ЕКОЛОГІЯ ТА ЕКОНОМІКА ПРИРОДНИХ РЕСУРСІВ

УДК 550.4:574.3

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.3-36.12>

РАДІОЕКОЛОГІЧНА СИТУАЦІЯ НА ТЕРИТОРІЇ ЕКЗОГЕННИХ ІНФІЛЬТРАЦІЙНИХ РОДОВИЩ УРАНУ УКРАЇНИ ТА ОЦІНКА ЇЇ ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ

Буглак О.В.¹, Верховцев В.Г.², Сушук К.Г.², Тищенко Ю.Є.², Задорожний Д.Б.²

¹Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, 03035, м. Київ

aleksandra.verkhovtseva@gmail.com;

²Інститут геохімії навколишнього середовища
Національної академії наук України

пр. Академіка Палладіна, 34А, 03142, м. Київ
Verkhovtsev@ukr.net, mamas@i.ua, u-risk@ukr.net

За результатами проведених упродовж 2015–2020 років польових та камеральних радіоекологічних досліджень на кількох екзогенних інфільтраційних родовищах урану (за класифікацією МАГАТЕ – пісковикового типу) осадового чохла Українського щита проведена комплексна оцінка радіоекологічної ситуації, геолого-економічне обґрунтування перспектив освоєння уранових родовищ та оцінка можливостей застосування способу підземного свердловинного вилуговування (ПСВ) для їх промислової розробки. Найінформативніші результати щодо радіоекологічної ситуації отримані за допомогою польових радіометричних вимірювань щільності потоку радону. Проведені прогностичні оцінки засвідчили, що індивідуальна ефективна доза опромінення, яка може формуватися під впливом виробничого комплексу з видобутку урану методом ПСВ, на межі санітарно-захисної зони радіусом 300 м не перевищує $9,0 \text{E-3}$ мкЗв/рік, що, згідно з радіаційно-гігієнічним регламентом, менше встановленої межі дози опромінення для населення. Значний негативний вплив на атмосферне повітря від об'єктів підприємства не очікується. Оскільки технологія ПСВ пов'язана з надходженням слабо кислих технологічних розчинів у водоносний шар рудного горизонту та їх поширенням з потоком підземних вод, під час відпрацювання покладів для контролю за можливим розтіканням продуктивних розчинів передбачається облаштування внутрішньоконтурних і законтурних спостережних свердловин; останні доцільно розташувати на відстані 30 м і 100 м від межі видобувного блоку та на межі СЗЗ 300 м. За підсумками математичного моделювання фільтраційних процесів на прикладі осадових водовміщуючих порід Сафоновського родовища показано, що ореол поширення залишкової кислотності не перевищить 280 м у напрямку руху підземного потоку за приблизно 20 років після ремедіації надр; надалі автореабілітаційні процеси компенсуватимуть міграцію розчинених сульфатів. Гідрогеологічні умови на території родовищ загалом оцінюються як придатні для їх експлуатації способом ПСВ. Руди є технологічними для ПСВ: концентрація урану в продуктивних розчинах на різних родовищах може складати від 15–20 мг/л до 25–30 мг/л, вилучення урану з руд 1 сорту – більше 50% (до 70–75%). Таким чином, існує принципова можливість підземного вилуговування урану з екзогенних руд інфільтраційного типу. Основний висновок проведених досліджень полягає в тому, що розробка невеликих уранових родовищ за допомогою сучасних технологій ПСВ потенційно може істотно поліпшити вітчизняну сировинну базу ядерної енергетики. *Ключові слова:* осадовий чохол Українського щита, екзогенні інфільтраційні родовища урану, підземне свердловинне вилуговування, радіоекологічна ситуація.

Radioecological situation on the territory of exogenic infiltration deposits of uranium of Ukraine and assessment of its environmental impact. Verkhovtsev V., Suschuk K., Tyshchenko Yu., Zadorozhnyi D.

