

І. О. Коваленко¹, М. І. Панасюк¹, Н. В. Сосонна¹, Г. В. Левін¹, П. А. Люшня¹, Г. К. Роєнко¹,
Л. А. Паламар¹, М. Г. Бузинний², І. Р. Онищенко³

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

² ДУ «Інститут громадського здоров'я О. М. Марзієва Національної академії медичних наук України»,
вул. Гетьмана Павла Полуботка (Попудренка), 50, Київ, 02094, Україна

³ ДУ «Науково-інженерний центр радіогідрогеоекологічних полігонних досліджень НАН України»,
вул. О. Гончара, 55б, Київ, 01601, Україна

Вплив іонної сили розчину на формування підвищеної міграції ^{90}Sr в підземних водах промислового майданчика Чорнобильської АЕС

Ключові слова:

промайданчик ЧАЕС,
підземні води,
сильнолужне середовище,
іонна сила розчину,
термодинамічне моделювання,
міграція різних форм
знаходження ^{90}Sr

Виконано термодинамічне моделювання форм знаходження ^{90}Sr для пояснення умов його міграції з підземними водами на основі даних моніторингових досліджень свердловини 4-Г, яка до її ліквідації у 2008 р. розташовувалася на промисловому майданчику Чорнобильської АЕС. Дослідження міграційних форм ^{90}Sr проводилося за допомогою набору програмних інструментів Geochemist's Workbench Community Edition. Для підтвердження та розуміння міграційних процесів проводилося моделювання поширення з підземними водами різних комплексних з'єднань ^{90}Sr , таких як SrCO_3 , SrHCO_3^+ , SrSO_4 , SrOH^+ та SrNO_3^+ . За допомогою SpecE8 було виконано розрахунок різних форм знаходження ^{90}Sr , а також розраховано іонну силу розчину (ICP) підземних вод. В експерименті в інтервалі pH 9,5–12,4 спостерігається зростання в підземних водах концентрації ^{90}Sr у 200–500 разів — до 550 Бк/л. У цьому ж інтервалі pH, за даними моделювання, спостерігається зростання в підземних водах концентрації стронцію у формі SrOH^+ та його зниження у формі Sr^{2+} . Причиною різкого зростання об'ємних активностей ^{90}Sr в сильнолужних підземних водах може бути підвищення ICP > 5 ммоль/л. Збільшення ICP сильнолужних підземних вод призводить до зниження сорбційних властивостей ґрунтів і до ремобілізації адсорбованого ^{90}Sr назад до підземних вод шляхом катіонного обміну. Імовірно, в інтервалі pH 9,5–12,4 та при ICP > 5 ммоль/л відбувається зміна поверхневого заряду частинок ґрунту (зазвичай із від'ємного на позитивний), при якому катіони не можуть сорбуватися, а, навпаки, повинні ремобілізуватися з поверхні ґрунтів до підземних вод. При цьому pH = 9,5, як припускається, є точкою нульового заряду (pzc). Для оцінки можливості існування зв'язку між концентраціями ^{90}Sr та ICP було проведено кореляційний аналіз методом геохімічної статистики. При цьому ступінь кореляції $K = 0,87$, що підтримує ідею існування тісного зв'язку між цими даними.

Вступ

Вивчення умов міграції радіонуклідів із підземними та поверхневими водами виконується на всіх

ділянках потенційного та фактичного радіоактивного забруднення територій, а також розміщення сховищ відпрацьованого ядерного палива, твердих і рідких радіоактивних відходів. Але, як правило, ці

© І. О. Коваленко, М. І. Панасюк, Н. В. Сосонна, Г. В. Левін, П. А. Люшня,
Г. К. Роєнко, Л. А. Паламар, М. Г. Бузинний, І. Р. Онищенко, 2023

роботи проводяться в лабораторних умовах, які можуть тільки частково відображати реальну природну ситуацію.

Прийнято вважати, що з лужних підземних вод ^{90}Sr вилучається майже на 100 % за рахунок сорбції ґрунтами [1]. Дослідження міграції ^{90}Sr з підземними водами промислового майданчика Чорнобильської АЕС (проммайданчика ЧАЕС) [2–7], навпаки, показують, що в умовах формування в підземних водах сильнолужного середовища, в якому $\text{pH} > 9,5$, спостерігається значне (у 200–500 разів) підвищення об'ємних активностей ^{90}Sr та урану. При цьому в окремих свердловинах концентрація ^{90}Sr може зростати до 700–2 100 Бк/л. У лабораторних експериментах, що моделюють підземні води в околицях Sellafield [8], вказано, що в незабуферованих ($\text{pH} 5,5$) і буферованих HCO_3^- ($\text{pH} 7,2$) підземних водах ступінь сорбції ^{90}Sr значно підвищився — до 61,8 та 98,9 % відповідно. Між $\text{pH} 6$ – 8 відбувається майже повна ($>99\%$) іммобілізація ^{90}Sr в осадах. У сильнолужних умовах при збільшенні ICP понад 5 ммоль/л відбувається зниження сорбційних властивостей супісків та пісків. При цьому відбувається ремобілізація адсорбованого на ґрунтах ^{90}Sr шляхом катіонного обміну.

