

ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДНОШЕННЯ “СТРОНЦІЙ - КАЛЬЦІЙ” У РОСЛИНИ ТА У ВІДПОВІДНОМУ ҐРУНТОВОМУ РОЗЧИНІ ДЛЯ ^{90}Sr ТА ПРИРОДНОГО ВАЛОВОГО СТРОНЦІЮ

В. В. Пророк¹, К. Ф. В. Масон², А. П. Ганушевич³, В. В. Осташко³,
Т. І. Макаренко¹, Л. Ю. Мельниченко¹

¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

² Національна лабораторія, м. Лос-Аламос, США

³ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

Визначено відношення Sr/Ca для валового стронцію та $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ у рослинах та у відповідних ґрунтових розчинах для трьох дослідних ділянок з “паливним” типом забруднення для кількох видів рослин у природних умовах. Вказані ділянки з трьома різними типами ґрунтів знаходяться в зоні відчуження Чорнобильської АЕС. Отримані експериментальні результати показують, що для всіх досліджуваних рослин та експериментальних ділянок відношення Sr/Ca у рослині дорівнює цьому відношенню у відповідному ґрунтовому розчині. Відношення $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ у досліджуваній рослині перевищує це відношення у відповідному ґрунтовому розчині.

Вступ

Проблема переходу стронцію до рослини є актуальною вже протягом півсторіччя, а особливо після Чорнобильської катастрофи.

На сьогоднішній день більшість дослідників вважає, що відношення „стронцій - кальцій” у рослині дорівнює цьому відношенню в рівноважному ґрунтовому розчині [1 - 3]. Якщо вказане відношення зберігається, то це полегшує задачу прогнозування надходження стронцію до рослин. Але за даними інших дослідників ці відношення в рослині та у відповідному ґрунтовому розчині не дорівнюють одне одному [4].

У цій роботі досліджували відношення „стронцій - кальцій” для рослин та відповідних ґрунтових розчинів для валового природного стронцію та відношення Sr^{90}/Ca для тих самих рослин і ґрунтових розчинів. Дослідження проводилися в природних умовах на ділянках з „паливним” типом забруднення. Вміст валового стронцію, Sr^{90} та кальцію вимірювався безпосередньо в ґрунтовому розчині.

Методика експерименту

Дослідження проводилися в 2002 та 2003 р. в польових умовах на трьох дослідних ділянках у Брагінському районі Гомельської області (Білорусь):

ділянка № 2 – дерено-підзолистий середньоопідзолений глеюватий піщаний ґрунт, що розвивається на водно-льодовикових пісках;

ділянка № 3 – торф’яно-болотний низинного типу ґрунт, що розвивається на торфях середньої товщини з осоки, очерету та деревини, що добре розклалися;

ділянка № 4 – дерено-підзолистий середньоопідзолений з ознаками тимчасового надмірного зволоження супіщаний ґрунт, що розвивається на водно-льодовикових супісках.

Згідно з літературними даними [5], у цьому районі є суттєвою паливна складова радіоактивного забруднення.

Висівалися скороспілі культури, що максимально відрізняються за властивостями одна від одної. Це редис (*raphanus sativus*), салат (*lactuca sativa*), крес-салат (*lepidium sativum*), коріандр (*coriandrum sativum*). Сіяли їх на дослідних ділянках упереміжку. Корені цих рослин були в ґрунті поряд. Висівання було зроблено кілька разів протягом сезону. На жаль, висіяні культури не завжди виростили. Крім культурних рослин, відбиралися також зразки дикоростучих трав на цих самих ділянках. Це були пирій повзучий (*elytrigia repens*),

© В. В. Пророк, К. Ф. В. Масон, А. П. Ганушевич,
В. В. Осташко, Т. І. Макаренко, Л. Ю. Мельниченко, 2005

тимофіївка (*phleum pratense*), гірчак (*polygonum hydropiper*), кропива (*urticaceae dioica*), суріпка (*barbarea vulgaris*), чистець болотний (*stachys palustris*). Відбиралися також зразки ячменю (*hordeum vulgare*) на полі № 4. Усі рослини відбиралися до стадії їх цвітіння і висушувалися для подальшого використання.