Based on the field and office radioecological studies conducted during 2015–2020 at several exogenous infiltration uranium deposits (according to the IAEA classification – sandstone type) of the sedimentary cover of the Ukrainian shield, a comprehensive assessment of the radioecological situation, geological and economic justification of the prospects for the development of uranium deposits and an assessment of the possibilities of using the method of underground borehole leaching (UBL) for their industrial development was carried out. The most informative results about the radioecological situation were obtained using field radiometric measurements of the radon flux density. The conducted forecast estimates showed that the individual effective radiation dose, which can be formed under the influence of the production complex for the extraction of uranium by the UBL method, at the border of the sanitary protection zone with a radius of 300 m does not exceed 9.0E-3 MSV/year, which is two orders of magnitude less than the established limit of the radiation dose for the population according to radiation and hygiene regulations. A significant negative impact on the atmospheric air from the company's facilities is not expected. Since the UBL technology is associated with the entry of slightly acidic technological solutions into the aquifer of the ore horizon and their distribution with the flow of underground water, during the development of deposits to control the possible spread of productive solutions, it is planned to arrange intra-circuit and legislative observation wells; the latter should be located at a distance of 30 M and 100 m from the boundary of the production block and at the boundary of the sanitary protection zone of 300 m. Based on the results of mathematical modelling of filtration processes on the example of sedimentary

water-containing rocks of the Safonovsky deposit, it is shown that the halo of residual acidity propagation will not exceed 280 m in the direction of underground flow approximately 20 years after subsurface remediation; in the future, autorehabilitation processes will compensate for the migration of dissolved sulfates. Hydrogeological conditions on the territory of deposits are generally assessed as suitable for their operation by the UBL method. Ores are technological for UBL: the concentration of uranium in productive solutions at various deposits can range from 15–20 mg/L to 25–30 mg/L, and the extraction of uranium from grade 1 ores is more than 50 % (up to 70–75 %). Thus, there is a fundamental possibility of underground leaching of uranium from exogenous ores of the infiltration type. The main conclusion of the research is that the development of small uranium deposits using modern UBL technologies can potentially significantly improve the domestic raw material base of nuclear energy. *Key words:* sedimentary cover of the Ukrainian shield, exogenous infiltration uranium deposits, underground borehole leaching, radioecological situation.

Постановка проблеми. Упродовж 2015–2020 років Державною установою «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України» проводилися комплексні польові та камеральні радіоекологічні дослідження на кількох екзогенних інфільтраційних родовищах урану осадового чохла Українського щита з метою оцінки впливу радіоекологічної ситуації на довкілля. Родовища розташовані в Саксагансько-Сурському (Новогурівське, Хутірське, Сурське) та Інгуло-Інгулецькому (Сафонівське, Христофорівське) урановорудних районах. Аналогічні дослідження проведені також на території Михайлівського полігенного родовища у Казанківському районі Миколаївської області, що розташоване поблизу Інгулецької рудоносної зони (Сафонівського родовища). Досліджені та детально описані геологічні умови формування уранового зруденіння, стан підземних водоносних горизонтів. Проаналізовано попередній досвід видобування урану в аналогічних умовах способом підземного свердловинного вилуговування (ПСВ). Охарактеризовано альтернативні варіанти планованої діяльності, зроблено їх порівняльну оцінку. Виконано прогнозу оцінку впливу планованої діяльності на довкілля. Оцінено ймовірну ефективність відновлення надр.

У результаті проведених досліджень зроблена комплексна оцінка впливу радіологічної ситуації на довкілля досліджуваної території та геолого-економічне обґрунтування перспектив освоєння екзогенних родовищ урану осадового чохла Українського щита.

Методи досліджень. У процесі досліджень перш за все було проаналізовано й узагальнено наявні фондові та літературні дані, а також результати попередніх вишукувань, передпроектних досліджень, проектні матеріали, дані власних досліджень і публікацій, виконаних у ДУ «ІГНС НАН України», щодо геологічних, гідрогеологічних та гідрологічних умов, рельєфу, ландшафту, кліматичних особливостей, ґрунтового і рослинного покриву, соціального середовища, стану об'єктів техногенного впливу на прилеглих до запланованого підприємства територіях. У процесі робіт була розроблена та апробована нова методологія досліджень навколишнього середовища шляхом комплексного дозиметричного і радіометричного знімання поверхневого та приповерхневого горизонтів ґрунтів з метою визначення пошукових і радіоекологічних параметрів досліджуваної території та полів аномальної активності вимірюваних радіаційних показників. Так,

проводився відбір проб ґрунтів шпуровим методом до глибини 1 м і природних поверхневих і підземних вод. Подальші радіологічні дослідження включали: польові дозиметричні вимірювання потужності експозиційної дози гамма-випромінювання (радіаційний фон), потужності еквівалентної дози гамма-випромінювання, польові радіометричні випромінювання щільності потоку радону з ґрунту; лабораторні радіометричні вимірювання питомої гамма-активності проб ґрунту, лабораторні радіометричні вимірювання альфа- та бета-активності проб ґрунту для визначення мас-еквівалентного вмісту та активності урану, лабораторні спектрометричні вимірювання радіонуклідів у пробах ґрунту.

