

DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2021-36-08>

УДК: 504.054+504.75

К. О. КОРИЧЕНСЬКИЙ¹,

науковий співробітник відділу радіаційного моніторингу природного середовища
e-mail: korychenskyi@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2439-2224>

Т. В. ЛАВРОВА¹,

науковий співробітник відділу радіаційного моніторингу природного середовища
e-mail: lavrova@uhmi.org.ua

О. В. ВОЙЦЕХОВИЧ¹, канд. географ. наук,

завідувач відділу радіаційного моніторингу природного середовища
e-mail: o.voitsekhovych@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5557-4288>

¹Український гідрометеорологічний інститут ДСНС та НАН України,
проспект Науки, 37, м. Київ, 03028, Україна

ЕКОЛОГІЧНІ І ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ БЕЗПЕЧНОГО УТРИМАННЯ ФОСФОГІПСУ НА МАЙДАНЧИКУ КОЛИШНЬОГО УРАНОВОГО ВИРОБНИЦТВА «ПРИДНІПРОВСЬКИЙ ХІМІЧНИЙ ЗАВОД»

Мета: Визначення можливості безпечного використання і переробки залишків переробки урановмісних руд і фосфогіпсу на майданчику колишнього ВО «Придніпровський хімічний завод» як елемент стратегії приведення його у безпечний стан.

Методи. Польові роботи і аналітичні методи визначення вмісту радіонуклідів уран-торієвих рядів, а також корисних елементів у мінеральних залишках уранового виробництва, оцінка безпечного поводження і можливих напрямків їх переробки.

Результати. За результатами моніторингових досліджень за радіонуклідним та гідрохімічним складом підземних вод промислового майданчика «ПХЗ» за період від 2009 по 2021 рік було виявлено високий вміст сульфатів та підвищений вміст урану у підземних водах під тілом хвостосховища "Дніпровське", яке має фосфогіпсове покриття на його поверхні. Фосфогіпс розглядається з одного боку, як джерело забруднення підземних вод, а з іншого як потенційний ресурс для можливого його повторного використання і переробки. Надаються також результати експериментальних досліджень вмісту природних радіонуклідів і елементного складу мінеральних залишків рудного виробництва на майданчику колишнього заводу з переробки уранових руд «ПХЗ», а також оцінки щодо безпеки поводження з ними і напрямки їх можливої переробки як елементу стратегії приведення майданчика у безпечний стан.

Висновки. Доведено можливість і необхідність безпечної переробки фосфогіпсів на поверхні хвостосховища "Дніпровське" із одночасним заміщенням його на нове ґрунтове покриття

КЛЮЧОВІ СЛОВА: спадщина уранового виробництва, фосфогіпс, радіоактивні матеріали природного походження, повторне використання і переробка залишків мінеральних матеріалів

Як цитувати: Кориченський К. О., Лаврова Т. В., Войцехович О. В. Екологічні і економічні аспекти безпечного утримання фосфогіпсу на майданчику колишнього уранового виробництва «Придніпровський хімічний завод». *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2021. Вип. 36. С. 96-110. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2021-36-08>

In cites: Korychenskyi, K.O., Lavrova, T.V. & Voitsekhovych, O.V. (2021). Ecological and economic aspects of phosphogypsum safety management at the former uranium production site "Pridniproivsky chemical plant". *Man and Environment. Issues of Neoecology*, (36), 96-110. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2021-36-08>

Вступ

Залишки уранового виробництва і переробки інших мінеральних сировинних ресурсів, що накопичені у межах промислового майданчика «Придніпровський хімічний завод» і на прилеглих до нього територіях оці-

нено у більше 40 млн тон. Такі залишки переробки урановмісних руд різного типу характеризуються підвищеним вмістом радіонуклідів уран-торієвих рядів (переважно урану-238, урану-234, радію-226) і є джерелами опромі-

© Кориченський К. О., Лаврова Т. В., Войцехович О. В., 2021



This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

нення людей, а також забруднення навколишнього природного середовища. Тому питанням приведення у безпечний стан даного майданчика протягом останнього десятиліття приділяють значну увагу [1, 2].

Залишки уранового виробництва утримуються у п'яти хвостосховищах (Рис.1). Ці хвостосховища були побудовані у різні періоди експлуатації уранового підприємства у створених чашах природного ландшафту шляхом побудови дамб або у природних депресіях рельєфу без облаштування протифільтраційних бар'єрів. Протягом тривало часу (десятиліття) такі хвостосховища не мали надійного покриття, тому атмосферні води надходили в хвостовий матеріал, стимулюючи вилугування радіонуклідів і хімічних забруднюючих речовин із рудних залишків і винесення їх у підземні води. На даний час хвостосховища «Західне», «Центральний Яр» і «Південно-східне» мають тимчасове покриття, яке з часом

має бути замінено на більш надійне для довготривалого утримання хвостів уранового виробництва в місцях їх сучасної локалізації [2, 3]. Основною функцією нового захисного покриття має бути стійкість до ерозії ґрунтового покриття, недопущення проникнення у тіло хвостів атмосферної води та кисню і перешкоджання ексхалції газу радону в атмосферу природного середовища із тіла хвостосховищ з високим вмістом радію-226 у складі залишків переробки уранових руд.

Протягом останнього десятиліття на майданчику «ПХЗ» в рамках Державних програм приведення майданчика у безпечний стан, які виконувалися протягом 2005-2009, 2010-2015 та 2016-2018 років було виконано кілька проектів першочергових заходів, у тому числі ремонтні роботи із облаштування тимчасового покриття, укріплення

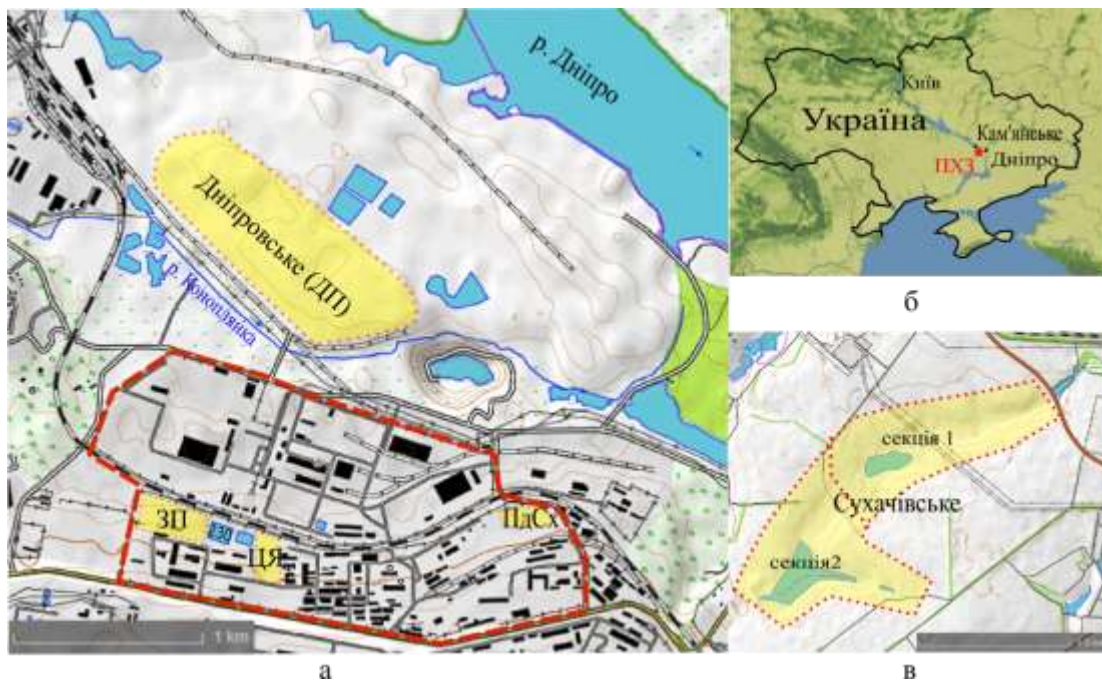


Рис. 1 – Схема об'єктів майданчика спадщини уранового виробництва на Придніпровському хімічному заводі («ПХЗ»), де: а) територія промислового майданчика ПХЗ в місті Кам'янське, із зазначеними хвостосховищами: Дніпровське (ДП), яке має фосфогіпсове покриття, Західне (ЗП), Центральний Яр (ЦЯ), Південно-Східне (ПдСх); б) - карта України із зазначеним містом Кам'янське та місцем розташування «ПХЗ»; в) – Сухачівське хвостосховище (секція-1 та секція-2), розташоване на відстані 14 км від території майданчика «ПХЗ»

