

М. І. Панасюк, Д. Т. Матросов, Є. І. Петросенко, Г. В. Левін, П. А. Люшня, М. О. Сізов,  
Л. А. Паламар, І. П. Онищенко\*

*Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова, 36а, Чорнобиль, 07270, Україна*

*\*Науково-інженерний центр радіогідроекологічних полігонних досліджень НАН України, вул. О. Гончара, 55б,  
Київ, 01054, Україна*

## РІВНІ РАДІОАКТИВНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ПІДЗЕМНИХ ВОД ПРОММАЙДАНЧИКА ЧАЕС ТА ЗАСОБИ ОБМЕЖЕННЯ ЙОГО РОЗПОВСЮДЖЕННЯ

За останні роки спостерігається значне (у 170 - 500 разів) підвищення концентрацій  $^{90}\text{Sr}$ , уран та трансуранових елементів у підземних водах на ділянці розташування комплексу НБК-ОУ. У статті показано, що підвищення міграційної здатності радіонуклідів із підземними водами відбувається в сильнолужному середовищі при  $\text{pH} > 9,5$  у відновлювальній чи перехідній обстановці. Наведено рекомендації щодо зменшення рівнів радіоактивного забруднення підземних вод

*Ключові слова:* проммайданчик ЧАЕС, підземні води,  $^{90}\text{Sr}$ , уран, трансуранові елементи, основні іони,  $\text{pH}$ , міграція.

### Вступ

Визначення рівнів та механізмів формування забруднення підземних вод  $^{90}\text{Sr}$ , ураном та трансурановими елементами (ТУЕ) проводиться по спостережних свердловинах (рис. 1) у рамках радіогідроекологічного моніторингу в районі об'єкта «Укриття».



Рис. 1. Схема розташування спостережних свердловин радіогідроекологічного моніторингу на ділянці розташування комплексу НБК-ОУ.

Основна мета проведення радіогідроекологічного моніторингу полягає в оцінці рівнів хімічного та радіоактивного забруднення ґрунтових вод, а також умов міграції радіонуклідів в оточуюче аварійний блок природне середовище для виконання ДСП ЧАЕС функцій безпеки, що стосуються обмеження розповсюдження радіоактивних речовин та іонізуючого випромінювання за встановлені межі.

© М. І. Панасюк, Д. Т. Матросов, Є. І. Петросенко, Г. В. Левін,  
П. А. Люшня, М. О. Сізов, Л. А. Паламар, І. П. Онищенко, 2018

## Матеріали та методи

На проммайданчику ДСП ЧАЕС розвинений безнапірний водоносний горизонт, приурочений до алювіальних пісків першої надзаплавної тераси р. Прип'ять. Потужність водоносного горизонту 26 - 28 м. Напрямок руху ґрунтових вод у районі об'єкта "Укриття" за останні 3 роки змінився з північного на північно-східний у бік заплави р. Прип'ять та залишкових озер на місці розташування колишнього водоймища-охолоджувача. На цьому фоні зросла швидкість руху підземних вод до 40 м/рік і відповідно зросли швидкості міграції радіонуклідів із підземними водами, що розвантажуються в р. Прип'ять та в залишкові озера водоймища-охолоджувача, тим самим додаючи свою частку в радіоактивне забруднення поверхневих вод – джерел питного водопостачання населення України. Більш докладно про радіоекологічні умови та методи дослідження наведено в [1].