Одночасно на всіх дослідних ділянках також відбиралися проби ґрунту. Кожного разу з кожної ділянки бралася по п'ять проб ґрунту за допомогою пробовідбірника діаметром 5 см та висотою 20 см. Усі відібрані в один день з однієї й тієї ж ділянки проби змішувалися. З ґрунту екстрагувався ґрунтовий розчин за допомогою центрифуги РС-6. Доцентрове прискорення при цьому дорівнювало 3000 g. З деяких зразків ґрунту ґрунтовий розчин видобувався зразу, а в деякі зразки ґрунту добавлялася вода, потім цей ґрунт оброблявся на ротаторі протягом однієї години, а вже потім з нього екстрагувався ґрунтовий розчин. Як показано в роботі [3], відношення „стронцій - кальцій” в екстрагованому ґрунтовому розчині при зміні вологості ґрунту змінюється незначно.

Центрифугований розчин фільтрувався спочатку скрізь скляний фільтр Whatman GF/A, а потім скрізь фільтр ТУ 6-09-1678-86.

Вміст кальцію та валового стронцію у зразках вимірювався за допомогою оптичного емісійного спектрометра з індуктивно зв'язаною плазмою „Spectro” (ФРН). Методику приготування проб для вимірювання хімічного складу зразків за допомогою оптичного емісійного спектрометра з індуктивно зв'язаною плазмою та методику самих вимірювань описано в [3]. Вміст Sr^{90} у зразках вимірювався за допомогою радіохімії (екстракційний метод). Крім вмісту валового стронцію, Sr^{90} та кальцію у рослинах та у відповідних ґрунтових розчинах визначалася також відносна вологість ґрунту на момент відбору зразків. Вологість та вологоємність ґрунтів визначалася, як це описано в [6]. Відносна вологість ґрунту визначалася як відношення вмісту води в ґрунті на момент відбору зразків до максимально можливого вмісту води в цьому ґрунті (капілярне насичення).

Експериментальні результати

Результати вимірювань наведено в табл. 1 - 3. У таблицях наведено вміст кальцію, стронцію та ^{90}Sr у висушених зразках рослин, у відповідних ґрунтових розчинах на момент відбору зразків та відносну вологість ґрунту на момент відбору зразків. Вміст кальцію та стронцію в рослинах наведено у мг/г, а в ґрунтових розчинах у мг/кг. Тут також наведено результати обробки отриманих даних:

Sr/Ca – відношення вмісту валового стронцію до вмісту кальцію;

$^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ - відношення вмісту ^{90}Sr до вмісту кальцію;

$(\text{Sr}/\text{Ca})_p/(\text{Sr}/\text{Ca})_{ss}$ – відношення відношень вмісту валового стронцію до вмісту кальцію в рослині та ґрунтовому розчині;

$(^{90}\text{Sr}/\text{Ca})_p/(^{90}\text{Sr}/\text{Ca})_{ss}$ – відношення відношень вмісту ^{90}Sr до вмісту кальцію в рослині та ґрунтовому розчині.

Більшість авторів у своїх статтях наводять дані по $K_{p/ss}$ (коефіцієнт переходу „ґрунтовий розчин - рослина”) або по $K_{p/s}$ (коефіцієнт переходу „ґрунт - рослина”). Для полегшення порівняння наших результатів з результатами інших авторів ми також наводимо аналогічні коефіцієнти для наших даних у табл. 1 - 3.

Вміст води в ґрунті ділянки № 2 при її капілярному насиченні становить 63 г води на 100 г сухого ґрунту, для ґрунту ділянки № 3 – 347 г, для ґрунту ділянки № 4 – 38 г. Вологість ґрунту ділянки № 4 у 2003 р. не вимірювалася, але зрозуміло, що вона була меншою, ніж у 2002 р. Середній вміст ^{90}Sr (Бк/кг) у ґрунті ділянки № 2 становить 550, ділянки № 3 – 8500, ділянки № 4 – 146.

Похибка вимірювань за допомогою радіохімічного методу вмісту ^{90}Sr для більшості зразків становила – 15 - 30 %, а вмісту кальцію та валового стронцію за допомогою спектрометра – 1 %.