Fig. 1 – The Uranium production legacy site Prydniprovsky Chemical Plant (PChP), where: a) the territory of the PChP industrial site in the city of Kam'yanske, with the specified locations of the U-residue tailings: Dniprovsk (Dn), with phosphogypsum cover, Zapadnoe (ZP), Central Yar (CY) Yugo-Vostochnoe (PDS); b) - map of Ukraine with the specified city of Kam'yanske and the location of the PChP; c) - Sukhachivsk tailings facilities (cell-1 and cell-2), located at a distance of 14 km from the territory of the PChP site

дамб на деяких хвостосховищах і відновлено моніторингові дослідження. В цей же період в рамках проектів технічної допомоги Європейської Комісії (ЄК) Україні було розроблено і розпочато виконання кількох проектів спорудження інфраструктури поводження із відходами, проекти демонтажу кількох найбільш забруднених будівель на території майданчика ПХЗ, а також розроблено концептуальні проекти реконструкції нового покриття для хвостосховищ «Центральний Яр» і «Західне» [4].

Натомість для найбільшого із хвостосховищ - «Дніпровського», що розташоване за межами промислового майданчика (рис. 1) досі не має визначеної стратегії мінімізації його впливу на навколишнє природне середовище, оскільки із приблизно 6,5 млн тон саме залишків переробки уранових руд із високим вмістом радіонуклідів уранового ряду на його поверхні утримуються ще біля 5 млн тон фосфогіпсу, який був побічним продуктом для виробництва фосфоровмісних мінеральних добрив на «ПХЗ». Викладений на поверхні хвостосховища фосфогіпс шаром від 3 до 16 м виконує функцію захисного покриття уранового хвостосховища лише частково, зменшуючи ексхаліацію радону і, екрануючи вплив зовнішнього гамма випромінювання з поверхні радіоактивних залишків переробки уранових руд.

Натомість, результати моніторингових спостережень показали, що фосфогіпс за своєю структурою пропускає атмосферну воду у тіло хвостосховища. Основною складовою фосфогіпсу є сульфат кальцію $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (гіпс), масова частка якого складає не менше 80%. У підземних водах техногенного горизонту під хвостосховищем спостерігається поступове зростання активності урану, який вилуговується із хвостів переробки уранових руд, а також концентрації сульфатів, які надходять із фосфогіпсового покриття з атмосферними водами. Дослідження показали, що уран у підземних водах перебуває у складі сульфатних і карбонатних комплексів, що прискорює винесення урану у підземні і поверхневі води [3]. Це свідчить про те, що фосфогіпсове покриття не виконує своєї захисної функції і потребує заміни на інше, яке буде здатним забезпечити безпечне і довготривале утримання хвостів уранового виробництва в алювіальних ґрунтах заплави річок Коноплянка і Дніпро із мінімальним негативним впливом на їх забруднення.

Натомість, великі об'єми фосфогіпсу і невизначеність щодо місця його складування

на прилеглих територіях, не дозволяють розробити комплексну стратегію приведення майданчика у безпечний стан. Викликом для управління безпекою на майданчику і вирішення подальшої долі його використання також є необхідність залучення дуже великих коштів на спорудження нового покриття хвостосховищ і очищення прилеглих територій (до 30 млн доларів за попередніми оцінками). Крім того, на етапі проектування спорудження нового покриття на заміну фосфогіпсового для хвостосховища «Дніпровське» доцільно розглянути і варіанти потенційно можливого переміщення на його поверхню хвостового матеріалу із хвостосховищ «Західне» і «Центральний Яр», загальний об'єм яких складає менше 10 відсотків об'єму уранових залишків, які утримуються у хвостосховищі «Дніпровське». Таким чином, можна буде сконцентрувати всі основні об'єми хвостового матеріалу в одному місці, не суттєво збільшивши його об'єм, але суттєво спростити і здешевити вартість довготривалого управління забрудненими територіями. Такий варіант стратегії довготривалого поводження із забрудненою територією колишнього ВО «ПХЗ» досі не розглядався, але стає реальним, якщо одночасно розробляти план поетапної заміни фосфогіпсового покриття хвостосховища «Дніпровське» на ґрунтове із переміщенням хвостів із хвостосховищ «Західне» і «Центральний Яр», а також можливість переробки або використання фосфогіпсу у якості сировини.

Актуальність розгляду такої стратегії у якості одного із варіантів приведення майданчика у безпечний стан стає очевидним, зважаючи на те, що вміст природних радіонуклідів у складі фосфогіпсу на майданчику було визначено як дуже низький, а можливості його використання і переробки у якості сировини для виробництва будівельних в'язучих сумішей широкого класу, у якості мінерального добрива для покращення родючості сільськогосподарських земель або навіть для вилучення цінних мінеральних компонентів технологічно є цілком можливим і потребує всебічної оцінки.

Результати комплексного дослідження корисного компоненту у складі залишків переробки уранових і фосфорних руд на майданчику «ПХЗ», а також аспекти безпечного поводження з ними і можливі шляхи переробки, розглядаються у даній статті з метою оцінки можливостей отримання додаткових коштів на приведення майданчика у безпечний стан.

Методи і підходи

Загальні положення. Загальний підхід в обґрунтуванні можливостей часткової мінеральних залишків уранового виробництва, що накопичені на майданчику «ПХЗ», полягає в тому, що масштабні заходи приведення забруднених територій уранової спадщини у безпечний стан потребують дуже великих коштів на їх здійснення, а тому необхідно шукати шляхи оптимізації витрат, в тому числі, намагаючись відокремити від дійсно небезпечний відходів переробки руд ту частину мінеральних залишків гірського виробництва, які можна розглядати в якості потенційного сировинного ресурсу. Для цього можна використати критерії безпеки для звільнення від регуляторного контролю мінеральної сировини, що містять радіонукліди природного походження у техногенно підвищених концентраціях. На етапі прийняття рішення щодо доцільності використання таких мінеральних ресурсів або їх переробки мають враховуватися також економічні чинники і ринкові умови потенційного збуту таких матеріалів. У разі обґрунтованої рентабельності такого комплексного підходу до поводження із відходами гірського виробництва отримані кошти від збуту сировинної продукції а також її переробки, можуть знизити вартість приведення таких майданчиків у безпечний стан.

Розглядаючи можливості повторного використання потенційних мінеральних ресурсів, що накопичені на майданчику колишнього ВО «ПХЗ», в першу чергу доцільно розглянути фосфогіпс, що у кількості біля 5 млн тон накопичено на поверхні хвостосховища «Дніпровське», який є продуктом переробки апатитів, що походять із кольського півострова і може розглядатися у якості сировинного ресурсу для виробництва будівельних сумішей і навіть для вилучення із них мінеральних елементів різного класу [5]. До того ж вміст природних радіонуклідів у фосфогіпсі різного типу є зазвичай досить низьким порівняно із залишками переробки уранових руд

Оскільки потенційні для переробки мінеральні залишки переробки руд, як правило, розташовані безпосередньо у межах промислових майданчиків гірських-переробних виробництв, зокрема на забруднених територіях «ПХЗ» і містять радіоактивні домішки природного походження у техногенно підвищених концентраціях, такі об'єкти і діяльність на них, перебувають заходів регулюючого контролю із відповідними обмеженнями на можливість доступу і використання таких об'єктів з метою безпеки працівників, а також захисту

населення і природного середовища. Тому, перш ніж і пропонувати певні стратегії і економічну доцільність використання таких матеріалів, мають бути виконано всебічна оцінка радіаційної безпеки поводження з ними і аналіз впливів на навколишнє природне середовище.

