

М. І. Панасюк, І. А. Литвин

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Чорнобиль

ЗАКОНОМІРНОСТІ РОЗПОДІЛУ УРАНУ
В ПІДЗЕМНИХ ВОДАХ ПРОММАЙДАНЧИКА ЧАЕС

За останні роки спостерігається значне (2 - 12 разів) підвищення концентрацій урану та трансуранових елементів у підземних водах на ділянці біля зруйнованого 4-го блока ЧАЕС. У статті показано, що підвищення міграційної здатності урану в підземних водах відбувається при зростанні рН вище 9 - 10 у відновлюваному чи перехідному середовищі на фоні значних підвищень концентрацій основних іонів: K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , CO_3^{2-} , NO_3^- , NO_2^- .

Ключові слова: проммайданчик ЧАЕС, підземні води, паливний уран, основні іони, рН, підвищена міграція.

Вступ

Традиційно вважається, що уран у підземних водах [1 - 3] у перехідному та відновлювальному, як правило, лужному середовищі зазвичай знаходиться в чотирьохвалентному стані, який випадає з розчину і не мігрує з підземними водами. Разом з тим за результатами проведення регламентних робіт у рамках радіогідроecологічного моніторингу в районі об'єкта «Укриття» спостерігається зростання у 2 - 12 разів концентрацій урану та трансуранових елементів (ТУЕ) у пробах води по ряду свердловин [4]. Раніше формування підвищених концентрацій плутонію в підземних водах чорнобильської зони було виявлено в «Рудому лісі» при вивченні міграції радіонуклідів із траншеї, де були захоронені радіоактивні відходи при дезактивації території [5]. У цій роботі показано, що підвищена міграційна здатність пов'язана з наявністю фракції плутонію з низькою молекулярною масою (<1 kDa). У роботі [6], навпаки, стверджується, що актиноїди в ґрунтових водах знаходяться у фракціях колоїдних частинок розміром 5 - 50 нм та у фільтраті. При цьому наводяться дані, що в ґрунтових водах усі форми актиноїдів включаються в колоїдний матеріал й одночасно всі ці форми знаходяться в розчинному стані. У роботі [7] обговорюються питання впливу величини рН в інтервалі значень 1 - 8 на сорбцію глиною U(VI) і робиться припущення, що при підвищенні рН розчину можливе утворення полімерних колоїдних форм, що визначає повну відсутність сорбції U(VI) у нейтральному та слаболужному середовищі.

Наша стаття написана на основі регламентних спостережень і спеціальних досліджень механізму формування підвищеної міграції урану залежно від величини рН поки що не проводилося. Мета даної роботи полягала перш за все в тому, щоб підтвердити факти існування в реальних польових умовах підвищення міграції урану в

сильнолужному перехідному та відновлювальному середовищі. Нами досліджено, що зростання рН підземних вод вище 9 - 10 призводить до підвищення міграційної здатності урану на порядок величин. Таке явище може мати значні негативні наслідки для екологічної безпеки довкілля. Підземні води від об'єкта «Укриття» розвантажуються в русло р. Прип'ять. Радіонукліди, що не сорбуються ґрунтами, з потоком підземних вод можуть досягнути р. Прип'ять за 40 років. Таким чином, підвищена міграція радіонуклідів із підземних вод є небезпекою для джерела питної води населення України – р. Прип'ять, яка відноситься до басейну р. Дніпро.

Матеріали та методи

Регламентне опробування безнапірного водоносного горизонту проводиться по 50 спостережних свердловинах, розташованих навколо будівлі 2-ї черги ЧАЕС (3-й і 4-й блоки).

Спостережні свердловини, як правило, обладнані фільтровими колонами з труб з інертного матеріалу – полівінілхлориду (ПВХ), їхній діаметр 110 - 125 мм. Інтервал робочої частини фільтрової колони для таких свердловин має довжину 2 - 3 м. Власне фільтр є керамічним або поліпропіленовим із гравійним покриттям із чистого кварцу, що не вимагає гравійної обсіпки. Але деякі свердловини (5-1А, 6-1А, 2-Г та 4-Г (ліквідована в 2008 р.)), пробурені та обладнані до 1995 р., мають металеві фільтрові колони. Інтервал робочої частини фільтра в даних свердловинах має довжину 1 - 2 м і створений із перфорованих труб діаметром 89 або 146 мм з сіткою галунного плетіння. У цих свердловинах в інтервалі глибин робочої частини фільтрової колони виконана гравійна обсіпка.

Відбір проб проводиться після прокачки в об'ємі трьох-чотирьох стовпів води в спостережній свердловині. У процесі прокачки здійсню-

© М. І. Панасюк, І. А. Литвин, 2017

ються вимірювання рН, Eh та T °C за допомогою польового рН-метра MultiLine P 4. Похибка визначення вищенаведених параметрів $\pm 0,5\%$.