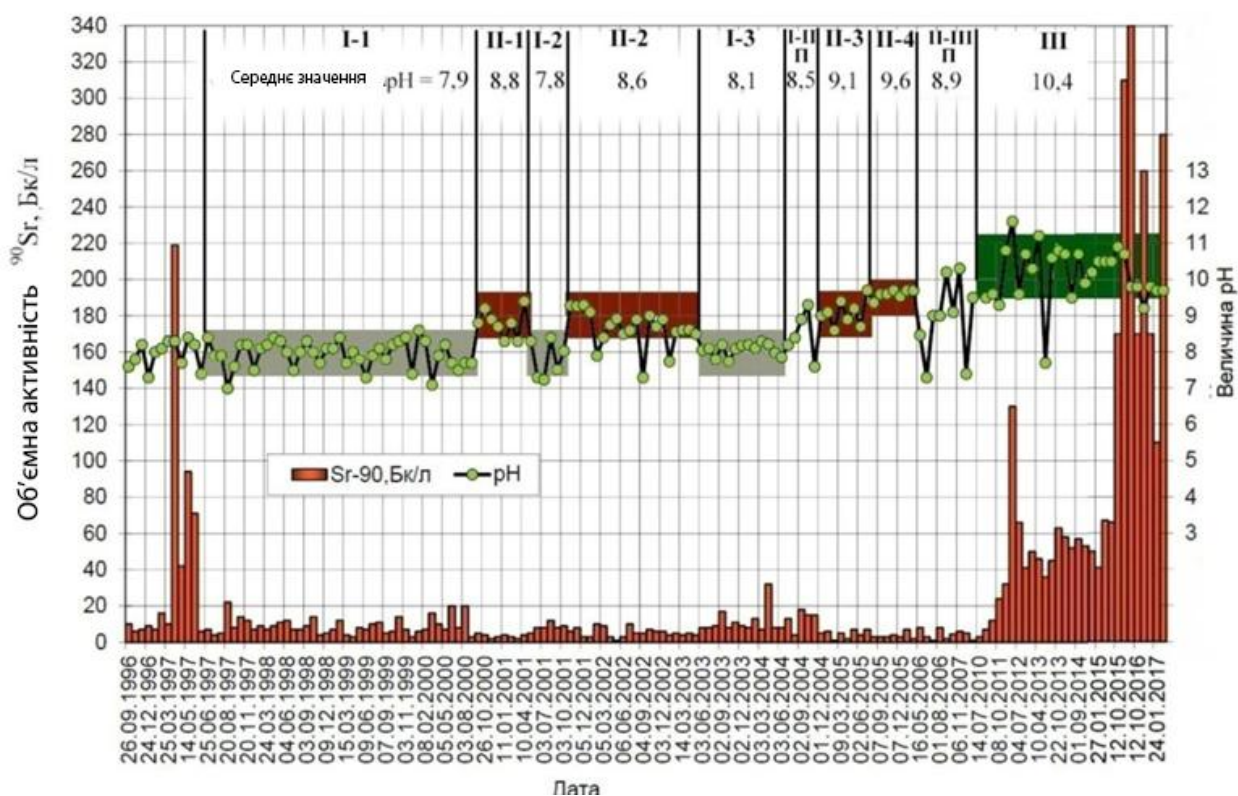


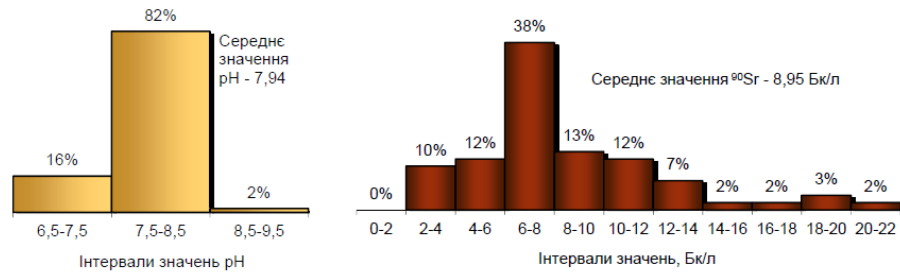
Рис. 2. Динаміка величини рН та об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  у пробах ґрунтових вод зі свердловини 2-Г. Угорі номери періодів та підперіодів і середні значення рН для кожного виділеного півперіоду.

За останні декілька років по окремих свердловинах, що розташовані нижче за потоком ґрунтових вод від об'єкта "Укриття», спостерігається значне в 170 - 500 разів зростання об'ємних активностей  $^{90}\text{Sr}$ , урану та ТУЕ (рис. 2). При цьому по окремих свердловинах концентрація  $^{90}\text{Sr}$  зростає до 700 - 2100 Бк/л.