Крім того, проаналізовано методи, технологічні показники, основні технічні параметри обладнання для реалізації планованої діяльності з видобування урану способом ПСВ та оцінено їх екологічні характеристики.

Обговорення результатів.

Загальні відомості. Екзогенні інфільтраційні (гідрогенні) родовища неоген-четвертинної епохи уранового рудоутворення в осадовому чохлі на території Українського щита становлять основний промисловий тип родовищ урану України, що розробляють методом ПСВ. Ці родовища невеликі за запасами (1–3 тис. т) та вмістом урану, але вельми рентабельні для видобутку завдяки гірничо-технологічним особливостям, а також комплексності – супутниками урану в рудах є стратегічно важливі рідкісні елементи (Sc, Re, TR), видобуток яких може здійснюватись одночасно з ураном тим же методом ПСВ. Встановлено, що динаміка вилучення урану, скандію і рідкісних земель ідентична і що у разі вилучення урану з руд у кількості 72–74% вилучення Sc і TR становить 12–14%.

Ґрунтово-інфільтраційні родовища приурочені переважно до піщано-вуглистих відкладів палеогенового віку (буцацький ярус) й розміщуються в палеодолинах на поверхні кристалічного фундаменту – Троїцько-Сафонівській (Сафонівське родовище, Покровська, Троїцька перспективні ділянки), Ново-Володимирівській (Володимирівська перспективна ділянка), Терновсько-Девладівській (Девладівське родовище) та інших палеодепресіях. Усього розвідано та попередньо оцінено більш 10 родовищ (крім названих, Садове, Братське, Ташлицьке, Новогурівське, Христофорівське, Хуторське, Сурське та ряд рудопроявів), які об'єд-

нані в три рудні райони: Південно-Бузький (Братське, Садове, Ташлицьке родовища), Інгуло-Інгuleцький (Сафонівське, Христофорівське, Девладівське родовища) та Саксагансько-Сурський (Новогурівське, Хуторське, Криничанське, Оленівське, Сурське, Петромихайлівське та Первозванівське родовища). Розвідані запаси та ресурси родовищ цього типу оцінюються нарівні 70 тис. т. У межах цієї металогенічної області можуть існувати ще не виявлені відгалуження відомих палеодолин і нові невеликі палеодепресії, що містять промислове уранове зруденіння.

Згідно з класифікацією гідрогенних родовищ зазначені родовища належать до класу ґрунтово-інфільтраційних, тобто таких, що формуються метеорними підземними водами за активного інфільтраційного гідродинамічного режиму, зумовленого підвищенням області живлення над областю розвантаження, і контролюються ґрунтовою окислювальною зональністю. Глибина урізу палеодолин, що містять уранове зруденіння, у фундамент і кору вивітрювання – до 70–90 м, протяжність – 30–100 км. Потужність перекриваючих відкладів (морських – еоцену і олігоцену або прибережно-морських – міоцену) – 30–60, максимум – 100 м до річкових відкладів, які або повністю заповнюють палеодолини, або залягають в основі осадового чохла під лагунно-лиманними або озерно-болотними відкладами. Відомі також випадки, коли значна частина зруденіння (90% від загального обсягу ураноносних порід) міститься в корі вивітрювання у вторинних каолінах, як це має місце на Петромихайлівському та Первозванівському родовищах, розташованих у межах Синельниківської депресії в зоні перетину Девладівського розлому з іншими регіональними структурами.

Уранові поклади контролюються ґрунтовою або ґрунтово-пластовою окислювальною зональністю і залежно від умов її розвитку від верхів'їв або бортів палеодолини розміщуються або уздовж стрижня по всій ширині палеорусл, або уздовж бортів у вигляді нешироких звивистих смуг. Вони мають переважно пластову або лінзовидну форму, локалізовані у вуглистих пісках, бурому вугіллі, рідше – вуглистих глинах або корі вивітрювання і утворюють декілька ярусів по всьому розрізу водоносного горизонту. Протяжність рудних тіл під нижньою межею зони ґрунтового окислення – до декількох кілометрів, ширина – сотні метрів, потужність – зазвичай десятки сантиметрів, зрідка до двох метрів, вміст урану – соті долі відсотка. На виклинюванні зон ґрунтово-пластового окислення утворюються багатші рудні тіла потужністю до 4–5 м, які іноді мають форму ролів. Уранове зруденіння супроводжу-

ється інтенсивною сульфідизацією різних літолого-фаціальних типів вугленосних відкладів.