Вивченню розподілу радіонуклідів у підземних водах проммайданчика ЧАЕС присвячено також роботи [9, 10]. Але основну увагу в них приділено визначенню джерел забруднення, а не умов транспортування ^{90}Sr у водоносному горизонті. Тобто, за літературними даними, однозначно визначеної поведінки ^{90}Sr в лужних підземних водах не існує.

У цій роботі пояснюються деякі особливості міграції ^{90}Sr з підземними водами, що отримані за допомогою термодинамічного моделювання.

Метою роботи є визначення форм знаходження ^{90}Sr в підземних водах залежно від pH розчину та можливості впливу ICP на міграційну здатність радіостронцію у водоносному горизонті проммайданчика ЧАЕС.

Матеріали та методи

Розрахунок міграційних форм ^{90}Sr проводився за допомогою набору програмних інструментів Geochemist's Workbench Community Edition. Для підтвердження та розуміння міграційних процесів проводилося моделювання поширення з підземними водами різних комплексних з'єднань ^{90}Sr , таких як SrCO_3 , SrHCO_3^+ , SrSO_4 , SrOH^+ , SrNO_3^+ , по свердловині 4-Г.

Для аналізу даних використовувалися здебільшого такі програми з набору Geochemist's Workbench, як GSS — The Geochemist's Spreadsheet та SpecE8.

Оскільки GSS — The Geochemist's Spreadsheet — це повнофункціональна електронна таблиця, вона використовувалася для сортування, оформлення та подальшої обробки даних [11].

За допомогою SpecE8 було виконано розрахунок різних форм знаходження ^{90}Sr , а також розраховано ICP підземних вод зі свердловини 4-Г.

Для підтвердження отриманих результатів було проведено кореляційний аналіз між отриманими розрахунковими даними для ICP та активністю ^{90}Sr методом геохімічної статистики [2].

Результати

У роботі використано результати моніторингових спостережень свердловини 4-Г.

Ряди спостережень за динамікою pH та об'ємними активностями ^{90}Sr умовно розділили на три періоди (рис. 1): період I — значення pH 7,5–8,5; період II — значення pH 8,5–9,5; період III — значення pH 9,5–12,5.

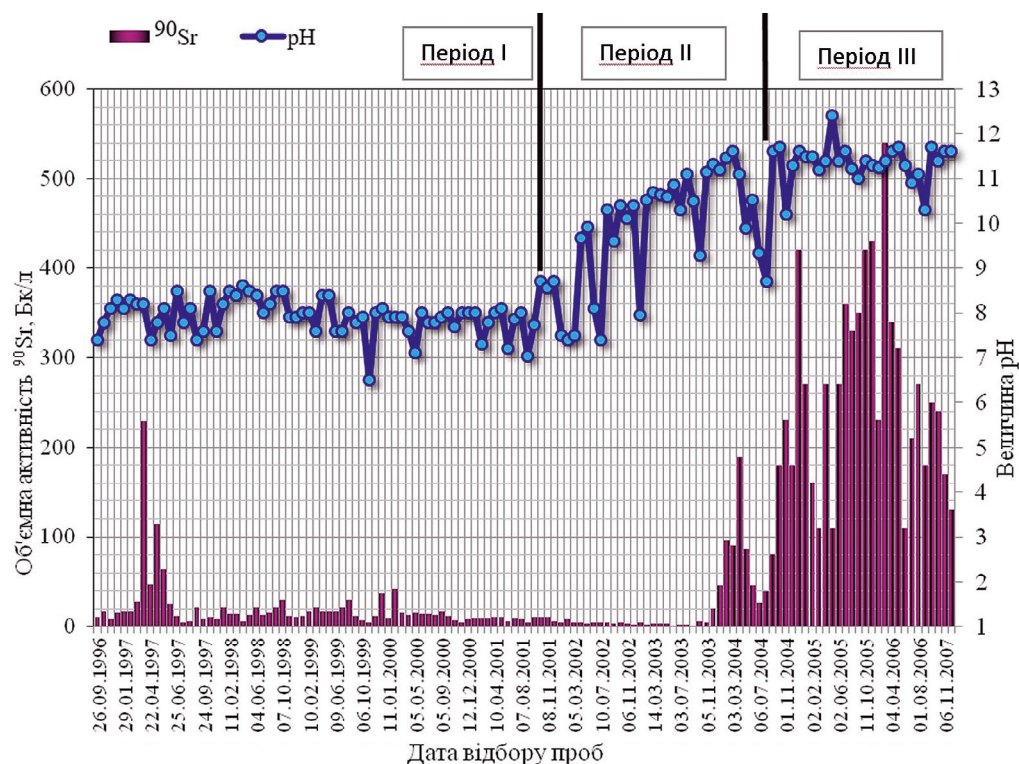
Як видно з рис. 1, при pH ґрунтових вод, характерних для періоду I, значення концентрації ^{90}Sr низькі. У разі підвищення pH до 8,5–9,5 (період II) об'ємні активності ^{90}Sr зменшуються. Причини зниження концентрацій ^{90}Sr полягають у тому, що при pH 8,3–8,5 частина гідрокарбонат-іонів переходить у карбонат-іони, які у свою чергу утворюють з іонами кальцію та іонами стронцію нерозчинні сполуки, що випадають з розчину ґрунтових вод в осад [4]. Проте при pH вище, в основному 9,5 (період III), різко зростають об'ємні активності ^{90}Sr .

