

## УДОСКОНАЛЕННЯ ПОШУКУ РАДІОАКТИВНИХ РЕЧОВИН ЗА ДОПОМОГОЮ КОМПЛЕКСУВАННЯ РАДІОМЕТРИЧНИХ ТА ГЕОФІЗИЧНО-РОЗВІДУВАЛЬНИХ МЕТОДІВ

Наконечний В.Г.<sup>1</sup>, Пікареня Д.С.<sup>2</sup>, Орлінська О.В.<sup>2</sup>, Белянська О.Р.<sup>1</sup>, Гунько С.О.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Дніпровський державний технічний університет

вул. Дніпробудівська, 2, 51918, м. Кам'янське

Товариство з обмеженою відповідальністю «Технічний університет «Метінвест Політехніка»

Південне шосе, 80, 69008, м. Запоріжжя

dondantalion00@gmail.com, dmitriy.pikarenia@mipolytech.education,

olha.orlinska@mipolytech.education, belyans@ukr.net, goonko@gmail.com

У зв'язку з великою небезпекою, що являють собою радіоактивні елементи, їх пошук та утилізація мають дуже велике значення, як для моніторингу стану навколишнього природного середовища, так і для забезпечення здоров'я людей, що перебувають поблизу. Джерела, що випромінюють радіацію чи отруйних газ, наприклад, радон, можуть знаходитися під товщою ґрунту та непомітно для людей впливати на них. Причиною утворення таких джерел можуть слугувати як природні радіоактивні елементи, так і штучні захоронення відходів або їх несанкціоновані скиди. У наш час існує багато спеціалізованих методів для пошуку радіоактивних елементів, але кожний з них має свої недоліки: великі затрати часу, ресурсів, обмежений радіус охоплення приладу. При користуванні деякими методами дослідження радіоактивних речовин, людина вимушено довгий час знаходиться на небезпечній відстані від джерела випромінювання. Вдосконалення досліджень за допомогою геофізично-розвідувальних методів має на меті поліпшення точності, підвищення швидкості та загальну оптимізацію процесу задля отримання найкращого результату.

У статті наведено результати аналізу та інтерпретації даних, що отриманих при дослідженні на північному майданчику колишнього ВО ПХЗ у місті Кам'янське. Встановлено, що дані, отримані під час радіологічних досліджень, мають зв'язок з даними природного електромагнітного поля Землі, що надає можливість, за допомогою останнього, корегувати результати досліджень та підвищувати їх точність та оперативність. Зони аномальних даних дають змогу локалізувати знаходження джерел випромінювання у дуже короткий час. У результаті досліджень нами виявлені джерела радіаційного випромінювання на окремій ділянці підприємства, що підтвердили адекватність застосування даних методів з метою локалізації загрози навколишньому природному середовищу та здоров'ю населення міста. *Ключові слова:* радіоактивні елементи, радон, екологічна безпека, комплексування радіологічних методів, геофізично-розвідувальні методи.

### The improvement of radioactive substances retrieval by means of combination of the methods of radiometry and exploration geophysics. Nakonechnyi V., Pikarenia D., Orlinska O., Byelyanska O., Hunko S.

Considering the great danger from radioactive elements, their retrieval and disposal are of great importance both for monitoring the conditions of the environment and for ensuring the health of people in the vicinity. Sources that emit radiation or poisonous gases, such as radon, can be located under the soil and affect people imperceptibly. Such sources can be caused by both natural radioactive elements and artificial waste disposal or unauthorised discharges. Nowadays, there are many specialised methods for retrieval of radioactive elements, but each of them has its disadvantages: large time and resource requirements, and limited radius of area coverage of the device. In addition, researchers are obligated to stay at a dangerous distance from the radiation source for a long time, while using some methods of researching radioactive substances. An improvement of researches, using geophysical exploration methods, aims to enhance accuracy, increase speed of the study conduction and generally optimise the process to obtain the best possible result.

