

І. А. Литвин<sup>1</sup>, М. І. Панасюк<sup>1</sup>, Г. В. Левін<sup>1</sup>, І. П. Онищенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова, 36а, Чорнобиль, 07270, Україна

<sup>2</sup> Науково-інженерний центр радіогідроекологічних полігонних досліджень НАН України, вул. О. Гончара, 55б, Київ, 01054, Україна

### ЗАБРУДНЕННЯ <sup>90</sup>Sr ПІДЗЕМНИХ ВОД ТЕРИТОРІЇ ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ» ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Виявлено нові закономірності поведінки <sup>90</sup>Sr в підземних водах, які пройшли шлях міграції під об'єктом «Укриття». Показано, що в лужному середовищі ґрунтових вод при рН води 8,5 – 10 об'ємна активність <sup>90</sup>Sr зменшується до одиниць Бк/л за рахунок створення слабозрочинних сполук із CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, що випадають в осад. При рН вище 10 – 11 міграційна здатність <sup>90</sup>Sr зростає на порядок і об'ємні активності <sup>90</sup>Sr у пробах ґрунтових вод досягають значень 150 – 2100 Бк/л.

*Ключові слова:* підземні води, проммайданчик ЧАЕС, міграція, активність <sup>90</sup>Sr, рН, карбонат-іон.

Визначення вмісту <sup>90</sup>Sr у пробах підземних вод зі спостережних свердловин проводиться в рамках радіогідроекологічного моніторингу в районі об'єкта «Укриття».

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.

Об'ємні активності радіонуклідів у пробах ґрунтових вод визначаються в лабораторіях відділу радіаційного моніторингу відділення ядерної та радіаційної безпеки ІПБ АЕС НАН України.

На проммайданчику ДСП ЧАЕС розвинений безнапірний водоносний горизонт, приурочений до алювіальних пісків першої надзаплавної тераси р. Прип'ять. Потужність водоносного горизонту до початку виведення водойми-охолоджувача з експлуатації (травень 2014 р.) становила 30 м. У даний час рівні ґрунтових вод знизилися на 2 м. Напрямок руху ґрунтових вод - на північний схід у бік заплави р. Прип'ять, включаючи ділянку, раніше зайняту водоймою-охолоджувачем. Зрозуміло, що в цьому ж напрямку відбувається поширення радіонуклідів, які мігрують із підземними водами від місць забруднення до ділянок розвантаження в руслі р. Прип'ять.

За час спостережень, починаючи з 1995 р., об'ємні активності <sup>90</sup>Sr у пробах ґрунтових вод зі спостережних свердловин досягали максимальних значень 3820 Бк/л – у пробах зі свердловини 3-Г у лютому 1997 р.

Вміст <sup>90</sup>Sr у пробах ґрунтових вод локальної зони об'єкта «Укриття» та прилеглої території у 2015 р. змінювався, переважно в межах від 0,5 до 1800 Бк/л (рис. 1).

