

© Д.В. Кулікова<sup>1</sup>, О.О. Борисовська<sup>1</sup>, А.Г. Рудченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

## СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ЕКОЛОГІЧНОГО ВПЛИВУ ВИДОБУТКУ ПРИРОДНОГО ГАЗУ З УРАХУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЕТАПІВ

D. Kulikova<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0003-0874-0188>

O. Borysovska<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0001-7309-0236>

A. Rudchenko<sup>1</sup> <https://orcid.org/0009-0000-1850-3712>

<sup>1</sup>Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

### SYSTEMATIC ANALYSIS OF THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF NATURAL GAS EXTRACTION CONSIDERING TECHNOLOGICAL STAGES

**Мета.** Метою роботи є системний аналіз екологічного впливу видобутку природного газу з урахуванням послідовних технологічних етапів газовидобувної діяльності, ідентифікація основних джерел техногенного навантаження та інтегральна оцінка екологічних ризиків для компонентів довкілля.

**Методика.** Дослідження виконано із застосуванням системного, порівняльного та аналітико-узагальнювального підходів. Методологічну основу становив поетапний аналіз газовидобувної діяльності в межах повного технологічного циклу з урахуванням причинно-наслідкових зв'язків між технологічними процесами, джерелами забруднення та наслідками для компонентів довкілля.

**Результати.** Встановлено, що газовидобувна діяльність характеризується комплексним техногенним навантаженням, інтенсивність і характер якого істотно змінюються залежно від технологічного етапу. Визначено, що найбільш екологічно небезпечними стадіями є буріння свердловин і гідророзрив пласта, для яких характерне поєднання високої інтенсивності впливу, значної тривалості наслідків і ускладнених процесів відновлення. Порівняльний аналіз показав, що повітря є найбільш уразливим до хронічних дифузних викидів метану, водні ресурси – до локальних, але тривалих хімічних забруднень, а ґрунтовий покрив – до комбінованого механічного й хімічного навантаження з повільними темпами самовідновлення.

**Наукова новизна.** Полягає у розвитку системно-матричного підходу до оцінювання екологічних наслідків видобутку природного газу шляхом інтеграції показників інтенсивності техногенного впливу, тривалості забруднення та складності природного відновлення компонентів довкілля в межах повного технологічного циклу газовидобутку. Вперше виконано комплексну інтегральну оцінку екологічних ризиків за окремими технологічними етапами газовидобувної діяльності.

**Практична значимість.** Полягає у можливості використання запропонованих аналітичних матриць екологічних впливів і ризиків як інструменту попередньої екологічної оцінки під час планування, експлуатації та завершення газових родовищ, а також для обґрунтування заходів екологічного моніторингу та управління ризиками.

**Ключові слова:** природний газ, газовидобуток, екологічний вплив, екологічні ризики, матричний аналіз, компоненти довкілля.

**Вступ.** Видобуток природного газу є одним із ключових напрямів розвитку паливно-енергетичного комплексу України та важливою складовою забезпечення енергетичної безпеки держави. Водночас газовидобувна діяльність супроводжується значним техногенним навантаженням на довкілля, що проявляється у забрудненні атмосферного повітря, водних ресурсів і ґрунтового покриву, порушенні природних екосистем та формуванні довготривалих екологічних ризиків [1–3]. У контексті реалізації державних програм з декарбонізації економіки, адаптації до змін клімату та впровадження принципів сталого розвитку проблема екологічної безпеки газовидобутку набуває особливої актуальності та практичної значущості.

Екологічні аспекти функціонування нафтогазової галузі широко висвітлені у наукових працях дослідників [4–11]. У наявних публікаціях розглядаються питання викидів парникових газів, зокрема метану, забруднення поверхневих і підземних вод буровими розчинами та пластовими водами, деградації ґрунтів у зоні розміщення газовидобувної інфраструктури, а також ризики, пов'язані з використанням технологій інтенсифікації видобутку. Значна частина досліджень присвячена окремим компонентам довкілля або аналізу впливу нафтогазової галузі загалом без чіткого розмежування стадій технологічного процесу видобутку природного газу.