Критерії радіаційної безпеки поводження із залишками гірського виробництва. Аналіз радіаційної безпеки є частиною загальної оцінки безпеки [6, 7], що включає оцінки професійного опромінення персоналу, що буде залучений до поводження із такими матеріалами, а також на населення у зоні можливого впливу планової діяльності, а також впливу на соціальне та на навколишнє середовище. Загальні підходи такого аналізу досить добре розроблені і визначені у документах МАГАТЕ, а також у нормах радіаційної безпеки України (НРБУ-97) [8].

У відповідності до НРБУ кількісними критеріями, що забезпечують протирадіаційний захист від техногенно-підсилених джерел природного походження є:

- рівні обов'язкових дій для запобіжного радіаційного контролю;
- рівні дій (РД) для поточного радіаційного контролю.

Рівні обов'язкових дій та рівні дій виражаються в термінах таких показників радіаційної ситуації, які можна вимірювати, зокрема:

- ефективної питомої активності природних радіонуклідів у будівельних матеріалах та мінеральній будівельній сировині;
- потужності поглиненої у повітрі дози гамма-випромінювання в приміщеннях за рахунок ПРН, включаючи компоненту від природного радіаційного фону;
- середньорічної еквівалентної рівноважної об'ємної активності (ЕРОА) ^{222}Rn у в повітрі приміщень;
- питомої активності природних радіонуклідів у питній воді;
- ефективної питомої активності ПРН у мінеральних добривах, сировині і продуктах переробки (зокрема, у будівельних матеріалах).

При перевищенні відповідного рівня обов'язкових дій на конкретному об'єкті втручання практично завжди доцільне і носить попереджувальний характер. При перевищенні відповідного РД, втручання планується на підставі визначення структури та величини всіх складових сумарної дози опромінення від природних і техногенно-підсилених джерел природного походження з подальшою процедурою оптимізації заходів по її зменшенню.

У якості основних показників вмісту радіонуклідів у ґрунтах і залишках переробки руд для оцінки безпеки розглядаються питома активність $^{238+234}\text{U}$, ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{232}Th , а також ^{40}K . Нормами радіаційної безпеки поводження із мінеральною сировиною і будівельними матеріалами встановлюють за показниками, так званої ефективної активності A_{ef} , що визначається за вмістом питомої активності радію-226 (A_{Ra}), торію-232 (A_{Th}) і калію-40 (A_{K}).

$$A_{\text{ef}} = A_{\text{Ra}} + 1.31A_{\text{Th}} + 0.085A_{\text{K}}$$

У разі коли величина A_{ef} у будівельних матеріалах та мінеральній будівельній сировині нижче або дорівнює 370 Бк/кг, такі матеріали і сировина можуть використовуватись для всіх видів діяльності і будівництва без обмежень (I клас). До матеріалів 2 групи (сировина, придатна для промислового та дорожнього будівництва в межах територій населених пунктів та зон перспективної забудови, зовнішнього облаштування житлових та громадських будинків, тощо відносять сировину із родовища, де питома активність копалин за рівнем A_{ef} визначена в діапазоні від 370 до 740 Бк/кг. До матеріалів 3 групи (сировина, придатна для промислового та дорожнього будівництва поза населеними пунктами) – із вмістом ПРН від 740 до 1300 Бк/кг. До матеріалів 4 групи відносять ті, в яких виявлені гірські породи із радіоактивністю понад 1350 Бк/кг.

У деяких випадках, наприклад для використання матеріалів мінерального походження для дорожнього будівництва, фундаментів, або навіть у якості зовнішніх оздобувальних матеріалів (наприклад, для цокольних частин житлових будинків), норми радіаційної безпеки України дозволяють використання таких матеріалів у разі не перевищення A_{ef} - 3700 Бк/кг.

За основними вітчизняними нормативними документами «Норми радіаційної безпеки України» (НРБУ-97) та «Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України» (ОСПУ-2005) відходи гірських виробництв з підвищеним вмістом ПРН (наприклад, фосфогіпс, що утримується на поверхні хвостосховища «Дніпровське») потребують радіаційного контролю у тих випадках, коли поводження з ними персоналу виробництв, якщо дози опромінення робітників перевищують 5 мЗв на рік (існуючі ситуації опромінення у відповідності до [7]). У такому випадку принципи радіаційного контролю до працівників підприємств мають застосовуватися такими ж як і для випадків ситуацій планового

опромінення. Інші вимоги до регулюючого контролю на підприємствах України, залишки виробничої діяльності яких мають підвищений вміст ПРН, визначено у документі [9].

В Україні у 2015 р. також було затверджено розпорядження КМУ №110-р [10] з імплементації директиви 2013/59/Євратом (Council Directive 2013/59/EuroAtom) щодо основних норм безпеки для захисту від небезпеки від іонізуючого випромінювання. Положеннями Директиви регулюються в тому числі питання щодо опромінення людини радіоактивними матеріалами природного походження. В цій директиві встановлено критерії безпеки для систем контролю радіонуклідів природного походження у твердих матеріалах (для радіонуклідів у віковій рівновазі з продуктами їх розпаду) а саме: для природних радіонуклідів серії ^{238}U та ^{232}Th – 1 кБк/кг, а для ^{40}K – 10 кБк/кг. Такі критерії відповідають встановленим міжнародним нормам у документі BSS GSR- Part 3 (Базові стандарти безпеки МАГАТЕ). У разі перевищення цих показників, рівні звільнення від регуляторного контролю певних видів діяльності, мають вирішуватися Регуляторним органом (у даному випадку ДІЯР України) або встановлюватися регулюючий режим у формі реєстрації або ліцензування [8].

Таким чином, норми радіаційної безпеки України є цілком визначені в питаннях щодо можливого використання матеріалів залишків гірського виробництва, що містять природні радіонукліди у техногенно підвищених концентраціях, а тому можуть бути застосовані для інвентаризації потенційних сировинних ресурсів у складі залишків переробки уранових та інших руд, що накопичені на майданчику колишнього ВО «ПХЗ» з метою оцінки їх потенційної придатності для повторного використання і переробки. Остаточне рішення щодо безпеки і доцільності можливого використання має прийматися за результатами погодження із регулюючим органом всіх етапів планової діяльності з переробки таких матеріалів, а також оцінками економічної доцільності.

Оцінки вмісту радіонуклідів природного походження у залишках уранового виробництва на майданчику колишнього ВО «ПХЗ» виконано за результатами комплексної інвентаризації характеристик хвостового матеріалу, ґрунтів і фосфогіпсу, які виконувалися протягом останніх 10 років. Така робота проводилася в рамках програм радіаційного моніторингу та технічного нагляду співробітниками УкрГМІ та ДП «Бар'єр» (оператор

майданчика). Крім кількісних характеристик вмісту радіонуклідів природного походження у мінеральних залишках переробки руд також визначалися їх мінеральний і елементний склад з метою оцінки сировинного потенціалу таких матеріалів для вторинної переробки.

Для вимірювання вмісту природних радіонуклідів уранового ряду у залишках виробництва (^{238}U , ^{226}Ra , ^{230}Th , ^{210}Pb та ^{232}Th і ^{40}K) в лабораторії відділу радіаційного моніторингу природного середовища УкрГМІ використовували сучасні напівпровідникові гамма-спектрометри з надчистим германієвим детектором типу HPGe GMX із відповідним методичним забезпеченням для визначення радіонуклідів уранового і торієвого рядів у природному середовищі [11].