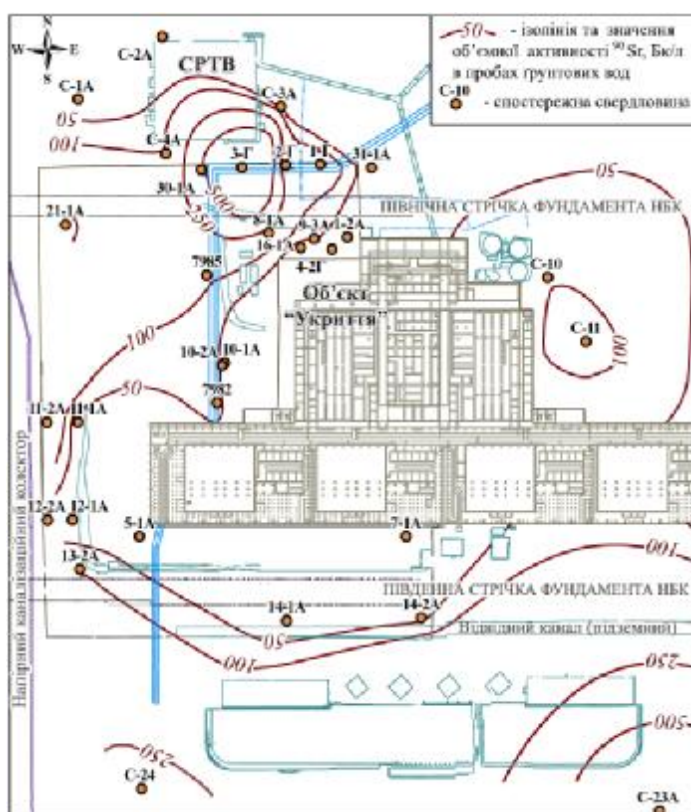


Рис. 1. Ізолінії розподілу об'ємних активностей <sup>90</sup>Sr у пробах ґрунтових вод зі спостережних свердловин у III кварталі 2015 р.

Місяця найбільших об'ємних активностей  $^{90}\text{Sr}$  вказують на ділянки зосередженого надходження радіоактивного забруднення у водоносний горизонт та водночас на сприятливі гідрохімічні умови для міграції радіонуклідів із підземними водами.

За останні декілька років на ділянці, розташованій на північ від каскадної стіни, де спостережними свердловинами контролюються ґрунтові води, що пройшли шлях фільтрації під об'єктом «Укриття», виявлено ряд нових закономірностей у поведінці  $^{90}\text{Sr}$ . Підвищення об'ємних активностей  $^{90}\text{Sr}$  у пробах ґрунтових вод із свердловин, розташованих нижче по потоку від об'єкта «Укриття», тісно пов'язані зі змінами, перш за все величини рН, та корелюють із концентраціями у воді  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^{2-}$  та  $\text{CO}_3^{2-}$ .

На рис. 2 показано зміни об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  та значення рН у пробах ґрунтових вод зі свердловини 2-Г за весь період спостережень. На графіках залежно від величини рН виділено три періоди:

період I - величина рН змінюється переважно в межах від 7,5 до 8,5 при середньому значенні 7,9 (табл. 1, рис. 2 та 3);

період II - величина рН змінюється здебільшого в межах від 8,5 до 9,5 при середньому значенні 8,9 (див. табл. 1, рис. 4);

період III - величина рН змінюється переважно в межах від 10 до 11 при середньому значенні 10,4 (див. табл. 1, рис. 5).