Разом із тим, незважаючи на значний обсяг наукових напрацювань, недостатньо узагальненим залишається питання системного аналізу негативного впливу саме газовидобувної діяльності з урахуванням окремих технологічних етапів – від геологічної розвідки та буріння свердловин до експлуатації родовищ і завершення їх функціонування. У багатьох роботах екологічні впливи розглядаються фрагментарно, без встановлення причинно-наслідкових зв'язків між технологічними процесами, джерелами забруднення та їх екологічними наслідками, що ускладнює ідентифікацію найбільш екологічно критичних стадій газовидобутку.

У зв'язку з цим актуальним є застосування системного та матричного підходів до аналізу екологічних наслідків видобутку природного газу, які дозволяють узагальнити характерні види техногенного навантаження на різних етапах технологічного циклу та забезпечити комплексне бачення екологічних ризиків. Такий підхід створює наукове підґрунтя для обґрунтування пріоритетних напрямів екологічного моніторингу, контролю та природоохоронних заходів у сфері газовидобувної діяльності.

**Метою роботи** є системний аналіз екологічного впливу видобутку природного газу з урахуванням послідовних технологічних етапів газовидобувної діяльності, ідентифікація основних джерел техногенного навантаження та інтегральна оцінка екологічних ризиків для компонентів довкілля з метою подальшого обґрунтування пріоритетних напрямів екологічного контролю та моніторингу.

**Основна частина.** Процес видобутку природного газу є складним багатостадійним технологічним циклом, що включає низку послідовних етапів – від виявлення газонасних структур до завершення експлуатації родовищ. Загальну послідовність основних етапів газовидобутку наведено на рис. 1.



Рис. 1. Основні етапи видобутку природного газу

Кожен етап технологічного циклу видобутку природного газу характеризується специфічними технологічними операціями та застосуванням різних технічних засобів. Сукупність цих процесів зумовлює формування різноманітних джерел техногенного навантаження, які відрізняються за характером, масштабами та тривалістю дії. У зв'язку з цим подальший розгляд присвячено ідентифікації та систематизації джерел забруднення компонентів довкілля, що виникають на окремих етапах газовидобутку.

Газовидобувна діяльність супроводжується формуванням різнотипних джерел техногенного впливу на довкілля, характер і інтенсивність яких істотно змінюються залежно від технологічного етапу. Для систематизації цих впливів у роботі застосовано поетапний підхід, що дозволяє простежити причинно-наслідкові зв'язки між технологічними операціями, джерелами забруднення та уразливими компонентами природного середовища.

На першому етапі дослідження було виконано систематизацію основних джерел забруднення довкілля, характерних для окремих технологічних етапів видобутку природного газу. З урахуванням поетапної структури газовидобувної діяльності (див. рис. 1) для кожної стадії виробничого циклу ідентифіковано декілька потенційних джерел техногенного впливу, що формуються внаслідок різних технологічних операцій. Результати узагальнення подано в табл. 1, де кожне джерело забруднення розглянуто окремо із зазначенням можливих екологічних наслідків. Такий підхід дозволяє відобразити комплексний характер негативного впливу газовидобутку на довкілля та створює основу для подальшого матричного аналізу екологічних впливів і ризиків.

Аналіз табл. 1 показав, що кожен технологічний етап супроводжується специфічними джерелами забруднення та має потенційний негативний вплив на компоненти довкілля.