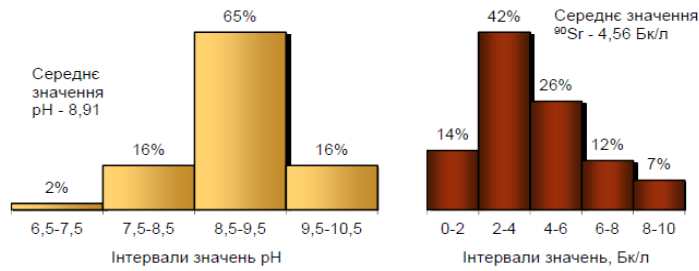
## Результати

За нашими дослідженнями, один із механізмів формування високих об'ємних активностей  $^{90}\text{Sr}$  пов'язаний зі створенням у підземних водах високолужного середовища. Із літературних джерел відомо, що ступінь сорбції  $^{90}\text{Sr}$  із лужного середовища досягає 60 – 100 %. А за нашими даними все відбувається навпаки. На рис. 2 наведено динаміку величин рН (графік зверху) та об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  (гістограма знизу) за період спостережень 1996 – 2017 рр. На графіку залежно від величин рН виділено й позначено римськими числами і різним кольором три періоди. Розподіл величин рН та об'ємних активностей  $^{90}\text{Sr}$  наведено на рис. 3. Як видно з рис. 2 і 3, при значеннях рН підземних вод в основному в інтервалі 7,5 - 8,5, які характерні до періоду I, найбільш часті значення об'ємних активностей  $^{90}\text{Sr}$  в підземних водах знаходяться в межах 6 - 8 Бк/л.

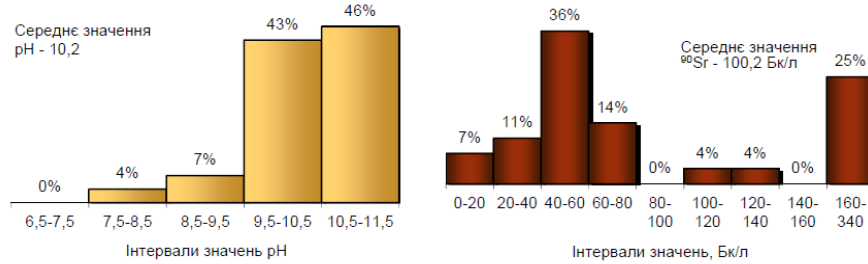
При значеннях рН підземних вод переважно в інтервалі 8,5 - 9,5, що припадають на період II, найбільш часті значення об'ємних активностей  $^{90}\text{Sr}$  знижуються до 2 – 4 Бк/л. Проте при рН вище в основному 9,5 (період III) різко зростають найбільш часті значення об'ємних активностей  $^{90}\text{Sr}$  до 40 - 60 Бк/л, при максимальних - 160 - 340 Бк/л.



а



б



в

Рис. 3. Розподіл величин рН та об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  для виділених трьох періодів: а - період I; б - період II; в - період III.

Причина зниження концентрацій  $^{90}\text{Sr}$  при рН у межах 8,5 – 9,5 (період II) полягає у тому, що при рН 8,3 - 8,5 частина гідрокарбонат-іонів переходить у карбонат-іони, які у свою чергу утворюють з іоном кальцію та іонами стронцію нерозчинні сполуки, що випадають із розчину ґрунтових вод в осад.

### Обговорення результатів

Існують два методи визначення причин та механізмів зростання міграційної здатності  $^{90}\text{Sr}$  та інших радіонуклідів у підземних водах при рН більше 9,5 (період III). Це вивчення фазового розподілу і форм знаходження радіонуклідів у воді за допомогою ультрафільтрації та метод термодинамічного моделювання гідрогеохімічних умов.

