дяків та ін., 2023; Busetti et al., 2024] в Розвадові є буріння свердловини. Проте ця причина лише на рівні припущень.

Для кваліфікованого вирішення питань, пов'язаних із можливим впливом промислової діяльності, а саме бурінням свердловини, або іншими причинами, необхідно мати об'єктивну інформацію про стан забруднення вуглеводнями приповерхневих відкладів та про напруженість гірських порід. Для оцінювання події здійснено дослідження методами природного імпульсного електромагнітного поля Землі та газогрунтового знімання для контролю напруженого стану гірських порід і ступеня газозованості природного середовища на території с. Розвадів.

Мета роботи

Метою досліджень є обґрунтування наукових засад виникнення грязьового вулкана в межах конкретної ділянки Передкарпатського прогину, що пов'язана із наявністю прирозломного малоглибинного газового покладу на Розвадівській площі та відображення його елементів у полях газогрунтового знімання та електрометрії

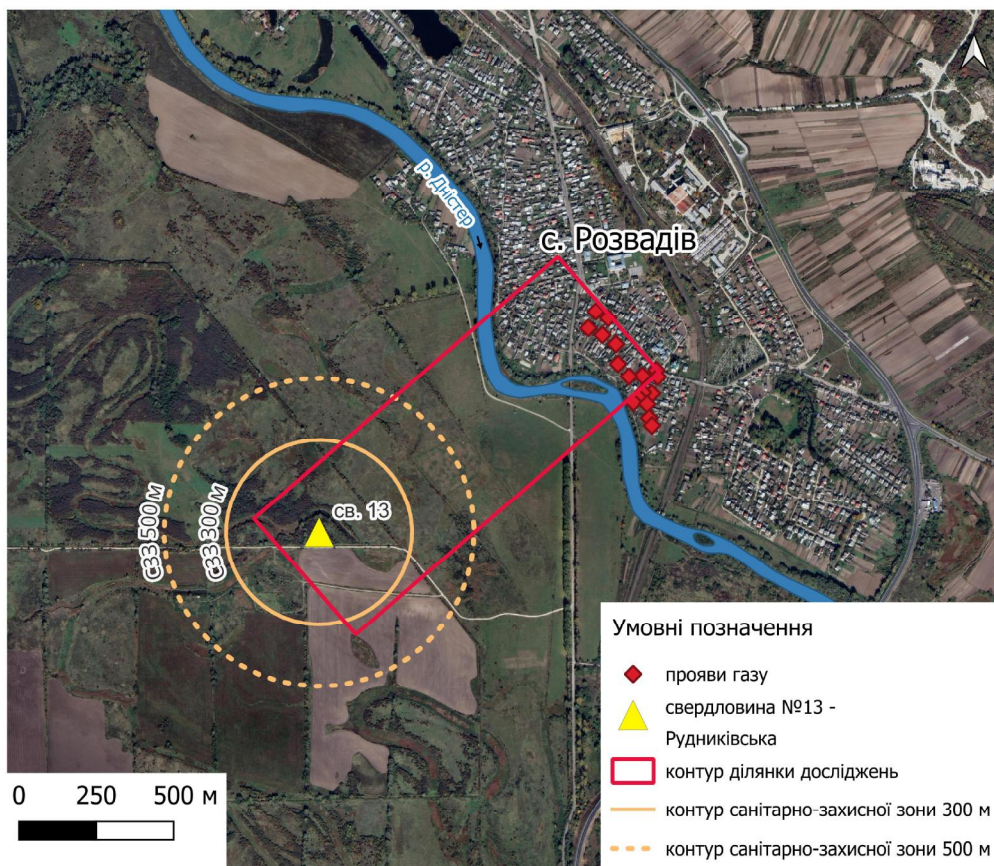


Рис. 1. Оглядова карта території дослідження
Особливості геологічної будови території

Район робіт розміщений у східній частині Руд-

никівської площі Передкарпатського прогину. Площу вивчено за даними глибокого буріння, геофізичних досліджень та геологічного знімання, де літолого-стратиграфічний розріз Рудниківської площі представлений палеозойськими, мезозойськими та кайнозойськими відкладами. Карбонатно-теригенні відклади палеозою та мезозою (юрської та крейдової систем) виповнюють розріз платформної основи Передкарпатського прогину, а кайно-

зойські відклади утворюють неогеновий моласовий чохол [Fedoriv, et al., 2019; Ftemov, et al., 2021; Riznychuk, et al., 2021; Yarema, et al., 2020; Artym, et al., 2019].

Відповідно до геотектонічного районування район робіт розташований у північно-західній частині Більче-Волицької зони Передкарпатського прогину, в зоні зчленування останньої із Рава-Руською зоною Західно-Європейської платформи (рис. 2).

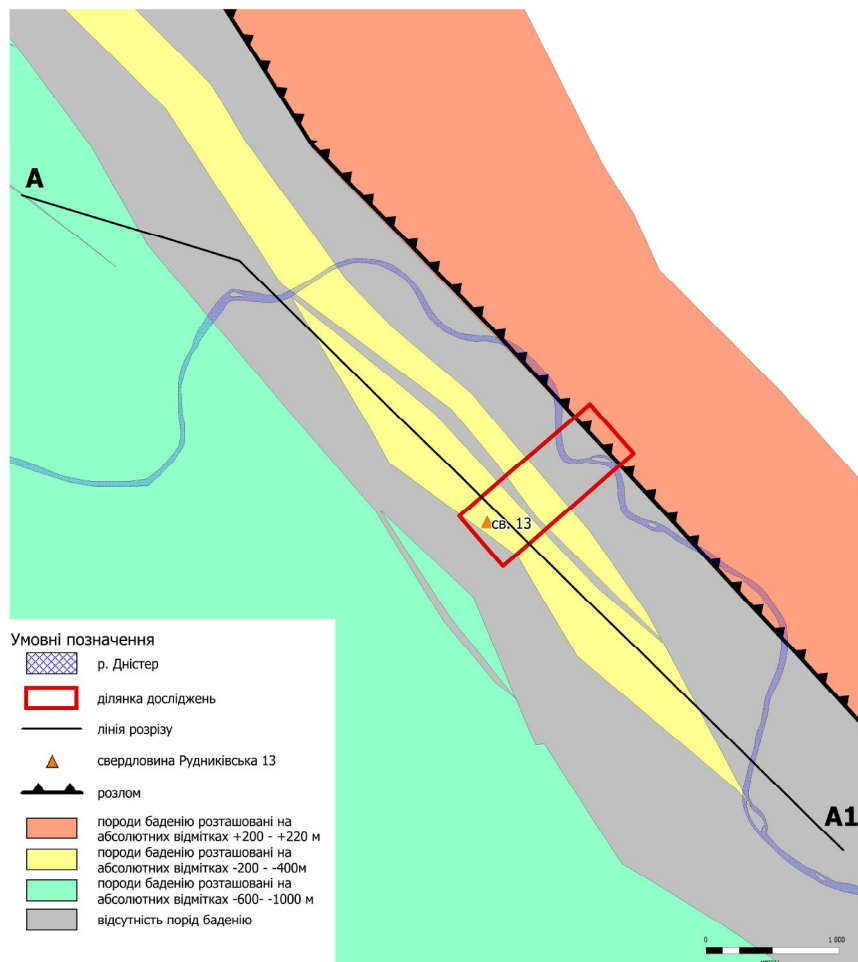


Рис. 2. Структурно-геологічна карта території дослідження (сформував автори на основі даних ТОВ “Георозвідка” [Георозвідка..., 2019])