Таблиця 1

## Основні джерела забруднення довкілля на різних етапах газовидобутку

Етап	Основні джерела забруднення	Екологічні наслідки
1	2	3
1	Проведення сейсмічних робіт	зміни фізичних властивостей ґрунтів і гірських порід через застосування вібраційних та/або вибухових методів; негативний вплив на кореневі системи рослин і ґрунтові біоценози; можливі зміни гідрогеологічних умов через локальні сейсмічні коливання
	Робота техніки	викиди забруднюючих речовин; шумове та вібраційне навантаження; порушення поведінкових реакцій тварин і тимчасове витіснення чутливих видів фауни; короткострокове порушення екологічної рівноваги природних екосистем у зоні проведення робіт
2	Земляні та планувальні роботи	порушення ґрунтового покриву внаслідок зняття родючого шару та ущільнення ґрунтів; посилення ерозійних процесів та зниження водоутримувальної здатності ґрунтів; деградація рослинного покриву; тимчасове зниження біорізноманіття прилеглих екосистем
	Робота техніки, тимчасове складування матеріалів	викиди забруднюючих речовин; шумове та вібраційне навантаження; стресові реакції та витіснення тварин з прилеглих територій; можливе забруднення ґрунтів і поверхневих вод при розливах паливно-мастильних матеріалів (ПММ) або під час складування матеріалів
3	Робота бурового обладнання і допоміжної техніки, утворення бурових відходів	викиди забруднюючих речовин; шумове та вібраційне навантаження, що негативно впливає на наземну та підземну біоту; локальні зміни структури ґрунтового покриву та деградація ландшафтів у зоні бурових робіт
	Використання бурових розчинів і хімічних реагентів	забруднення ґрунтового покриву та поверхневих вод; ризик проникнення хімічних компонентів у підземні водоносні горизонти; токсичний вплив на ґрунтові мікроорганізми та водні біоценози

1	2	3
4	Робота бурової та допоміжної техніки	викиди забруднюючих речовин; шумове та вібраційне навантаження; локальні зміни структури ґрунтового покриву
	Закачування робочої рідини та відпрацьованих пластових вод	ризик забруднення підземних вод та ґрунтів; накопичення токсичних і мінералізованих сполук; вплив на підземні екосистеми та біоту; зміни гідрогеологічних умов; порушення природних процесів самоочищення водоносних горизонтів
5	Робота видобувних і компресорних установок	викиди забруднюючих речовин; шумове та вібраційне навантаження; локальні зміни мікрокліматичних умов; тимчасове порушення поведінки тварин
	Обслуговування та технічні операції на свердловині	потенційне локальне забруднення ґрунтів та поверхневих вод; зміни хімічного складу ґрунтів і вод у зоні свердловини; вплив на кореневі системи рослин і водні біоценози; локальні порушення структури ґрунтового покриву
6	Підготовка газу (сепарація, очищення, компримування)	викиди забруднюючих речовин; шумове та вібраційне навантаження; тимчасове порушення поведінки тварин; локальні зміни мікрокліматичних умов та структури ґрунтового покриву у зоні підготовчих установок
	Трубопроводи та перекачувальні станції	загроза локального та регіонального забруднення повітря; ризик забруднення ґрунтів і поверхневих вод у разі аварійних витоків або розливів конденсату; потенційний вплив на кореневі системи рослин і водні біоценози; порушення природного дренажу та мікрорельєфу на трасах і майданчиках транспортування
7	Демонтаж обладнання та утилізація технічних матеріалів	потенційне забруднення ґрунтів і поверхневих вод залишками ПММ, технічних рідин та металевих фрагментів; локальне порушення структури ґрунтового покриву та деградація рослинного покриву; тимчасове зниження біорізноманіття через втрату місць існування для наземної біоти
	Залишки бурових та промислових матеріалів на території	забруднення ґрунтів, поверхневих та підземних вод у разі витоків залишкових рідин; локальна деградація ґрунтів через накопичення побічних відходів; токсичний вплив на мікрофлору та місцеву флору і фауну; тимчасове порушення природного стану екосистем до завершення рекультивації

Найбільш інтенсивні впливи спостерігаються під час буріння свердловин, гідророзриву пласта та видобутку газу, що зумовлено як механічною дією бурового та видобувного обладнання, так і використанням хімічних реагентів та робочих рідин. Водночас етапи геологічної розвідки, підготовки майданчиків та транспортування газу характеризуються локальними і помірними впливами, що проявляється переважно в змінах структури ґрунтів, локальних викидах в атмосферу та тимчасовому впливі на біоту.

Вплив на атмосферне повітря проявляється через викиди оксидів азоту, метану та твердих часток; на поверхневі і підземні води - через потенційні витіки бурових і промислових рідин; на ґрунтовий покрив та рослинність – через ерозію, ущільнення та локальні зміни структури ґрунтів; на біоту – через шум, вібрації та тимчасове порушення природних середовищ існування.

На другому етапі дослідження виконано узагальнену оцінку екологічних впливів видобутку природного газу з урахуванням окремих технологічних етапів та основних компонентів довкілля. Для цього застосовано матричний підхід, який дозволив якісно оцінити інтенсивність негативного впливу (низький, середній, високий) на атмосферне повітря, поверхневі та підземні води, ґрунтовий покрив і біоту (табл. 2).

