

УДК 622.24:504.064

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202406/1-06>

ФІЗИКО-ХІМІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА БУРОВИХ ШЛАМІВ ТА ЇХ ВПЛИВ НА КОМПОНЕНТИ ГЕОЛОГІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА

Заріцький В. Б., Коцюбинський А. О., Линник Д. О.,
Угриновський І. Т., Калин Т. І., Турчин О. Р.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Нафтогазова промисловість є однією з ключових галузей економіки України, проте її діяльність супроводжується значним техногенним навантаженням на довкілля. Особливу екологічну небезпеку становлять виснажені нафтові свердловини, які після припинення експлуатації залишаються потенційними джерелами забруднення геологічного середовища. Буріння та експлуатація нафтових свердловин супроводжується утворенням значних обсягів відходів, зокрема бурових шламів та відпрацьованих бурових розчинів, що містять складні суміші хімічних речовин. Бурові шлами становлять серйозну загрозу для геологічного середовища, підземних водоносних горизонтів, ґрунтового покриву та

екосистем. У роботі представлено результати фізико-хімічної характеристики бурових шламів з різних глибинних інтервалів в зоні впливу нафтових свердловин. Для визначення елементного та оксидного складу застосовано метод енергодисперсійного рентгенофлуоресцентного аналізу, що забезпечив комплексну оцінку вмісту основних компонентів та мікроелементів. Досліджено варіабельність хімічного складу бурових шламів залежно від літологічних особливостей геологічного розрізу та властивостей використовуваних бурових розчинів. Проведено оцінку впливу бурового шламу на геологічне середовище.

Ключові слова: буріння, свердловина, забруднення, буровий шлам, геологічне середовище, довкілля.

PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF DRILLING SLURRIES AND THEIR IMPACT ON COMPONENTS OF THE GEOLOGICAL ENVIRONMENT

Zaritskyi Vitaly Bogdanovych, Kotsyubynsky Andrew Olegovych, Lynnyk Diana Oleksandrivna, Ugrynovsky Ivan Tarasovych, Kalyn Tetiana Ivanivna, Turchyn Oleg Romanovych

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

The oil and gas industry is one of the key sectors of Ukraine's economy, but its activity is accompanied by a significant technogenic burden on the environment. Exhausted oil wells, which after the termination of operation, remain potential

sources of pollution of the geological environment, are a special environmental hazard. Drilling and operation of oil wells is accompanied by the generation of significant volumes of waste, in particular, drilling muds and spent drilling fluids

containing complex mixtures of chemicals. Drilling cuttings pose a serious threat to the geological environment, underground aquifers, soil cover and ecosystems. The paper presents the results of the physical and chemical characteristics of drilling muds from different depth intervals in the zone of influence of oil wells. The method of energy dispersive X-ray fluorescence analysis was used to determine the elemental and oxide composition, which provided a comprehensive assessment of the content of the main components and trace elements. The variability of the chemical composition of drilling muds was studied depending on the lithological features of the geological section and the properties of the used drilling fluids. The impact of drilling mud on the geological environment was assessed.

Key words: *drilling, well, pollution, drilling mud, geological environment, environment.*

Постановка проблеми.

Нафтогазова промисловість є однією з ключових галузей економіки України, проте її діяльність супроводжується значним техногенним навантаженням на довкілля. Особливу екологічну небезпеку становлять виснажені нафтові свердловини, які після припинення експлуатації залишаються потенційними джерелами забруднення геологічного середовища важкими металами, вуглеводнями та токсичними хімічними сполуками. Буріння та експлуатація нафтових свердловин супроводжується утворенням значних обсягів відходів, зокрема бурових шламів та відпрацьованих бурових розчинів. За різними оцінками, буровий розчин та буровий шлам разом утворюють другий за величиною обсяг залишків у розвідувально-видобувній галузі. Ці відходи містять складні суміші хімічних речовин, включаючи важкі метали (свинець, цинк, хром, кадмій, миш'як), барит, бентоніт, органічні забруднювачі та радіоактивні ізотопи. Покинуті та виснажені свердловини можуть