Фазовий розподіл радіонуклідів у блокових та підземних водах вивчався в 1996 – 2012 рр. ІБОНХ та ІПБ АЕС НАН України. Ці дані опубліковані, і ми залучили їх для пояснення причин зростання міграційної здатності радіонуклідів. За результатами вивчення фазового розподілу  $^{90}\text{Sr}$  у пробах ґрунтових вод із свердловини 4-Г при настанні III періоду частка розчинної форми  $^{90}\text{Sr}$  зростає з 50 до 98 % від загальної об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  у пробі. Такі ж дані отримано при вивченні фазового розподілу  $^{90}\text{Sr}$  у пробах із свердловини 2-Г

Таким чином, очевидно, що при високих рН (9,5 - 12,5)  $^{90}\text{Sr}$  утворює комплексні сполуки, які слабо сорбуються піщаними ґрунтами алювіального водонесного горизонту. Але які саме комплексні сполуки утворюються, може відповісти термодинамічне моделювання. На рис. 4 показано розподіл

величини рН та об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  по свердловині 1-2А. По даній свердловині, як і по свердловинах 4-Г, 1-1А, 4-1н та 4-4н, III період виділяється значним зростанням концентрацій  $^{90}\text{Sr}$ .

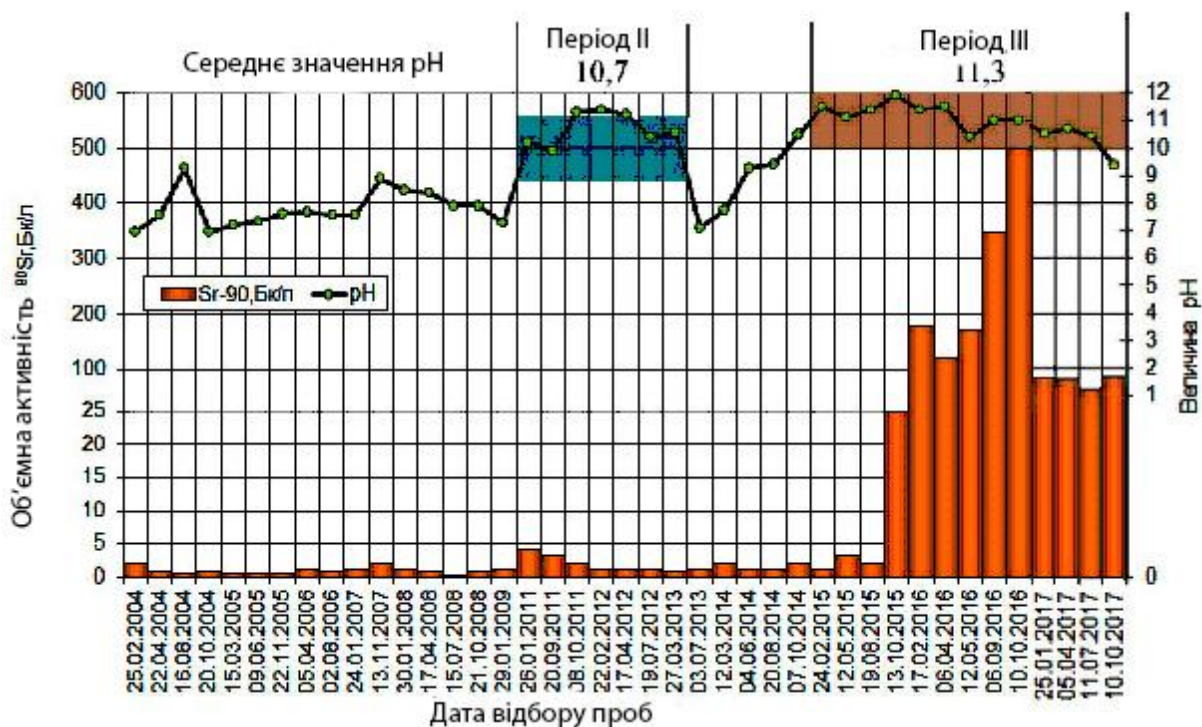


Рис. 4. Динаміка величини рН та об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  у пробах ґрунтових вод із свердловини 1-2А. Угорі номери періодів і середні значення рН для кожного виділеного періоду.

За даними термодинамічного моделювання результатів визначення хімічного складу проб із свердловини 1-2А за допомогою програми SOFA\_CH, частка міграційної форми  $^{90}\text{Sr}$  в комплексній сполуці з карбонатами в періоді III зростає до 14 % по відношенню до періоду II, де це значення дорівнювало 3 % (рис. 5). Відповідно частка міграційної форми  $^{90}\text{Sr}$  у вигляді вільного іону зменшується в періоді III до 83 %.