Таблиця 2

Матриця екологічних впливів видобутку природного газу  
з урахуванням технологічних етапів

Етап газовидобутку	Атмосферне повітря	Поверхневі води	Підземні води	Ґрунтовий покрив	Біота
1	●	●	●	●●	●
2	●●	●	●	●●●	●●
3	●●	●●	●●●	●●●	●●
4	●●	●●●	●●●	●●	●●
5	●●●	●●	●●	●●	●●
6	●●●	●	●	●	●
7	●	●●	●●	●●	●

Умовні позначення: ●●● – високий рівень впливу; ●● – середній рівень впливу; ● – низький рівень впливу

Аналіз матриці (див. табл. 2) свідчить про виражену нерівномірність техногенного навантаження на окремі компоненти довкілля протягом усього виробничого циклу. Отримані результати підтверджують, що характер і рівень екологічного впливу значною мірою визначаються специфікою технологічних операцій кожного етапу газовидобутку та умовами їх реалізації.

Найвищі рівні інтенсивності впливу зафіксовано на етапах буріння свердловин та гідророзриву пласта, які характеризуються значним навантаженням на підземні води та ґрунтовий покрив. Це пов'язано з використанням бурових розчинів, хімічних реагентів, а також високими гідродинамічними тисками, що створює підвищені ризики міграції забруднювачів у геологічному середовищі та порушення природних фільтраційних процесів.

Етап видобутку природного газу відзначається високою інтенсивністю впливу на атмосферу, що зумовлено дифузними й організованими викидами метану, супутніх газів та продуктів згоряння енергоносіїв. Вплив на поверхневі та

підземні води, а також ґрунтовий покрив на цій стадії має переважно середній характер і проявляється локально в межах промислових майданчиків.

Під час підготовки майданчиків найбільш уразливим компонентом довкілля є ґрунтовий покрив, для якого встановлено високий рівень впливу внаслідок порушення поверхневого шару ґрунту, його ущільнення та знищення рослинного покриву. Вплив на атмосферне повітря та поверхневі води на цьому етапі оцінюється як середній і має тимчасовий характер.

Для етапів підготовки газу, транспортування та зберігання характерні переважно середні або низькі рівні інтенсивності екологічного впливу, що обумовлено більш регламентованими технологічними процесами та застосуванням інженерних і організаційних заходів екологічного контролю. Водночас потенційні аварійні ситуації на цих стадіях можуть спричинити локальні, але суттєві негативні наслідки для довкілля.

Етап завершення експлуатації родовищ характеризується загалом низькими рівнями інтенсивності впливу, однак залишкові порушення ґрунтового покриву, гідрогеологічних умов і біоти зумовлюють необхідність реалізації тривалих природоохоронних та рекультиваційних заходів.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що інтенсивність екологічного впливу не завжди корелює з тривалістю та складністю природного відновлення, що обумовлює необхідність подальшого аналізу характеристик забруднення за часовими параметрами та здатністю компонентів довкілля до самовідновлення. Саме з цією метою на наступному етапі дослідження виконано оцінку тривалості впливу та складності природного відновлення компонентів довкілля, результати якої наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Характеристика компонентів довкілля за характером забруднення, тривалістю впливу та складністю природного відновлення при газовидобутку

Компонент довкілля	Характер забруднення	Тривалість екологічних наслідків	Складність природного відновлення
Атмосферне повітря	викиди метану, оксидів азоту та вуглецю, летких органічних сполук; пилове навантаження	коротко- та середньострокова	низька
Поверхневі води	забруднення завислими речовинами, нафтопродуктами, солями та реагентами	середньострокова	середня
Підземні води	засолення, забруднення буровими розчинами, компонентами рідин гідророзриву, пластовими водами	довгострокова	висока
Ґрунтовий покрив	забруднення нафтопродуктами та буровими відходами, механічне порушення, ущільнення,	довгострокова	висока
Біота	порушення середовищ існування, фрагментація екосистем, токсичний вплив забруднювачів	середньострокова та довгострокова	середня /висока

Проведений аналіз свідчить про суттєву диференціацію впливів залежно від типу природного компонента. Встановлено, що вплив на атмосферне повітря має переважно коротко- або середньостроковий характер і характеризується низькою складністю природного відновлення, що зумовлено високою динамічністю атмосфери та її здатністю до самоочищення після припинення джерел викидів.