Основними тектонічними та структуроформувальними елементами в межах досліджуваної площі є Калуський та Городоцький регіональні розломи, по яких відбувалось ступінчасте занурення фундаменту (епіварисційської консолідації) Західно-Європейської платформи під час формування Передкарпатського прогину. За генетичним типом це скиди, амплітудою до 1 км (на донеогеновому рівні), субкарпатського (північно-західного) простягання, із опущеним південно-західним крилом.

У нафтогазогеологічному плані район досліджень розташований у межах Більче-Волицького нафтогазоносного району. Для Більче-Волицького нафтогазоносного району характерні два поверхи

нафтогазоносності: підгіпсовий (мезозойський), з яким пов’язані як нафтові, так газові і газоконденсатні поклади, та надгіпсовий (баден-сарматський), для якого характерні газові та газоконденсатні поклади. Рудниківська площа, з якою пов’язаний об’єкт досліджень, розташована в зоні нафтогазонакопичення, для якої характерні виключно газові та газоконденсатні поклади в підгіпсовому і газові поклади в надгіпсовому комплексі порід; ця зона в межах Більче-Волицького НГР простягається від Угерського родовища на південному сході до Рудківського родовища на північному заході.

Район робіт безпосередньо пов’язаний із Розвадівським газопошуковим об’єктом, який вияв-

лено в результаті локального прогнозування газоносності в межах Рудниківської площі.

У межах Розвадівського пошукового об'єкта перспективи виявлення нових покладів газу пов'язані із відкладами карпатію та кампанського ярусу крейдової системи. Поверх пошуків охоплює інтервал глибин 500–550 м. Очікується масивний склепінний газовий поклад (рис. 2, 3).

зани із відкладами карпатію та кампанського ярусу крейдової системи. Поверх пошуків охоплює інтервал глибин 500–550 м. Очікується масивний склепінний газовий поклад (рис. 2, 3).

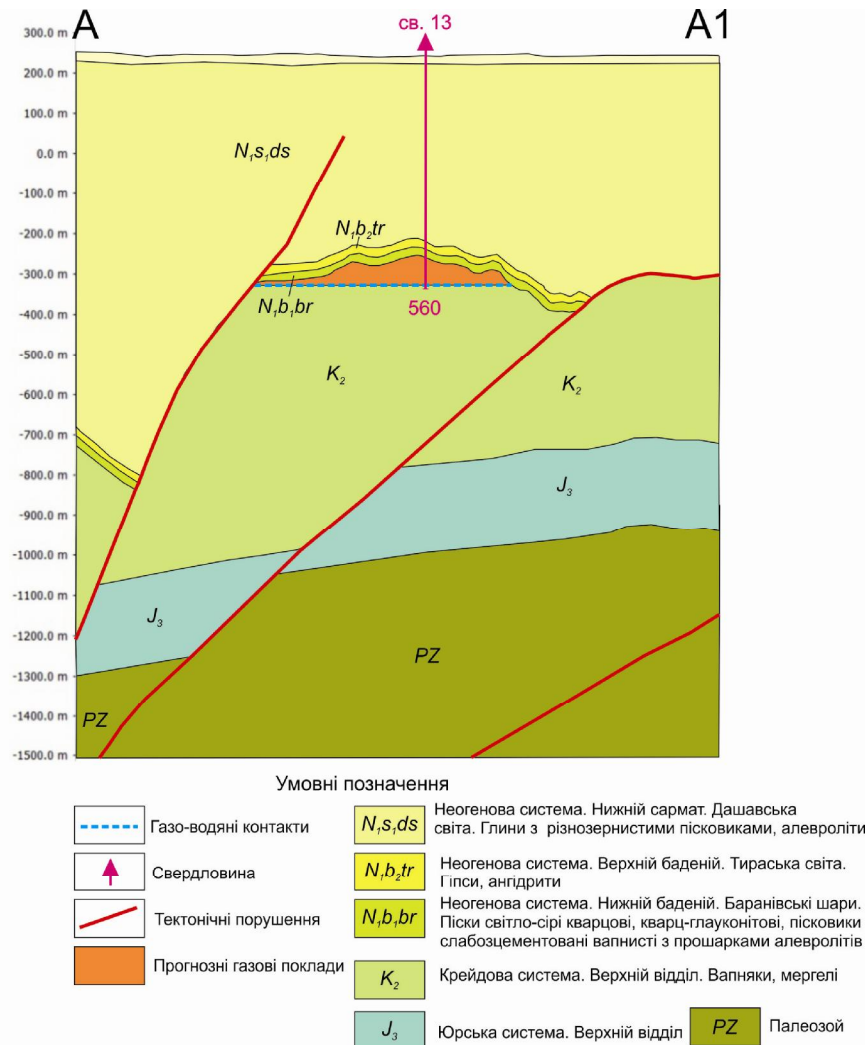


Рис. 3. Сейсмогеологічний розріз по лінії А – А1 (створили автори на основі даних ТОВ “Георозвідка” [Георозвідка..., 2019])

Методи досліджень та результати

Як оперативні, ефективні за результативністю та порівняно недорогі вибрано методи газогрунтового знімання (ГГЗ) та геофізичний метод природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПІЕМПЗ).

Газогрунтове знімання. Газогрунтове знімання широко використовують як в Україні, так і за її межами [Toutain, et al., 1999; Schütze, et al., 2012; Sechman, et al. 2013, 2022; Zarroca, et al., 2012 Gryga, et al., 2016; Baillie, et al., 2019; Vyzhva, et al., 2021, Bagriy, et al., 2019].

Газометричні дослідження вперше виконано в житловій зоні села Розвадів та прилеглих територій. Інформаційну основу газометрії становлять без-

посередні вимірювання вільного газу в регулярній системі спостережень в атмосфері ґрунтового середовища, їх статистичні характеристики і розрахункові показники загазованості. За результатами газометричних досліджень сформовано схему газометричних спостережень і карти вмісту метану, сумарного вмісту вуглеводневих газів, нижньої та верхньої межі вибуховості суміші вуглеводневих газів. Для оперативного отримання первинної об'єктивної інформації із розрахунком на її перспективне споживання здійснено газометричне вивчення в межах житлового фонду села Розвадів та прилеглої території на площі 0,65 км² саме вуглеводневих газів вільного стану в ґрунтовому середовищі на глибині 0–0,75 м.