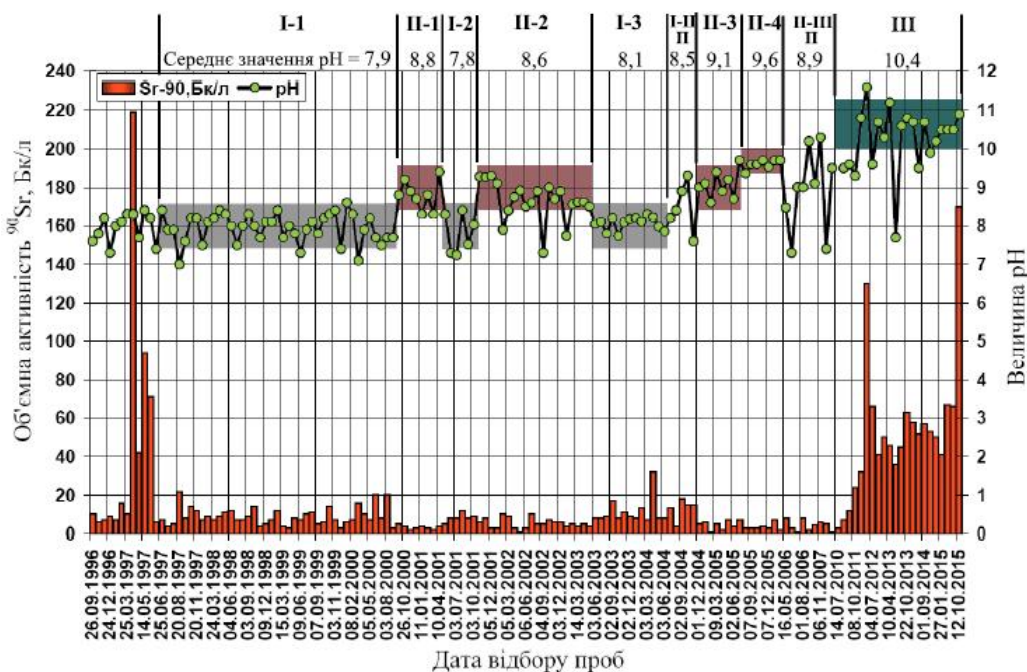


Рис. 2. Динаміка величини рН та об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  у пробах ґрунтових вод зі свердловини 2-Г. Угорі номери періодів і середні значення рН для кожного виділеного підперіоду.

Таблиця 1. Значення рН та об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  у свердловині 2-Г для періодів, що виділені на рис. 2

Дата		Період, підперіод	Коеф. корел. $^{90}\text{Sr}/\text{pH}$	рН			$^{90}\text{Sr}$		
від	до			мін	макс	середнє	мін	макс	середнє
10.06.1997	05.09.2000	I-1	-0,15	7	8,6	7,9	3	22	9
05.09.2000	10.04.2001	II-1	0,31	8,3	9,4	8,8	2	5	3
04.05.2001	03.10.2001	I-2	0,20	7,24	8,4	7,8	5	12	8
24.10.2001	05.05.2003	II-2	-0,15	7,3	9,3	8,6	1	10	5
03.06.2003	03.06.2004	I-3	0,35	7,74	8,3	8,1	7	32	11
06.07.2004	01.11.2004	I-II II	0,19	7,6	9,3	8,5	4	18	13
01.12.2004	05.07.2005	II-3	0,78	8,6	9,7	9,1	1	7	5
04.08.2005	04.04.2006	II-4	0,34	9,4	9,7	9,6	2	7	4
16.05.2006	14.07.2010	II-III II	-0,13	7,3	10,3	8,9	1	8	4
01.02.2011	12.10.2015	III	0,55	7,7	11,6	10,4	7	170	56
10.06.1997	12.10.2015	I-III	0,58	7	11,6	8,7	1	170	15

Періодам присвоєно номери підперіодів 1, 2, 3 і т.д., що нумеруються по порядку поширення. Як видно з рис. 2 та табл. 1, об'ємні концентрації  $^{90}\text{Sr}$  у пробах ґрунтових вод, у межах тих самих періодів коливання рН, мають однакові значення. При рН ґрунтових вод, характерних для підперіодів I-1, I-2, I-3 (див. рис. 2 та 3) періоду I, найбільш часті значення концентрації  $^{90}\text{Sr}$  знаходяться в інтервалі 8 - 10 Бк/л. При підвищенні рН до 8,5 - 9,5 (період II) найчастіші значення об'ємних активностей  $^{90}\text{Sr}$  знаходяться в інтервалі 2 - 4 Бк/л. Причини цього полягають 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.

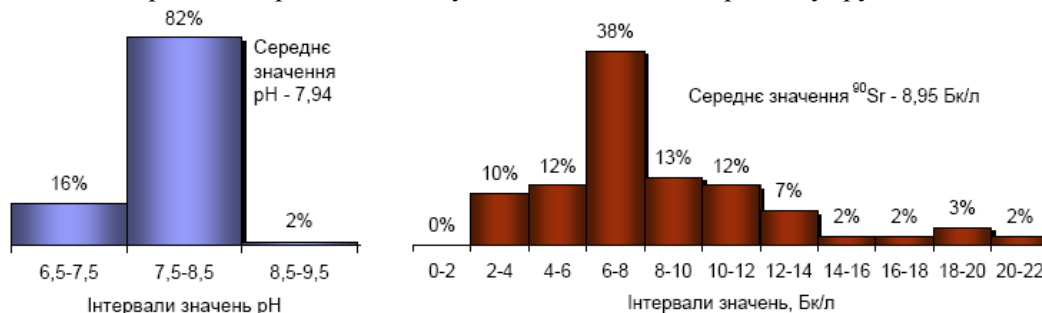


Рис. 3. Розподіл значень рН та об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  у пробах ґрунтових вод для періоду I.