Для поверхневих вод екологічні наслідки є переважно середньостроковими, а складність їх відновлення оцінюється як середня, що пов'язано з наявністю природних механізмів самоочищення, але водночас із залежністю від гідрологічних умов і масштабів забруднення.

Найбільш несприятлива ситуація спостерігається щодо підземних вод та ґрунтового покриву, для яких характерні довгострокові екологічні наслідки та висока складність природного відновлення. Це обумовлено повільними процесами оновлення водоносних горизонтів і ґрунтоутворення, а також можливістю тривалого збереження забруднюючих речовин у цих середовищах.

Вплив на біоту має середньо- або довгостроковий характер і характеризується середньою або високою складністю відновлення, що визначається ступенем порушення екосистем, втратою середовищ існування та адаптаційним потенціалом живих організмів.

З метою узагальнення результатів, отриманих у табл. 2 і 3, та переходу від якісної характеристики екологічних впливів до їх кількісної оцінки, на завершальному етапі дослідження було сформовано матрицю інтегральної оцінки екологічних ризиків газовидобувної діяльності з урахуванням технологічних етапів (табл. 4). Оцінювання екологічних ризиків здійснювалося на основі поєднання трьох ключових чинників: інтенсивності екологічного впливу, тривалості його дії та складності природного відновлення компонентів довкілля.

Таблиця 4

Матриця інтегральної оцінки екологічних ризиків видобутку природного газу з урахуванням технологічних етапів

Етап	Атмосферне повітря	Поверхневі води	Підземні води	Ґрунтовий покрив	Біота	R
1	1,2	1,7	2,3	2,7	2,0	2,0 (С)
2	1,5	1,7	2,3	3,0	2,3	2,2 (С)
3	1,5	2,0	3,0	3,0	2,3	2,4 (В)
4	1,5	2,3	3,0	2,7	2,3	2,4 (В)
5	1,8	2,0	2,7	2,7	2,3	2,3 (С)
6	1,8	1,7	2,3	2,3	2,0	2,0 (С)
7	1,2	2,0	2,7	2,7	2,0	2,1 (С)

Умовні позначення: Н – низький екологічний ризик; С – середній екологічний ризик; В – високий екологічний ризик

Для забезпечення порівнянності результатів усі якісні характеристики були переведені у бальну шкалу. Інтенсивність впливу (див. табл. 2), оцінювалася таким чином: низька – 1 бал, середня – 2 бали, висока – 3 бали. Тривалість впливу (див. табл. 3) приймалася як: короткострокова – 1 бал, середньострокова – 2 бали, довгострокова – 3 бали. Складність природного відновлення компонентів довкілля оцінювалася за аналогічною шкалою: низька – 1 бал, середня – 2 бали, висока – 3 бали.

Інтегральний екологічний ризик для кожного компонента довкілля на окремому технологічному етапі визначався шляхом обчислення середнього арифметичного значення трьох бальних показників (інтенсивність, тривалість, природне відновлення). Загальний екологічний ризик ( $R$ ) для відповідного етапу газовидобутку розраховувався як середнє значення інтегральних ризиків за всіма компонентами довкілля. Для інтерпретації отриманих результатів було застосовано узагальнену шкалу рівнів екологічного ризику:

- 1,0–1,5 – низький екологічний ризик (зона безпечних/керованих впливів);
- 1,6–2,3 – середній екологічний ризик (зона контрольованих, але значущих ризиків);
- 2,4–3,0 – високий екологічний ризик (зона пріоритетної екологічної небезпеки).

Аналіз результатів інтегральної оцінки екологічних ризиків видобутку природного газу з урахуванням технологічних етапів (див. табл. 4) свідчить, що потенційна екологічна небезпека формується нерівномірно протягом усього виробничого циклу та є похідною від інтенсивності техногенного впливу, тривалості екологічних наслідків і складності природного відновлення окремих компонентів довкілля. Отримані значення інтегрального показника  $R$  узгоджуються з результатами аналізу матриці екологічних впливів і дозволяють виділити етапи з підвищеним рівнем екологічного ризику.