The article presents the results of the analysis and interpretation of data obtained during the research at the northern site of the now-defunct Prydniprovskiy Chemical Plant (PChP) in Kamianske. It is established that the data obtained during radiological studies have a connection with the data of the Earth's natural electromagnetic field, which makes it possible to correct the results of studies and increase their accuracy and efficiency. The anomalous data zones allow to localise radiation sources in a very short time. As a result of the surveys, we identified sources of radiation at that separate site of the now-defunct PChP, which confirmed the adequacy of the applied methods for localising threats to the environment and public health. *Key words:* radioactive elements, radon, environmental security, combination of radiological methods, geophysical exploration methods.

**Постановка проблеми.** У зв'язку з великою небезпекою, що представляють собою радіоактивні елементи їх пошук та утилізація має дуже велике значення як для екології так і для забезпечення здоров'я людей, які перебувають поблизу. Моніторинг цих елементів у ґрунтах здійснюється комплексом різно-

манітних методів, що досліджують наявність радону у повітрі, випромінювання альфа частинок та гамма хвиль, заміри температури ґрунтів. Вдосконалення системи досліджень за допомогою геофізично-розвідувальних методів дає змогу підвищити точність та оперативність досліджень.

Тема розробки систем для виявлення радіоактивного забруднення досліджується науковцями світу останні 35 років через катастрофу Чорнобильську, що сталася на Київщині в Україні. Різні методології та інструменти щодо моніторингу радіоактивності були випробувані в багатьох морських районах світу за останні роки [1], залежно від обраної площі, рельєфу і рівня забруднення. Єдиний рекомендований методом у випадках виявлення на місці, коли концентрація активності радіонуклідів перевищує мінімально виявлену активність системи, є безперервний моніторинг. Науковцями розроблено

інтеграцію радіоактивного спектрометра KATERINA II у стаціонарній станції (буй) мережі POSEIDON на Північному Егейському морі. Ними зафіксовано інтенсивне зростання концентрації активності дочірніх порід радону (до порядку величини) під час випадання опадів. Але такі пристрої є вузько обмеженими у використанні через специфіку конструкції станції.

Також проводиться величезна робота з дослідження розвитку програм моніторингу забезпечення якості вимірювачів радіаційної активності. Експрес вимірювачі перевіряють на точність вимірювання як людини, що перебувала у радіаційному забрудненні, так і її одягу. Такі дослідження корисну упершу чергу у відділеннях медичних установ клінічної ядерної медицини [2].

Лише в останнє десятиліття археологи, які працюють в Онтаріо, Квебеку та штаті Нью-Йорк, почали використовувати потенціал геофізичних досліджень і хімії ґрунту для виявлення особливостей місцевості. Нещодавні дослідження з використанням поєднання магнітної градіометрії, магнітної сприйнятливості та аналізу фосфатів у ґрунті продемонстрували, що багатометодичні підходи мають потенціал для подолання перешкод, накладених історичними особливостями, складом ґрунту та особливістю геології [3].

Відомі розвідувальні дослідження геотермальних ресурсів у частинах жолоба Середнього Бенуе, Нігерія, з використанням дистанційного зондування та геофізичних методів. У Нігерії фундаментальний комплекс і осадові басейни містять багато термальних джерел, які є фізичними проявами геотермальної енергії. Однак існують труднощі до стабільного доступу цих ресурсів через проблеми етики та безпеки, а також через обмежену кількість розвідувальних даних [4]. Успішною була інтеграція геофізичних методів для дослідження підземних вод району Ель-Шейх-Марзук, оазис Фарафра, Єгипет [5].

Методика радіометричних вимірювань успішно застосовується у дослідженнях ґрунтів і пластів корисних копалин. Динаміку ослаблення гамма-променів у ґрунтах Північної Ірландії, особливості торфу представлено у роботі вчених [6]. Ними розглядається ослаблення гамма-випромінювання, що пов'язане з ґрунтами та породами Північної Ірландії

при використанні простої теорії та даних з повітряної зйомки високої роздільної здатності. Залежі у ґрунті розглядаються як джерело радіогенного матеріалу. Радіометричні дані загального підрахунку разом із картографуванням ґрунтів і порід Північної Ірландії в масштабі 1:250 використовуються науковцями для проведення статистичного аналізу [6].