Випробування вільного газу, здійснене із глибини 0,75 м, є достатньо ефективним і високопродуктивним способом. Воно полягає у вакуумуванні підповерхневої атмосфери за допомогою абсолютно герметичного пристрою. Пристрій складається із перфорованої в нижній частині трубки, виготовленої із хроматографічної колонки із нержавіючої сталі, вакуумного шланга і вакуумного насоса. Внутрішній діаметр трубки трохи більший за 5 мм. Вакуумували 250 см³ підповерхневої атмосфери у вакуумі – 1 атм., з яких 10 см³ газу консервувалось в герметичному флаконі місткістю 15 см³, попередньо заповненому насиченим розчином хлористого натрію. Така технологія дала змогу відновити десятикратне повторення аналізу однієї проби, що істотно підвищує надійність і точність.

Площа виконаного газогрунтового знімання становить 1300×500 м. Система спостережень утворює регулярну сітку 100×125 м, а в межах житлового масиву 50×62,5 м, та становить 102 пункти пробовідбору. Відібрано також одну пробу газоповітряної суміші із колодязя. Вакуумна система відбирання проб газу оснащена самоконтролем і гарантує абсолютну герметичність. В разі порушення герметичності система спрацьовує на відмову, пробовідбір не відбувається. Високочутлива газоаналітична апаратура дає змогу визначати мінімальні концентрації вуглеводневих газів і створює реальну можливість системного аналізу поля концентрацій та їх формалізованих показників. Якісний склад вивчених вуглеводневих газів такий: метан, етан, етилен, пропан, пропилен, ізобутан, нормальний бутан, ізопентан, нормальний пентан, а також гексан та вищі.

Дуже важливим етапом у технології створення газометричної інформації є газова хроматографія. Це найефективніший із фізико-хімічних методів розділення суміші речовин, яке переважає багатеразове повторення процесу розділення компонентів між двома фазами – нерухомою, з великою поверхнею, і рухомою, що переміщується щодо першої. Газова хроматографія як основний метод дослідження складу природних газів є різновидом хроматографічного методу розділення легких з'єднань, у якому рухомою фазою є газ, а нерухомою фазою – твердий сорбент. Хроматограма стає джерелом інформації про склад аналізованої суміші. Якісний аналіз ґрунтується на сталості часу виходу кожного компонента із роздільної колонки, відрахованого з моменту введення проби до моменту реєстрації компонента на хроматограмі. Кількісну характеристику аналізованих речовин дають виміри висоти або площі піків. Залежність висоти або площі піка від концентрації, а також часу виходу окремих компонентів встановлюють попереднім калібруванням, здійснюваним за штучно підготовленими контрольними сумішами або за чистими газами.

Ураховуючи такі умови, вимірювання на хроматографічному газовому комплексі концентрацій

вуглеводів у газоповітряних сумішах порід, взятих на території села Розвадів, Стрийського району Львівської області виконувала лабораторія моніторингових досліджень СОДІМД ПАТ “УКРНАФТА”.

Результати вуглеводневих газометричних визначень в атмосфері підповерхневого повітря в межах території села Розвадів наведені на відповідних картах, зокрема сумарного вмісту вуглеводневих газів (рис. 4).

У тексті розглянемо лише деякі статистичні характеристики основних показників загазованості. Мінімальні значення вмісту метану в пунктах відбору проб становлять $0,706 \cdot 10^{-4} \% \text{ об.}$, а максимальні $171,345 \cdot 10^{-4} \% \text{ об.}$ Також варто відзначити, що в пробі із криниці встановлено найвищий вміст, а саме $540,538 \cdot 10^{-4} \% \text{ об.}$ Мінімальні значення сумарного вмісту вуглеводневих газів становлять $1,477 \cdot 10^{-4} \% \text{ об.}$, максимальні – $123,854 \cdot 10^{-4} \% \text{ об.}$ [Нафтогазовий..., 2023].

Аналіз максимальних значень вуглеводневих газів свідчить, що вміст вуглеводневих газів вільного стану в атмосфері ґрунтового середовища території села Розвадів, враховуючи найвище значення у криниці, в десятки разів нижче від нижньої межі вибуховості суміші вуглеводневих газів. Диференційних зв'язків між свердловиною Рудниківська – 13 та газопроявами в с. Розвадів не спостерігається.

Окремим розділом газогрунтового знімання є *визначення показників вибуховості та ступеня загазованості*.

Основні показники вибуховості природних газів – нижня та верхня межі вибуховості, тобто ті межі та концентрації, за яких вони утворюють вибухову суміш із повітрям. Нижня межа характеризується кількістю газу, достатньою для нормального перебігу реакції горіння. Нижня межа вибуховості вуглеводневого газу відповідає такій концентрації газу в газоповітряній суміші, за якої подальше зменшення його робить суміш невибуховою.

Верхня межа вибуховості характеризується вмістом повітря (кисню), що є недостатнім для нормального проходження реакції горіння вуглеводнів. Верхня межа вибуховості відповідає такому вмісту вуглеводнів у газоповітряній суміші, за якої у разі подальшого його збільшення суміш стає невибуховою.

За концентрації вуглеводневого газу в повітрі від нижньої межі до верхньої межі й за наявності джерела спалахування (відкритого вогню від запаленого сірника, цигарки, іскри) станеться вибух. Якщо ж вуглеводнів в повітрі менше від нижньої межі вибуховості або більше від верхньої межі, то така суміш не здатна вибухати. Струмін газовой суміші, концентрація вуглеводнів у якому перевищує верхню межу вибуховості, надходячи в атмосферу і змішуючись із повітрям, згорає спокійним полум'ям.