Значення pH , об'ємної активності ^{90}Sr та хімічного складу у пробах зі свердловини 4-Г для дат відбору проб, що обрані представляти свої періоди (03.12.1998 р. — період I; 05.02.2002 р. — період II; 23.02.2006 р. — період III), наведено в табл. 1.

Похибка вимірювань $^{90}\text{Sr} \pm 25$ – 30% , $\text{pH} \pm 0,5\%$, компонентів хімічного складу ± 10 – 15% .

Концентрація стабільного та радіоактивного $\text{Sr}_{\text{стаб+радіоактив}}$ взята умовно однакова (1 мг/л) для досліджень за всіма періодами, щоб порівнювати зміни різних форм знаходження.

За допомогою SpecE8 було виконано розрахунок концентрацій $\text{Sr}_{\text{стаб+радіоактив}}$ у різних формах залежно від періоду спостережень, що встановлені для свердловини 4-Г (табл. 2). Як видно з таблиці, концентрація

Рис. 1. Динаміка величини рН та об'ємної активності ^{90}Sr у пробах ґрунтових вод зі свердловини 4-ГТаблиця 1. Значення рН, хімічного складу та об'ємної активності ^{90}Sr у пробах зі свердловини 4-Г залежно від періоду моніторингових спостережень, мг/л

Номенклатура визначень	Період I	Період II	Період III
pH	6,75	9,15	11,3
Na^+	17,1	26,9	58
K^+	16,4	7	50
Ca^{2+}	12	4	24
Mg^{2+}	4,8	1,5	4,9
NH_4^+	1,1	1	4,5
Cl^-	4,76	2,8	6,4
SO_4^{2-}	24,6	28,8	24,7
NO_3^-	6,5	0	2,4
NO_2^-	0	1,5	3
HCO_3^-	85,4	51,9	45,8
CO_3^{2-}	0	9	118,5
Окислюваність, мг O_2 / л	20,4	16,8	13,12*
SiO_2	10,86	22,83	10,9
PO_4^{3-}	5	11,25	0,86
F^-	1,22	3	1,4
Мінералізація	172,60	134,40	342,2
$\text{Sr}_{\text{стаб+радіоактив}}$	1	1	1
^{90}Sr , Бк/л	10	8	540*

* Розмірність наведено в стовпчику «Номенклатура визначень».

Таблиця 2. Розраховані форми знаходження ^{90}Sr в пробах підземних вод залежно від періоду моніторингових спостережень по свердловині 4-Г, мг/л

Форми знаходження	Період I	Період II	Період III
SrCO_3	$2 \cdot 10^{-4}$	0,039	0,24
SrHCO_3^+	0,020	0,015	$6,89 \cdot 10^{-4}$
SrSO_4	0,061	0,075	0,044
SrOH^+	$2,88 \cdot 10^{-7}$	$7,11 \cdot 10^{-5}$	0,0082
$\text{Sr}^{2+} + ^{90}\text{Sr}$	0,958	0,93	0,827
SrNO_3^+	$8,64 \cdot 10^{-4}$	–	$2,51 \cdot 10^{-4}$
Іонна сила, ммоль/л	2,72	2,27	5,73

розчинної комплексної нейтральної сполуки, що не сорбується, SrCO_3 зростає в періоді III в 6 разів. Концентрація SrHCO_3^+ , навпаки, зменшується. Концентрація SrSO_4 зростає в періоді II, але спадає в періоді III, SrOH^+ зростає в періоді III, а Sr^{2+} зменшується. SrNO_3^+ в періоді III зменшується. Також у періоді III спостерігається суттєве, більш ніж у 2 рази, зростання ІСР.