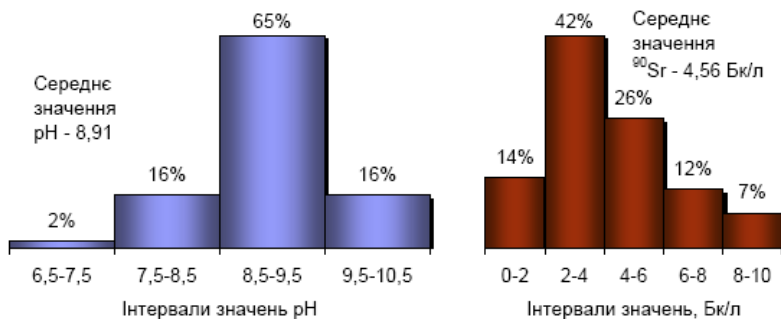


Рис. 4. Розподіл значень рН та об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  у пробах ґрунтових вод для періоду II.

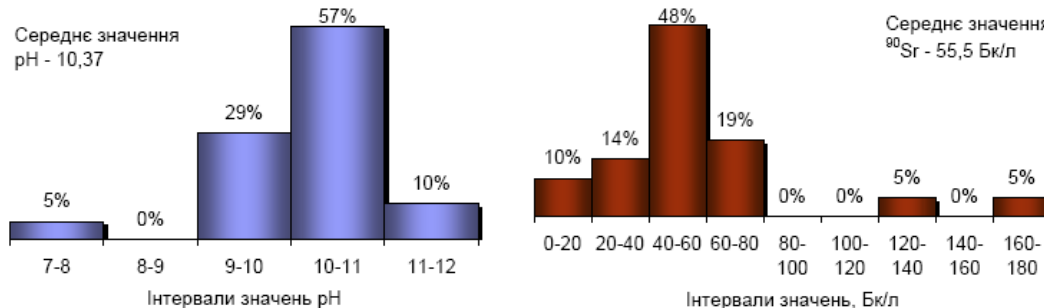


Рис. 5. Розподіл значень рН та об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  у пробах ґрунтових вод для періоду III.

При переході від періоду II до періоду III спостерігається проміжна область II-III п. При цьому в межах періоду III рН ґрунтових вод (рис. 5) переважно змінюються від 10 до 11 і спостерігається різке зростання об'ємних активностей  $^{90}\text{Sr}$  до значень 170 Бк/л, при середньому значенні 56 Бк/л, тобто сорбційна здатність ґрунтів різко знижується при рН ґрунтових вод вище 9,5 - 10. Коефіцієнт розподілу  $^{90}\text{Sr}$  при цьому зменшується в 15 разів у порівнянні з періодом II. Наявність високих значень об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$ , характерних для періоду III є досить несподіваним результатом. За літературними даними [1] вважається, що ступінь сорбції  $^{90}\text{Sr}$  з лужного середовища досягає значень 60 - 100 %. Раніше ми вважали [2], що сорбційна здатність ґрунтів знижується через те, що у водоносному горизонті при високих значеннях рН утворюються, за участю  $^{90}\text{Sr}$ , колоїди, які мігрують у водоносному горизонті не сорбуючись. Але аналіз даних за фазовим розподілом  $^{90}\text{Sr}$  у пробах ґрунтових вод зі свердловини 4-Г у роботах [3, 4 та 5] не підтверджує цю гіпотезу. Більш того, у свердловині 4-Г (рис. 6 та 7) для періоду III, у порівнянні з періодами I і II, характерне зростання об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  в іонно-дисперсній формі від 53 - 54 до 91 - 98 % загальної об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  в пробі. При цьому частка активності  $^{90}\text{Sr}$  в колоїдній формі знаходження для періоду II становить 9,5 %, а для періоду III знижується до значень 0,6 - 0,7 %. Таким чином, імовірно, що при

високих рН (10 - 12,5)  $^{90}\text{Sr}$  утворює комплексні сполуки, що слабо сорбуються піщаними ґрунтами алювіального водоносного горизонту.