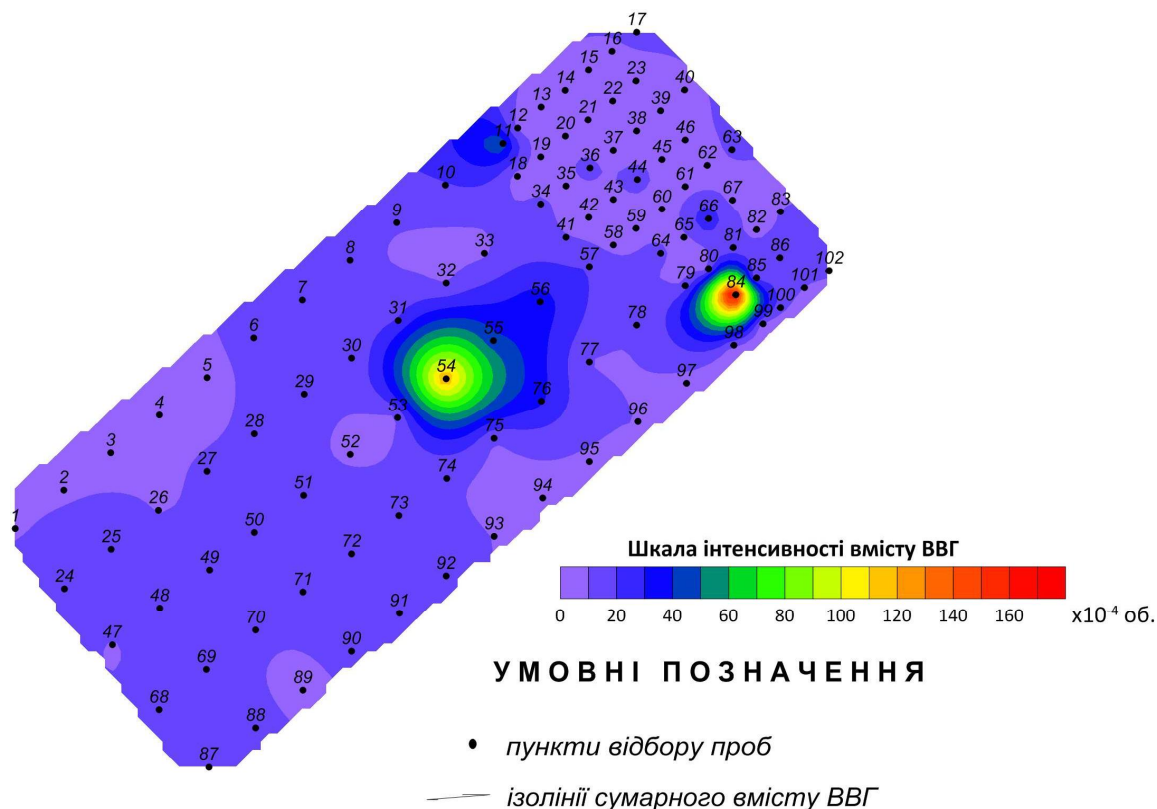


Рис. 4. Карта сумарного вмісту вуглеводневих газів у ґрунтовому середовищі територій с. Розвадів

Ці межі вмісту (об'ємні відсотки) природного газу (в суміші з повітрям) і його компонентів у повітряному середовищі наведено у відповідних нормативних документах, зокрема в табл. 1.

Оскільки досліджувані природні гази є багатокомпонентними сумішами індивідуальних вуглеводнів, то розрахунок нижньої та верхньої меж вибуховості таких сумішей в об'ємних процентах виконано за формулами:

$$L_{\text{сум}} = \frac{\sum_{i=1}^N C_i}{\sum_{i=1}^N \frac{C_i}{L_i}}, \quad (1)$$

$$U_{\text{сум}} = \frac{\sum_{i=1}^N C_i}{\sum_{i=1}^N \frac{C_i}{U_i}}, \quad (2)$$

де L_i – нижня межа вибуховості i -го компонента суміші; U_i – верхня межа вибуховості i -го компонента суміші; C_i – вміст i -го компонента в суміші.

Значення нижньої та верхньої меж вибуховості для кожного індивідуального компонента можна підібрати за табл. 1.

Наведені формули розрахунків меж вибуховості справедливі для умов атмосферного тиску.

Якщо тиск нижчий від атмосферного, концентраційні межі вибуховості звужуються, а коли тиск перевищує атмосферний – межі розширюються.

Зроблено загальний висновок про вуглеводневу вибухонебезпечність території села Розвадів та його флангів – у напрямку свердловини 13-Рудниківська: в атмосфері ґрунтового середовища вибухонебезпечні концентрації вуглеводневих газів відсутні [Нафтогазовий..., 2023].

Таблиця 1

Межі вибуховості окремих вуглеводнів у повітрі

Вуглеводень	Межа вибуховості, об'ємні %	
	верхня	нижня
природний газ (відносна густина 0,6)	4,5	14,5
метан	4,4	17,0
етан	2,9	13,0
пропан	2,1	9,5
н-бутан	1,8	8,4
і-зобутан	1,8	8,4
н-пентан	1,4	8,3
і-зопентан	1,4	8,3
гексан	1,2	7,7

Результати досліджень методом природного імпульсного електромагнітного поля Землі

Дослідження методом природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПІЕМПЗ) останнім часом усе частіше застосовують для вирішення таких інженерно-екологічних і геолого-екологічних завдань [Довбніч та ін, 2012; Kuzmenko, et al, 2018; Bagriy, et al, 2017; Дзьоба, 2020; Дешиця та ін., 2016]:

- якісне оцінювання загального природного поля механічних напруг і простеження його динаміки під час режимних спостережень;
- оперативне виявлення та прогнозування небезпечних геологічних процесів і явищ (зсувів, карсту, гірничих ударів, суфозії, обвалів, викидів у шахтах);

– визначення активізації геодинамічних структур картування та характеристика зон розломів;

– обстеження житлових будівель, господарських приміщень, споруд і комунікацій для встановлення можливих деформацій фундаментів, стін і конструкцій.

Фактичні роботи виконано за наведеними нижче етапами.

Дослідження на території, що охоплює свердловину 13-Рудниківську, ділянку села Розвадів та площу між ними.

Зазначені дослідження виконано на території розмірами 1300×500 м (рис. 5). Частоти досліджень 2–16 кГц вибрано так, щоб досягти максимальних глибин досліджень – понад сотні метрів. Як видно на картах карт, напрям антен не впливав на результативність.

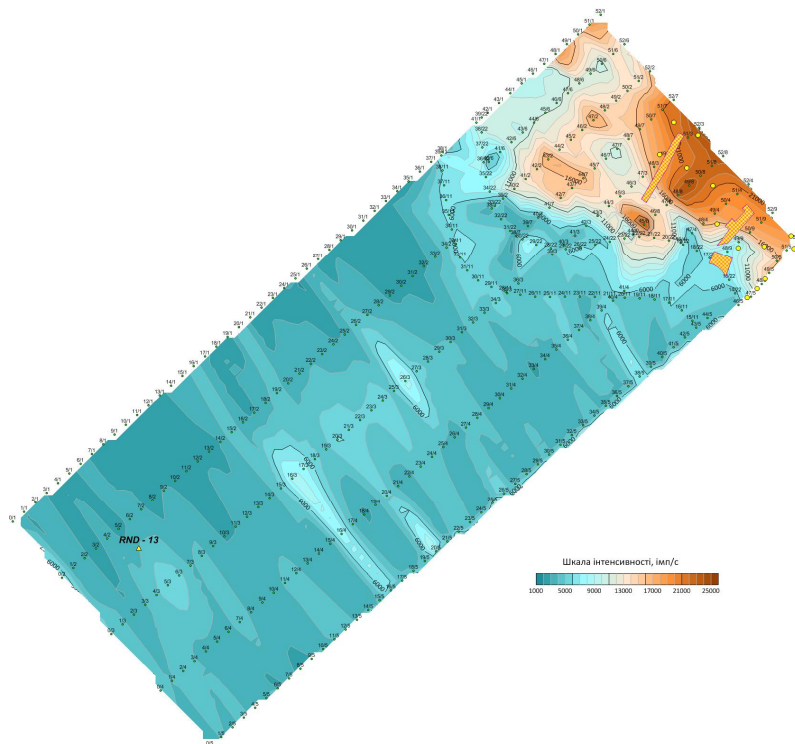


Рис. 5. Повний вектор електромагнітного поля Т, ділянка між свердловиною № 13 – Рудниківською та с. Розвадів