Для визначення елементного складу у мінеральних залишках і фосфогіпсах використано метод енергодисперсійної рентген-флуоресцентної спектрометрії (EDXRF), виконаний на приладі EDX-8100 з модулем гелієвої продувки (Shimadzu, Японія). Для цього аналізу були використані 1г порошкові подріб-

нені зразки. Для кількісного аналізу використовували набори різних еталонних матеріалів виробництва МАГАТЕ (SL-1, SL-3, IAEA-158, IAEA-405, IAEA-457, RGU-1, RGTh-1) та WEPAL (ISE-954). Для визначення вмісту рідкоземельних елементів використано результати аналітичних вимірювань зразків хвостового матеріалу і фосфогіпсів майданчика у партнерській лабораторії компанії LOKMIS (Литва) із використанням за плазмового мас-спектрометра ICP-HRMS Element-2 високої роздільної здатності (ThermoFinnigan, Німеччина) з мікрохвильовим мінералізатором AntonPaar-MULTIWAVE (AntonPaarGmbH, Австралія). У якості калібрувальних розчинів для аналізу використовували «багатоелементний стандартний розчин ICP VI» (30 елементів у розведеній азотній кислоті) Suprapur® (Merck KGaA, Німеччина) та «Суміш рідкоземельних елементів для ICP» (16 елементів, 50 мг/л в азотній кислоті) виробництва TraceCERT® (Fluka Analytical, Швейцарія). Також використовувалися архівні дані визначення рідкоземельних елементів у фосфогіпсах, які виконано із використанням спектрофотометричних методів.

Результати та обговорення

Оцінка впливу фосфогіпсу на забруднення підземних вод. Побічним продуктом переробки фосфатних руд на майданчику «ПХЗ» в процесі розмелу і обробки сірчаної кислотою формувався фосфоровмісний нерозчинний осад сульфату кальцію, який і називається фосфогіпсом. Фосфогіпс, який накопичено на поверхні хвостосховища «Дніпровське» є залишковим продуктом переробки кольєських апатитових руд. Його поверхня не має захисного покриття, а неоднорідність рельєфу його поверхні (насіпом від 5 до 16 м) сприяла формуванню депресійних форм (суфозійних воронок), де накопичувалися атмосферні води, які поступово інфільтрувалися через товщу фосфогіпсу у тіло залишків уранового виробництва.

Фосфогіпс містить мінеральні основи для генерування кислот (переважно сірчаної) [5], які добре розчиняються у воді і вимиваються атмосферними водами з відвалів фосфогіпсу, потрапляючи у підземні та поверхневі води. Особливим випадком стало його розміщення на поверхні хвостосховища «Дніпровське», де вилуговування слабких розчинів кислот із фосфогіпсів атмосферними водами і надходження їх у тіло залишків уранового виробництва, збільшує вміст сульфатних комплексів стимулює вимивання урану у підземні води.

Результати моніторингових досліджень авторів, щодо вмісту урану і сульфатів у підземних водах техногенного горизонту під тілом хвостосховища «Дніпровське» за 2009 і 2021 р показано на Рис. 2 і свідчать, що вміст сульфатів у підземних водах під хвостосховищем є дуже високим (від 2,3 г/л до 8,5 г/л), що вірогідно є результатом додаткового надходження його із фосфогіпсу на поверхні даного хвостосховища. Порівняльний аналіз вмісту сульфатів у підземних водах техногенного горизонту під тілом хвостосховища «Західне» за той же період показали, що вміст сульфатів у воді був у тричі нижчим.

Результати спостережень (рис. 2) також показали, що за період з 2009 р. до 2021 р. питома активність урану у підземних водах під тілом хвостосховища «Дніпровське», також суттєво зросла. Такі результати підтверджують доцільність необхідної заміни фосфогіпсового покриття на поверхні хвостосховища «Дніпровське» на більш ефективне ґрунтове. Разом з тим, заміна фосфогіпсового покриття вимагає зняти його з поверхні уранового хвостосховища, а це дуже витратні заходи для такої кількості фосфогіпсу, у тому числі із невідзначеними майданчиками і стратегією його довготривалого утримання.

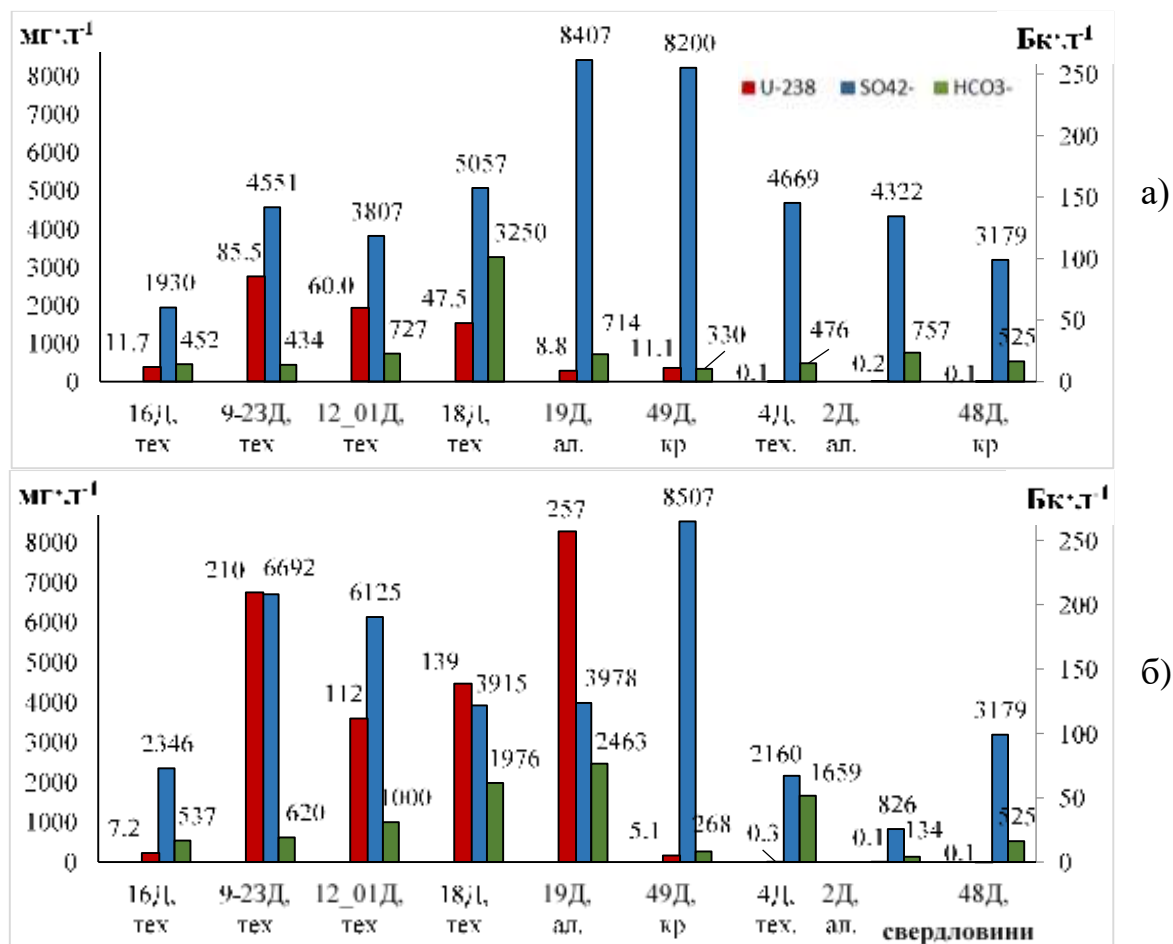


Рис. 2 – Просторовий розподіл концентрацій активності урану і основних аніонів у техногенному і алювіальному водоносних горизонтах хвостосховища «Дніпровське» за даними спостережень 2009 р. (а) і 2021 р. (б)

Fig. 2 – Spatial distribution of Uranium specific activity concentrations and major anions in the aquifers of the Dneprijskoe tailings according to monitoring data of 2009 (a) and 2021 (b)

Тому, у даному дослідженні, фосфогіпс розглядається з одного боку, як джерело хронічного забруднення підземних вод, а з іншого як потенційний ресурс для можливого його повторного використання і переробки. Доцільність використання і переробки фосфогіпсу розглядалася за різними можливими напрямками, зокрема, для виробництва будівельних сумішей, на основі гіпсу та крейди, які можуть бути виділені внаслідок конверсії сульфату кальцію, а також для можливого вилучення деяких корисних мінеральних елементів у тому числі рідкоземельних елементів церієвої та ітрієвої груп методами гідрометалургії.