протікати під землею, забруднюючи ґрунтові води та поверхневі ґрунти навіть за відсутності видимих викидів на поверхні. Процеси вивітрювання бурових шламів, що складаються біля свердловин, призводять до міграції забруднювачів у навколишнє середовище, впливаючи на мікробну активність ґрунту, розчинність поживних речовин та екосистеми в цілому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Процес буріння нафтових і газових свердловин є складною та капіталомісткою операцією, що включає декілька послідовних етапів: буріння, облаштування та введення в експлуатацію свердловини. Критичним елементом успішного проведення бурових робіт є застосування бурових розчинів, які зазвичай складаються з води, глини та різноманітних хімічних добавок, включаючи біоциди, мастильні речовини та обважнювачі. Бурові розчини виконують багато важливих функцій у процесі буріння та рециркулюють між свердловиною і платформою багаторазово [4]. Однак після численних циклів використання ці рідини перетворюються на відходи, що становить серйозну екологічну проблему [7, 8].

Буровий розчин та буровий шлам разом формують другий за обсягом вид залишків у розвідувально-видобувній галузі [4]. Залишковий буровий розчин є одним з найбільших відходів нафтогазової індустрії, а його різноманітність та хімічна складність значно зросли в останні десятиліття. У процесі експлуатації буровий розчин зазнає трансформації: хімічні речовини у його складі перетворюються на забруднювачі, він контактує з сировою нафтою при досягненні продуктивного пласта, а також змішується з ґрунтовими водами, що містять солі та важкі метали [8]. Буровий шлам характеризується складним хімічним складом і містить важкі метали, барит, бентоніт, спеціальні

хімічні реагенти, вуглеводні, органічні забруднювачі та радіоактивні ізотопи. Значні обсяги бурових відходів утворюються протягом усього процесу буріння до досягнення продуктивного горизонту. При цьому у відходах часто виявляють високі концентрації важких металів, зокрема свинцю, цинку, хрому, кадмію, миш'яку та магнію. Концентрація важких металів у буровому шламi визначається типом використовуваного бурового розчину, його добавок та мінералогічним складом формацій, через які проходить свердловина [9, 12].

Згідно досліджень є дві основні групи джерел забруднення важкими металами під час буріння свердловин. На початковому етапі домінуючим фактором є літологічний склад геологічних формацій, через які проходить стовбур свердловини, тоді як на наступних етапах основним джерелом стають добавки до бурового розчину [3]. Більшість металевих компонентів бурового шламy є прямими переносами з хімічних речовин і добавок бурових розчинів на водній основі, а також з гірських порід продуктивного пласта [9]. Глибина буріння також впливає на обсяг та склад відходів, оскільки зі збільшенням глибини зростає вміст хімічних речовин та іонів важких металів у шламi [11].

Буровий шлам після завершення робіт зазвичай складається на поверхні землі, де піддається різноманітним процесам вивітрювання. Лужний характер бурового розчину сприяє інтенсивній міграції забруднювачів: при накопиченні або розливі у водоймах чи на земній поверхні токсичні речовини поширюються по всій місцевій гідросистемі та ґрунтовому покриву. Водні потоки та вітрова ерозія розсіюють забруднюючі речовини на значні відстані, що призводить до деградації не лише ґрунтових та водних екосистем, але й негативно впливає на рослинний і тваринний світ [3].

Під час буріння вертикальної розвідувальної свердловини можливе значне пошкодження геологічної формації, що призводить до вивільнення бурового шламy з ушкодженої зони та перекриваючих горизонтів, створюючи потенційну загрозу забруднення підземних водоносних горизонтів та поверхневих ґрунтів [12]. Особливу небезпеку становлять покинуті та виснажені свердловини, які можуть протікати під землею навіть за відсутності видимих викидів метану на поверхні [1].

Забруднювачі впливають на ключові параметри ґрунтової екосистеми: пригнічують мікробну активність, знижують розчинність поживних речовин, погіршують життєдіяльність ґрунтових організмів та стимулюють міграцію елементів (Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, P, B) до підземних водоносних горизонтів. Екологічні наслідки включають забруднення атмосферного повітря, емісію парникових газів, контамінацію ґрунтових вод, деградацію ґрунтів, руйнування екосистем та підвищений ризик вибухів [2].