Частина території, розташована на правому березі Дністра (де розміщена свердловина), абсолютно однорідна за інтенсивністю ПІЕМПЗ. Зміни інтенсивності спостерігаються у межах 3000–5500 імпл./с, тобто практично без диференціації за інтенсивністю. Об'єктивний візуальний аналіз карт для цієї частини території дає підстави стверджувати, що ніякого зв'язку між свердловиною та селом Розвадів немає. Виникає запитання: як пояснити виразні аномалії ПІЕМПЗ на території с. Розвадів? Усі ці аномалії розміщені на лівому березі Дністра. Пояснення, на наш погляд, таке. Виразна межа, що відділяє “безаномальну” територію від аномальної, повністю збігається із контактом Передкарпатсь-

кого прогину зі Східно-Європейською платформою. Зміна електричного опору (збільшення його) на території платформи призводить до збільшення інтенсивності випромінювання електромагнітного поля Землі. Це доведено теоретично та практично, що відображено у наших звітах з наукових робіт [Нафтогазовий..., 2023]. Звичайно, границя прогину та платформи є точнішою – унаслідок більшого масштабу робіт і, відповідно, щільнішої сітки спостережень. Лівобережна аномалія не є однорідною, можна чітко розрізнити дві ділянки. Північно-західна, західна і південна її частини менші за інтенсивністю і притаманні суто платформі. Східна і південно-східна її частини відрізняються

підвищеною інтенсивністю, а головне, територіально узгоджуються з ділянками прояву газу. Отже, це аномалії, що відповідають техногенним явищам під час викиду газу.

Детальні дослідження на території села Розвадів.

Детальні дослідження ми виконали на території, де зафіксовано газопрояви, на всіх використаних частотах: 36–50 кГц, 16–36 кГц, 2–16 кГц. Фізичний зміст застосування різних частот полягає в тому, що зменшення частоти призводить до збільшення глибини досліджень. Результати досліджень наведено на рис. 6. Частоти 36–50 кГц (рис. 4, в) відповідають глибини перших метрів. На цих частотах спостерігаються пов'язані з приповерхневими породами невиразні випадкові ано-

мальні зони, які ніяк не узгоджуються із наслідками газопровів. Тобто ці глибини не пов'язані із причинами небезпечної ситуації. Частоти 16–36 кГц (рис. 6, б). ймовірно, відповідають глибині залягання четвертинних алювіальних утворень, а також припокрівельній частині порід платформи. Тому вони, по-перше, узгоджуються зі структурним планом платформи, і по-друге, закривають території алювію. Тобто газ, виділяючись, розподілявся деякий час по четвертинних відкладах. За аномаліями глибинні джерела гейзерів, які відповідають частотам 2–16 кГц (рис. 6, а), характеризують глибинні аномалії та повністю збігаються за конфігурацією з територією розташування колодязів, що “газували”. У межах аномалій розташовані пошкоджені будівлі в с. Розвадів.

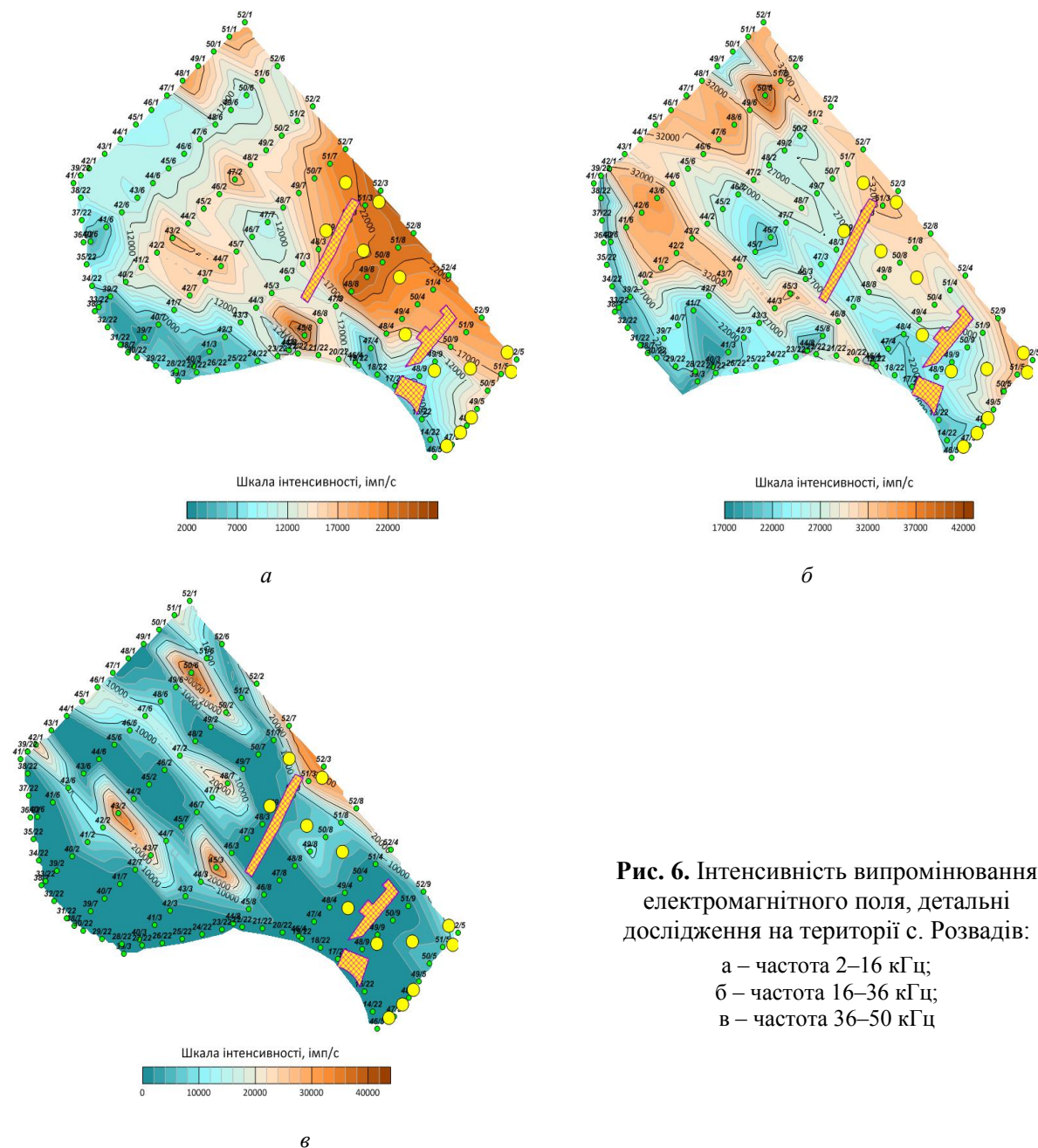


Рис. 6. Інтенсивність випромінювання електромагнітного поля, детальні дослідження на території с. Розвадів:

а – частота 2–16 кГц;

б – частота 16–36 кГц;

в – частота 36–50 кГц

Дослідження напружено-деформованого стану порід на ділянці буріння.