Для обґрунтування можливості повторного використання і переробки фосфогіпсу (замість витратної їх передислокації і довготривалого утримання на інших підготовлених

місцях майданчика), а також мінеральних залишків переробки урановмісних руд необхідно було визначити вміст у їх складі природних радіонуклідів уранового і торієвого рядів, а також вміст калію-40, високий вміст яких у таких залишках є суттєвим фактором обмеження у розгляді стратегій поводження з ними. Такі дослідження було виконано у відділі радіаційного моніторингу природного середовища УкрГМІ. Узагальнення отриманих даних показано в таблиці 1 (для фосфогіпсового покриття), і таблиці 2 для інших мінеральних залишків переробки уранових руд).

Результати оцінки вмісту природних радіонуклідів у складі фосфогіпсу кольського походження на поверхні хвостосховища «Дніпровське» показали, що, не зважаючи на неоднорідність його забруднення у

Таблиця 1

Активність радіонуклідів у фосфогіпсі на майданчику ПХЗ, (Бк/г)

Table 1

Specific Activity concentration of radionuclides in phosphogypsum at the tailings site, (Bq/g)

Об'єкт	^{238}U	^{230}Th	^{226}Ra	^{210}Pb	^{232}Th
Фосфогіпс кольських апатитів (хвостосховище «Дніпровське»)	0.03-0.20	0.03-0.40	0.04-0.40	0.03-0.50	0.01-0.05
Ґрунти за межами зони впливу, природний фон	0.02 -0.04	0.03-0.04	0.03-0.04	0.04-0.06	0.02-0.05

Таблиця 2

Радіонукліди в матеріалах хвостосховищ на майданчику «ПХЗ»

Table 2

Specific activity concentrations of radionuclides in U-tailings materials at the PChP site

Хвостосховище	Активність (Бк/г) у шламових матеріалах					
	^{238}U	^{226}Ra	^{210}Pb	^{230}Th	^{232}Th	^{40}K
Дніпровське	1.1±0.4	18.7±8.6	17.6±10.7	29.3±13.8	0.08±0.02	0.25±0.10
Центральний Яр	3.3±0.6	55.3±10.1	57.5±10.2	66.4±23.8	0.03±0.01	0.45±0.15
Західне	2.1±0.5	10.1±3.4	11.3±4.3	17.8±8.2	0.12±0.04	0.38±0.13
Сухачівське	0.4±0.1	7.6±2.0	7.8 ± 2.2	9.2±2.2	0.45±0.20	0.51 ± 0.20

межах приблизно одного порядку величин, у жодній пробі максимальні концентрації із ряду вимірювань активності природних радіонуклідів у фосфогіпсі не перевищували базовий рівень безпеки (1 Бк/г), для звільнення поводження з ним від регулюючого контролю. Тому є всі підстави розглядати фосфогіпс на поверхні хвостосховища «Дніпровське» у якості потенційного мінерального ресурсу, який є придатним для повторного використання і переробки. Заміна його на ґрунтове покриття має суттєво знизити негативний вплив кислотних продуктів вилугування фосфогіпсів на вимивання урану та інших радіонуклідів із тіла хвостосховища у підземні води.

Разом із тим, слід враховувати, що на даний час фосфогіпс на поверхні хвостосховища «Дніпровське» має офіційний статус «захисного покриття», тому видалити його з поверхні хвостосховища, навіть у разі обґрунтування економічної доцільності і екологічної безпеки не має можливості без запропонованої альтернативи спорудження нового ґрунтового захисного покриття. Саме тому, в рамках даного дослідження розглядаються шляхи найбільш ефективної переробки фосфогіпсу із можливо найбільшим прибутком в отриманні коштів, які мають бути спрямовані на спорудження нового захисного покриття. Слід зауважити, що фосфогіпс, який на даний час збе-

рігається на поверхні хвостосховища Дніпровське, формально є елементом його захисного покриття, але не виконує у повній мірі своєї основної функції.

Мінеральні залишки переробки уранових руд у хвостосховищах. На етапах характеристики стану забруднення майданчика колишнього ВО «ПХЗ» виконувалися також оцінки вмісту радіонуклідів у складі залишків уранового виробництва, які накопичено у хвостосховищах. Типові концентрації активності радіонуклідів серії розпаду урану у хвостосховищах і накопичувачах продуктів очистки уранової продукції показано у таблиці 2.

Узагальнені результати показали, що практично в усіх об'єктах концентрованого утримання залишків уранового виробництва вміст природних радіонуклідів у десятки разів перевищує рівень звільнення. Тому їх переробка і можливе повторне використання (навіть за умов потенційного вмісту корисного компоненту) є недоцільними і не може бути дозволеною у погодженні із регулюючим органом. Міжнародна практика довготривалого поводження з такими матеріалами доводить, що єдиним раціональним і безпечним напрямком поводження з ними є довготривале утримання у спеціально підготовлених хвостосховищах із відповідними інженерними і геохімічними бар'єрами безпеки із застосуванням заходів радіаційного контролю, з метою недопущення

суттєвого винесення радіонуклідів із тіла хвостосховищ водним шляхом, а також в умовах надійного ґрунтового покриття, що дозволяє контролювати емісію в атмосферу радону - 222, як продукту його еманції із накопиченого у хвостосховищах радіо-226 у складі залишків переробки уранових руд.

Саме тому, стратегія приведення у безпечний стан хвостосховищ «Західне» і «Центральний яр» із найбільшим вмістом природних радіонуклідів у хвостах, яку було розроблено в рамках проектів технічної допомоги ЄС визначає необхідність спорудження нового покриття на їх поверхні. З іншого боку, хвостосховища «Центральний яр» і «Західне» розташовані на схилах верхньої тераси р. Дніпро. В цілому дослідження наведені у [12] показали, що сучасні радіологічні ризики потенційного опромінення за рахунок забруднення підземних вод є дуже низькими і будуть залишатися такими принаймні наступні 200 років, враховуючи дуже малі швидкості перенесення урану і радіо із підземними водами у напрямку їх розвантаження у р. Коноплянка (притока р. Дніпра). Натомість, сам факт суттєвого розширення ореолу радіоактивного забруднення підземних вод є вкрай небажаним, оскільки унеможливує у майбутньому локалізувати процеси забруднення довкілля. Тому доцільно розглянути також варіанти стратегії приведення у безпечний стан майданчика, що допускають перевезення хвостового матеріалу із хвостосховищ «Західне» і «Центральний яр» в одну із секцій хвостосховища «Дніпровське» на етапі заміни фосфогіпсового покриття на кондиційне ґрундове. Розрахунки, які наведені у [12] також показали, що винесення радіонуклідів із хвостосховища «Дніпровське» у поверхневі водні об'єкти є принаймні у 10 разів більш тривалим ніж із хвостосховищ «Західне» і «Центральний яр» на схилах верхньої тераси р. Дніпро, розташовано колишній майданчик «ПХЗ». Саме для розгляду таких гіпотетичних сценаріїв перенесення матеріалу із цих хвостосховищ на «Дніпровське», необхідно буде враховувати характеристики радіоактивного забруднення і елементний склад залишків переробки уранових руд, що були наведені у таблиці 2.

Нерадіоактивні елементи в матеріалах хвостосховищ та фосфогіпсі. Оскільки проби ґрунту і залишків всіх хвостосховищ на майданчику колишнього «ПХЗ» після їх вивчення на вміст природних радіонуклідів зберігалися у літотеці в УкрГМІ, в лабораторіях інституту також було виконано аналіз цих

проб на вміст інших мінеральних компонентів. Оцінки масового вмісту таких елементів у хвостосховищах мінеральних залишків переробки уранових руд і фосфогіпсі використовувалися для експертної оцінки доцільності і технологічної можливості вилучення таких елементів із залишків рудного виробництва. Елементний аналіз було виконано для всіх хвостосховищ, результати яких розглядаються у [13].