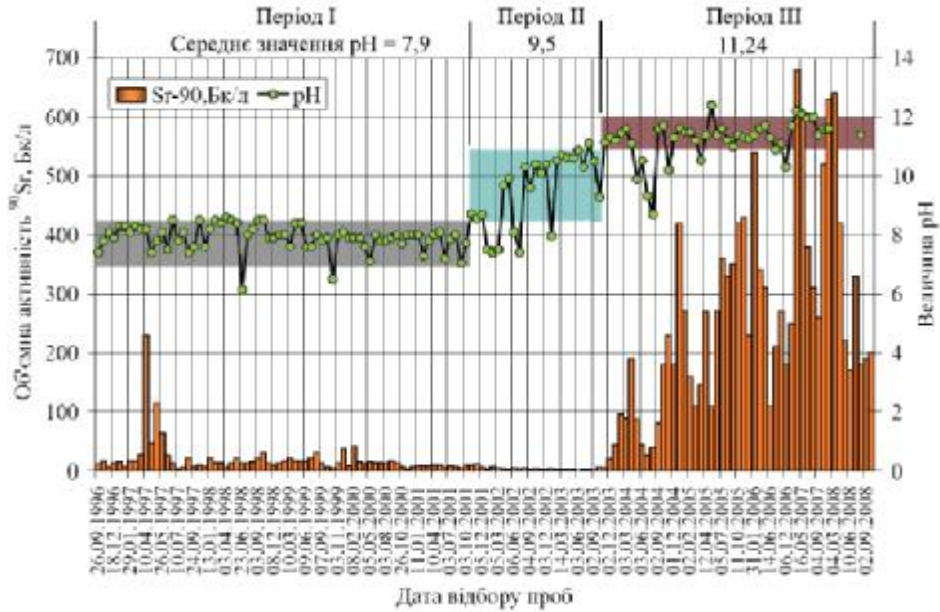


Рис. 6. Динаміка рН та об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  у пробах ґрунтових вод зі свердловини 4 - Г. Угорі номери періодів та середні значення рН для кожного виділеного періоду.

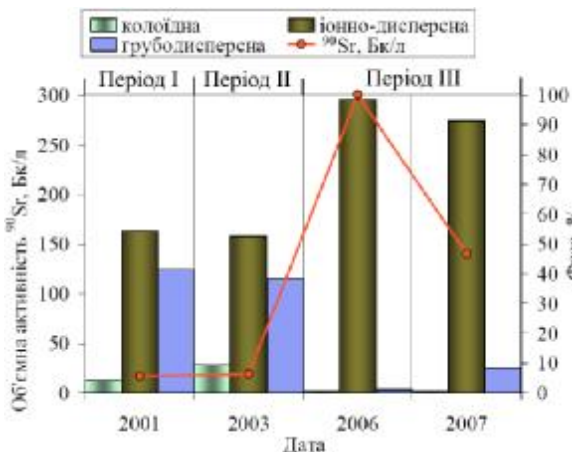


Рис. 7. Фазовий розподіл  $^{90}\text{Sr}$  у пробах ґрунтових вод зі свердловини 4-Г для періодів I і II (за результатами [3, 4 та 5]).

Аналогічні закономірності фіксуються також у свердловинах 1-1А, 9-2А (рис. 8, 9 і 10) та інших свердловинах.