Для оцінювання напружено-деформованого стану (НДС) порід на ділянці буріння використано метод скінченних елементів (МСЕ). Мета роботи – оцінювання впливу істотного підвищення тиску в свердловині (до 50 МПа) на стан прилеглої товщі порід.

Моделювання здійснено по профілю, спрямованому від свердловини на північний схід, тобто в напрямку до с. Розвадів.

Базові фізико-механічні характеристики матеріалу – модуль пружності E , коефіцієнт Пуассона μ , границі міцності за стиску σ_M^C та розтягу σ_M^P . Для описання плоского деформованого стану достатньо двовимірної моделі. Параметром для оцінювання НДС ділянки вибрано Safety Factor (SF). Цей параметр визначають за рівнянням

$$SF = \frac{[\sigma]}{\sigma_{eq}},$$

де $[\sigma]$ – гранично допустиме напруження; σ_{eq} – еквівалентне напруження згідно із вибраною гіпотезою міцності.

Для таких крихких матеріалів, як пісковики та алевроліти, із істотно різною границею міцності на стиск і розтяг, найприйнятніша гіпотеза міцності Мора, згідно з якою міцність забезпечується за умови:

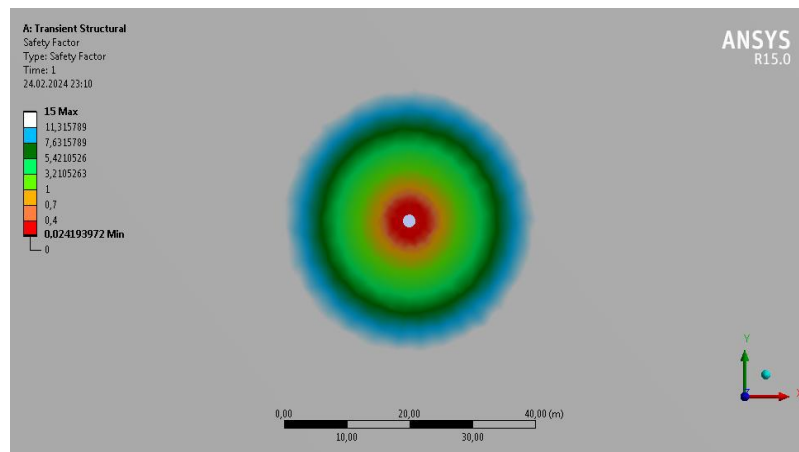
$$\sigma_{eq} = \sigma_1 - \nu \sigma_3 \leq [\sigma] = \sigma_M^P, \quad \nu = \frac{\sigma_M^P}{\sigma_M^C};$$

де σ_1, σ_3 – головні напруження.

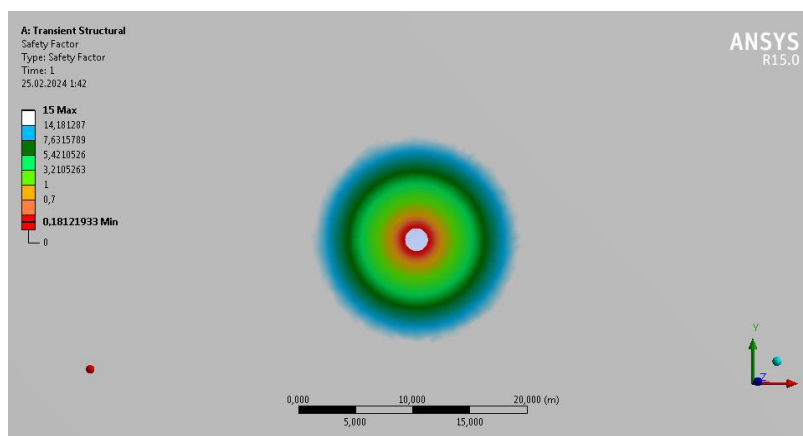
Зрозуміло, що тріщинуватість ділянки буде високою, якщо $SF \leq 1$.

Результати моделювання наведено на рис 7.

Як показав аналіз результатів моделювання напружено-деформованого стану порід, для реального розрізу (переважно алевролітів та пісковиків) підвищення тиску на площі під час буріння поширювалось на відстань лише 30–40 м від свердловини.



а)



б)

Рис. 7. Вплив підвищення тиску в свердловині до 50 МПа на НДС порід:

а – алевроліти; б – пісковики

Обговорення результатів

На наш погляд, перелічені факти свідчать на користь того, що джерелом газогрязьових викидів є окремий приповерхнево-прирозломний газовий поклад незначних розмірів.

Тоді виникає наступне запитання – що слугувало поштовхом активізації цього покладу? Можливі три відповіді:

- 1) збільшена активність газового покладу, порушеного свердловиною 13-Рудниківською, і зв'язок цієї активності з грязьовим вулканізмом;
- 2) регіональні причини (сейсмічна активність території);
- 3) збільшення сонячної активності.

Розглянемо ці гіпотези послідовно.

Виникнення надзвичайної ситуації в с. Розвадів унаслідок впливу буріння свердловини 13-Рудниківська виключено. Це доведено результатами газогрунтового знімання, електромагнітними дослідженнями та моделюванням аномалії пластового тиску на території, прилеглій до свердловини.

Проаналізовано сейсмічну активність території, до якої належить Рудниківська площа та Розвадівська територія. Найближча сейсмічна станція, яка дала інформацію щодо сейсмічних обставин, – Моршинська, розташована приблизно за 40 км від території надзвичайної ситуації. Проте вночі з 26 на 27 квітня на станції фіксували сейсмічну тишу. Отже, припущення щодо одночасового впливу сейсмічної хвилі не видається обґрунтованим.

Єдина надрегіональна причина, яку можна розглядати як імовірну – це зміна сонячної активності, яка є однаковою для Рудниківської площі та Розвадівської території. Кількість сонячних плям змінилась з 25 квітня до 27 квітня 2023 року від 72 до 110. Це доволі істотна зміна. Наші детальні дослідження змін сонячної активності під час вивчення зсувів, селів і карсту показали, що аналогічна зміна кількості сонячних плям за такий короткий період відбувалась у 2023 р. три рази і впливала на екзогенні геологічні процеси. Отже, ця гіпотеза не є ординарною і має право на існування, якою б неймовірною не здавалась.