Натомість, враховуючи висновок, щодо недоцільності розгляду стратегій переробки мінеральних залишків переробки уранових руд, що накопчені у хвостосховищах, у даному дослідженні надано характеристики лише тієї частини мінеральних ресурсів, які потенційно можуть бути звільнені від регуляторного контролю, а саме фосфогіпсове покриття хвостосховищ Дніпровське і Сухачівське. Порівняльний аналіз вмісту корисних мінеральних елементів у фосфогіпсі і рудних залишках уранового виробництва, можна виконати для результатів, які надаються для хвостосховища «Дніпровське» (табл. 3).

Результати наведені у таблиці свідчать, що у складі фосфогіпсу основними складовими є кальцій і сірка і кремній, що є типовим для гіпсової матриці фосфогіпсу. Відповідно, основним напрямком його використання може стати виробництва в'язучих будівельних сумішей. Натомість у складі фосфогіпсу також визначені наявність цінних мінеральних елементів, таких як ванадій, хром, а також рідкоземельні елементи (група ітрію, церій, неодим та деякі інші).

Навіть ці попередні дані дають достатні підстави розглядати ці матеріали як потенційний ресурс, який так чи інакше може бути використаний для отримання вторинної продукції з метою зниження витрат на відновлювальні заходи та соціальну реабілітацію цього промислового об'єкта.

У складі рудних залишків уранового виробництва, що накопчені у хвостосховищах в істотно значущих концентраціях визначено вміст металів, таких як залізо, марганець, хром, кадмій, мідь і цинк, які також у значних концентраціях виявлено у складі підземних вод під хвостосховищами. Це свідчить про необхідність включати у регулярні програми моніторингу забруднення підземних і поверхневих вод зон впливу хвостосховищ уранового виробництва, також спостереження за їх забруднення цими металами.

Розглядаючи можливість найбільш економічно доцільних напрямків переробки фосфогіпсу з метою часткового покриття вартості

Таблиця 3

Вміст основних елементів у фосфогіпсах (ФГ) і залишках переробки уранових руд на території «ПХЗ»

Table 3

Element composition in the phosphogypsum (ФГ) and mineral residues of the Uranium ore processing at the PChP site

Місце відбору	Концентрація											
	г/кг											
	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe	Mn	Sr	Zr	Ba
Дніпровське хвостосховище	16.9	31.9	189	34.3	15.1	51.4	2.86	113	2.61	0.28	0.13	0.25
ФГ покриття на Дніпровському хвостосховищі	1.97	7.14	110	181	0.52	149	2.11	3.70	0.08	10.4	1.34	0.12
ФГ покриття на Сухачівському хвостосховищі	10.1	15.0	131	154	1.45	138	2.10	16.0	0.22	3.04	0.70	0.12
Залишки рудного матеріалу на майданчику ПХЗ	7.85	34.9	297	ND	14.9	16.8	3.74	12.4	0.46	0.20	0.67	0.39

Таблиця 3 (продовження)

Вміст основних елементів у фосфогіпсах (ФГ) і залишках переробки уранових руд на території «ПХЗ»

Table 3 (continuation)

Element composition in the phosphogypsum and mineral residues of the Uranium ore processing at the PChP site

Місце відбору	Концентрація												
	мг/кг												
	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Y	Th	U	As	Ce	Nd	Er
Дніпровське хвостосховище	125	101	30.9	27.8	45.6	110	32.3	14.9	41.1	12.3	-	-	-
ФГ покриття на Дніпровському хвостосховищі	33.2	48.2	4.79	25.2	ND	48.6	26.9	8.36	9.69	2.89	-	-	-
ФГ покриття на Сухачівському хвостосховищі	24.0	53.9	7.97	43.7	33.5	187	121	9.57	5.28	4.06	195	91.6	13.2
Залишки рудного матеріалу на майданчику ПХЗ	70.3	52.5	7.22	13.7	18.3	57.2	23.8	8.65	145	1674	404	194	28.3

для спорудження нового покриття крім виробництва різного типу будівельних сумішей за технологіями, які розглядаються, наприклад у [5,14,15], привабливим може також стати розгляд можливості вилучення рідкоземельних елементів (РЗЕ). Деякі попередні дослідження, які було виконано раніше на «ПХЗ» з із досвіду вилучення РЗЕ із кольського фосфогіпсу доводять можливість отримання так званого колективного концентрату РЗЕ від 0,4% до 0,8%. У разі застосування спеціальних екстракторів із концентрату РЗЕ можна вилучати ітрій, європій, гадоліній та інші цінні елементи.

Очевидно, що економічні обґрунтування і технологічні можливості щодо такої глибокої переробки фосфогіпсу, потребують спеціальних досліджень і тестових виробничих випробувань, але навіть такі дуже поверхневі оцінки дають підстави, щодо актуальності розпочати цикл таких досліджень в рамках програм приведення майданчику колишнього ВО «ПХЗ» у безпечний стан. Техніко-економічне обґрунтування (ТЕО) проекту заміни фосфогіпсового покриття має розглядати всі можливі шляхи його використання у тому числі за напрямками переробки у будівельні суміші, а також можливого вилучення саме рідкоземельних елементів.

Економічна доцільність такої стратегії може бути підтримана, виходячи із деяких оцінок ринку виробництва корисної продукції із фосфогіпсу, ринкова вартість якого може складати від 300 гривень за тону у разі простого вивезення і використання його для гіпсування кислих земель для збільшення їх родючості [16], до 5-10 тисяч гривень за тону і більше після переробки у будівельні суміші, а саме: гіпсова в'язуча сировина, хімічно осаджений тонко дисперсний кальцит, як наповнювач для фарб, пластмас і шпаклівок, оксид кальцію (негашене вапно), гідрооксид кальцію (гашене вапно) та інша продукція, яка має попит на українському ринку.

Успішний досвід переробки фосфогіпсу для виробництва будівельних добавок і будівельних матеріалів продемонстровано у [5], де показано, що експериментальні лабораторні установки показали можливість виробництва будівельних добавок до 10-15 тон

на день. Промисловий рівень переробки фосфогіпсу можна збільшити у десятки разів і дозволити переробляти до 300-500 тон на день, у тому числі переробляти фосфогіпс у крейду та сульфат амонію розчин карбонату амонію та додатковий запас газоподібних NH_3 та CO_2 [17, 18]. Водночас можна видобувати рідкісноземельні елементи [19, 20].

Очевидно, що вартість переробки фосфогіпсу у значній мірі буде залежати від кон'юнктури ринку, а також доступності і вартості інвестицій, які потрібно залучити для будівництва підприємства з переробки фосфогіпсу. Натомість, вище наведені оцінки дають всі підстави вважати, що можливість переробки залишків гірського виробництва на майданчиках спадщини уранових, є цілком реальною і має розглядатися як елемент комплексних стратегій приведення майданчиків спадщини уранового виробництва у безпечний стан.

Висновки

Результати оцінок, що наведені дають всі підстави вважати, що фосфогіпс накопичений на поверхні хвостосховища Дніпровське, не виконує у повній мірі функцію захисного покриття і стимулює окислення і росту вмісту урану у підземних водах. Тому стратегія приведення майданчика уранового виробництва ПХЗ у безпечний стан має включати заміну даного покриття на нове, що буде відповідати вимогам необхідної довготривалої консервації залишків уранового виробництва у хвостосховищі.

Заміна існуючого покриття новим, потребує поетапного заміщення фосфогіпсу, який за показниками економічної доцільності, радіаційної безпеки можна розглядати як

потенційний ресурс для використання і переробки у товарну продукцію. Напрямки найбільш ефективної переробки фосфогіпсу мають бути визначені в рамках техніко-економічного обґрунтування проекту спорудження нового покриття, яке має одночасно розглядати стратегію і варіанти промислової переробки фосфогіпсу із поступовим заміщенням його на комплексне ґрунтове покриття у відповідності до кращого міжнародного досвіду.