Таблиця 1. Вміст стронцію, кальцію та ^{90}Sr у зразках рослин та ґрунтових розчинів у 2002 - 2003 рр. на ділянці № 2

Відносна вологість ґрунту	Дата відбору	Опис зразка	№ зразка	Ca	Sr	^{90}Sr Бк/кг	Sr/Ca	$^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$	$K_{p/ss}$	$K_{p/s}$	$\frac{(^{90}\text{Sr}/\text{Ca})_p}{(^{90}\text{Sr}/\text{Ca})_{ss}}$	$\frac{(\text{Sr}/\text{Ca})_p}{(\text{Sr}/\text{Ca})_{ss}}$
1	12.05.02	Ґрунтовий розчин	6	23,42	0,158	10,4	0,00675	0,444				
$h = 0,37$	12.05.02	Тимофіївка	57	1,43	0,010	1277	0,00705	0,892	123	2,32	2,272	0,869
1	09.06.02	Ґрунтовий розчин	17	33,67	0,235	16,3	0,00698	0,484				
$h = 0,17$	09.06.02	Тимофіївка	58	1,53	0,011		0,00694					0,994
1	22.06.02	Ґрунтовий розчин	18	34,21	0,216		0,00631					
$h = 0,098$	22.06.02	Редис (коренеплоди)	55	6,16	0,038	7514	0,00618	1,219		13,7	2,051	0,979
	22.06.02	Редис (листки)	65	15,54	0,133	19343	0,00853	1,245		35,2	2,093	1,351
	22.06.02	Крес-салат	67	9,90	0,088		0,00886					1,404
1	14.07.02	Ґрунтовий розчин	22	35,60	0,152		0,00427					
$h = 0,15$	14.07.02	Тимофіївка	75	1,93	0,008		0,00419					0,981
	14.07.02	Чистець болотний	76	4,19	0,034		0,00811					1,899
$h = 0,46$	08.06.03	Ґрунтовий розчин	5	53,62	0,224	42	0,0042	0,783				
$h = 0,025$	08.06.03	Редис	35	13,81	0,109	14276	0,0078	1,0337	340	26,0	1,320	1,889
	08.06.03	Крес-салат	36	8,36	0,0506	7037	0,0060	0,8421	168	12,8	1,075	1,450
	08.06.03	Салат	37	7,41	0,0507	5942	0,0068	0,8015	142	10,8	1,023	1,637
	08.06.03	Чистець болотний	38	5,21	0,0292	4360	0,0056	0,8374	104	7,9	1,069	1,342
$h = 0,47$	13.07.03	Ґрунтовий розчин	8	59,30	0,3641	46,8	0,0061	0,789				
$h = 0,05$	13.07.03	Салат	21	12,18	0,0474	7012	0,0039	0,5757	150	12,8	0,729	0,634
	13.07.03	Гірчак	22	7,6	0,0656	10266	0,0086	1,3508	219	18,7	1,712	1,406
	13.07.03	Коріандр	23	9,29	0,0388	8088	0,0042	0,8706	173	14,7	1,103	0,680
	13.07.03	Чистець болотний	24	5,57	0,0355	4746	0,0064	0,8521	101	8,6	1,080	1,038

Таблиця 2. Вміст стронцію, кальцію та ^{90}Sr у зразках рослин та ґрунтових розчинів у 2002 - 2003 рр. на ділянці № 3

Відносна вологість ґрунту	Дата відбору	Опис зразка	№ зразка	Ca	Sr	^{90}Sr Бк/кг	Sr/Ca	$^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$	$K_{p/ss}$	$K_{p/s}$	$(^{90}\text{Sr}/\text{Ca})p/$ $(^{90}\text{Sr}/\text{Ca})ss$	$(\text{Sr}/\text{Ca})p/$ $(\text{Sr}/\text{Ca})ss$
0,86	12.05.02	Ґрунтовий розчин	10	27,9	0,107	34	0,00383	1,218				
$h = 0,86$	12.05.02	Пирій повзучий(листя)	51	5,16	0,016	9250	0,00314	1,792	272	1,09	1,493	0,885
	12.05.02	Пирій повзучий (корені)	52	3,96	0,017	7770	0,00419	1,962	229	0,91	1,634	1,181
0,68	09.06.02	Ґрунтовий розчин	24	33,65	0,081	43	0,00241	1,278				
$h = 0,68$	09.06.02	Кропива	59	18,12	0,06		0,00330					1,371
	09.06.02	Гірчак	60	8,55	0,036	16023	0,00420	1,874	373	1,89	1,467	1,745
1	22.06.02	Ґрунтовий розчин	19	145,0	0,409		0,00282					
$h = 0,59$	22.06.02	Редис (коренеплоди)	54	8,95	0,028	14110	0,00313	1,576			1,233	1,109
	22.06.02	Редис (листя)	64	34,46	0,103		0,00300					1,063
	22.06.02	Крес-салат	68	15,24	0,056		0,00365					1,296
	22.06.02	Гірчак	69	13,8	0,072	28503	0,00523	2,065			1,616	1,855
1	14.07.02	Ґрунтовий розчин	23	58,63	0,133		0,00227					1,051
$h = 0,42$	14.07.02	Кропива	72	14,79	0,035		0,00239					1,093
	14.07.02	Різотрав'я	73	9,26	0,023		0,00248					
$h = 0,40$	08.06.03	Ґрунтовий розчин	6	267,9	0,509	200,5	0,0019	0,748				1,143
$h = 0,13$	08.06.03	Салат	39	18,24	0,039	13909	0,0021	0,763	69	1,64	1,019	1,134
	08.06.03	Коріандр	40	14,25	0,031	15376	0,0021	1,079	77	1,81	1,442	1,688
	08.06.03	Пирій повзучий (листя)	41	3,80	0,012	6491	0,0032	1,706	32	0,76	2,279	1,067
	08.06.03	Кропива	42	37,99	0,077	53213	0,0023	1,401	265	6,26	1,871	1,276
$h = 0,21$	08.06.03	Гірчак	43	21,40	0,052	24068	0,0024	1,125	120	2,83	1,502	
$h = 0,078$	13.07.03	Ґрунтовий розчин	9	304,5	0,835	282,4	0,0027	0,927				
	13.07.03	Коріандр	25	13,83	0,037	15464	0,0020	1,118	55	1,82	1,206	0,986
	13.07.03	Салат	26	16,43	0,045	17241	0,0027	1,049	61	2,03	1,131	0,992
	13.07.03	Редис	27	30,58	0,079	29618	0,0029	0,969	105	3,48	1,044	0,943
	13.07.03	Гірчак	28	21,49	0,068	30559	0,0031	1,422	108	3,60	1,533	1,159
	13.07.03	Пирій повзучий(листя)	29	5,27	0,016	5313	0,0030	1,008	19	0,63	1,087	1,128