Уран у рудах міститься в основному у вуглистій речовині (у середньому 35%), меншою мірою – в глинистій (у середньому 25%) і у вигляді уранової черні (17%). Близько 5% урану міститься в лейкоксені і близько 3% – у гідроксидах заліза. Вміст урану у вуглистій речовині досягає 1,7%, у глинистій – 0,378%. Уранова чернь встановлена тільки в багатих рудах. Вона утворює дрібні виділення, зрощення або тонкі плівки навколо зерен піриту, марказиту, ільменіту. За допомогою електронної мікроскопії та мікронзондування був встановлений кофініт, який разом з урановими чернями утворює дрібні (соті долі мм) скупчення: в цементі пісковиків, на поверхні кварцу, на поверхні та всередині вуглистих залишків, навкруги уламкових зерен і виділень дисульфідів заліза, на зернах ільменіту. На Новогурівському родовищі також встановлені високі концентрації ренію на виклинюванні пластової зони окислення у внутрішній частині зони. Мінеральна форма ренію – ізоморфна домішка в піритах, тонкодисперсні дисульфіді. На Сафонівському родовищі із вмістом урану корелюється високий вміст селену.

Сафонівське родовище. Найбільш підготовленим до експлуатації є Сафонівське родовище у Казанківському районі Миколаївської області, де проведені детальні розвідувальні роботи, натурні дослідження на полігонах (рис. 1).

Основні характеристики родовища. Морфологія рудних покладів переважно стрічкоподібна, місцями ізометрична. Розподіл руд у розрізі родовища одноярусний, частіше має вигляд рудонасичених зон або лінзоподібну морфологію. Середня потужність продуктивного горизонту становить 13,0 м, а середня сумарна потужність рудних тіл – 7,2 м. Інтервал глибини залягання руд становить 50–70 м. Основні мінерали – сорбований уран у вуглисто-глинистій речовині та уранові черні. Вміст урану в рудах – 0,018%.

Рис. 1. Рудні тіла покладів Сафонівського родовища урану

Рис. 2. Рудні поклади Михайлівського родовища

Поблизу розвіданого Сафонівського родовища виявлені Покровська і Троїцька перспективні ділянки, також придатні до видобутку урану методом підземного свердловинного вилуговування.

Михайлівське родовище. На Михайлівському родовищі уранове зруденіння встановлено в тріщинуватих кристалічних породах (гнейсах, гранітах, мігматитах та пегматитах) та їх корі вивітрювання. Родовище характеризується значними прогностичними ресурсами урану (рис. 2).

Михайлівське родовище є поліхромно-полігенним з проявом 3 рудних етапів та 3 генетичних типів зруденіння. Основна маса руд залягає в гнейсах біотитових з домішкою графіту, які зазнали інтенсивного дроблення, катаклазу, інтенсивно тріщинуваті з накладеними гідротермальними змінами (гематизації, хлоритизації, карбонатизації, піритизації і окварцювання). В гранітах уранове зруденіння локалізоване рідше. Найбільша частка в утворенні промислового уранового зруденіння на родовище належить гідрогенному типу руд, який потенційно придатний для промислової розробки способом підземного вилуговування.

Уранова мінералізація на Михайлівському родовищі представлена настураном, уранінітом, кофінітом і урановою черню [1]. Згідно з Паспортом родовища, кофініт є головним рудним мінералом, а уранініт, настуран, уранові черні – другорядними мінералами [2]. У цих мінералах уран знаходиться у відновленій чотиривалентній формі і згідно із загальноприйнятою класифікацією [3; 4] його вилуговування без використання окислювачів є утрудненим. Оскільки основна маса руд родовища – це убогі і бідні, то єдино можливим способом їх відпрацювання є метод підземного вилуговування із застосуванням системи закачувальних і відкачувальних свердловин. Тому на стадії оціночних робіт одним

Рис. 3. Рудні поклади Сурського родовища уранових руд
1 – Грушевський поклад; 2 – Червоноярський поклад

з основних завдань було визначення принципової можливості рентабельного вилугування урану з руд на місці залягання. З цією метою проведено лабораторні і натурні технологічні випробування. Під час лабораторних випробувань для руд найбільш пізньої гіпергенної прожилково-тріщинної уранової черневої мінералізації, сформованої впродовж фанерозою, з концентрацією більше 0,01% встановлено добре вилучення урану (до 70–80%) з отриманням промислової концентрації урану в розчині. Цей тип мінералізації створився за рахунок вилугування урану із різних ендегенних проявів і перевідкладень його в зонах відкритої тріщинуватості. Цьому екзогенному зруденінню, представленому вторинними кофініт-ураново-черневими накопиченнями, в загальному балансі руд Михайлівського родовища належить істотна роль.