Оцінки потоку радону на основі даних гамма-випромінювання та геохімічних даних для визначення джерел, шляхів міграції та відповідного ризику для здоров'я на прикладі регіону Кампанії (Італія) успішно проводили дослідники у 2022 році [7].

Тема дослідження поєднання вищенаведених радіологічного та геофізично-розвідувального методу для глибокого аналізу ділянок поверхні ґрунту на радіаційне забруднення є актуальною та має практичне значення.

**Актуальність дослідження.** Одними з найбільш небезпечних для людини та природи є саме радіоактивні елементи. Саме тому вдосконалення методів їх пошуку є актуальним.

Результати роботи надали можливість оцінити залежність між радіологічними та геофізично-розвідувальними методами за для подальшого їх комплексування та підвищення ефективності пошуку радіоактивних елементів у ґрунті.

**Виклад основного матеріалу.** Об'єктом наших досліджень виступають радіоактивні бета частки, що впливають на магнітне поле яке генерується під час досліджень за допомогою геофізичного методу.

Мета дослідження – аналіз та комплексування результатів дослідження за допомогою радіологічних та геофізично-розвідувальних методів за для подальшої оптимізації процесу.

Для досягнення поставленої мети, в межах Ділянки № 3 північного проммайданчика колишнього ВО «Придніпровський хімічний завод» (ПХЗ) виконано комплекс наступних досліджень (робіт):

– проведення геофізичних досліджень ділянок методом природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПЕМПЗ);

– проведення радіометричних досліджень території що включають польові альфа, бета, гама – вимірювання;

За збереженими архівними даними північна частина колишнього ПХЗ не розглядалася в якості радіаційно-небезпечної території, так як вважалося, що там не велися роботи з радіоактивними речовинами.

В ході попередніх робіт в рамках виконання були уточнені як радіаційні так і просторові межі 3-х забруднених ділянок. Загальна площа цих ділянок склала біля 1 га, або менше 1% від площі ПМ (116 га). Максимальні значення ПЕД на висоті 1,0 м коливаються від 1,7 мкЗв/год на Ділянках № 1, 3 до 12 мкЗв/год на Ділянці № 2.

Ділянка № 3 розташована в південно-західній частині північного проммайданчика колишнього

ВО ПХЗ недалеко від будівлі 7526. Більше половини площі представлено автодорогами, бетонними майданчиками, пішохідними проходами, залишками бетонної огорожі. Невелика частина (приблизно) 10% території знаходяться на крутому схилі. Велика частина ділянки на глибині 30–120 см забруднена будівельним сміттям (тільки 2 свердловини з 10 при попередньому дослідженні ділянки були без каменів, бетону та іншого сміття). Ділянка неправильної форми; площа приблизно 700 м<sup>2</sup>.

Обмеження опромінення працівників [8] на забруднених територіях ПХЗ може бути забезпечено рекультивацією цих ділянок. Нормативним документом, який регламентує проведення відновлення забруднених територій, є Санітарні правила ліквідації, консервації і перепрофілювання підприємств з видобутку і переробки радіоактивних руд (СП ЛКП-91) [9].

Згідно з п. 2.4.5 СП ЛКП-91 потужність експозиційної дози не повинна перевищувати 20 мкР/год понад рівень природного фону для даної місцевості. Середнє фонове значення потужності еквівалентної дози зовнішнього гамма випромінювання від усіх проведених вимірювань 0,122 мкЗв/год. Потужність експозиційної дози 20 мкР/год відповідає потужності еквівалентної дози в 0,175 мкЗв/год, отже нормативний рівень склав 0,297 мкЗв/год. Схема розташування забруднених територій (ділянки № 1, 2, 3) в північній частині колишнього ПХЗ представлена на рисунку 1.