На рис. 8 для свердловини 1-1А винесено концентрації іона  $\text{CO}_3^{2-}$ , час появи якого в підземних водах збігається з настанням періоду II (рН > 8,3 - 8,5) та зниженням середніх об'ємних активностей  $^{90}\text{Sr}$  з 30 до 4 Бк/л (табл. 2). Це також підтверджує наше припущення, що зниження концентрацій  $^{90}\text{Sr}$  в рамках періоду II відбувається за рахунок випадання в осад слаблорозчинних сполук карбонату кальцію та карбонату стронцію.

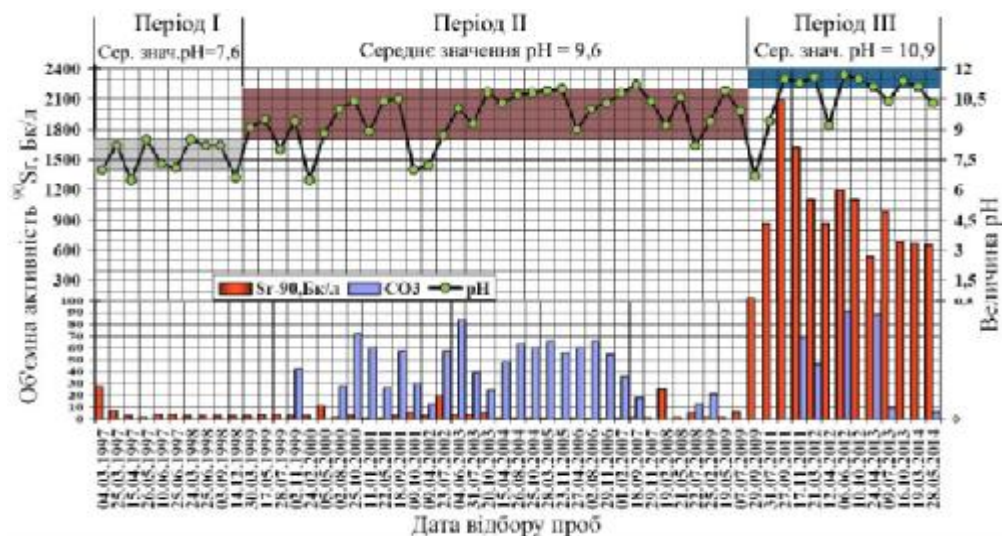


Рис. 8. Динаміка рН та об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  у пробах ґрунтових вод зі свердловини 1-1А. Угорі номери періодів та середні значення рН для кожного виділеного періоду.

За даними опробування ґрунтових вод зі свердловини 9-2А (рис. 9, табл. 2) чітко видно зворотну кореляцію між  $^{90}\text{Sr}$  та рН для періодів II. Власне це характерно для всіх свердловин, де виділяється період II.