Оцінка впливу на здоров'я населення продемонструвала тривожні результати. Індекс забруднення ґрунтових вод показав, що половина досліджених зразків з нафтовидобувних територій є непридатною для питного водопостачання. Аналіз ризиків для здоров'я виявив істотний неканцерогенний та канцерогенний вплив як на дорослих, так і на дітей [5]. Встановлений зв'язок між експозицією важких металів і зростаючою частотою неінфекційних захворювань свідчить про високу ймовірність збільшення онкологічного тягаря через забруднення важкими металами та вуглеводнями з бурових відходів. Навіть незначні концентрації вуглеводнів у відходах бурових розчинів залишаються небезпечними для екосистеми, оскільки провокують розвиток різноманітних

хронічних неінфекційних захворювань. Токсичність бурового розчину переважно детермінується його базовою рідиною [6]. Присутність важких металів у концентраціях, що перевищують гранично допустимі значення, вимагає спеціальної обробки для нейтралізації токсичного впливу і запобігання несприятливим наслідкам для живих організмів, рослин та тварин [9]. Для вирішення проблеми екологічного впливу відходів буріння регуляторні органи впровадили суворі нормативи щодо поводження з відходами та їх утилізації. Найпоширенішими методами утилізації бурових відходів є захоронення на спеціальних полігонах, закачування в інжекційні свердловини та термічна обробка [7]. Проте у більшості випадків рідина з забруднювачами все ж потрапляє в навколишнє середовище після завершення бурових робіт, незважаючи на можливість переробки бурового розчину [3].

Визначення цілей статті (постановка завдання). Мета дослідження – фізико-хімічна характеристика бурових шламів та оцінка їх впливу на геологічне

середовище в зоні впливу нафтових свердловин.

Для досягнення поставленої мети визначено наступні завдання:

1. Визначити елементний та оксидний склад бурових шламів.
2. Визначити основні джерела надходження важких металів та токсичних елементів у буровий шлам.
3. Оцінити потенційний вплив бурових шламів на компоненти геологічного середовища.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Для досягнення поставленої мети було відібрано три зразки бурових шламів з різних глибинних інтервалів експлуатованої нафтової свердловини. Визначення елементного та оксидного складу проводилося методом енергодисперсійного рентгенофлуоресцентного аналізу (XRF), що дозволило отримати комплексну характеристику хімічного складу відходів буріння. На рисунку 1 представлено елементний склад досліджуваного типу бурового шламу.

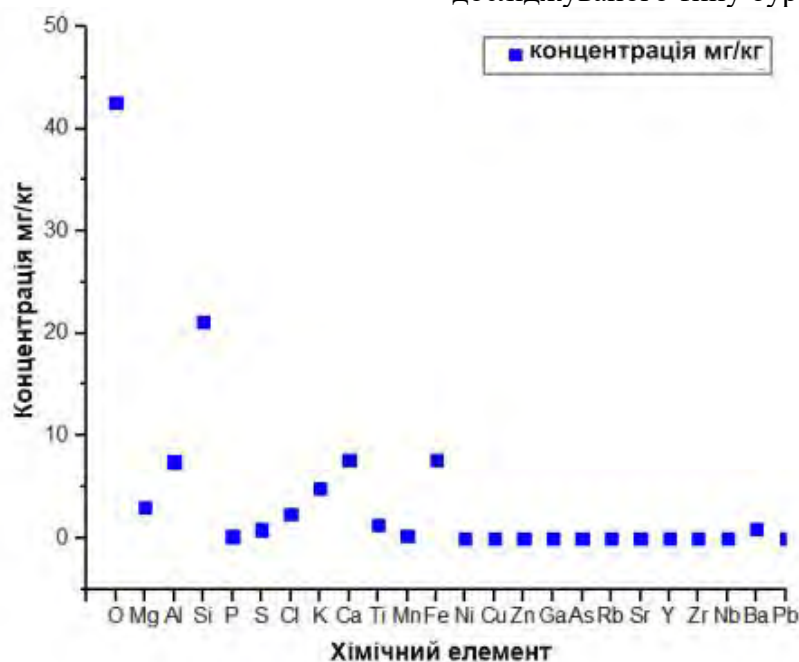


Рисунок 1. – Елементний склад бурового шламу.