**Виклад основного матеріалу.** *Методика та результати дозиметричної зйомки.* В рамках цієї роботи на ділянці №3 наряду з польовими дозиметричними вимірюваннями потужності дози гамма випромінювання, щільності потоку бета та альфа часток, проводилося вимірювання щільності потоку радону з поверхні ділянок. Вимірювання за допомогою дозиметра-радіометра ДКС-96 з відповідними блоками детектування (сертифікат калібрування UA01 № 2427 від 07.04.2020р.) проводилось у вуз-

лах сітки де проводились геофізичні дослідження. Похибка вимірювання, згідно документації на прилад, склала для гамма випромінювачів –  $(20+2/Ax)\%$ , для бета випромінювачів –  $(20+5/Ax)\%$ , для альфа випромінювачів –  $(20+8/Ax)\%$  ( $Ax$  – вимірне значення відповідної величини). На кожній із ділянок (додатково до раніше виконаних робіт) 18 і 19 листопада 2020 року було проведено по 50 вимірювань.

В рамках дозиметричної зйомки, яка була виконана раніше, проводилися вимірювання потужності дози на висоті 1 м над поверхнею землі по сітці  $2 \times 2$  м. Результати вимірювання на ділянці № 3 представлені для ділянки № 3 – в таблиці 1.

*Методика та результати зйомки електророзвідувальними методами.* Метод природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПЕМПЗ). Цей метод відноситься до групи електророзвідувальних геофізичних методів. Його застосування рекомендовано нормативними геологорозвідувальними документами, також він залучається при проведенні інженерно-геологічних вишукувань, що знайшло відображення у Державних будівельних нормах ДБН А.2.1-1-2014.

Метод заснований на реєстрації природного імпульсного електромагнітного випромінювання Землі, яке складається їх трьох джерел: зовнішнього – сонячна радіація і космічні поля; внутрішнього – обумовлюється геологічними процесами під або безпосередньо на денній поверхні; техногенного – різного роду промислові і побутові випромінювання. Діапазон частот такого інтегрального імпульсного електромагнітного поля від перших герц до мега- і навіть гігагерц. Для цілей геології вивчається природне імпульсне електромагнітне поле, що генерується саме внутрішніми джерелами.

Відомо досить багато процесів і явищ, в результаті або протягом яких виникає електромагнітне випромінювання або електромагнітна емісія (застосовуються обидва терміни). Одним з них є п'єзоелектричний ефект мінералів і гірських порід. Іншим досить потужним джерелом служать тектонічні



Рис. 1. Схема розташування забруднених територій (ділянки № 1, 2, 3) в північній частині колишнього ПХЗ

Таблиця 1  
Результати дозиметричних вимірювань  
на ділянці № 3

№ вимір.	бета частинки, част./хв·см <sup>2</sup>	№ вимір.	бета частинки, част./хв·см <sup>2</sup>
1	0,98	21	0,77
2	0,61	22	0,75
3	0,78	23	1,59
4	1,79	24	1,98
5	0,38	25	1,57
6	0,36	26	3,67
7	0,62	27	1,23
8	0,59	28	1,81
9	0,88	29	5,92
10	1,3	30	0,17
11	2,15	32	1,26
12	2,23	36	1,65
13	3,59	37	0,22
14	4,48	38	0,17
15	3,73	44	1,53
16	3,31	45	0,43
17	3,97		
18	3,72		
19	0,94		
20	0,84		

напруги масиву гірських порід, особливо на рівні тисків, що передують утворенню тріщин. Третім значущим джерелом виступають різні електричні і електрохімічні процеси в породних масивах (зміни подвійного електричного шару, електронна емісія при русі розчинів, хімічні перетворення мінералів і порід). Інші джерела досліджені набагато слабкіше або їх внесок досить обмежений. В результаті утворюється стрибкоподібний сплеск електромагнітного випромінювання, який і називається імпульсом електромагнітного поля. Він характеризується різким збільшенням амплітуди і енергії випромінювання і дуже коротким (мілі- і мікросекунди) часом прояву. Частота проходження імпульсів ПЕМПЗ від перших герц до 20 кілогерц, цим поле ПЕМПЗ відрізняється від атмосферних і техногенних джерел. В поле ПЕМПЗ відсутня будь-яка періодичність, характерна для техногенних випромінювачів, що служить для розділення цих джерел.