Практична значущість

Інтерпретація одержаних результатів дає підстави визначити причини надзвичайної геологічної події на Розвадівській площі Львівської області, класифікувати подію та її наслідки як прояв елементів грязьового вулканізму, встановити відсутність зв'язку зазначеної події з техногенним порушенням (бурінням) геологічного середовища на сусідніх ділянках.

Висновки

Аналіз максимальних значень вуглеводневих газів свідчить про те, що вміст вуглеводневих газів вільного стану в атмосфері ґрунтового середовища

території села Розвадів в десятки разів менший від нижньої межі вибуховості суміші вуглеводневих газів. Диференційованих зв'язків між свердловиною Рудниківська-13 та газопроявами в с. Розвадів не спостерігається. Загальний висновок про вуглеводневу вибухонебезпечність території села Розвадів такий, що в ґрунтовому середовищі вибухонебезпечні концентрації вуглеводневих газів відсутні.

Дослідження за методом ПЕМПЗ дають змогу розділити територію на три яскраво виражені зони:

1) зона правобережжя р. Дністер, на якій розташована свердловина № 13 – Рудниківська і яка в структурному плані належить до Прикарпатського прогину;

2) зона лівобережжя р. Дністер, на якій міститься територія с. Розвадів і яка в структурному плані належить до Східно-Європейської платформи;

3) зона лівобережжя р. Дністер, де розташована територія, уражена унаслідок газопроявів у с. Розвадів.

Зв'язок між свердловиною № 13 – Рудниківська та аномальним полем ПЕМПЗ не виявлено. Припускаємо, що газові прояви в с. Розвадів спричинені наявністю окремого прирозломно-приповерхневого газового покладу незначних розмірів, який розташований у межах стику Передкарпатського прогину та Східно-Європейської платформи, що є сейсмічно активною зоною. Розвантаження цього покладу відбулось у вигляді газогрязьових викидів та подальших провалів земної поверхні. Однозначно можна стверджувати, що на цій території є елементи грязьового вулканізму. На час досліджень спостерігався підвищений рівень напружено-деформованого стану в с. Розвадів, тобто масив гірських порід не є повністю розвантаженим. Зокрема інтенсивність електромагнітного випромінювання у аномальних зонах села розвалів досягає 22000 імп./с порівняно із фоновими значеннями, що становлять 5000–6000 імп./с поза межами села. Тому можливі подальші прояви газових викидів або просідання земної поверхні. Проте ці процеси з часом загасатимуть. Тому доцільні будь-які роботи, що сприяють дегазації масиву гірських порід і зменшенню ризику витоків газу на поверхню. Отже, логічними є висновок щодо необхідності моніторингу таких досліджень в областях газогрязьового вулканізму та доцільності здійснення їх в аналогічних умовах.

Список літератури

- Георозвідка ТОВ (2019). Уточнений проект пошуково-розвідувального буріння на рудниківській площі (Львівська область, Україна). Львів.
- Довбніч М. М., Стовас Г. М., Канін В. О. (2012). Спостереження ПЕМПЗ і вертикального градієнту магнітного поля Землі на полі шахти ім. О. Ф. Засядька. *Наукові праці УкрНДМІ НАН України*, 10. С. 342–348.

- Дешиця С. А., Підвірний О. І., Романюк О. І., Садовий Ю. В., Коляденко В. В., Савків Л. Г., Мишишин Ю. С. (2016). Оцінка стану екологічно проблемних об'єктів Калуського гірничо-промислового району електромагнітними методами та їх моніторинг. *Наука та інновації*, No. 5. С. 47–59.
- Дзьоба У. О. (2020). Ефективність застосування методу ПЕМПЗ для моніторингу стану геологічного середовища при вирішенні прикладних інженерних задач. *Вісник Одеського національного університету*. Том 25. № 2(37) С. 238–253. [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2020.2\(37\).216574](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2020.2(37).216574)
- Дяків В. О., Павлюк В. І., Яремович М. В. (2023). Геологічні прояви, ймовірні природні та техногенні чинники активізації грязевого вулканізму в ніч з 26 на 27 квітня 2023 р. у с. Розвадів Стрийського району Львівської області. Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування: матеріали VIII міжнар. наук.-практ. конференції. С. 470–477.
- Нафтогазовий науково-технологічний парк ТОВ (2023). Звіт про науково-дослідну роботу “Дослідження методами імпульсного електромагнітного поля Землі та газогрунтової зйомки для контролю напруженого стану гірських порід і ступеня загазованості природного середовища на території с. Розвадів з метою надання рекомендацій щодо дегазації масиву гірських порід та зменшення ризику витоку газів і рідин на поверхню”. Івано-Франківськ.
- Artym I. V., Kurovets S. S., Zderka T. V., Yarema A. V., & Kurovets I. M. (2019). Development of the rocks fracturing model on the Carpathian region example. Conference Proceedings, *18th International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*, <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902064> Retrieved from www.scopus.com
- Bagriy S., Kuzmenko E., & Motkalyk A. (2017). Prediction of karst cave-in processes at the Solotvyno rock salt deposit applying geophysical methods. The *16th International Conference Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201701892> Retrieved from www.scopus.com
- Bagriy I. D., Kuzmenko S. O., Naumenko Uliana, & Zubal S. D. (2019). New technology for exploration of hydrogen accumulations and forecast of geodynamic phenomena, 1–4. 10.3997/2214-4609.201903188.
- Baillie J., Risk D., Atherton E., O'Connell E., Fougère C., Bourlon E., & MacKay K. (2019). Methane emissions from conventional and unconventional oil and gas production sites in southeastern Saskatchewan, Canada. *Environmental Research Communications*, 1(1), 011003. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ab01f2>
- Busetti, M., Geletti, R., Civile, D., Sauli, C., Brancatelli, G., Forlin, E., ... & Cova, A. (2024). Geophysical evidence of a large occurrence of mud volcanoes associated with gas plumbing system in the Ross Sea (Antarctica). *Geoscience Frontiers*, 15(1), 101727. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101727>.
- Gryga M. Y., Bagriy I. D., Starodubets K. M., & Semenyuk V. G. (2016, May). Geochemical data analysis and prediction of hydrocarbon accumulation in the territory of Rotmistrovka impact structure. In *15th EAGE International Conference on Geoinformatics-Theoretical and Applied Aspects* (Vol. 2016, No. 1, pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201600512>.
- Fedoriv V., Bagriy S., Piatkovska I., Femyak Y., Trubenko A. (2019) Petrophysic model for determin clayness of rocks by the results of complex geophysical researches. *18th International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*, <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902116> Retrieved from www.scopus.com
- Ftemov Y. M., Fedoriv V. V. & Maniuk V. M. (2021) Petrophysical models for estimating filtration-capacity parameters of complex reservoir rocks at Kachalivske oil and gas condensate field. The *XXth International Conference “Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*, <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521017> Retrieved from www.scopus.com
- Kopf A. J. (2002). Significance of mud volcanism. *Reviews of Geophysics*, 40. <https://doi.org/10.1029/2000RG000093>
- Kuzmenko E. D., Bahrii S. M., Dzioba U. O. The depth range of the Earth's natural pulse electromagneticfield (or ENDEMF). *Journal of Geology, Geography and Geology*. Dnipro, 2018. 27 (3), 466–477. <https://doi.org/10.15421/111870>.
- Mazzini A. (2009). Mud volcanism: Processes and implications. *Marine and Petroleum Geology*, 26, 1677–1680. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.05.003>
- Panahi B. M. (2005). Mud Volcanism, Geodynamics and Seismicity of Azerbaijan and the Caspian Sea Region. In: Martinelli, G., Panahi, B. (eds) *Mud Volcanoes, Geodynamics and Seismicity. NATO Science Series*, Vol. 51. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/1-4020-3204-8_7
- Riznychuk, A. I., Famyak, Ya. M., Fedoriv, V. V., Charkovskyi, V. M., Deineha, R. O. & Stetsiuk, R. B. (2021). Technical and technological solutions to prevent destruction of the walls of directional wells in the mining and geological conditions of Ukrainian fields. Conference Proceedings, *15th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K2041> Retrieved from www.scopus.com
- Sechman, H., Mościcki, W. J., & Dzieniewicz, M. (2013). Pollution of near-surface zone in the vicinity of gas wells. *Geoderma*, 197, 193–204. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.01.012>