Проби відбираються в поліетиленові ємкості об'ємом 1,5 л. Проби не підкислюються, доставляються в лабораторію не пізніше 2 год з моменту відбору.

Глибина залягання рівня ґрунтових вод змінюється від 7 до 16 м залежно від гіпсометрії денної поверхні. Потужність безнапірного водоносного горизонту ≈ 28 м. Рух ґрунтових вод направлено з південного заходу на північний схід, з ухилом 0,001 - 0,002 і дійсною швидкістю руху 20 - 30 м/рік. На ділянці розташування купола розтікання (свердловини 8-1А, 9-2А, 7985), за рахунок додаткового живлення ґрунтових вод біля першого уступу каскадної стіни, ухил поверхні водоносного горизонту дорівнює 0,0074, а дійсна швидкість досягає значень 250 м/рік. Розвантаження безнапірного водоносного горизонту здійснюється в районі оз. Азбучин в русло р. Прип'ять, яке розташоване по лінії току ґрунтових вод на відстані 1200 м.

Джерелами надходження урану та ТУЕ в підземні води є: витіки за межі об'єкта «Укриття» блокової води; втрати радіоактивно забрудненої води з комунікацій; фільтрація води з будівельних котлованів; інфільтраційні води.

За останній період спостерігається зростання у 2 - 12 разів концентрацій урану та ТУЕ у пробах води по ряду свердловин, що потребує додаткового аналізу радіаційної обстановки, яка складається в підземних водах, а також умов та механізмів формування підвищених міграційних властивостей актиноідів.

Об'ємні питомі активності радіонуклідів у пробах ґрунтових вод визначаються в лабораторіях відділу радіаційного моніторингу відділення ядерної та радіаційної безпеки ІПБ АЕС НАН України. Уран, плутоній та ^{241}Am у пробах води визначався на 8-канальному альфа-спектрометрі фірми EG & G ORTEC OSTETE PC із напівпровідниковими кремнієвими детекторами серії BU-017-450-100 ULTRA з ефективністю реєстрації 25 % при відстані від джерела 12 мм. Визначення виконувалися після іонообмінного виділення. Для визначення хімічного виходу урану, плутонію та ^{241}Am вносилися мітки ^{232}U , ^{242}Pu та ^{243}Am . Підготовка проб полягала в послідовному фільтруванні води через паперовий фільтр «Біла стрічка» та мембранний фільтр з розміром пор 0,2 мкм. Потім проводилося упарювання проб об'ємом від 1,5 до 2 л до вологих солей. Далі озолення органічних складових виконувалося обробкою сухого залишку концентрованої HNO_3 з додаванням H_2O_2 . Похибка визначення ^{235}U

30 - 40 %. Похибка визначення активності ^{234}U , ^{238}U , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ та ^{241}Am в межах 15 - 30 %.

Енергетичне розділення 19 кеВ на лінії 5486 кеВ (^{241}Am). Власний фон для енергій вище 3 МеВ не більше одного імпульсу на годину.

Результати

Концентрації урану в ґрунтових водах локальної зони об'єкта «Укриття» і прилеглої території за останні роки змінювалися в широких межах – від 0,083 до 25,8 мкг/дм³. Найбільші значення концентрацій урану від 1,5 до 25,8 мкг/дм³ виявлено у пробах із свердловин 16-1А, 1-3А, 1-4А, 4-2Г, 9-2А, 2-Г та 10-2А, що розташовані нижче по потоку ґрунтових вод від об'єкта «Укриття» (рис. 1).

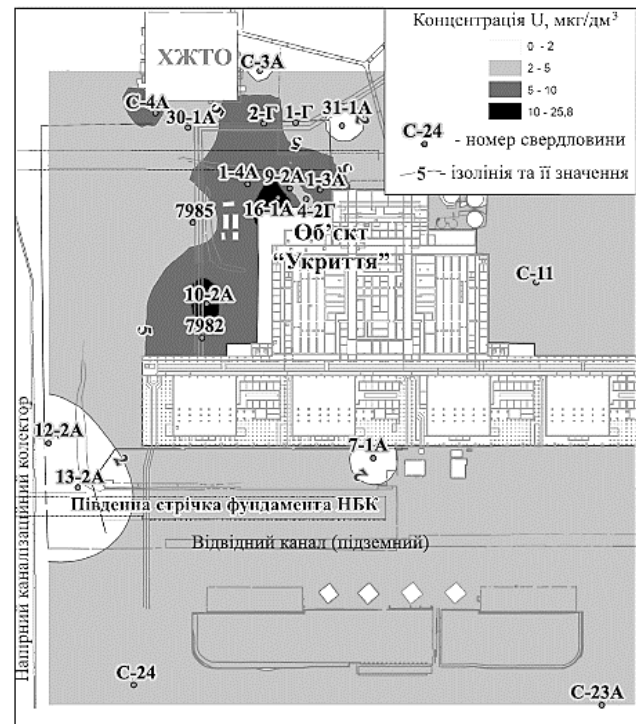


Рис. 1. Розподіл концентрацій урану у пробах ґрунтових вод.