Найвищий рівень інтегрального екологічного ризику встановлено для етапів буріння свердловин і гідророзриву пласта. Для цих стадій характерне поєднання високої інтенсивності впливу на підземні води та ґрунтовий покрив із тривалими періодами природного відновлення, що зумовлено застосуванням бурових розчинів, хімічних реагентів і значними гідродинамічними навантаженнями. Саме ці фактори формують підвищену довгострокову екологічну небезпеку зазначених етапів.

Етапи геологічної розвідки, підготовки майданчиків, видобутку природного газу, підготовки газу, його транспортування та завершення експлуатації родовищ характеризуються середнім рівнем інтегрального екологічного ризику. Для цих стадій домінують локальні або помірні за інтенсивністю впливи на атмосферне повітря, ґрунтовий покрив і біоту, а також потенційні ризики для водних ресурсів, які, як правило, мають обмежений просторовий характер і частково компенсуються регламентованістю технологічних процесів.

Етап геологічної розвідки відзначається мінімальними значеннями інтегрального ризику, що пояснюється короткочасністю впливів і відносно швидким природним відновленням компонентів довкілля. Натомість на етапах підготовки майданчиків і завершення експлуатації середній рівень ризику зумовлений залишковими порушеннями ґрунтового покриву, гідрогеологічних умов і біоти, які потребують тривалих природоохоронних та рекультиваційних заходів.

Загалом результати інтегральної оцінки підтверджують доцільність диференційованого підходу до екологічного управління газовидобувною діяльністю з концентрацією природоохоронних і моніторингових заходів на етапах буріння свердловин і гідророзриву пласта, які характеризуються найвищим рівнем екологічного ризику.

**Висновки.** 1. Встановлено, що видобуток природного газу супроводжується комплексним багатofакторним техногенним навантаженням на довкілля, інтенсивність, просторові масштаби та екологічні наслідки якого істотно змінюються залежно від технологічного етапу.

2. Систематизовано основні джерела забруднення довкілля на семи технологічних етапах газовидобутку та встановлено причинно-наслідкові зв'язки між технологічними процесами, видами антропогенного впливу й екологічними наслідками, що дозволило виділити етапи з підвищеним рівнем потенційної екологічної небезпеки.

3. На основі матриці екологічних впливів встановлено, що атмосферне повітря є найбільш уразливим до хронічних дифузних і організованих викидів на етапах видобутку та підготовки газу, водні ресурси – до локальних, але тривалих хімічних впливів, насамперед уразливими є підземні води, тоді як ґрунтовий покрив зазнає комбінованого механічного й хімічного навантаження з уповільненими темпами природного відновлення.

4. Узагальнена оцінка тривалості екологічних наслідків і складності природного відновлення показала переважання середньо- та довгострокових впливів для підземних вод, ґрунтового покриву та біоти, особливо на етапах буріння свердловин, гідророзриву пласта та експлуатації родовищ, що зумовлює підвищену екологічну вразливість цих компонентів довкілля.

5. За результатами інтегральної оцінки екологічних ризиків встановлено, що найбільш екологічно критичними етапами газовидобувної діяльності є буріння свердловин і гідророзрив пласта, для яких характерне поєднання високої інтенсивності впливу, значної тривалості екологічних наслідків і ускладнених процесів природного відновлення. Інші етапи виробничого циклу формують переважно середній рівень екологічного ризику за рахунок локального або регламентованого характеру техногенного навантаження.

6. Отримані результати можуть бути використані як науково-методичне підґрунтя для вдосконалення систем екологічного моніторингу, обґрунтування пріоритетів природоохоронних заходів і підвищення ефективності екологічного управління при плануванні, експлуатації та виведенні з експлуатації газових родовищ.