- Sechman, H. (2022). Detailed analysis of gaseous components in soil gases around petroleum wells-An effective tool for evaluation of their integrity. *Applied Geochemistry*, 142, 105346. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105346>
- Schütze C., Vienken T., Werban U., Dietrich P., Finizola A., & Leven C. (2012). Joint application of geophysical methods and Direct Push-soil gas surveys for the improved delineation of buried fault zones. *Journal of Applied Geophysics*, 82, 129–136. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2012.03.002>
- Toutain, J. P., & Baubron, J. C. (1999). Gas geochemistry and seismotectonics: a review. *Tectonophysics*, 304(1–2), 1–27.. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(98\)00295-9](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)00295-9)
- Yarema A. V., Zderka T. V., Kurovets S. S., Khovanets N. P. (2020) Gas-geochemical predicting and system assessment of oil and gas prospects for the purpose of increasing exploration efficiency. *Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo148>
Retrieved from www.scopus.com
- Vyzhva, Serhii, Solovyov I., Mykhalevych I., Kruhlyk, Viktoriia, & Lisny G. (2021). Use of direct hydrocarbon indicators for forecasting hydrocarbons deposits, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K2109>.
- Zarroca, M., Linares, R., Bach, J., Roqué, C., Moreno, V., Font, L., & Baixeras, C. (2012). Integrated geophysics and soil gas profiles as a tool to characterize active faults: the Amer fault example (Pyrenees, NE Spain). *Environmental Earth Sciences*, 67, 889–910. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1537-y>

Eduard KUZMENKO^{1a}, Ihor CHUDYK², Sergiy BAGRIY^{1b}, Andrii YAREMA³, Yurii NESPLIAK⁴, Ihor CHEPURNYI^{1c}, Volodymyr ARTYM⁵

¹ Department of Geodesy and Land Management, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15, Karpatska str., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine, tel. +380(342)50-47-61, e-mail: gbg2020@ukr.net; ^{1a} <https://orcid.org/0000-0002-1994-0970>. ^{1b} <https://orcid.org/0000-0003-1190-6222>, ^{1c} <https://orcid.org/0000-0003-2109-3827>

² Rector, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15, Karpatska str., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine, tel. +380 (342) 72-47-16, e-mail: rector@nung.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-7402-6962>

³ Department of Geology and Exploration of Oil and Gas Fields, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15, Karpatska str., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine, tel. +38 (0342) 72-71-21, e-mail: 05.03.1982@ukr.net

⁴ Department of Oil and Gas Well Drilling, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15, Karpatska str., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine, tel. +38 0342 72-71-37, e-mail: y.nespliak@gaz.net.ua

⁵ Department of Construction and Civil Engineering, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 1, Karpatska str., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine, tel. +38 (0342)57-24-04, e-mail: viartym@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8938-552X>

USE OF A COMPLEX OF GAS-GROUND SURVEYING AND GEOPHYSICAL RESEARCH FOR SOLVING THE PROBLEM OF DEFINING THE TERRITORY OF MUD VOLCANISM WITHIN ROZVADIV AREA IN LVIV OBLAST

The purpose of the research is to substantiate the scientific basis behind the formation of a mud volcano within a specific section of the Precarpathian depression. It also aims at examining the existence of a near-fault shallow gas deposit in the Rozvadiv area and its possible impact on gas-soil surveying and electrometry fields. The relevance of the work is determined by the need to solve the ecological problem of environmental pollution with hydrocarbon gases, as well as to establish and forecast the degree of emissions of the gas-mud mixture. At the same time, the problem of the presence (or absence) of the relationship between the influence of the Rudnyk gas-prospecting area, which is impacted by drilling, and the Rozvadiv deposit mentioned above is solved by comparing the results of gas-soil and geophysical surveys on a significant territory covering the specified areas. The research methodology consists of the following: 1) application of research with different physical justifications (gas-soil survey and electrometry); 2) comparison of the survey results from the same area and the same grid of observations; 3) detection of anomalies within the studied territory and their interpretation from the point of view of the development of mud volcanism. Research results. The information basis of gasometry involves direct measurements of free gas in a observation regular system in the the soil environment atmosphere,

their statistical characteristics, and calculated indicators of gas contamination. Therefore, the gas distribution maps are informative. The applied research using the method of Earth's natural pulsed electromagnetic field made it possible to differentiate the area according to the intensity degree of electromagnetic radiation, taking into account the different depths of the sources, and, thus, identify areas of stressed-strain state of rocks and qualify them by the causes. The scientific novelty lies in the following: 1) indicating the absence of connections between the massif impacted by drilling and a natural disaster; 2) specifying the causes of the natural disaster and its substantiated mechanism and classifying the event as a mud volcano. Practical significance. Interpretation of the obtained results makes it possible to determine the causes of the extraordinary geological event in the Rozvadiv area of the Lviv region, classify the event and its consequences as a manifestation of elements of mud volcanism, and establish the absence of a relationship between the specified event and man-made impact (drilling) of the geological environment in the neighbouring areas.

Key words: gas-soil survey; electromagnetic field radiation intensity; stress state; mining massif; deformations; well; mud volcano.

Надійшла 11.03.2024 р.