Експериментальними дослідженнями різних авторів встановлено, що при стискуванні кристалічних порід зростає кількість, енергія і амплітуда імпульсів ПЕМПЗ, які перед початком крихких деформацій досягають максимуму. Як тільки настає фаза руйнування (утворення тріщин), кількість імпульсів різко (вертикально) зменшується аж до нуля і потім незначно зростає до деякого рівня, на якому і залишається.

Електромагнітне випромінювання має здатність поширюватися в твердих породах на значне

віддалення від джерела, при цьому його амплітуда і енергія змінюється досить слабо. Якщо ж на шляху поширення електромагнітного випромінювання зустрічається ділянки замочування порід або зона порожнечі (обводнені і сухі тріщини і т.п.), то інтенсивність випромінювання дуже різко зменшується, а при потужній зоні воно взагалі розсіюється або поглинається. Завдяки цій особливості можна виділяти ділянки, які мають різну щільність потоку електромагнітних імпульсів, тобто кількості імпульсів за одиницю часу.

Ідея застосування методу ПЕМПЗ для цілей даного дослідження наступна: імпульсне електромагнітне поле генерується к кристалічних породах Українського щита. Якщо на шляху його розповсюдження зустрічаються обводнені ділянки порід, то його рівень та кількість імпульсів має зменшуватися. Теж саме буде проявлятися у тріщинуватих породах, до яких можна віднести насипні техногенні ґрунти. Розрізнити зони обводнення та техногенні ґрунти можна за допомогою інших методів. Для досліджень застосовувалася прилад «СІМЕІЗ» (мікропроцесорний індикатор електромагнітного поля – МІЕМП 14/1), який є авторською розробкою ТОВ «Слов'янський міст» (рис. 2) та призначений для вивчення ПЕМПЗ, а також електромагнітного поля техногенного походження в лабораторних і польових умовах [10]. Зовнішній вигляд приладу МІЕМП-14/4 представлено на рисунку 2.



Рис. 2. Зовнішній вигляд приладу МІЕМП-14/4

Прилад дозволяє визначати кількість імпульсів ПЕМПЗ за час вимірювання з відносною похибкою в межах  $\pm 10\%$  і знаходити відсоткове співвідношення сумарної тривалості сигналу, який перевищив динамічний діапазон, до часу вимірювання («відсоток зашкалу») з відносною по-похибкою в межах  $\pm 10\%$ .

Наявність чотирьох антенних гнізд дозволяє проводити зйомку одночасно на трьох антенах; дві з них розташовані горизонтально (зазвичай у меридіональному та широтному напрямках), третя направлена вертикально вниз, четверта може бути використана в якості варіометра і фіксувати зміни електромагнітного поля в стаціонарній точці.

В прилад вбудований частотний фільтр, що дозволяє в процесі спостережень «відсікати» електромагнітні поля техногенного походження, викликані лініями електропередач, підземними комунікаціями, системами бездротового зв'язку, в тому числі стільникового (мобільного), вплив яких останнім часом все відчутніше позначається на реєстрації ПЕМПЗ.

Зйомка методом ПЕМПЗ проводилася у профільному варіанті з відстанню між профілями 2 м, між точками спостереження на профілі – 2 м; розташування точок на ділянці № 3 – на рис. 3.

Обробка результатів досліджень здійснювалась шляхом складання карт щільності потоку імпульсів магнітної складової ПЕМПЗ для кожної антени у програмному середовищі Surfer 8.0. Для побудови карт використаний метод триангуляції з лінійною інтерполяцією за квадратною вузловою мережею.

Наступним кроком у роботі стає аналіз даних та приведення їх до одної метричної системи. Для цього за допомогою програми MicrosoftExcel данні були занесені у таблицю та для кожної точки було прораховано модуль відхилення та переведено його у відсоткове значення:

$$Q = N/T$$

де Q – модуль відхилення; N – значення даних у точці; T – максимальне значення у всій вибірці даних.