Для дослідження динаміки розповсюдження SrOH^+ було взято за основу дані, що характеризують період III (проба від 23.02.2006 р.). У SpecE8 цій пробі надавались різні значення рН та обраховувались кон-

центрації SrOH^+ і Sr^{2+} , отримані дані були використані для побудови графіка (рис. 2).

Зростання концентрацій стронцію у формі SrOH^+ в періоді III за часом збігається з підвищенням ІСР (рис. 3). При ІСР більше 5 ммоль/л спостерігається значне підвищення об'ємних активностей ^{90}Sr .

У рамках експерименту, за даними термодинамічного моделювання, у SpecE8 було побудовано графік залежності між концентраціями стронцію та ІСР (рис. 4). У періоді III при рН орієнтовно 9,5 спостерігається зростання ІСР. При цьому відбувається зменшення концентрацій стронцію у формі Sr^{2+} .

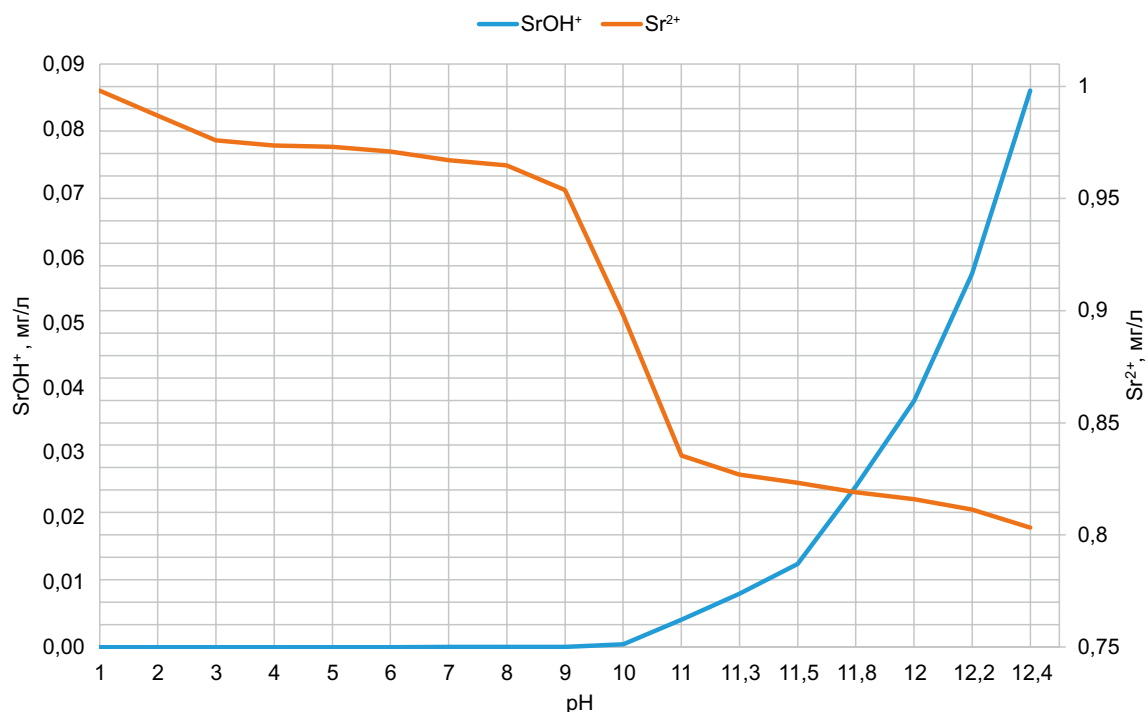
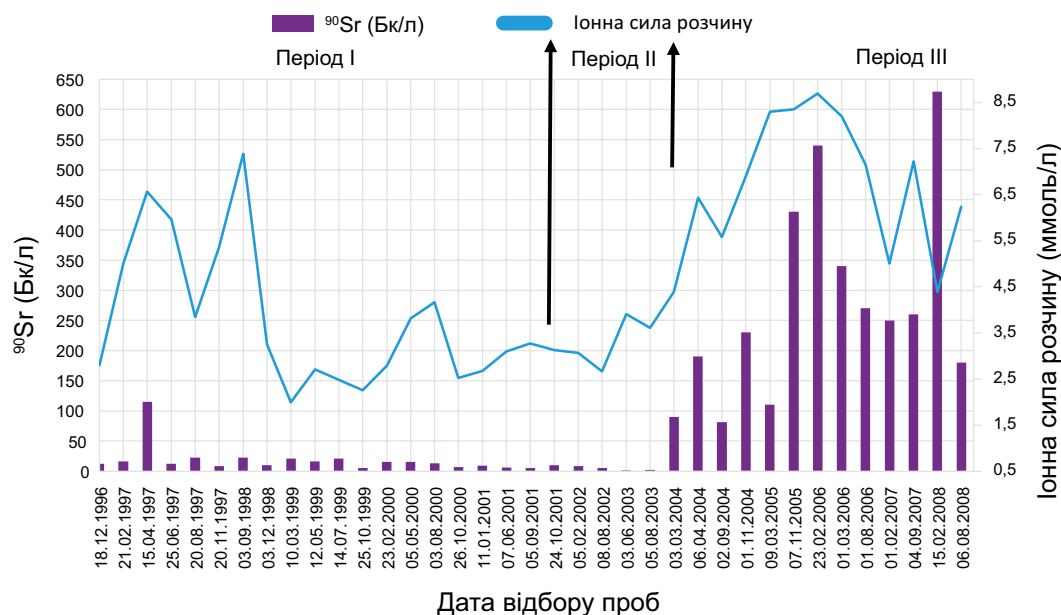
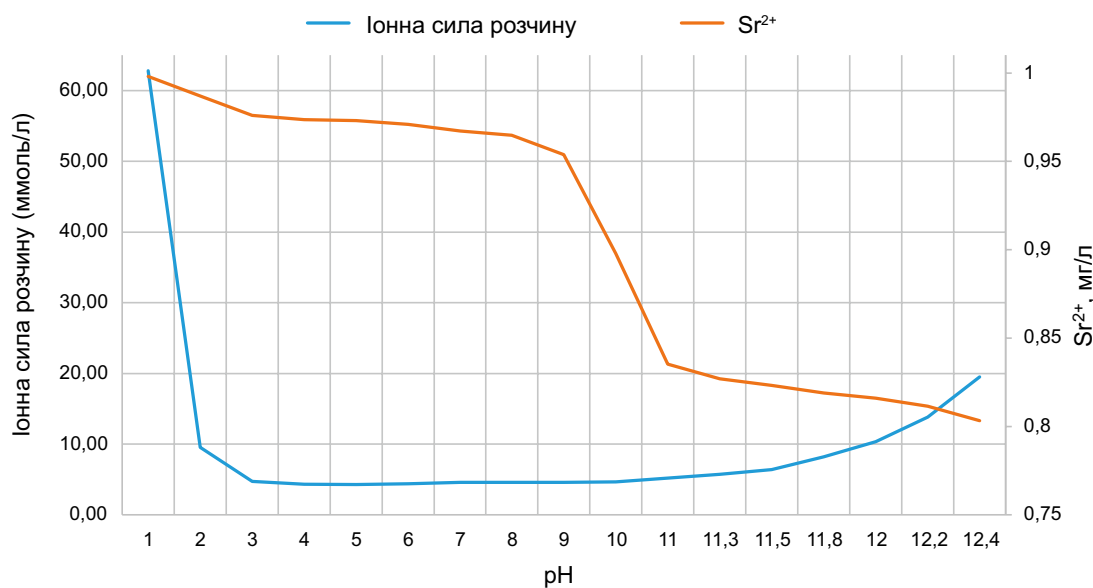