Високі концентрації урану формуються за рахунок міграції з підземними водами паливного урану. Зазвичай концентрація природного урану у воді алювіального водоносного горизонту не перевищує 0,2 мкг/дм³. Також про наявність у пробах паливного урану може вказувати аналіз співвідношень активностей $A^{234}\text{U}/A^{238}\text{U}$.

У роботі [8] показано, що про присутність паливного урану в підземних водах промайданчика ЧАЕС можна робити висновок по співвідношенню активностей $A^{234}\text{U}/A^{238}\text{U}$, які перевищують значення 1,1 - 1,15. Для природних мінералів, що містять уран, це співвідношення переважно становить 1. Так, у пробах води із свердло-

вини 16-1А співвідношення активностей $A^{234}\text{U}/A^{238}\text{U}$ було $2,5 \pm 0,5$, що явно вказує на присутність паливного урану, для якого характерним є співвідношення активностей $A^{234}\text{U}/A^{238}\text{U}$ в межах 1,69 - 3,06 (див. [8]). Крім того, у пробах води із свердловини 16-1А детектується ^{236}U , який відноситься виключно до паливного урану.

Однією із закономірностей поведінки урану та ТУЕ є те, що підвищення їхніх об'ємних питомих активностей у пробах підземних вод, як правило, відбувається на фоні змін хімічного складу ґрунтових вод. Як видно з рис. 2, у 2012 р. зафіксовано зростання в 3 рази по відношенню до опробування 2010 р. об'ємних питомих активностей урану у пробах підземних вод із свердловини 16-1А. Разом з тим у 2012 р. (рис. 3) також

підвищилися концентрації іонів калію, натрію та інших основних іонів. Повторно у 2014 - 2015 рр. у пробах із свердловини 16-1А спостерігається зростання концентрацій урану у 2-3 рази, а концентрації ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ і ^{241}Am зросли майже на порядок. При цьому спостерігається підвищення в основному в 1,4 - 1,75 раза концентрацій іонів калію, натрію та кальцію. А концентрації іонів нітратів та нітритів зросли істотно – в 1,4 - 7 та в 40 - 300 разів відповідно. Таким чином, можна констатувати тісний зв'язок концентрацій урану з концентраціями в підземних водах деяких основних іонів. Зокрема, коефіцієнти кореляції концентрацій урану з концентраціями калію, натрію та кальцію у пробах із свердловини 16-1А дорівнюють 0,69, 0,77 та 0,61 відповідно.

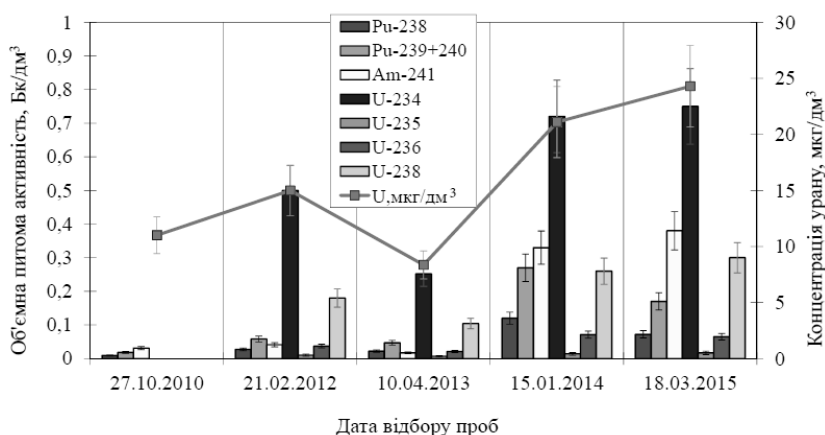


Рис. 2. Динаміка об'ємних питомих активностей урану і ТУЕ у пробах ґрунтових вод зі свердловини 16-1А.