Розвиток підприємств з переробки залишків рудного виробництва на майданчику дозволить оживити його економічне відродження і у майбутньому переробляти інші відходи гірського виробництва в регіоні.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Список використаної літератури

1. Войцехович О.В. Приднепровский химический завод – масштабы бедствия и перспективы приведения площадки уранового наследия («ПХЗ») в безопасное состояние, 22 с. URL: <https://uatom.org/wp-content/uploads/2016/12/PHZ-3.pdf>
2. Voitsekhovych O., Lavrova T. Strategy for Remediation of Former PChP Uranium Production Site in Ukraine 44th Annual Waste Management Conference WM 2018 Conference, March 18-27, 2018, Phoenix, Arizona, USA. – Vol. 8 (2018) P. 5035-5048.

3. Korychensky K.O, Laptiev, G.V., Voitsekhovych O.V., Lavrova T.V, Dyvak T.I., Speciation and mobility of uranium in tailings materials at the U-production legacy site in Ukraine. *J. Nuclear Physics and Atomic Energy*. 2018. Vol. 19. No 3. 270-279. <http://dx.doi.org/10.15407/jnpae2018.03.270>
4. Development of the method (strategy, technology) for remediation activities at the former Uranium facility Pridneprovskiy Chemical Plant. Development of an overall remediation strategy for the Pridneprovskiy Chemical Plant". INSC Project U401/10G (2016). Task 5A Final Report
5. Іващенко Т.Г., Бондар О.І., Новосельська Л.В., Вінниченко В.І. Фосфогіпс. Екологічні безпечні шляхи утилізації і використання.-ОЛДІ-ПЛЮС, 2017- 218 с.
6. International Basic Safety Standards. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources. General Safety Requirements (GSR Part 3). IAEA 2014. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1578_web-57265295.pdf
7. Management of Residues Containing Naturally Occurring Radioactive Material from Uranium Production and Other Activities, IAEA Safety Standards Series No. SSG-60, IAEA, 2021. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/PUB1883_web.pdf
8. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97): державні гігієнічні нормативи ДГН 6.6.1.-6.5.001-98. К., 2000. 135 с.
9. Safety Reports Series No. 78 Radiation Protection and Management of NORM Residues in the Phosphate Industry. 2013. URL: <https://docplayer.net/159796508-Subject-approval-of-florida-industrial-and-phosphate-research-institute-s-fy-annual-report.html>
10. Про схвалення розроблених Державною інспекцією ядерного регулювання планів імплементації деяких актів законодавства ЄС : розпорядження Кабінету міністрів України від 18.02.2015 р. N 110-р / "Законодавство України" URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/110-2015-%D1%80>.
11. Костеж А.Б., Лаврова Т.В. Прикладная ядерная спектрометрия радионуклидов уран-ториевых рядов в пробах окружающей среды. Ч. 1: Монография. К.: Укр.НИГМИ, ЗАО "Випол", 2011. – 212 с
12. Ткаченко К.Ю., Скальський О.С., Бугай Д.О., Лаврова Т.В. та інші. (2020). Моніторинг техногенного забруднення підземних і поверхневих вод у зоні впливу уранових хвостосховищ Придніпровського хімічного заводу (м. Кам'янське). *Геологічний журнал*. 372 (3). С. 17-35. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2020.3.206341>
13. Voitsekhovych O., Lavrova T., Korychensky K., Satalkina L., Haneklaue N., Steiner G. NORM management at the former Pridneprovsky Chemical Plant in Ukraine, Conference: International Conference on the Management of Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) in Industry <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.20345.90724>
14. Camposl M.P., Costa J.P., Nisti M.B. Phosphogypsum recycling in the building materials industry: assessment of the radon exhalation rate. *J. of Environm. Radioactivity*. 2017. Vol. 172. P. 232-236. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.04.002>
15. Герасимов Д.В., Игнатъев А.А., Готовцев В.М., Голиков И.В. Перспективы использования фосфогипса в производстве асфальтобетона. ДП "ДерждорНДІ" URL:<https://dorndi.org.ua/ua/pidhodi-do-prognozu-vannya-ekspluatatsiy-nih-harakteristik-asfalytobetonu-na-osnovi-zakordonnogo-dosvidu>
16. ТУ У 24.1-31980517-002:2005. Фосфогіпс – меліорант для сільського господарства.
17. Canovas C.R., Peres-Lpes, R., Macias, F., Chapron, S., Nietto J.M., Pellet-Roasting, S. Exploration of fertilizer industry wastes as potential source of critical raw materials. *J. of Cleaner. Production*. 2017. Vol.143. P.497-505. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.083>
18. Волков О., Брехария Х., Мухачов А., Харитонова О., Ажежа В. Спосіб добування рідкісноземельних елементів із фосфогіпсу. Патент, № UA 5644. Бюл. №3 2005. URL: <http://uapatents.com/2-5644-sposib-dobuvannya-ridkisnozemelnykh-elementiv-iz-fosfogipsu.html> (In Ukrainian)
19. Ричков В.М, Кирилов Е.В. Кирилов С.В. Семиніщев В.С. та інші. Вилучення рідкісно-земельних елементів із фосфогіпсу. *Журнал. Чиста продукція*. 2018. Вип. 196. С. 674-681 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.114>
20. Korovin V.Y., Shestak Y N. Scandium extraction from hydrochloric acid media by Levextrel-type resins containing di-iso-octyl-methyl-phosphonate. *J. Hydrometallurgy*. 2009. Vol. 95. P. 346-349. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.05.011>

Стаття надійшла до редакції 07.11.2021

Рекомендована до друку 20.12.2021

K. O. KORYCHENSKYI¹,

Research Officer of the Environmental Radiation Monitoring Department
e-mail: korychenskyi@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2439-2224>

T. V. LAVROVA¹,

Research Officer of the Environmental Radiation Monitoring Department
e-mail: lavrova@uhmi.org.ua

O. V. VOITSEKHOVYCH¹, Ph.D.(Geography),

Head of the Environmental Radiation Monitoring Department
e-mail: o.voitsekhovych@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5557-4288>

¹*Ukrainian Hydrometeorological Institute of the State Emergency Service of Ukraine and National Academy of Sciences of Ukraine, 37 Avenue Nauky, Kyiv, 03028, Ukraine*

**ECOLOGICAL AND ECONOMIC ASPECTS OF PHOSPHOGYPSUM SAFETY
MANAGEMENT AT THE FORMER URANIUM PRODUCTION SITE
“PRIDNIPROIVSKY CHEMICAL PLANT”**

Purpose: Justification the possibility of safe re-use and recycling of the residues of Uranium-containing raw material processing as an element of the remediation strategy for bringing the site of the former "Prydniprovsky Chemical Plant" (PChP) to a safe state.

Methods: Site specific field studies and analytical methods for determining of the radionuclides of Uranium-Thorium series, as well as useful mineral elements in the residues of Uranium production, assessment of safe management and possible options for its re-use and recycling.

Results: According to the results of monitoring studies on the radionuclide and hydrochemical composition of groundwater at the PChP industrial site for the period from 2009 to 2021 year, a high content of sulfates and an increased content of uranium in groundwater under the body of the Dniprovsk tailing dump, which has a phosphogypsum coating on its surface, was revealed. Phosphogypsum is considered, on the one hand, as a source of groundwater pollution, and on the other, as a potential resource for its possible reuse and processing. The results of experimental studies of the content of natural radionuclides and the elemental composition of mineral residues of ore production at the site of the former uranium ore processing plant "PChP" are also provided, as well as a safety assessment of their handling and the options of their possible processing as an element of the strategy for bringing the site to a safe state.

Conclusions: The possibility and necessity of safe processing of phosphogypsum on the surface of the tailings "Dniprovsk" with its simultaneous replacement by a new soil cover is proved.