Рис. 2. Динаміка концентрації Sr^{2+} і SrOH^+ залежно від рН, за даними термодинамічного моделювання моніторингових результатів по свердловині 4-Г

Рис. 3. Динаміка концентрації ^{90}Sr та ICP у пробах зі свердловини 4-ГРис. 4. Зміни концентрацій стронцію у формі Sr^{2+} та ICP залежно від pH за даними термодинамічного моделювання проби води із свердловини 4-Г від 23.02.2006 р.

Слід зазначити, що спостерігається відповідність динаміки ICP до динаміки pH у досліджуваних пробах підземних вод (рис. 5).

Обговорення результатів

Таким чином, за результатами виконаного аналізу можемо стверджувати, що підвищення ICP підзем-

них вод сприяє зниженню сорбції ^{90}Sr ґрунтами та його ремобілізації з поверхні часток ґрунтів за рахунок катіонного обміну за аналогією з даними [8]. Як відомо, ICP — це міра інтенсивності електричного поля, яке створюється іонами в розчині. Імовірно, що з початком періоду III, відбувається зміна поверхневого заряду частинок ґрунту з від'ємного на позитивний, при якому катіони не можуть сорбуватися, а, на-

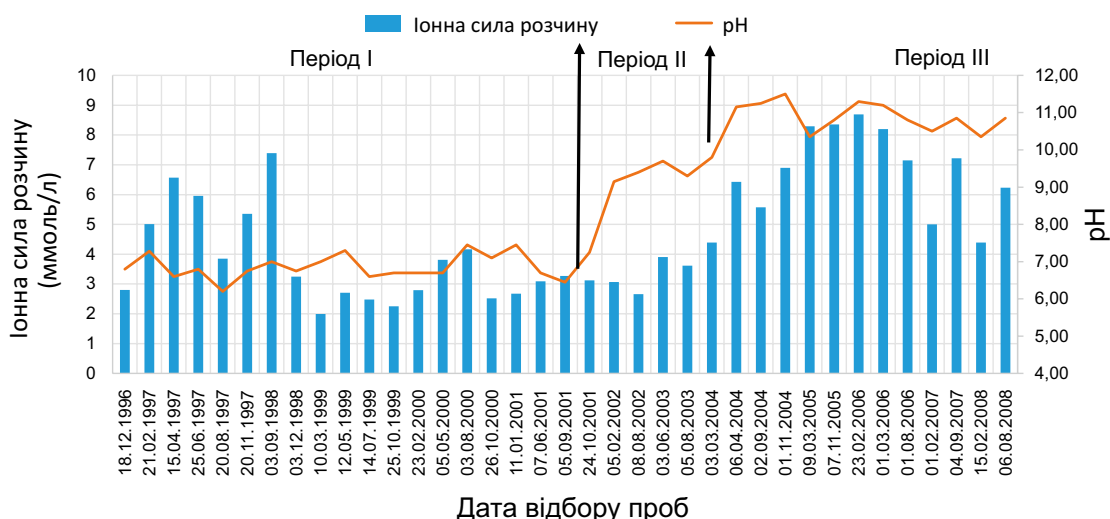


Рис. 5. Фактичні значення рН у пробах зі свердловини 4-Г та розподіл ІСР

впаки, повинні ремобілізуватися. Водночас $\text{pH} = 9,5$, імовірно, є точкою нульового заряду (рзс).

Для кількісної оцінки ступеня зв'язку між концентраціями ^{90}Sr та ІСР у пробах підземних вод був зроблений кореляційний аналіз методом геохімічної статистики (2), який показав наявність високої кореляції між цими параметрами (рис. 6). Ступінь кореляції $K = 0,83$, яка є аналогом звичайного поняття коефіцієнта кореляції, є достатньо високим ($K = 1$ — Р, де Р є загальновідомим критерієм р-value), який оцінює ймовірність того, що встановлений зв'язок є випадковим, тобто підтверджується ідея наявності тісного зв'язку між іонною силою та концентраціями ^{90}Sr в пробах води зі свердловини 4-Г.

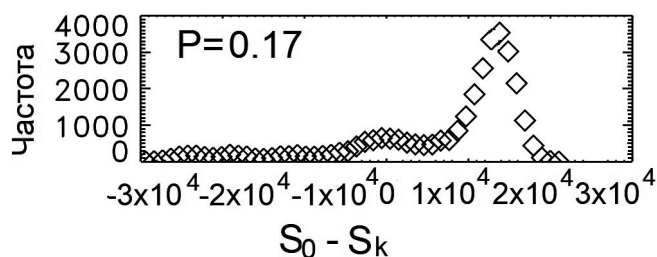


Рис. 6. Розрахунок кореляції між об'ємною активністю ^{90}Sr та іонною силою в пробах підземних вод зі свердловини 4-Г

Поява піка далеко справа від нуля свідчить про сильну скорельованість вибірок, які порівнюються (2).

Висновки

Визначено, що зростання ІСР підземних вод до рівнів вище 5 ммоль/л поряд з іншими факторами

супроводжується зростанням у 200–500 разів об'ємних активностей ^{90}Sr в сильнолужних підземних водах. Збільшення ІСР сильнолужних підземних вод призводить до зниження сорбційних властивостей ґрунтів і ремобілізації адсорбованого ^{90}Sr назад до підземних вод шляхом катіонного обміну. Цей результат відповідає висновкам [8], які отримані за результатом лабораторних експериментів, тоді як за багаточисельними літературними даними, наприклад [1], вважається, що сорбція стронцію ґрунтами в сильнолужних умовах досягає 99 %.

Результати термодинамічного моделювання показують, що для значень $\text{pH} > 9,5$ концентрації Sr^{2+} у вигляді стронцій-іону зменшуються, а у вигляді SrOH^+ зростають. Такі ж дані отримано в роботі [8].

Автори висловлюють глибоку подяку В. Є.-І. Хану та О. О. Одінцову за виконані лабораторні визначення концентрацій ^{90}Sr у пробах ґрунтових вод.