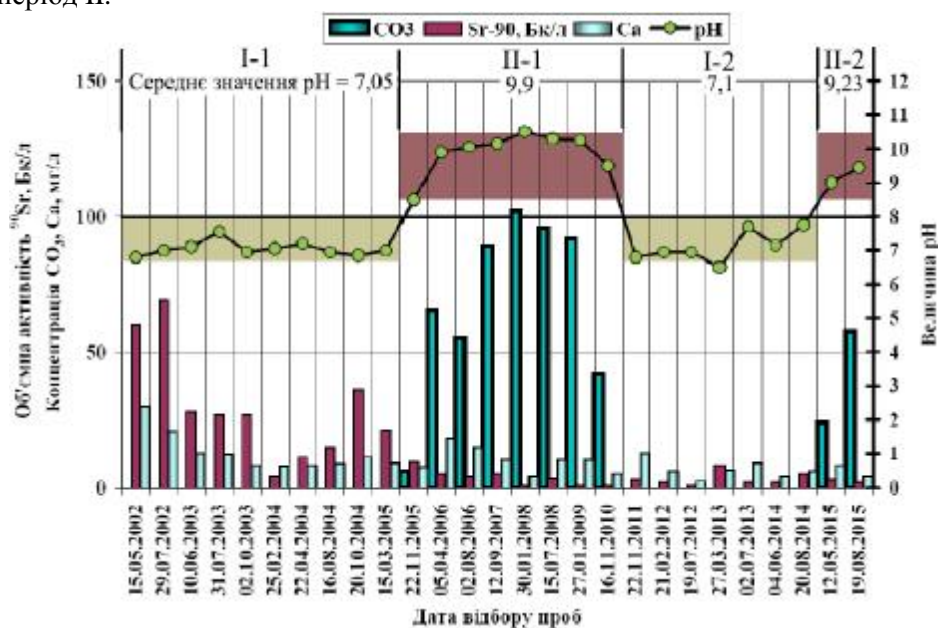


Рис. 9. Динаміка рН та об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  у пробах ґрунтових вод зі свердловини 9-2А. Угорі номери періодів та середні значення рН для кожного виділеного періоду.

Таблиця 2. Значення рН та об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  у свердловині 9-2А для різних періодів, що виділені на рис. 9

Дата		Період, підперіод	Коеф. корел. $^{90}\text{Sr}/\text{pH}$	рН			$^{90}\text{Sr}$		
від	до			мін	макс	середнє	мін	макс	середнє
15.05.2002	15.03.2005	I-1	-0,18	6,8	7,6	7,1	4	69	30
15.03.2005	16.11.2010	II-1	-0,66	8,5	10,5	9,9	1	9	4
16.11.2010	20.08.2014	I-2	-0,16	6,5	7,8	7,1	1	8	3
20.08.2014	19.08.2015	II-2	-1,00	9	9,5	9,21	2	3	3
15.05.2002	19.08.2015	I-II	-0,43	6,5	10,5	8,1	1	69	13

При цьому у свердловині 9-2А виділяються тільки періоди I та II, а період III ще не настав (див. рис. 9). Хоча не можна виключити, що ґрунтові води з характерними для періоду III рН уже профільтрувались через цю ділянку, до буріння спостережної свердловини 9-2А та в даний час ми спостерігаємо періоди «спаду» високих значень рН.

В якості висновку можна відзначити, що високі значення рН формуються при контакті ґрунтових вод із бетоном фундаментів споруд. У разі підвищення рН ґрунтових вод до величин 10 - 11, за рахунок корозії пального фундаменту НБК, що перекирає частину водоносного горизонту, можливе значне збільшення об'ємних активностей  $^{90}\text{Sr}$  нижче по потоку ґрунтових вод від фундаментів НБК. Разом з тим, якщо штучно підтримувати у водоносному горизонті значення рН у межах 8,5 - 9,5 та високі концентрації  $\text{CO}_3^{2-}$ , то можна не допустити поширення  $^{90}\text{Sr}$  з підземними водами за межі промайданчика ЧАЕС, до місць розвантаження ґрунтових вод у руслі р. Прип'ять.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Белицкий А.С., Орлова Е.И.* Охрана подземных вод от радиоактивных загрязнений. – М.: Медицина, 1968.
2. *Панасюк Н.И., Алферов А.М., Скорбун А.Д. и др.* Радиоактивное загрязнение подземных вод и грунтов локальной зоны объекта «Укрытие» и промплощадки ЧАЭС // Сб. докл. «Двадцать пять лет Чернобыльской катастрофы. Безопасность будущего». – К., 2011. – С.79 - 84.
3. *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.
4. *Руденко Л.И., Хан В.Е.-И., Панасюк Н.И.* Вклад микрочастиц в механизм миграции радионуклидов из объекта «Укрытие» и его промплощадки в грунтовые воды // Радиохимия. – 2005. – Т. 47, № 1. - С. 89 - 90.

5. Руденко Л., Хан В., Кухар В. Міграція радіонуклідів з об'єкта «Укриття». Наукові засади очищення рідких радіоактивних відходів від органічних речовин і трансуранових елементів // Доп. НАН України. – 2008. – № 4. – С. 10 – 22.