Сурське родовище складається з двох ділянок – Червоноярської та Грушевської, на яких зосереджено 39,5 та 60,5% запасів урану відповідно (рис. 3).

Відстань між ділянками близько 8 км. Натеper Червоноярська ділянка нерідко розглядається як окреме Червоноярське родовище [5]. На Червоноярській ділянці розвідано 4 поклади (Центральний, Східний, Південний та Західний) та 2 лінзи балансових руд [6]. Найбільш великим є Центральний поклад (26,7% запасів родовища)

широтного простягання та складної форми. На Грушевській ділянці розвідано 2 поклади (Основний і Північно-Східний) та 2 лінзи балансових руд. Основні запаси ділянки (51,5% запасів родовища) зосереджені в Основному покладі, який має форму смуги близького до меридіонального простягання. Рудні поклади в розрізі складаються, як правило, з 1–3 рудних тіл порівняно невеликої потужності, розмішених всередині пачки проникних порід.

Уранове зруденіння приурочене до піщано-вуглисто-глинистих відкладів буцацького ярусу середнього еоцену та харківського ярусу олігоцену, що заповнюють відроги депресії. Вік відкладів встановлений неоднозначно. В південно-західній частині Сурського родовища уранове зруденіння встановлене також у вторинних каолінах, що підстеляють вуглисті глини та піски.

Новогурівське родовище знаходиться на відстані 30 км на південний схід від м. Жовті Води (рис. 4).

Зруденіння приурочене до піщано-вуглисто-глинистих відкладів буцацького ярусу середнього еоцену, що заповнюють два відроги верхів'я Новогурівської депресії, загалом близької до меридіонального простягання. Рудовміщуючі відклади залягають горизонтально; розподіляються на дві пачки. Нижня складається з вторинних каолінів, різною мірою записочених, з прошарками пісків,

Рис. 4. Розташування рудних покладів Новогурівського родовища

1 – Широколанівський поклад; 2 – Основний поклад

потужність пачки 5–15 м, розвинута вона переважно по бортах та верхів'ях депресії. Верхня пачка має вуглисто-глинисто-піщаний склад, потужність до 30 м, розвинута по всій площі депресії. Тобто зруденіння знаходиться як у річковому морфологічному типі відкладів, так і в корі вивітрювання [5].

Родовище складається з двох рудних покладів – Основного та Широколанівського, відстань між ними – 5 км. Окрім цих покладів, є 8 дрібних лінз. На Основному покладі зосереджено 64,5% запасів урану, на Широколанівському – 26,5% [5; 7].

Уранове зруденіння відоме в усіх літологічних типах порід – глинах, пісковицях, бурому вугіллі. Основна кількість урану в рудах зосереджена за рахунок сорбції на глинистих мінералах та вуглистій речовині, а також у формі черні. Встановлені також (в акцесорних кількостях) ураніт, кофінит, студтит.

Гідрогеологічні умови в межах родовища визначаються наявністю бучацького (продуктивного) водоносного горизонту, який характеризується найбільшою обводненістю з коефіцієнтами фільтрації від 0,13 до 9,02 м/добу, питомим дебітом від 0,006 до 2,33 л/с, напірним характером з висотою напору 10–20 м. Води сульфатно-хлоридно-натрієві з мінералізацією 0,8–3,1 г/л. Основне джерело живлення – атмосферні опади.

Оцінка можливостей застосування способу ПСВ для експлуатації зазначених родовищ

Лабораторні та натурні досліді, проведені КП «Кіровгеологія» на вказаних родовищах, перш за все показали, що загалом гідрогеологічні умови оцінюються як придатні для експлуатації родовищ способом ПСВ. Руди є технологічними для ПСВ: концентрація урану в продуктивних розчинах – 15–20 мг/л, вилучення урану з руд I сорту – близько 50%. Таким чином, існує принципова можливість підземного вилуговування урану з екзогенних руд інфільтраційного типу.

Водночас під час натурних випробувань рудних біотитових гнейсів встановлено, що вони мають високу кислотостійкість і відновні властивості через наявність у них сірководню. Тому сірчана кислота як реагент не може бути застосована через високі її витрати і закупорки шляхів руху розчину гіпсом, що утворюється.