Список використаної літератури

1. Role of magnetite and humic acid in radionuclide migration in the environment / B. K. Singh, A. Jain, S. Kumar [et al.] // Journal of Contaminant Hydrology. — 2009. — Vol. 106, no. 3–4. — doi.org/10.1016/j.jconhyd.2009.02.004.
2. Correlation between chemical composition and ^{90}Sr concentrations in groundwater of the Chornobyl NPP industrial site / I. O. Kovalenko, M. I. Panasiuk, A. D. Skorbut [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. — 2021. — Vol. 240. — Art. 106756.
3. Забруднення ^{90}Sr підземних вод території об'єкта «Укриття» Чорнобильської атомної електростанції / І. А. Литвин, М. І. Панасюк, Г. В. Левін, І. П. Они-

- щенко // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — 2016. — Вип. 26. — С. 122–127. — Режим доступу: http://www.ispnpp.kiev.ua/wp-content/uploads/2017/2016_26/c122.pdf.
4. Radioactive contamination of groundwater and soils of the local zone of the “Shelter” object and the ChNPP industrial site / M. I. Panasyuk, A. M. Alferov, A. D. Scorbun [et al.] // Collection of reports “Twenty-five years of the Chernobyl disaster. Security of the future”. — 2011. — P. 79–84.
 5. Panasyuk M. I. Laws of distribution of uranium in groundwater of ChNPP industrial site / M. I. Panasyuk, I. A. Lytvyn // Nuclear Physics and Atomic Energy. — 2017. — Vol. 18. — P. 56–62.
 6. Soils and ground water’s radioactive contamination into the local zone of the “Shelter” object and industrial site of Chernobyl NPP / M. I. Panasyuk, I. A. Lytvyn, E. P. Liushnya [et al.] // Uranium — Past and Future Challenges. — Springer International Publishing, 2015. — P. 657–664. — doi.org/10.1007/978-3-319-11059-2_75.
 7. Можливість використання термодинамічного моделювання формування високих концентрацій ^{90}Sr в сильнолужних підземних водах / М. І. Панасюк, Д. Т. Матросов, О. І. Стоянов, Г. В. Левін // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — 2018. — Вип. 31. — С. 120–126.
 8. Effect of groundwater pH and ionic strength on strontium sorption in aquifer sediments: Implications for ^{90}Sr mobility at contaminated nuclear sites / S. H. Wallace, S. Shaw, K. Morris [et al.] // Applied Geochemistry. — 2012. — Vol. 27, no. 8. — doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.04.007.
 9. Изучение особенностей радионуклидного состава грунтовой воды скважины 4-Г локальной зоны объекта «Укрытие» / В. Е. Хан, А. А. Одинцов, А. К. Калининский [и др.] // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — 2006. — Вип. 4. — С. 111–120.
 10. Радионуклиды в грунтовой воде наблюдательных скважин локальной зоны объекта «Укрытие» / А. А. Одинцов, В. Е. Хан, В. А. Краснов, Э. П. Пазухин // Радиохимия. — 2007. — Т. 49, № 5. — С. 467–473.
 11. Bethke C. M. *GWB Essentials Guide* / C. M. Bethke, B. Farrel, M. Sharifi. — Illinois: Aqueous Solutions, LLC Champaign, 2022. — 220 p. — Available at: <https://www.gwb.com/pdf/GWB2022/GWBessentials.pdf>.

¹ Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NAS of Ukraine, 36a, Kirova st., Chornobyl, 07270, Ukraine

² SI “O. M. Marzieiev Institute for Public Health”, National Academy of Medical Sciences of Ukraine, 50, Hetman Pavlo Polubotok (Popudrenko) st., Kyiv, 02094, Ukraine

³ SI “Radioenvironmental Centre of the NAS of Ukraine”, 55b, O. Honchara st., Kyiv, 01601, Ukraine

Influence of Ionic Strength in the Formation of Increased Migration of ^{90}Sr in Groundwater at the Industrial Site of the Chornobyl NPP

Thermodynamic modeling of ^{90}Sr migration was performed based on data from monitoring studies on well 4-G, which, before its liquidation in 2008, was located on the industrial site of the Chornobyl nuclear power plant. The study of the ^{90}Sr migration forms was carried out using a set of software tools “Geochemist’s Workbench Community Edition”. In order to confirm and understand the migration processes, modeling of the spread of various complex ^{90}Sr compounds such as SrCO_3 , SrHCO_3 , SrSO_4 , SrOH^+ and SrNO_3^+ with groundwater was carried out. With the help of SpecE8, the calculation of various forms of ^{90}Sr was performed, and the ionic strength of the groundwater solution (ISS) was also calculated.

In the range of pH 9.5–12.4, there is an increase in the Sr^{2+} concentration in groundwater by 200–500 times to 550 Bq/l. In the same pH interval, according to thermodynamic modeling, an increase in the concentration of strontium in the form of SrOH^+ and a decrease in the form of Sr^{2+} is observed in groundwater. At the same time, the dominance of strontium concentrations in the form of SrOH^+ over Sr^{2+} does not occur.