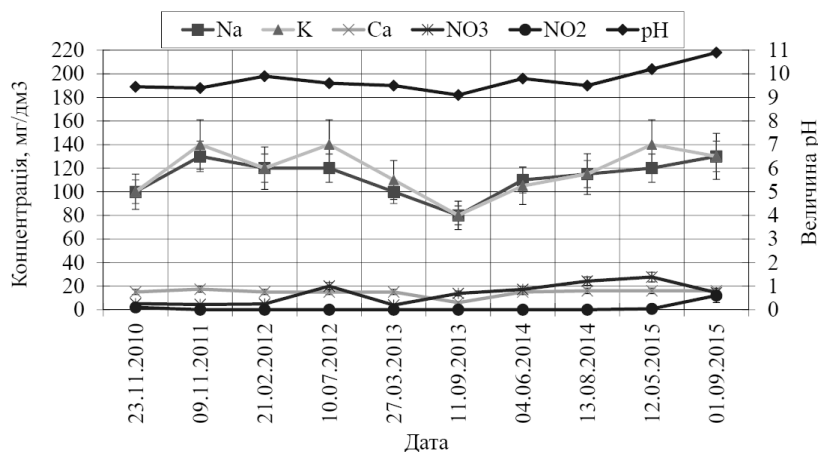


Рис. 3. Динаміка концентрацій Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , NO_3^- , NO_2^- та значень рН у пробах із свердловини 16-1А за час спостережень.

Усі ці зміни відбуваються на фоні зростання у пробах із свердловини 16-1А у 2014 - 2015 рр. значень рН (рис. 4). Середнє значення рН у 2014 - 2015 рр. становило 10,2, тоді як у 2010 - 2013 рр. – 9,5. При цьому кількість величин рН в інтервалі значень 10 - 11 у 2010 - 2013 рр. становила 7,7 %, а у 2014 - 2015 рр. вона підвищилась до 66,7 %.

Аналогічні закономірності зростання концентрацій урану при високих значеннях рН підземних вод простежуються й у пробах із свердловини 2-Г. На рис. 5 період спостереження по свердловині 2-Г 1996 - 2015 рр. розділений на періоди й підперіоди залежно від величини рН та значень об'ємної питомої активності ^{90}Sr .

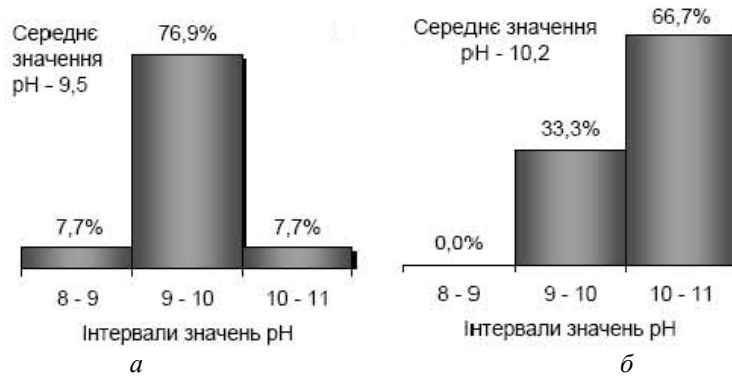


Рис. 4. Розподіл значень рН у пробах підземних вод із свердловини 16-1А:
а – за період 2010 - 2013 рр.; б – за період 2014 - 2015 рр.

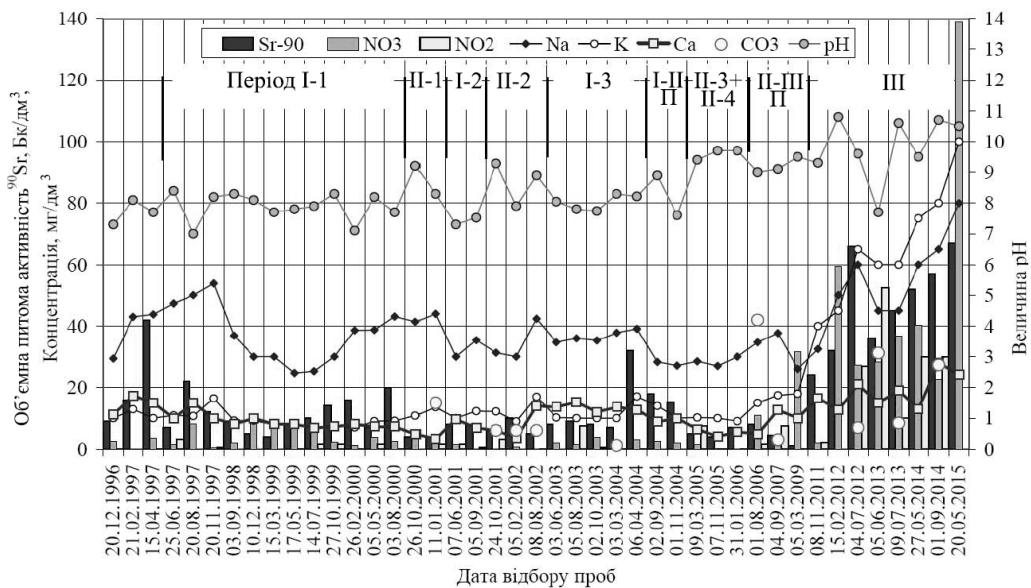


Рис. 5. Розподіл значень рН, концентрацій основних іонів та об'ємної питомої активності ^{90}Sr у пробах ґрунтової води із свердловини 2-Г.