На базі Сафонівського родовища планується апробація методу киснево-содового збагачення уранової сировини (За програмою розвитку мінерально-сировинної бази України до 2030 року).

Загальна характеристика методу ПСВ

Метод ПСВ характеризується меншим ступенем забруднення навколишнього середовища порівняно зі звичайними методами розробки. Рекультивация землі при цьому мінімальна, оскільки витягання обсадних труб і цементування стовбура свердловин проводиться до рівня глибини оранки, а також немає скидання твердих і рідких відходів, газів, аерозолів у повітря. Немає необхідності у будівництві та експлуатації хвостосховищ. Можливе збере-

ження у непорушеному стані денної поверхні: після відпрацювання родовища або окремої його частини земельні угіддя можуть бути використані у сільському господарстві без будь-яких обмежень.

Щодо *наслідків підземного вилуговування урану* для навколишнього середовища, то слід зазначити таке. На відпрацьованому Девладівському родовищі видобуток урану з 1962 по 1983 рік відбувався шляхом закачування у свердловини технологічного розчину, який містив у собі сірчану та азотну кислоти, аміачну селітру і аміачну воду. Після вилуговування урану, оскільки відновлення (промивання) надр не проводилось, ореол забруднення охопив усю площу уранових покладів і простягнувся вздовж палеодолини на відстань 4,5 км шириною 0,4–0,6 км. У продуктивному горизонті залишкові розчини становили близько 6 млн м³. Завдяки проведенню моніторингових спостережень (1983–2006 рр.) у мережі водопунктів (свердловин, колодязів і гідрогеологічних створів) за горизонтами ґрунтових вод отримано таку інформацію.

У продуктивному горизонті, тобто у водоносному горизонті бучацької свити, відбуваються сучасні процеси як техногенного, так і геологічного характеру. Геологічні процеси характеризуються надходженням у продуктивний горизонт тріщинних підземних вод з кристалічного фундаменту та порових підземних вод з піщаного водоносного горизонту міоцену через гідрогеологічні «вікна» у бортах палеодолини. Ці води знижують кислотність залишкових розчинів, взаємодіють з ними хімічно і витискають їх із порового простору порід, змушуючи пересуватись у напрямку області розвантаження, тобто річки Саксагань. Хімічна взаємодія залишкових розчинів з породами рудного водоносного горизонту призводить до нейтралізації сірчаної кислоти, збагачення розчинів солями металів та осадження нерозчинних хімічних сполук (оксидів заліза й алюмінію, гіпсу тощо) у порах пісків. Вміст у підземних водах рудного горизонту більшості сполук, у тому числі радіоактивних елементів, перевищує допустимі норми та являє загрозу забруднення як суміжних водоносних горизонтів, так і ближніх річок. Але і у водах рудних горизонтів і навіть суміжних з рудним водоносних горизонтів, родовищ, де ще нічого не видобували (Сафонівка, Сурське, Новогурівка), активність трансуранових нуклідів на 1–2 порядки перевищує норми. І було б дивно, якби було інакше.

Але за період спостережень з 1983 року, коли існувала найбільша забрудненість підземних вод компонентами технологічного розчину, до 2006 року відбулося зменшення вмісту сульфат-іону, загального вмісту солей у цілому, вмісту урану, зменшення інтенсивності процесу вилуговування в центральній частині родовища за рахунок розрідження залишкових розчинів підземними водами. Водночас залишкові розчини з низьким рН поширилися на нові площі, де почали вилуго-

уватись низькі некондиційні концентрації урану ($< 0,01\%$). Відбувались мікробіологічна денітрифікація залишкових розчинів, виведення з них радію і радіогенного свинцю, але підвищення вмісту торію (за рахунок зниження рН та підвищення Eh); вміст полонію залишився незмінним.

Проведені моніторингові дослідження показали необхідність постійних спостережень, особливо в напрямку переміщення ореолів забруднення до басейнів річок.

Впливи на довкілля, зумовлені технологією ПСВ та способи їх послаблення

Технологія ПСВ пов'язана з надходженням слабо кислих технологічних розчинів у водоносні шари рудного горизонту та їх поширенням з потоком підземних вод. З метою запобігання розповсюдження робочих розчинів за межі території відпрацювання встановлюється баланс закачування і відкачування робочих розчинів з незначною (до 2%) перевагою об'єму відкачування перед об'ємом закачування.

Для контролю за можливим розтіканням продуктивних розчинів передбачається облаштування контурних і законтурних спостережних свердловин, які розташовані на межі розрахункових радіусів розтікання (на практиці законтурні планують, як правило, на межі СЗЗ – 300 м).