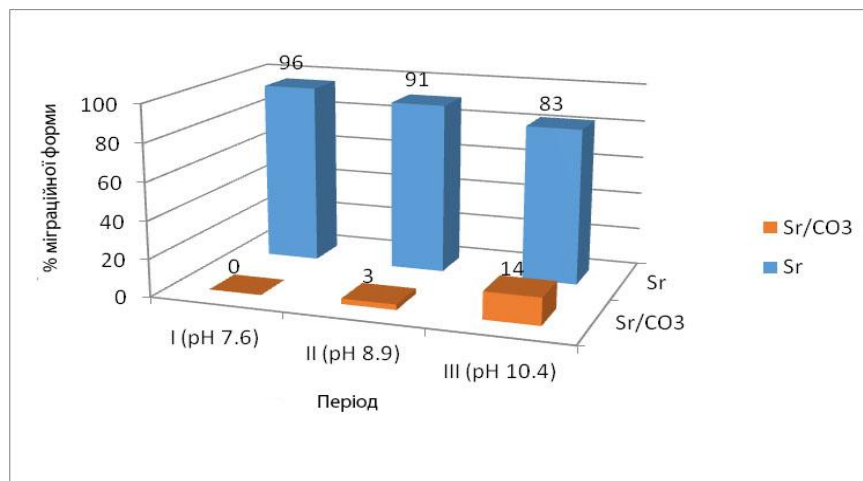


Рис. 5. Розподіл міграційних форм  $^{90}\text{Sr}$  залежно від періодів спостережень за даними термодинамічного моделювання результатів хімічного складу проб із свердловини 1-2А (програма SOFA\_CH).

На жаль, результати термодинамічного моделювання не пояснюють значне підвищення концентрації  $^{90}\text{Sr}$  в періоді III. Як відомо, сполуки стронцію та кальцію з карбонатами - стронціаніт ( $\text{SrCO}_3$ ) та кальцит ( $\text{CaCO}_3$ ) - слабозрозумінні у воді та при утворенні випадають в осад унаслідок незначного добутку розчинності даних речовин. Таким чином, у нашому випадку для  $^{90}\text{Sr}$  можливо утворення інших комплексних сполук, що не сорбуються ґрунтами і не виявляються за результатами термодинамічного моделювання.

Також за даними проведення радіогідроекологічного моніторингу в сильнолужному середовищі при рН вище 9 - 9,5 міграційна здатність урану та ТУЕ зростає на один-два порядки (рис. 6).