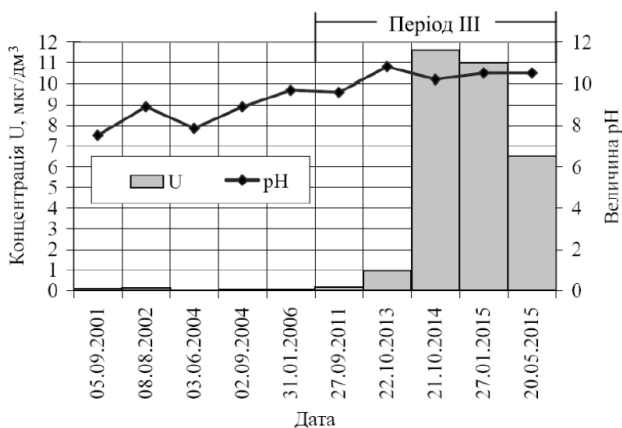


Рис. 6. Динаміка значень рН та концентрацій урану у пробах ґрунтових вод із свердловини 2-Г. Зверху зазначено період III, який за часом збігається з періодом III з рис. 5.

Підвищення об'ємної питомої активності ^{90}Sr у пробах ґрунтових вод збігається з початком періоду III (лютий 2011 р.). На цей же період припадає зростання величини рН здебільшого до значень 9,5 - 10,5 і, починаючи з 2014 р., зафіксовано різке підвищення концентрацій урану у

пробах води до 11,6 мкг/дм³ (рис. 6). Підвищення концентрацій урану у пробах із свердловини 2-Г (з жовтня 2014 р.) зафіксовано із затримкою на два роки відносно часу початку підвищення об'ємної питомої активності ^{90}Sr та концентрацій іонів Na^+ , K^+ , CO_3^{2-} , NO_2^- , NO_3^- та інших основних іонів і показника рН.

За даними дослідження фазового розподілу урану та інших радіонуклідів у пробах ґрунтових вод із спостережних свердловин локальної зони об'єкта «Укриття» [9, 10] по свердловині 4-Г для періоду III (рН > 9,2 – 10) спостерігається підвищення частки урану в іонно-дисперсній (розчинній) формі у 2,5 раза в порівнянні з періодом II (рН = 8,1) (рис. 7).

Аналогічні дослідження проводились і по свердловині 2-Г, фазовий розподіл урану по якій вивчався у 2009 - 2012 рр. [11, 12]. У пробах з даної свердловини уран в іонно-дисперсній аніонній та катіонній формах для періоду III по відношенню до періоду II також зростає майже вдвічі. При цьому частка урану у грубодисперсній формі відповідно зменшується орієнтовно з 40 до 10 % (рис. 8).

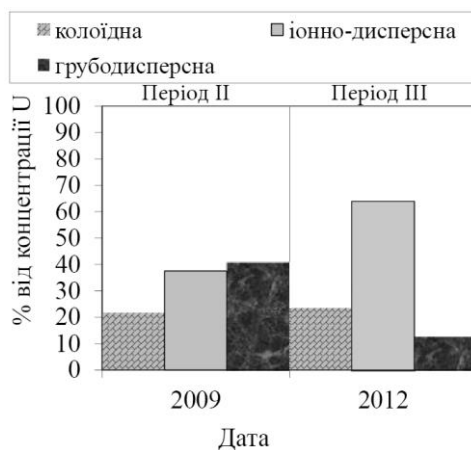
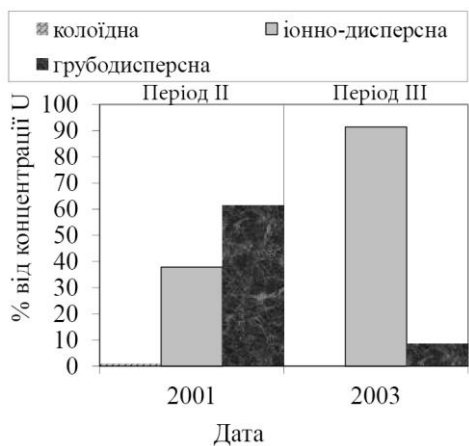


Рис. 7. Гістограми фазового розподілу концентрацій урану в підземних водах по свердловині 4-Г залежно від періодів II та III (табл. 1).

Рис. 8. Гістограми фазового розподілу концентрацій урану в підземних водах по свердловині 2-Г. Періоди II та III по часу виділено аналогічно з рис. 7 (табл. 2).