Отримані результати були помноженні на 100 та отримано відсоток перевищення норми, на основі якого побудований графік порівняння між першим та другим методом.

Графік порівняння даних процентного рівня перевищення норми радіометричного та геофізичного методів представлено на рис. 4.

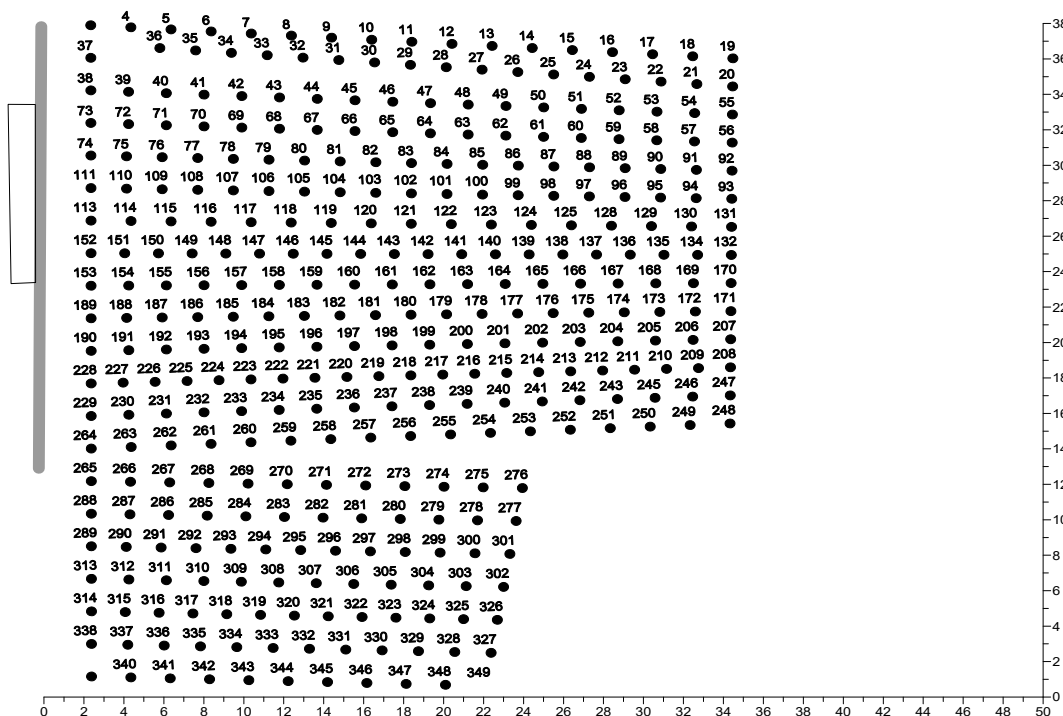


Рис. 3. Карта розташування точок зйомки методом ПЕМПЗ на ділянці № 3 та їх номери (система координат умовна, метрична. Сіра лінія – положення бетонного забору, прямокутник – контур технологічної будки)

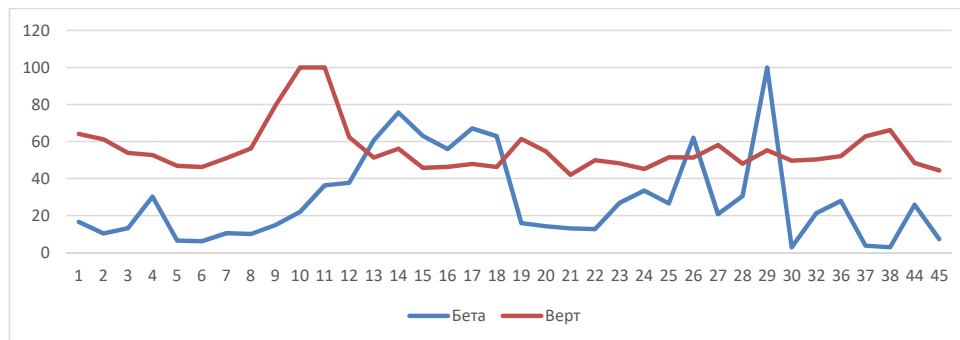


Рис. 4. Графік порівняння даних процентного рівня перевищення норми радіометричного та геофізичного методів