**И. А. Литвин<sup>1</sup>, М. И. Панасюк<sup>1</sup>, Г. В. Левин<sup>1</sup>, И. П. Онищенко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Кирова, 36а, Чернобыль, 07270, Украина

<sup>2</sup>Научно-инженерный центр радиогидрогеоэкологических полигонных исследований НАН Украины, ул. О. Гончара, 55б, Киев, 01054, Украина

### **ЗАГРЯЗНЕНИЕ $^{90}\text{Sr}$ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ТЕРРИТОРИИ ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ» ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

Обнаружены новые закономерности поведения  $^{90}\text{Sr}$  в подземных водах, которые прошли путь миграции под объектом «Укрытие». Показано, что в щелочной среде грунтовых вод при pH воды 8,5 - 10 объемная активность  $^{90}\text{Sr}$  уменьшается до единиц Бк/л за счет создания слаборастворимых соединений с  $\text{CO}_3^{2-}$ , которые выпадают в осадок. При pH выше 10 - 11 миграционная способность  $^{90}\text{Sr}$  возрастает на порядок и объемные активности  $^{90}\text{Sr}$  в пробах грунтовых вод достигают значений 150 - 2100 Бк/л.

*Ключевые слова:* подземные воды, промплощадка ЧАЭС, миграция, активность  $^{90}\text{Sr}$ , pH, карбонат-ион.

**I. A. Lytvyn<sup>1</sup>, M. I. Panasyuk<sup>1</sup>, G. V. Levin<sup>1</sup>, I. P. Onyshchenko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, Kirova str., 36a, Chornobyl, 07270, Ukraine

<sup>2</sup>Radio-Environmental Center NAS of Ukraine, O. Gonchara str., 55b, Kyiv, 01054, Ukraine

### **GROUNDWATER CONTAMINATION BY $^{90}\text{Sr}$ ON THE TERRITORY OF THE “UKRYTTYA” OBJECT OF THE CHORNOBYL NUCLEAR POWER PLANT**

Identified new patterns of  $^{90}\text{Sr}$  conduct in groundwater that have passed way migration under the "Ukryttya" object. Shown that in alkaline groundwater environment with pH 8.5 – 10 volume activity of  $^{90}\text{Sr}$  is reduced to several Bq/l by creating weakly soluble compounds with  $\text{CO}_3^{2-}$ , which precipitate. When pH above 10 - 11, increases  $^{90}\text{Sr}$  migration capacity and the values of  $^{90}\text{Sr}$  volume activity in groundwater samples reaches 150 – 2100 Bq/l.

*Keywords:* groundwater, industrial site of ChNPP, migration,  $^{90}\text{Sr}$  activity, pH, carbonate-ion.

#### **REFERENCES**

1. Belitskiy A.S., Orlova E.I. The protection of ground waters from radioactive contamination. – Moskwa: Medicina, 1968. (Rus)
2. Panasyuk M.I., Alfiorov A.M., Skorbun A.D. et al. Soils and ground water's radioactive contamination into the local zone of the "Shelter" object and ChNPP industrial site // Intern. conf. "Twenty-five years after Chernobyl Accident. Safer for the Future". – Part 2. – Kyiv, 2011. – P.79 - 84. (Rus)
3. Rudenko L. I., Khan V. E.-I., Panasyuk M. I. Physico-chemical justification for radionuclides migration from the "Shelter" object and its industrial site to the ground waters // Radiochimiya. – 2003. – Vol. 45, № 3. – P. 268 - 272. (Rus)
4. Rudenko L.I., Khan V.E.-I., Panasyuk M.I. Microparticles contribution in the mechanism of radionuclide migration from the "Shelter" object and its industrial site to the ground waters // Radiochimiya. – 2005. – Vol. 47, № 1. – P. 89 - 90. (Rus)
5. Rudenko L., Khan V., Kukhar V. Migrations of radioactive nuclides from «Shelter» object. Scientific fundamentals of liquid radioactive waste products purification from organic substances and transuranium elements // Bulletin of NAS of Ukraine. – 2008. - № 4. – P. 10 – 22. (Rus)

Надійшла 14.04.2016

Received 14.04.2016