Таблиця 1. Фазовий розподіл концентрацій урану в пробах підземних вод із свердловини 4-Г, % від концентрацій урану [9, 10]

Дата	Період	Концентрація урану у воді, мкг/дм ³	Фаза (розмір частинок, мкм)			
			грубодисперсна		колоїдна	іонно-дисперсна
			> 0,2 мкм	0,1 - 0,2 мкм	0,01 - 0,1 мкм	
2001	II	470	58	3,3	0,8	37,9
2003	III	100	8,6	0	0	91,4

Таблиця 2. Фазовий розподіл концентрацій урану в пробах підземних вод із свердловини 2-Г, % від концентрацій урану [11, 12]

Дата	Період	Концентрація урану у воді, мкг/дм ³	Фаза (розмір частинок, мкм)				
			грубодисперсна		колоїдна	іонно-дисперсна	
			> 2 мкм	0,1 - 0,2 мкм	0,01 - 0,1 мкм	катіонна форма	аніонна форма
2009	II	8,52	20,89	19,84	21,71	не виявлено	37,56
2012	III	немає даних	9,77	2,82	23,5	27,07	36,84

Обговорення результатів

Несподіваним результатом опробування свердловин 16-1А та 2-Г та інших є те, що спостерігається підвищення концентрацій урану при підвищенні значень рН вище 9 - 10 і зниженні величини Eh = (+30) ÷ (-10), які властиві відновлювальному чи перехідному середовищу. Як наведено у вступі даної статті, із літературних джерел відомо, що у відновлювальному, як правило, лужному середовищі уран у підземних водах зазвичай знаходиться в чотирьохвалентному стані, який випадає з розчину і не мігрує з підземними водами. А в умовах об'єкта «Укриття» в сильно лужному середовищі (рН = 9 - 12) у перехідному чи відновлювальному середовищі по ряду свердловин спостерігається підвищення міграційної здатності урану. Але якщо більш детально аналізувати валентність та форми знаходження урану по Eh - рН діаграмах системи U - ОН [13, 14 та 15], то виявляється, що при рН 9 - 11 та Eh вище мінус 200 мВ (відновлювальна обстановка в інтервалі Eh = мінус 200 - 0 мВ) уран в підземних водах може бути у формі $UO_2(OH)_3^{[-]}$, в якій цей елемент знаходиться в шестивалентному стані (рис. 9).

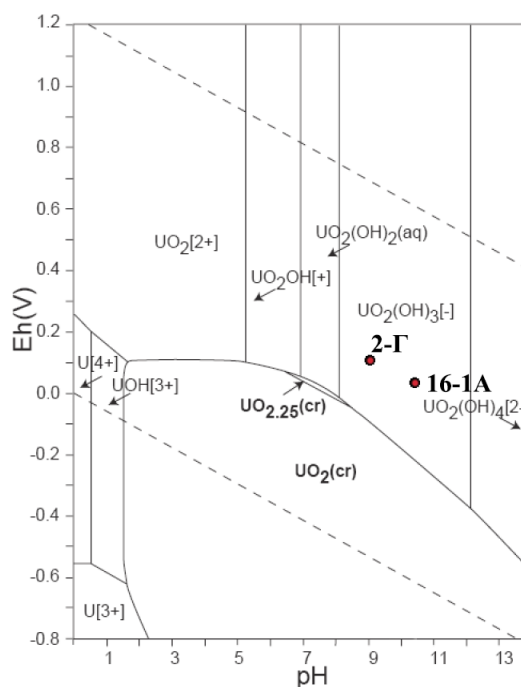


Рис. 9. Eh - рН діаграма для системи U-О-Н. Дані рН та Eh підземних вод по свердловинах 16-1А та 2-Г нанесено точками.

Але ця форма знаходження урану розрахована для водних розчинів урану. В умовах присутності значної кількості карбонатів, що характерно для підземних вод в районі об'єкта «Укриття», форми знаходження урану, згідно з [13], мають виглядати так: $UO_2(CO_3^{2-})_3^{4-}$ або $UO_2(CO_3^{2-})_2(H_2O)_2^{2-}$. Уран у цих формах також є шестивалентним.

Таким чином, незалежно від джерел надходження в підземні води радіоактивного забруднення при значеннях рН вище 9 - 10 (період III) спостерігається підвищення міграційної здатності урану. При цьому частка урану в іонно-дисперсному (розчинному) стані збільшується в 2 - 2,5 раза порівняно з дослідженнями, які припадали до періоду II (рН = 8 - 9).

Висновки

1. В умовах об'єкта «Укриття» значне у 2 - 12 разів підвищення у пробах ґрунтових вод концентрацій урану відбувається в умовах сильнолужного середовища при значення рН вище 9 - 10.

2. Як правило, передумовами підвищення в пробах ґрунтових вод в районі об'єкта «Укриття» концентрацій урану є підвищення концентрацій іонів калію, натрію, нітратів, нітритів та інших основних іонів в 1, 4 - 300 разів і величини рН на 1 - 3 одиниці.