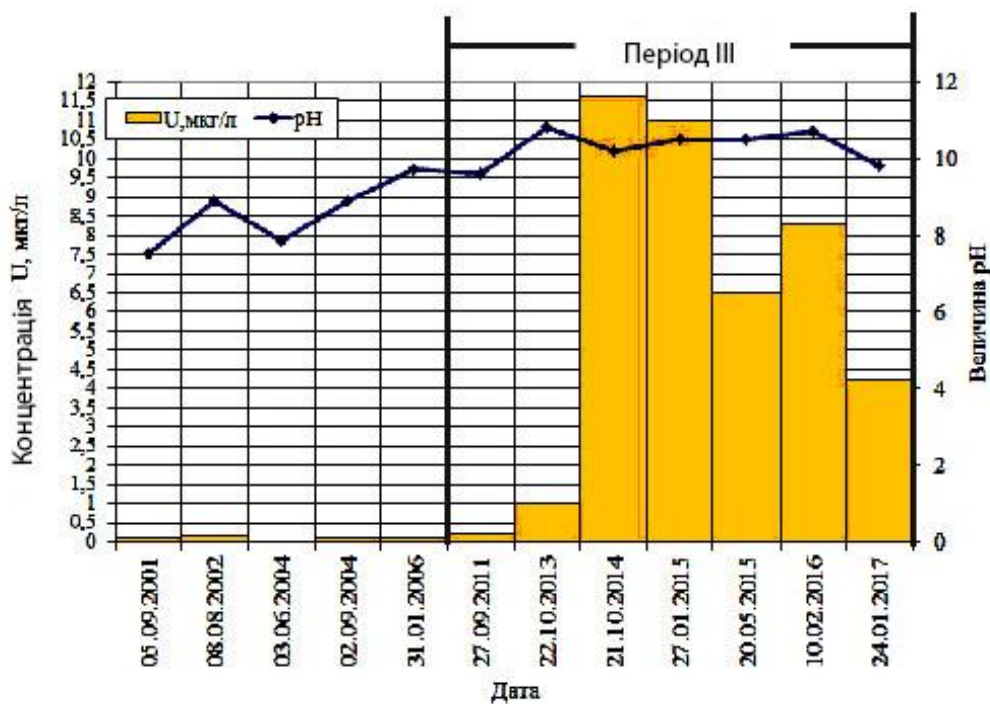


Рис. 6. Динаміка концентрацій урану у пробах ґрунтових вод із свердловини 2-Г.

Високі значення рН формуються при контакті ґрунтових вод із бетоном фундаментів споруд. У разі підвищення рН ґрунтових вод до величин 9,5 – 10,0 за рахунок корозії бетону пальового фундаменту НБК, що перекриває частину водоносного горизонту, можливе значне збільшення об'ємних активностей  $^{90}\text{Sr}$ , урану та ТУЕ.

Таким чином, постає питання вирішення проблем, які пов'язані з надходженням та розповсюдженням радіоактивного забруднення з підземними водами в довкіллі та розвантаження їх у поверхневій воді, які є джерелами питної води населення України.

Одним із заходів, який може призвести до зменшення радіоактивного забруднення підземних вод, є регулювання поверхневого стоку атмосферних опадів. На окремих ділянках поверхні проммайданчика ЧАЕС склалися сприятливі умови для зосередженої інфільтрації атмосферних опадів через радіоактивно забруднені ґрунти зони аерації в підземні води. Об'ємні активності  $^{90}\text{Sr}$  у пробах підземних вод із свердловин, що розташовані в зоні впливу таких ділянок, досягають 1200 – 3800 Бк/л.

Зменшити радіоактивне забруднення на ділянках зосередженої інфільтрації атмосферних опадів (місця розташування свердловин С-24, С-23А, 21-1А, 3-Г, 30-1А, С-4А) можливо за рахунок улаштування зливових каналізаційних колекторів. Відведення атмосферних опадів із колекторів можна здійснювати в підвідний і відвідний канали. Таким чином, будуть виключені зосереджена інфільтрація атмосферних опадів через радіоактивно забруднені ґрунти і привнесення радіонуклідів у водоносний горизонт.

Разом з тим факт зменшення об'ємних активностей  $^{90}\text{Sr}$  при рН підземних вод в інтервалі значень 8,5 – 9,5 (період II) наводить на думку про те, що штучне підтримання у водоносному горизонті цих величин рН може затримати поширення  $^{90}\text{Sr}$  з підземними водами за межі проммайданчика ЧАЕС.

## Висновки

1. Причина зниження концентрацій  $^{90}\text{Sr}$  при рН в межах 8,5 – 9,5 (період II) полягає в тому, що при рН 8,3 - 8,5 частина гідрокарбонат-іонів переходить у карбонат-іони, які у свою чергу утворюють з іонами кальцію та стронцію нерозчинні сполуки, що випадають із розчину ґрунтових вод в осад.

2. Механізм формування високих об'ємних активностей  $^{90}\text{Sr}$ , урану та ТУЕ пов'язаний зі створенням у підземних водах високолузного середовища з  $\text{pH} > 9,5$ .

3. Зменшити радіоактивне забруднення підземних вод на ділянках зосередженої інфільтрації атмосферних опадів через радіоактивно забруднені ґрунти можливо за рахунок улаштування зливових каналізаційних колекторів.