*Джерело: розроблено авторами

Рисунок 1 ілюструє типовий спектр рентгенофлуоресцентного аналізу бурового шламу. На спектрі чітко ідентифікуються піки основних елементів: кремнію, алюмінію, заліза, кальцію, калію та магнію, які формують породоутворюючі оксиди. Також виявлено характеристичні лінії важких металів та мікроелементів (Pb, Zn, Ni, Cu, Sr, Ba, As), присутність яких зумовлена як літологічними

особливостями геологічного розрізу, так і компонентами бурових розчинів. Інтенсивність піків відображає відносний вміст елементів у зразку та дозволяє оцінити рівень потенційного забруднення геологічного середовища. Кількісна інтерпретація спектральних даних дозволила визначити масові частки оксидів та концентрації мікроелементів у досліджуваних зразках (таблиця 1).

Таблиця 1

Оксидний склад бурових шламів

Формула	Зразок 1	Зразок 2	Зразок 3
Al ₂ O ₃	6,852	13,097	14,053
MgO	4,577	2,78	5,02
SiO ₂	36,815	50,752	45,14
Продовження таблиці 1			
PbO	139 ppm	135 ppm	52 ppm
Nb ₂ O ₅	35 ppm	24 ppm	41 ppm
P ₂ O ₅	0,35	0,38	0,361
SO ₃	2,215	2,145	2,061
Cl	4,483	2,608	2,313
K ₂ O	3,922	5,035	5,814
CaO	31,039	11,882	10,711
Fe ₂ O ₃	5,828	7,577	10,875
Ni ₂ O ₃	79 ppm	117 ppm	126 ppm
MnO ₂	0,297	0,201	0,419
CuO	45 ppm	63 ppm	56 ppm
ZnO	109 ppm	182 ppm	159 ppm
TiO ₂	2,086	2,061	2,139
Ga ₂ O ₃	24 ppm	46 ppm	—
As ₂ O ₃	21 ppm	16 ppm	21 ppm
Rb ₂ O	114 ppm	126 ppm	147 ppm
SrO	0,080	0,0544	459 ppm
Y ₂ O ₃	35 ppm	34 ppm	49 ppm
ZrO ₂	270 ppm	266 ppm	270 ppm
BaO	1,729	1,326	0,952

*Джерело: розроблено авторами

Діоксид кремнію є домінуючим компонентом у зразках 2 та 3, що характерно для бурових шламів, оскільки він походить як з глинистих компонентів бурового розчину (бентоніт), так і з піщано-кварцових порід геологічного розрізу. Зразок 1

відрізняється найнижчим вмістом SiO₂, але найвищою концентрацією оксиду кальцію, що вказує на проходження цього інтервалу через карбонатні породи або інтенсивне використання вапнякових реагентів для регулювання властивостей бурового розчину. Оксид

заліза присутній у всіх зразках у помітних концентраціях, при цьому найвищий вміст характерний для зразка 3, що може бути зумовлено як природним мінералогічним складом формацій, так і надходженням заліза з обважнювачів бурового розчину та корозії металевого обладнання. Оксиди калію та магнію виявлено у помірних концентраціях, що типово для бурових шламів з використанням калієвих стабілізаторів та магнієвих добавок. Підвищений вміст хлору у зразку 1 порівняно зі зразками 2 та 3 може свідчити про контакт бурового розчину з високо мінералізованими пластовими водами на відповідному глибинному інтервалі.

Особливу екологічну небезпеку становлять виявлені концентрації важких металів та токсичних елементів. Оксид свинцю демонструє значну варіабельність: зразок 1 характеризується критично високим вмістом, що майже у три рази перевищує показник зразка 3 та близький до значень зразка 2. Цинк виявлено у помітних концентраціях, при цьому найвищі значення характерні для зразка 2. Нікель присутній у всіх зразках, причому спостерігається тенденція до зростання від зразка 1 до зразка 3. Стронцій