3. Імовірно, що в умовах проммайданчика ЧАЕС у сильнолужному середовищі уран не

сорбується чи слабо сорбується ґрунтами, що призводить до підвищення його міграційної здатності з підземними водами з очевидними негативними наслідками цього процесу.

4. Підземні води від об'єкта «Укриття» розвантажуються в русло р. Прип'ять. Радіонукліди, що не сорбуються ґрунтами, з потоком підземних вод можуть досягнути русла р. Прип'ять за 40 років, а ділянки її заплави – через 20 років. Таким чином, підвищена міграція радіонуклідів з підземних вод є небезпекою для джерела питної води населення України - р. Прип'ять, яка відноситься до басейну р. Дніпро.

5. Сильнолужне середовище в підземних водах в районі об'єкта «Укриття», вірогідно, формується за рахунок вилугування бетону фундаментів, підземних комунікацій чи споруд при контакті з ними підземних вод.

6. Очікується, що при тривалому контакті підземних вод із бетоном пальового фундаменту НБК, який заглиблений у водоносний горизонт на 15 м, у ґрунтових водах буде формуватись сильнолужне відновлювальне середовище, що може призвести до підвищення міграційної здатності урану.

Автори висловлюють глибоку подяку В. Є-І. Хану та О. О. Одінцову за виконанні лабораторні визначення концентрацій урану та ТУЕ у пробах ґрунтових вод.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Белицкий А.С., Орлова Е.И.* Охрана подземных вод от радиоактивных загрязнений. - Москва: Медицина, 1968.
2. *Коротков А.И., Павлов А.Н.* Гидрохимический метод в геологии и гидрогеологии. - Ленинград: Недра, 1972.
3. *Крайнов С.Р., Швец В.М.* Гидрогеохимия. - Москва: Недра, 1992.
4. *Радиогидроэкологический мониторинг в районе объекта «Укрытие». Этап 2. Проведение радиогидроэкологического мониторинга по второму этапу 2015 г.» : отчет о НИР / Рук. Н. И. Панасюк. № ГР 0115U005355. - Чернобыль, 2015.*
5. *Levchuk S., Kashparov V., Maloshtan I. et al.* Migration of transuranic elements in groundwater from the near-surface radioactive waste site // *Applied Geochemistry*. - 2012. - Vol. 27, No. 7. - P. 1339 - 1347.
6. *Новиков А.П., Калмыков А.Н., Ткачев В.В.* Формы существования и миграции актиноидов в окружающей среде // *Ж. Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева*. - 2005. - Т. XLIX, № 2. - С. 119 - 126.
7. *Корнилович Б.Ю., Пишичко Г.Н., Ковальчук И.А.* Влияние фульвокислот на взаимодействие U (VI) с глинистыми компонентами почв // *Радиохимия*. - 2001. - Т 43, № 5. - С. 464 - 467.
8. *Панасюк Н.И.* Распределение урана в подземных водах промплощадки ЧАЭС // *Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля*. - 2010. - Вип. 13. - С. 128 - 135.
9. *Руденко Л.И., Хан В.Е.-И., Панасюк Н.И.* Физико-химическое обоснование миграции радионуклидов из объекта «Укрытие» и его промплощадки в грунтовые воды // *Радиохимия*. - 2003. - Т. 45, № 3. - С. 268 - 272.
10. *Руденко Л.И., Хан В. Е.-И.* Вклад микрочастиц в механизм миграции радионуклидов из объекта «Укрытие» и его промплощадки в грунтовые воды // *Радиохимия*. - 2005. - Т. 47, № 1. - С. 89 - 90.
11. *Міграція альфа-випромінюючих радіонуклідів з об'єкта «Укриття» в ґрунтові води та механізм їх реалізації: анотований звіт по НДР / Інститут біоорганічної хімії та нафтохімії НАН України*. - Київ, 2010.
12. *Дослідження складу альфа-випромінюючих радіонуклідів в ґрунтових водах проммайданчика Чернобыльской АЭС. Этап 2012 р. Дослідження фазового розподілу концентрацій цезію, стронцію, урану і трансураничних елементів: звіт по НДР (проміжний) / Кер. Л. І. Руденко; Інститут біоорганічної хімії та нафтохімії НАН України.*

- № ДР 0111U002825. - Київ, 2012.
13. *Garrels R.M., Christ C.L.* Solutions, Minerals, and Equilibria. - San Francisco: Freeman, Cooper & Co., 1965. - 450 p.
 14. *Pourbaix M.J.N.* Thermodynamics of Dulite Aqueous Solutions. - London: Edwar Arnold and Co., 1949. - 136 p.
 15. *Atlas of Eh-pH diagrams.* Intercomparison of thermodynamic databases. Geological Survey of Japan Open File Report No. 419 / National Institute of Advanced Industrial Science and Technology. Research Center for Deep Geological Environments. Naoto TAKENO. May 2005.