KEYWORDS: **legacy of uranium production, phosphogypsum, radioactive materials of naturally origin, reuse and recycling, residues of raw materials**

References

1. Voitsekhovych, O.V. (2016). PChP U-legacy site - the scale of the environment hazards and the prospects to bring it to a safe state. Retrieved from <http://uatom.org/index.php/ru/2016/12/12/prydneprovskiy-hymycheskyj-zavod-masshtaby-bedstvyya-y-perspektyvy-pryvedenyya-ploshhadky-uranovogo-nasledyya-phz-v-bezopasnoe-sostoyanye/> (In Russian)
2. Voitsekhovych, O., & Lavrova, T. (2018). Strategy for Remediation of Former PChP Uranium Production Site in Ukraine 44th Annual Waste Management Conference WM 2018 Conference, March 18-27, 2018, Phoenix, Arizona, USA. 8, 5035-5048.
3. Korychensky K.O., Laptiev, G.V., Voitsekhovych O.V., Lavrova T.V., & Dyvak T.I. (2018). Speciation and mobility of uranium in tailings materials at the U-production legacy site in Ukraine. *J. Nuclear Physics and Atomic Energy*, 19(3), 270-279. <http://dx.doi.org/10.15407/jnpae2018.03.270>
4. Development of the method (strategy, technology) for remediation activities at the former Uranium facility Pridneprovskiy Chemical Plant. Development of an overall remediation strategy for the Pridneprovskiy Chemical Plant". INSC Project U401/10G (2016). Task 5A Final Report.
5. Ivashchenko, T.G., Bondar, O.I., Novoselskaya, L.V., & Vinnichenko, V.I.(2017). Phosphogypsum. Ecological safe ways of it utilization and use. OLDI-PLUS. (In Ukrainian)
6. International Basic Safety Standards. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources. General Safety Requirements (GSR Part 3). (2014). IAEA. Retrieved from https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1578_web-57265295.pdf
7. Management of Residues Containing Naturally Occurring Radioactive Material from Uranium Production and Other Activities. (2021). IAEA Safety Standards Series No. SSG-60, IAEA. Retrieved from https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/PUB1883_web.pdf
8. Radiation safety standards of Ukraine (NRBU-97): state hygienic standards DGN 6.6.1.-6.5.001-98. K., 2000. 135 p.

9. Radiation Protection and Management of NORM Residues in the Phosphate Industry. (2013). *Safety Reports Series*, (78). Retrieved from <https://docplayer.net/159796508-Subject-approval-of-florida-industrial-and-phosphate-research-institute-s-fy-annual-report.html>
10. About approval of the plans of implementation of some acts of the legislation of the EU developed by the State inspection of nuclear regulation: the order of the Cabinet of Ministers of Ukraine from 02/18/2015 N 110-r / "Legislation of Ukraine". Retrieved from <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/110-2015-%D1%80>.
11. Kostezh, A.B., & Lavrova, T.V. (2011). Applied nuclear spectrometry of radionuclides of Uranium and Thorium decay series in the environmental samples. Part 1: Monograph. К.: Ukr.NIGMI, ZAO Vipol.
12. Tkachenko, K.Y., Skalsky, O.S., Bugay, D.O., Lavrova, T.V. ...& Zanoz, B. (2020). Monitoring of man-caused pollution of groundwater and surface water in the zone of influence of Uranium tailings at the Pridneprovsky Chemical Plant (Kamyanske). *Geological Journal*, 372 (3), 17-35. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2020.3.206341> (In Ukrainian)
13. Voitsekhovych, O., Lavrova, T., Korychensky, K., Satalkina, L., Haneklaue, N., & Steiner, G. NORM management at the former Pridneprovsky Chemical Plant in Ukraine, Conference: International Conference on the Management of Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) in Industry <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.20345.90724>
14. Camposl, M.P., Costa, J.P. & Nisti, M.B. (2017). Phosphogypsum recycling in the building materials industry: assessment of the radon exhalation rate. *J. of Environm. Radioactivity*, 172, 232-236. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.04.002>
15. Gerasimov, D.V., Ignatiev, A.A., Gotovtsev, V.M., & Golikov, I. (2018). Prospects for the use of phosphogypsum in the production of asphalt concrete. State Enterprise "DerzhdorNDI". Retrieved from <https://dorndi.org.ua/ua/pidhodi-do-prognozuвання-eksploataciynih-harakteristik-asfalytobetonu-na-osnovi-zakordonnogo-dosvidu> (In Russian)
16. TU U 24.1-31980517-002: 2005. Phosphogypsum is an ameliorant for agriculture. (In Ukrainian)
17. Canovas, C.R., Peres-Lpes, R., Macias, F., Chapron, S., Nietto J.M., & Pellet-Roasting, S. (2017). Exploration of fertilizer industry wastes as potential source of critical raw materials. *J. of Cleaner. Production*, 143, 497-505. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.083>
18. Volkov, O. F., Brekharina, Hr. P., Mukhachev, A. P., Kharitonova, O.A. & Azhezha, V.M. (2005). Method for extraction of rare-earth elements from phosphogypsum. Declarative patent for utilities model., № UA 5644, Bul., (3), 18. Retrieved from <http://uapatents.com/2-5644-sposib-dobuvannya-ridkisnozemelnykh-elementiv-iz-fosfogipsu.html> (In Ukrainian)
19. Rychkov, V.N., Kyryllov, E.V., Kyryllov, S.V., Seminishev, V.S., Bunkov, G.M., Botalov, M.S. Smyshlyaev, D.V., & Malyshev, A.S. (2018). Recovery of rare earth elements from phosphogypsum. *J. of Cleaner Production*, 196, 674-681. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.114> (In Ukrainian).
20. Korovin, V.Y. & Shestak, Y. N. (2009). Scandium extraction from hydrochloric acid media by Levextrel-type resins containing di-iso-octyl-methyl-phosphonate. *J. Hydrometallurgy*, 95, 346-349. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.05.011>

The article was received by the editors 07.11.2021

The article is recommended for printing 20.12.2021

К. А. КОРИЧЕНСКИЙ¹,

научн. сотр. отдела радиационного мониторинга окружающей среды
e-mail: korychenskyi@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2439-2224>

Т. В. ЛАВРОВА¹,

научн. сотр. отдела радиационного мониторинга окружающей среды
e-mail: lavrova@uhmi.org.ua

О. В. ВОЙЦЕХОВИЧ¹, канд. географ. наук,

зав. отдела радиационного мониторинга окружающей среды
e-mail: o.voitsekhovych@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5557-4288>

¹Украинский гидрометеорологический институт ГСЧС и НАН Украины,
проспект Науки, 37, г. Киев, 03028, Украина

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ БЕЗОПАСНОГО СОДЕРЖАНИЯ ФОСФОГИПСА НА ПЛОЩАДКЕ БЫВШЕГО УРАНОВОГО ПРОИЗВОДСТВА «ПРИДНЕПРОВСКИЙ ХИМИЧЕСКИЙ ЗАВОД»

Цель: Определение возможности безопасного использования и переработки остатков переработки урансодержащих руд и фосфогипса на площадке бывшего ПО «Приднепровский химический завод» как элемент стратегии приведения ее в безопасное состояние

Методы. Полевые работы и аналитические методы определения содержания радионуклидов уран-ториевых рядов, а также полезных элементов в минеральных остатках уранового производства, оценка безопасного обращения с ними и возможных направлений их переработки.

Результаты: По результатам мониторинговых исследований по радионуклидному и гидрохимическому составу подземных вод промышленной площадки «ПХЗ» за период с 2009 по 2021 год было выявлено высокое содержание сульфатов и повышенное содержание урана в подземных водах под телом хвостохранилища «Днепровское», которое имеет фосфогипсовое покрытие на его поверхности. Фосфогипс рассматривается с одной стороны как источник загрязнения подземных вод, а с другой как потенциальный ресурс для возможного его повторного использования и переработки. Предоставляются также результаты экспериментальных исследований содержания природных радионуклидов и элементного состава минеральных остатков рудного производства на площадке бывшего завода по переработке урановых руд «ПХЗ», а также оценки безопасности обращения с ними и направления их возможной переработки как элемента стратегии приведения площадки в безопасное состояние

Выводы. Доказана возможность и необходимость безопасной переработки фосфогипса на поверхности хвостохранилища «Днепровское» с одновременным замещением его на новое грунтовое покрытие.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: наследие уранового производства, фосфогипс, радиоактивные материалы природного происхождения, повторное использование, переработка, минеральные остатки рудного происхождения

Статья поступила в редакцию 07.11.2021

Статья рекомендована в печать 20.12.2021