Автори висловлюють подяку В. Є. Хану та О. О. Одінцову за організацію та визначення концентрацій радіонуклідів у пробах води.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Панасюк М. І., Литвин І. А. Закономірності розподілу урану в підземних водах проммайданчика ЧАЕС // Ядерна фізика та енергетика. – 2017. – Т. 18, № 1. – С. 56 - 62.

**Н. І. Панасюк, Д. Т. Матросов, Є. І. Петросенко, Г. В. Левин, П. А. Люшня, М. А. Сизов,  
Л. А. Паламарь, І. П. Онищенко\***

*Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Кирова, 36а, Чернобыль, 07270, Украина  
\*Научно-инженерный центр радиогидроэкологических полигонных исследований НАН Украины,  
ул. О. Гончара, 55б, Киев, 01054, Украина*

#### УРОВНИ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРОМПЛОЩАДКИ ЧАЭС И МЕРОПРИЯТИЯ ПО ОГРАНИЧЕНИЮ ЕГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ

За последние годы наблюдается значительное (в 170 - 500 раз) повышение концентраций  $^{90}\text{Sr}$ , урана и трансураниевых элементов в подземных водах на участке расположения комплекса НБК-ОУ. В статье показано, что повышение миграционной способности радионуклидов с подземными водами происходит в сильнощелочной среде при  $\text{pH} > 9,5$  в восстановительной или переходной обстановке. Приводятся рекомендации по уменьшению уровней радиоактивного загрязнения подземных вод.

*Ключевые слова:* промплощадка ЧАЭС, подземные воды,  $^{90}\text{Sr}$ , уран, трансураниевые элементы, основные ионы, pH, миграция.

**M. I. Panasyuk, D. T. Matrosov, Y. I. Petrosenko, G. V. Levin, P. A. Lyushnya, M. O. Syzov,  
L. A. Palamar, I. P. Onyshchenko\***

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NAS of Ukraine, Kirova str., 36a, Chornobyl, 07270, Ukraine  
\*Radio-Environmental Center NAS of Ukraine, O. Gonchara str., 55b, Kyiv, 01054, Ukraine*

#### LEVELS OF RADIOACTIVE POLLUTION OF LOWER WATERS OF THE CHORNOBYL NUCLEAR POWER PLANT AND MEANS OF LIMITATION OF ITS DISTRIBUTION

There is increase of radionuclide migration capacity (by 200 - 500 times) with underground waters when  $\text{pH} > 9.5$  (period III). In addition, percent of soluble fraction of  $^{90}\text{Sr}$  is growing from 50 to 98 % of total activity of  $^{90}\text{Sr}$ . According to thermodynamic modeling, part of migration fraction of  $^{90}\text{Sr}$  in compound with carbonates is growing from 3 % (period II with  $\text{pH}$  8.5 - 9.5) to 14 % (period III). At the same time, percent of migration form  $^{90}\text{Sr}$  of free ion decreases to 83 % in period III. The results of thermodynamic modeling doesn't explain significant increase of strontium-90 concentration. As is known, strontium and calcium compound with carbonate, strontianite ( $\text{SrCO}_3$ ) and calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), are slightly soluble in water and when formed, they fall into a precipitate. Perhaps  $^{90}\text{Sr}$  forms other complex compounds that are not sorbed by soils and are not found by applications for thermodynamic simulation. High pH values are formed by contacting infiltration and groundwater with concrete deepened structures of buildings. In the case of pH increase of groundwater to a value of 9.5 – 10.0, due to the corrosion of the concrete of the foundation of the ARKA, which overlaps the part of the aquifer, is possible a significant increase in volumetric activity of  $^{90}\text{Sr}$ , uranium, and transuranic elements. The article presents recommendations for reducing the level of radioactive contamination of groundwater.

*Keywords:* ChNPP industrial site, underground waters,  $^{90}\text{Sr}$ , uranium, transuranic elements, basic ions, pH, migration.

#### REFERENCES

- Panasyuk M. I., Lytvyn I. A. Laws of distribution of uranium in groundwater of Chnpp industrial site // Jaderna fizika ta energetyka. – 2017. - Vol. 18, № 1. - С. 56 - 62.*

Надійшла 27.03.2018  
Received 27.03.2018