The reason for the sharp increase in the volume activities of ^{90}Sr in strongly alkaline groundwater was the increase in the ISS > 5 mmol/l. An increase in the ISS of strongly alkaline groundwater leads to a decrease in the sorption properties of soils, and to the remobilization of adsorbed ^{90}Sr back to groundwater through cation exchange. Probably, in the pH range of 9.5–12.4 and the ISS > 5 mmol/l, there is a change in the surface charge of soil particles, usually from negative to positive, in which cations cannot be sorbed, but, on the contrary, must to remobilize from the soil surface to groundwater. At the same time, pH = 9.5 is probably the point of zero charge (pzc).

To assess the possibility of a relationship between the concentrations of ^{90}Sr and ISS, a correlation analysis using the geochemical statistics method was carried out. At the same time, the correlation coefficient $K = 0.87$, which proves the existence of a close relationship.

**I. O. Kovalenko¹, M. I. Panasiuk¹, N. V. Sosonna¹,
G. V. Levin¹, P. A. Lushnia¹, G. K. Roienko¹,
L. A. Palamar¹, M. G. Buzynnyi², I. P. Onyshchenko³**

Keywords: Chornobyl nuclear power plant site, underground water, highly alkaline environment, ionic strength of the solution, thermodynamic modeling, migration of various ^{90}Sr forms.

References

1. Singh B. K., Jain A., Kumar S., Tomar B. S., Tomar R., Manchanda V. K., Ramanathan S. (2009). Role of magnetite and humic acid in radionuclide migration in the environment. *Journal of Contaminant Hydrology*, vol. 106 (3–4), pp. 144–149. doi.org/10.1016/j.jconhyd.2009.02.004.
2. Kovalenko I. O., Panasiuk M. I., Skorbun A. D., Sosonna N. V., Ojovan M. I., Shevchenko O. L., Onyshchenko I. P. (2021). Correlation between chemical composition and ^{90}Sr concentrations in groundwater of the Chornobyl NPP industrial site. *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 240, 106756. doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106756.
3. Lytvyn I. A., Panasyuk M. I., Levin G. V., Onyschenko I. P. (2016). [Groundwater contamination by ^{90}Sr on the territory of the Shelter object of the Chornobyl nuclear power plant]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 26, 122–127. Available at: http://www.ispnpp.kiev.ua/wp-content/uploads/2017/2016_26/c122.pdf. (in Rus.)
4. Panasyuk M. I., Alferov A. M., Skorbun A. D. (2011). Radioactive contamination of groundwater and soils of the local zone of the “Shelter” object and the ChNPP industrial site. *Collection of Reports “Twenty-Five Years of the Chornobyl Disaster. Security of the Future”*, pp. 79–84.
5. Panasyuk M. I., Lytvyn I. A. (2017). Laws of distribution of uranium in groundwater of ChNPP industrial site. *Nuclear Physics and Atomic Energy*, vol. 18, pp. 56–62.
6. Panasyuk M. I., Lytvyn I. A., Liushnya E. P., Alfeyoroff A. M., Levin G. V., Shestopalov V. M. (2015). Soils and ground water’s radioactive contamination into the local zone of the “Shelter” object and industrial site of Chornobyl NPP. In: *Uranium — Past and Future Challenges*. Cham: Springer International Publishing, pp. 657–664. doi.org/10.1007/978-3-319-11059-2_75
7. Panasyuk M. I., Matrosov D. T., Stoianov O. I., Levin G. V. (2018). Possibility of using thermodynamic modeling of formation of high concentrations of ^{90}Sr in highly alkaline underground waters. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, pp. 120–126. doi.org/10.31717/1813-3584.18.31.14. (in Ukr.)
8. Wallace S. H., Shaw S., Morris K., Small J. S., Fuller A. J., Burke I. T. (2012). Effect of groundwater pH and ionic strength on strontium sorption in aquifer sediments: Implications for ^{90}Sr mobility at contaminated nuclear sites. *Applied Geochemistry*, vol. 27, no. 8, pp. 1482–1491. doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.04.007.
9. Khan V. E., Odintsov A. A., Kalynovsky O. K., Dubenko P. N., Pazukshin E. M., Krasnov V. A. (2006). [Study of particularities of radionuclides composition in ground waters 4-g borehole of local area of the Shelter object]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, no. 4, pp. 111–120. Available at: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/127887>. (in Rus.)
10. Odintsov A. A., Khan V. E., Krasnov V. A., Pazukshin E. M. (2007). [Radionuclides in the groundwater of observation wells in the local zone of the Shelter object]. *Radiochemistry*, no. 5, pp. 467–473. Available at: <http://chernobyl-database.com/radionuclides-in-groundwaters-from-observation-holes-in-the-shelter-local-area-probably-english>. (in Rus.)
11. Bethke C. M., Farrel B., Sharifi M. (2022). *GWB Essentials Guide*. Illinois: Aqueous Solutions, LLC Champaign, 220 p. Available at: <https://www.gwb.com/pdf/GWB2022/GWBessentials.pdf>.

Надійшла 27.12.2022

Received 27.12.2022