**Головні висновки.** В результаті проведеного аналізу отриманих даних видно що, бета випромінювання напряму впливає на електромагнітне поле, що генерується котушкою у приладі. Потік електронів поглинає собою зустрічні електромагнітні імпульси. Це призводить до того, що менша кількість імпульсів повертається до приладу. При зростанні випромінювання одразу ж падає кількість імпульсів, а як тільки воно зменшується, електромагнітне поле повертається до норми чи зростає. Електромагнітні

хвилі розповсюджуються паралельно землі, а отже, на кожній буде відбиток наявності бета електронів під ґрунтом, які створюють магнітні перешкоди, що поглинають імпульси. Отриманий ефект, що спостерігається, незвичайний для таких об'єктів та був отриманий вперше, тому потребує більш детальної теоретичної основи та наступних досліджень. Даний комплекс методів дозволить більш точно та швидко отримувати реальну картину радіоактивного забруднення території.

### Література

1. Tsabaris, C.; Androulakaki, E.G.; Ballas, D.; Alexakis, S.; Perivoliotis, L.; Iona, A. Radioactivity Monitoring at North Aegean Sea Integrating In-Situ Sensor in an Ocean Observing Platform / *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021, Volume 9, p. 77. <https://doi.org/10.3390/jmse9010077>
2. Chen-Ju Feng et al The evaluation of an on-site monitoring program for activity meter quality assurance with exemption-level sources / *Journal of Radiological Protection*. 2023. Volume 43, p. 021508. DOI 10.1088/1361-6498/accc96
3. Megan Anne Conger, Jennifer Birch Archaeological reconnaissance through multi-method geophysical and geochemical survey at two Iroquoian village sites, southern Ontario, Canada / *Journal of Archaeological Science: Reports*, Elsevier. Volume 26, August 2019, P. 101888. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.101888>
4. T. Ngene, M. Mukhopadhyay and S. Reconnaissance investigation of geothermal resources in parts of the Middle Benue Trough, Nigeria using remote sensing and geophysical methods. / *Ampana Energy Geoscience*. Volume 3, 2022, p. 360–371. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2022.06.002> (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).
5. M. Abdel Zaher, A. Younis, H. Shaaban et al. Integration of geophysical methods for groundwater exploration: A case study of El Sheikh Marzouq area, Farafra Oasis, Egypt / *Egyptian Journal of Aquatic Research*, Volume 47, 2021, p. 239–244. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2021.03.001>
6. Janvier Domra Kana, Noël Djongyang, Danwe Raïdandi et al A review of geophysical methods for geothermal exploration / *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 44, April 2015, Pages 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.026>
7. Annalise Guarino, Cicchella Domenico, Annamaria Lima, Albanese Stefano. Radon flux estimates, from both gamma radiation and geochemical data, to determine sources, migration pathways, and related health risk: The Campania region (Italy) case study / *Chemosphere*, Volume 287, Part 2, January 2022, Page 132233 <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132233>
8. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97); Державні гігієнічні нормативи ГГН 6.6.1.-6.5.001-98 . Київ, 1998.
9. Умови та правила провадження діяльності з переробки уранових руд (Затверджено Мінекоресурсів України 20.03.2001 № 110) Київ: Міністерство екології та природних ресурсів України, № 110 від 20.03.2001.
10. Пікареня Д. С. Досвід застосування методу природного імпульсного електро-магнітного поля Землі (СІЕМПЗ) для вирішення інженерно-геологічних та геологічних задач / Д.С. Пікареня, О. В. Орлінська. Дніпропетровськ: Вид-во «СВІДЛЕР», 2009. 120 с.