Вилуговуючий розчин на різних стадіях відпрацювання рудного тіла (пласту) має певні концентрації вилуговуючого реагенту:

- стадія закислення продуктивного горизонту розчином сірчаної кислоти концентрацією 25–30 г/дм³.

Метою стадії закислення є заповнення порового простору продуктивного горизонту розчином реагенту, який переведе призначений для видобутку метал (уран) у розчинну форму. У цей період доцільні максимальні концентрації реагенту та швидкість фільтрації для якнайшвидшого заповнення вилуговуючим розчином продуктивного горизонту.

Стадія вилуговування починається за таких умов:

- рН відкачних розчинів знижується в межах від 4,5 до 1,5 та стабілізується при значенні 1,5–2,0;

- у продуктивних розчинах спостерігається стійкий вміст урану більше ніж 25 мг/дм³;

- у розчині підвищується вміст іонів Fe^{3+} , Fe^{2+} , Al^{3+} ;

- спостерігається збільшення коефіцієнта фільтрації в зоні вилуговування за рахунок хімічної декольматції.

На стадії вилуговування слід поступово знижувати концентрацію реагенту (сірчаної кислоти), зберігаючи високу швидкість фільтрації розчинів. Концентрація сірчаної кислоти у вилуговуючому розчині на рівні 8–10 г/дм³ визначається залишковою кислотністю продуктивного розчину. Необхідна залишкова кислотність продуктивного розчину – 1–2 г/дм³.

Загалом технологічні процеси з відкачування і переробки продуктивних розчинів, які містять радіоактивні елементи, проводяться в рідкій фазі

із забезпеченням герметичності на всіх стадіях видобувного та переробного циклів – без викидів в атмосферу. Таким чином, забруднення повітряного середовища радіоактивними речовинами природного походження не прогнозується за виключенням еманції радону-222 із продуктивного розчину при його відстоюванні. Додатковий внесок виробничої діяльності у приземні концентрації радону-222, згідно з виконаними розрахунками, може скласти на межі СЗЗ до 0,5 Бк/м³ [8], що не перевищує кількох відсотків від існуючих природних показників на цій місцевості, які становлять 20...45 Бк/м³ [9].

Оцінка впливу на довкілля експлуатації екзогенних інфільтраційних родовищ урану України

Польові дозиметричні вимірювання показали, що прилегла до родовищ територія у радіоекологічному відношенні є досить безпечною. Водночас просторовий розподіл потужності еквівалентної дози (ПЕД) характеризується локалізацією аномально високих показників на ділянках, приурочених до території родовищ, де зафіксовані рівні перевищення ПЕД над фоновими показниками прилеглої території, які досягають 5 разів, що у 3,5 раза перевищує граничні показники радіаційного впливу для населення (1 мЗв/рік). Таким чином, у разі початку розробки родовищ необхідно передбачити посилені заходи з радіаційного контролю та захисту території і населення. Також є певні підстави вважати, що простежується вплив розломних структур такої території на рівні ПЕД.

Вимірювання щільності потоку радону з поверхні ґрунту показало, що аномально високі рівні такого показника, очевидно, пов'язані з поверхневим відображенням найбільших за розмірами рудних тіл. Подальші дослідження можуть виявити непрямим методом існування інших потенційних рудних тіл.

Виміряні в лабораторних умовах показники альфа-, бета- та гамма-радіоактивності у відібраних пробах ґрунту не додають суттєвої додаткової інформації, однак, загалом, підтверджують існування певних полів поширення аномально високої активності на території уранових родовищ.

Результати гамма-спектрометричних аналізів відібраних проб ґрунтів показують для різних родовищ загалом співставимі рівні активності радіонуклідів уранового і торієвого рядів, які у низці випадків помітно перевищують глобальні показники.

Загалом, найбільш інформативні результати про радіоекологічну ситуацію отримані за допомогою польових дозиметричних вимірювань, а щодо інтерпретації поверхневих радіаційних досліджень з точки зору їх співпадіння з наявними геологічними, геофізичними, геоморфологічними даними – за допомогою вимірювань щільності потоку радону.

Інші радіаційні впливи не прогнозуються. Радіаційний фон досліджуваної території – потужність експозиційної дози гамма-випромінювання – адекватний більшості територій України, а також глобальним показникам.