#### Перелік посилань

1. Jimoh, M. O., Arinkoola, A. O., Salawudeen, T. O., & Daramola, M. O. (2024). Environmental challenges of natural gas extraction and production technologies. In *Advances in Natural Gas: Formation, Processing, and Applications: Vol. 1. Natural Gas Formation and Extraction* (pp. 75–101). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-19215-9.00009-8>
2. Wang, S., Tang, X., Wang, J., Zhang, B., Sun, W., & Höök, M. (2021). Environmental impacts from conventional and shale gas and oil development in China considering regional differences and well depth. *Resources, Conservation and Recycling*, 167, Article 105368. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105368>
3. Costa, D., Jesus, J., Branco, D., Danko, A. S., & Fiúza, A. (2017). Extensive review of shale gas environmental impacts from scientific literature (2010-2015). *Environmental Science and Pollution Research*, 24(17), 14538–14559. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8970-0>

4. Mikos-Szymańska, M., Rusek, P., Borowik, K., Rolewicz, M., Bogusz, P., & Gluzinska, J. (2018). Characterization of drilling waste from shale gas exploration in Central and Eastern Poland. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(7), 2365–2376. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2365-8>
5. Zandi, E., Alemrajabi, A. A., Emami, M., & Hassanpour, M. (2022). Numerical study of gas leakage from a pipeline and its concentration evaluation based on modern and practical leak detection methods. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 80, Article 104890. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104890>
6. Ma, L., Hurtado, A., Eguilior, S., & Llamas, J. F. (2022). Exposure risk assessment to organic compounds based on their concentrations in return water from shale gas developments. *Science of The Total Environment*, 822, Article 153586. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153586>
7. Pereira, L. B., Sad, C. M. S., Castro, E. V. R., Filgueiras, P. R., & Lacerda, V. (2022). Environmental impacts related to drilling fluid waste and treatment methods: A critical review. *Fuel*, 310, Article 122301. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122301>
8. Howarth, R. W., Santoro, R., & Ingraffea, A. R. (2011). Methane and the greenhouse-gas footprint of natural gas from shale formations. *Climatic Change*, 106(4), 679–690. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0061-5>
9. Meng, Q. (2017). The impacts of fracking on the environment: A total environmental study paradigm. *Science of The Total Environment*, 580, 1422–1434. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.045>
10. Crow, D. J. G., Balcombe, P., Brandon, N., & Hawkes, A. D. (2019). Assessing the impact of future greenhouse gas emissions from natural gas production. *Science of The Total Environment*, 668, 1242–1258. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.048>
11. Atoufi, H. D., & Lampert, D. J. (2020). Impacts of oil and gas production on contaminant levels in sediments. *Current Pollution Reports*, 6(1), 43–53. <https://doi.org/10.1007/s40726-020-00137-5>

### ABSTRACT

**Purpose** of this study is to carry out a systematic analysis of the environmental impact of natural gas extraction, considering the sequential technological stages of gas production, to identify the main sources of technogenic pressure, and to provide an integrated assessment of environmental risks to the components of the environment.

**Methodology.** The study was conducted using systemic, comparative, and analytical–synthetic approaches. The methodological framework was based on a stage-by-stage analysis of gas production activities within the full technological cycle, considering cause-and-effect relationships between technological processes, sources of pollution, and their impacts on environmental components.

**Results.** It was established that gas production activities are characterized by a complex technogenic load, the intensity of which vary significantly depending on the technological stage. The most environmentally hazardous stages were identified as drilling and hydraulic fracturing, which are characterized by a combination of high impact intensity, long-term consequences, and complicated processes of recovery. The comparative analysis showed that air is the most vulnerable to diffuse methane emissions, water resources – to localized but long-lasting chemical contamination, and soil cover to combined mechanical and chemical loads with slow rates of self-recovery.

**Scientific novelty** lies in the development of a systemic–matrix approach to assessing the impacts of natural gas extraction through the integration of indicators of impact intensity, pollution duration, and the complexity of recovery of environmental components within the full technological cycle of gas production. For the first time, a comprehensive integrated assessment of environmental risks was carried out for technological stages of gas production activities.

**Practical significance** lies in the possibility of using the proposed matrices of environmental impacts and risks as a tool for preliminary environmental assessment during the planning, operation, and decommissioning of gas fields, as well as for substantiating measures for environmental monitoring, and risk management.

**Keywords:** *natural gas, gas extraction, environmental impact, environmental risks, matrix analysis, environmental components.*

дата першого надходження статті до видання	12.01.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	24.02.2026
дата публікації (оприлюднення)	30.03.2026