демонструє найбільшу варіабельність серед досліджених елементів: зразок 3 містить аномально високу концентрацію, тоді як зразки 1 та 2 характеризуються значно нижчими значеннями. Така висока концентрація стронцію у зразку 3 може вказувати на контакт з високо мінералізованими пластовими водами нафтогазових родовищ. Барій виявлено у значних кількостях, при цьому найвищий вміст характерний для зразка 1, що може свідчити про використання бариту як обважнювача бурового розчину. Миш'як присутній у всіх зразках, що становить серйозну екологічну загрозу навіть при відносно низьких концентраціях. Для оцінки екологічних ризиків, пов'язаних з буровими шламами, проведено аналіз їх впливу на чотири ключові компоненти геологічного середовища: підземні води, ґрунтовий покрив, водоносні горизонти та геологічні формації (рис. 2). Графік представляє аналіз ступеня впливу на чотири компоненти навколишнього середовища: підземні води, ґрунтовий покрив, водоносні горизонти та геологічні формації. Для кожної категорії оцінюються три показники — рівень забруднення, міграційна здатність та тривалість впливу.

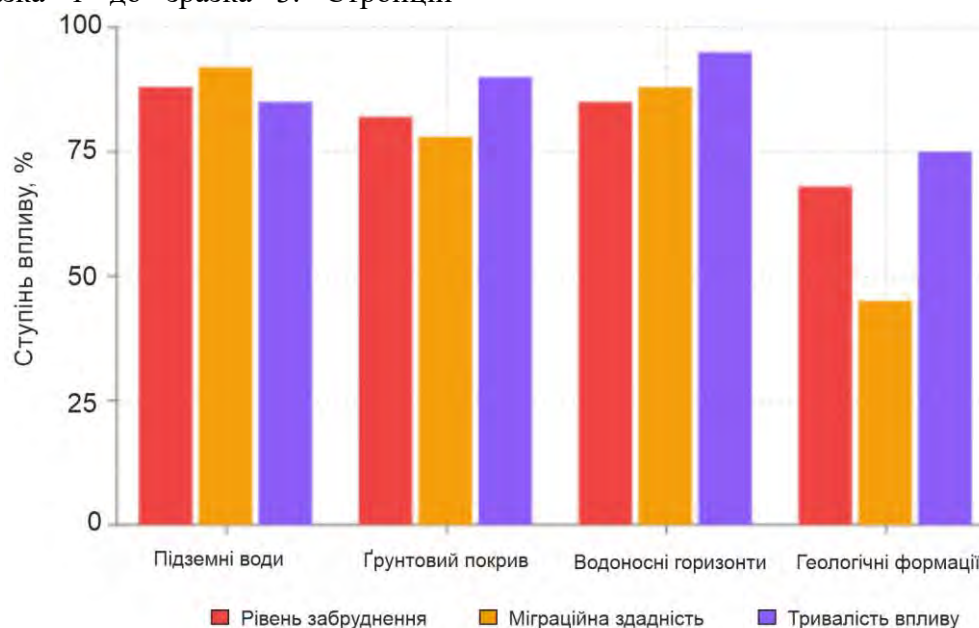


Рисунок 2 – Оцінка впливу на компоненти геологічного середовища

*Джерело: розроблено авторами

Результати показують, що підземні води та ґрунтовий покрив піддаються інтенсивному впливу з показниками 78-92%. Особливо вразливими є водоносні горизонти, де здатність впливу бурових шламів досягає 94%, що свідчить про високий ризик забруднення водних ресурсів. Геологічні формації демонструють найбільшу стійкість до впливу бурових шламів, де міграційна здатність забруднювачів обмежена. Це пояснюється низькою проникністю глибоких гірських порід, які утруднюють поширення забруднювачів.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Проведене дослідження фізико-хімічних характеристик бурових шламів з різних глибинних інтервалів нафтової свердловини дозволило встановити значну варіабельність їх елементного та оксидного складу. Методом

рентгенофлуоресцентного аналізу визначено, що домінуючими компонентами є діоксид кремнію, оксиди кальцію, алюмінію та заліза, вміст яких залежить від літологічних особливостей геологічного розрізу та властивостей використовуваних бурових розчинів. Встановлено, що основними джерелами надходження важких металів та токсичних елементів у буровий шлам є природна мінералізація геологічних формацій, хімічні добавки до бурових розчинів, пластові води нафтогазових родовищ та корозія металевого обладнання. Виявлені концентрації важких металів становлять потенційну екологічну загрозу для навколишнього середовища. Особливу увагу заслуговують свинець, миш'як та нікель, які є високотоксичними та канцерогенними навіть при відносно низьких концентраціях. Аномально високі концентрації стронцію та барію у окремих зразках свідчать про контакт бурового розчину з високо мінералізованими пластовими водами та інтенсивне використання обважнювачів. Оцінка впливу бурових шламів на компоненти