Н. И. Панасюк, И. А. Литвин

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УРАНА В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ ПРОМПЛОЩАДКИ ЧАЭС

Наблюдаемое значительное повышение объемных активностей урана (2 - 12 раз) в пробах подземных вод из скважин, расположенных вблизи объекта «Укрытие», происходит при росте рН выше 9 - 10 на фоне повышения концентраций основных ионов: Na^+ , K^+ , CO_3^{2-} , NO_2^- , NO_3^- . При этом в подземных водах формируется сильнощелочная восстановительная или переходная среда.

Ключевые слова: промплощадка ЧАЭС, подземные воды, топливный уран, основные ионы, рН, повышенная миграция.

M. I. Panasyuk, I. A. Lytvyn

Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, National Academy of Sciences of Ukraine, Chornobyl

REGULARITIES OF URANIUM DISTRIBUTION IN GROUNDWATER OF ChNPP INDUSTRIAL SITE

Observed significant increase of migration properties of uranium from groundwater happens when pH rises above 9 - 10 against significant increases in the concentrations of major ions: Na^+ , K^+ , CO_3^{2-} , NO_2^- , NO_3^- . Herewith, strongly alkaline reducing or transitional environment in groundwater is formed.

Keywords: industrial site of ChNPP, underground waters, fuel uranium, plutonium, pH, major ions, raised migration.

REFERENCES

1. *Belitskij A.S., Orlova E.I.* Protection of groundwater from radioactive contamination. - Moskva: Meditsina, 1968. (Rus)
2. *Korotkov A. I., Pavlov A. N.* Hydrochemical method in geology and hydrogeology. - Leningrad: Nedra, 1972. (Rus)
3. *Krajnov S.R., Shvets V.M.* Hydrogeochemistry. - Moskva: Nedra, 1972. (Rus)
4. *Radiohydroecological monitoring in the area of the object "Ukrytie". Step 2. Conducting of radiohydroecological monitoring for the second step of 2015 : Report on research work / Supervisor N. I. Panasyuk.* No. ГР 0115U005355. - Chernobyl, 2015. (Rus)
5. *Levchuk S., Kashparov V., Maloshtan I. et al.* Migration of transuranic elements in groundwater from the near-surface radioactive waste site // Applied Geochemistry. - 2012. - Vol. 27, No. 7. - P. 1339 - 1347.
6. *Novikov A.P., Kalmykov A.N., Tkachev V.V.* // Zh. Rossijskogo khimicheskogo obshchestva imeni D. I. Mendeleeva. - 2005. - Vol. XLIX, No. 2. - P. 119 - 126. (Rus)
7. *Kornilovich B.Yu., Pshinko G.N., Koval'chuk I.A.* // Radiokhimiya. - 2001. - Vol. 43, No. 5. - P. 464 - 467. (Rus)
8. *Panasyuk N.I.* // Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobylya. - 2010. - Iss. 13. - P. 128 - 135. (Rus)
9. *Rudenko L.I., Khan V.E.-I., Panasyuk N.I.* // Radiokhimiya. - 2003. - Vol. 45, No. 3. - P. 268 - 272. (Rus)
10. *Rudenko L.I., Khan V. E.-I.* // Radiokhimiya. - 2005. - Vol. 47, No. 1. - P. 89 - 90. (Rus)
11. *Migration of alpha-radionuclides from the object "Ukrytya" to the groundwater and the mechanism for their realization : annotated report on research work / Institute of Bioorganic Chemistry and Petrochemistry, National Academy of Sciences of Ukraine.* - Kyiv, 2010. (Ukr)
12. *Investigation of the composition of alpha emitting radionuclides in the groundwaters of the industrial site of the Chernobyl NPP: Stage 2012. Investigation of the phase distribution of cesium, strontium, uranium and transuranium elements concentration : Interim report on research work / Supervisor L. I. Rudenko; № ДР 0111U002825; Institute of Bioorganic Chemistry and Petrochemistry, National Academy of Sciences of Ukraine.* - Kyiv, 2012. (Ukr)
13. *Garrels R.M., Christ C.L.* Solutions, Minerals, and Equilibria. - San Francisco: Freeman, Cooper & Co., 1965. - 450 p.
14. *Pourbaix M.J.N.* Thermodynamics of Dulite Aqueous Solutions. - London: Edwar Arnold and Co., 1949. - 136 p.
15. *Atlas of Eh-pH diagrams.* Intercomparison of thermodynamic databases. Geological Survey of Japan Open File Report No. 419 / National Institute of Advanced Industrial Science and Technology. Research Center for Deep Geological Environments. Naoto TAKENO. May 2005.

Надійшла 05.10.2016
Received 05.10.2016