Висновки. Проведені дослідження довели, що прогнозована індивідуальна ефективна доза опромінення, яка формується впливом виробничого комплексу по видобутку урану методом ПСВ, на межі СЗЗ не перевищує $9,0 \times 10^{-3}$ мкЗв/рік, що на два порядки менше встановленої межі дози опромінення для населення згідно з радіаційно-гігієнічним регламентом ДГН 6.6.1.-6.5.001-98 (НРБУ-97 [10]).

Значний негативний вплив на *атмосферне повітря* внаслідок надходження забруднюючих речовин від об'єктів підприємства не очікується. Викиди в атмосферне повітря з території родовища, на якій проводяться видобувні роботи, не прогножуються.

Основним джерелом забруднення атмосфери у період видобування корисної копалини з надр і переробки продуктивних розчинів є технологічний корпус переробного комплексу. У технологічному корпусі переробки розчинів викиди, головним чином, представлені парами речовин (кислот), які використовуватимуться як реагенти для вилугову-

вання урану, а також діоксидом азоту і зварювальним аерозолем від обладнання ремонтної майстерні.

За розрахунками, виконаними у проєктній документації на відпрацювання запасів Сафонівського родовища [8; 11–12], сумарний прогнозований викид забруднюючих речовин в атмосферу у період експлуатації орієнтовно становитиме 30...60 т/рік. Обсяги викидів формуються переважно автотранспортом і залежатимуть від інтенсивності робіт і будуть відрізнятися протягом різних періодів роботи підприємства.

Основний висновок проведених досліджень полягає в тому, що розробка невеликих уранових родовищ за допомогою сучасних технологій ПСВ потенційно може суттєво поліпшити вітчизняну сировинну базу. З огляду на структуру української енергетики (питому вагу ядерної енергетики в енергетичному балансі країни), уран – корисна копалина, яка має стратегічне значення. Отже, несумнівна актуальність планованої діяльності.

Література

1. Крамар О., Возняк Д., Галабурда Ю. Локалізація і генезис уранового зруденіння в межах Михайлівської площі (Західноінгулецька смуга Українського щита). *Мінералогічний збірник*. 2006. № 56. Вип. 1–2. С. 48–54.
2. Паспорт Михайлівського родовища № 41. Державний кадастр родовищ і рудопроаявів корисних копалин України. Родовища металевих корисних копалин.
3. Тураев Н.С., Жерин И.И. Химия и технология урана : учебное пособие для вузов. Москва : ЦНИИАТОМИНФОРМ, 2005, 407 с.
4. Носков М.Д. Добыча урана методом скважинного подземного выщелачивания : учебное пособие. Северск : Изд-во СТИ НИЯУ МИФИ, 2010. 83 с.
5. Металогенія урановорудних районів в осадовому чохлаі Українського щита / Відп. ред. Верховцев В.Г.; автори: Верховцев В.Г., Сушук К.Г., Фомін Ю.О., Тищенко Ю.С., Семенюк М.П., Деміхов І.Л., Колябіна І.Л., Вайло О.В., І.І. Михальченко. Київ : НВП «Видавництво «Наукова думка» НАН України», 2019. 158 с.
6. Сурське родовище. Паспорт № (ТГФ) ЗП-1212. Державний кадастр родовищ і рудопроаявів корисних копалин України. Родовища металевих корисних копалин.
7. Новогурівське родовище. Паспорт № (ТГФ) ЗП-1197. Державний кадастр родовищ і рудопроаявів корисних копалин України. Родовища металевих корисних копалин.
8. Техніко-економічне обґрунтування «Виробничий комплекс для проведення дослідно-промислової розробки Сафонівського родовища уранової руди способом свердловинного підземного вилуговування», Том 7.1 Оцінка впливів на навколишнє середовище. СРПВ-0-0-0-ОВНС-ПЗ, ДП «УкрНДПРІ промтехнології», м. Жовті Води, 2017.
9. Коваленко Г.Д. Радиоэкология Украины / 2-е изд., доп. и перераб. Харьков : ИД «ИНЖЭК», 2013. 344 с.
10. Норми радіаційної безпеки України НРБУ-97.
11. Проєкт «Нове будівництво підприємства по відпрацюванню Сафонівського родовища, с. Миколаївка Казанківського району Миколаївської області. Том 7.1 Оцінка впливів на навколишнє середовище. СРПВ-2-0-0-ОВНС-ПЗ, ДП «УкрНДПРІ промтехнології», м. Жовті Води, 2019.
12. Звіт з ОВД «Підприємство по відпрацюванню Сафонівського родовища» (р/н 20194253528), ДУ «ІГНС НАН України», Київ, ДУ «ІГНС НАН України», 2019.