геологічного середовища показала, що найбільш вразливими є водоносні горизонти та підземні води, тоді як геологічні формації демонструють найвищу стійкість до забруднення. Перспективи подальших досліджень включають оцінку довгострокового впливу на біогеохімічні цикли та моніторингу міграції забруднювачів у системі "буровий шлам – ґрунт – підземні води", оцінка канцерогенних ризиків для населення прилеглих територій.

Список літератури

1. Schout, G, Griffioen, J, Hassanizadeh, SM, de Lichtbuer, GC, Hartog, N. 2019. Occurrence and fate of methane leakage from cut and buried abandoned gas wells in the Netherlands. *Science of the Total Environment* 659: 773–782. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.339>.
2. Environmental Defense Fund. 2019. Model regulatory framework for hydraulically fractured hydrocarbon production wells. Environmental Defense Fund. Available at https://www.edf.org/sites/default/files/content/Model_Regulatory_Framework_For_Hydraulically_Fractured_Hydrocarbon_Production_Wells_2014.pdf
3. Bakhtiari, H., Amanipoor, H. & Battaleb-Looie, S. Analysis of heavy metal accumulation and environmental indicators in fluids and drilling cuttings. *J Petrol Explor Prod Technol* 14, 41–58 (2024). <https://doi.org/10.1007/s13202-023-01690-7>
4. Pereira, L. B., Sad, C. M., Castro, E. V., Filgueiras, P. R., & Lacerda Jr, V. (2022). Environmental impacts related to drilling fluid waste and treatment methods: A critical review. *Fuel*, 310, 122301. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122301>
5. Dasari, B.M., Aradhi, K.K., Banothu, D. et al. Assessment of groundwater quality, source identification, and health risk around oil and gas drilling sites. *Environ Earth Sci* 83, 312 (2024). <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11576-4>

6. Antia, M., Ezejiofor, A. N., Obasi, C. N., & Orisakwe, O. E. (2022). Environmental and public health effects of spent drilling fluid: an updated systematic review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 7, 100120. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100120>
 7. Nirali J. Gajjar, Apoorva B. Vaghela, Manish V. Shah, Rakeshkumar R. Panchal. A systematic review on composition, effect and remediation methods of petroleum hydrocarbon contaminated waste drilling mud. *Adv. Biores. Special Issue 1: 2023: 56-65*
 8. Yang, J., Sun, J., Wang, R. et al. Treatment of drilling fluid waste during oil and gas drilling: a review. *Environ Sci Pollut Res* 30, 19662–19682 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11356-022-25114-x>
 9. Tirimisiyu, A. A., & Omon, U. K. (2024, April). Drilling to the Pay Zone with Water-Based Mud: Focus on Drill Cuttings Treatment. In 2024 International Conference on Science, Engineering and Business for Driving Sustainable Development Goals (SEB4SDG) (pp. 1-8). IEEE. DOI: 10.1109/SEB4SDG60871.2024.10630307
 10. Halim, M. C., Hamidi, H., & Akisanya, A. R. (2022). Minimizing Formation Damage in Drilling Operations: A Critical Point for Optimizing Productivity in Sandstone Reservoirs Intercalated with Clay. *Energies*, 15(1), 162. <https://doi.org/10.3390/en15010162>
 11. Sun, P., He, Y., Zhou, S., Erneste, H., Gao, Q., Zou, Z., & Zhu, J. (2024). Experimental study on environmental chemical effect and purification treatment of waste slurry in horizontal directional drilling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 145, 105548. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105548>
 12. Elrayah, A.A.I. Enhancing drilling operations: prioritizing wellbore integrity, formation preservation, and effective mud waste control (case study). *J. Eng. Appl. Sci.* 71, 86 (2024). <https://doi.org/10.1186/s44147-024-00383-0>
-
-