Таблиця 3. Вміст стронцію, кальцію та ^{90}Sr у зразках рослин та ґрунтових розчинів у 2002 - 2003 рр. на ділянці № 4

Відносна вологість ґрунту	Дата відбору	Опис зразка	№ зразка	Ca	Sr	^{90}Sr Бк/кг	Sr/Ca	$^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$	$K_{p/ss}$	$K_{p/s}$	$\frac{(^{90}\text{Sr}/\text{Ca})_p}{(^{90}\text{Sr}/\text{Ca})_{ss}}$	$\frac{(\text{Sr}/\text{Ca})_p}{(\text{Sr}/\text{Ca})_{ss}}$
1	09.06.02	Ґрунтовий розчин	12	51,3	0,3570	14	0,0069589	0,273				
h = 0,18	09.06.02	Суріпка	61	7,41	0,0648	3520	0,0087461	0,475	251	24,1	1,74	1,256
	09.06.02	Ячмінь	70	1,33	0,0105	653	0,0078711	0,490	47	4,47	1,79	1,13
h = 1	08.06.03	Ґрунтовий розчин	4	23,10	0,135	5,6	0,00584	0,242				
	08.06.03	Редис	31	12,48	0,0811	5810	0,00650	0,466	1038	39,8	1,921	1,112
	08.06.03	Крес-салат	32	3,96	0,0251	1448	0,00634	0,366	259	9,92	1,509	1,085
	08.06.03	Ячмінь	33	3,35	0,0173	1143	0,00516	0,341	204	7,8	1,407	0,884
h = 1	13.07.03	Ґрунтовий розчин	7	17,79	0,1305	5,3	0,00734	0,298				
	13.07.03	Редис	16	9,96	0,0855	3548	0,00858	0,356	669	24,3	1,196	1,170
	13.07.03	Крес-салат	17	5,26	0,0364	2133	0,00692	0,406	402	14,6	1,361	0,943
	13.07.03	Ячмінь	18	1,62	0,0123	632	0,00759	0,390	119	4,33	1,309	1,035
	13.07.03	Суріпка	20	9,94	0,0967	2944	0,00973	0,296	555	20,2	0,994	1,326

Обговорення результатів

У польових умовах температура та вологість ґрунту весь час змінюються. Експериментальні результати, що наведені в табл. 1 - 3, показують, що в польових умовах відношення „стронцій - кальцій”, як правило, змінюється при зміні температури та вологості ґрунту не більше ніж на 30 % від його середнього значення. Для кожної з трьох дослідних ділянок та для кожної досліджуваної рослини відношення „стронцій - кальцій” відрізняється від середнього значення цього параметра для ґрунтового розчину не більше ніж на 30 %, тобто змінюється приблизно в тих самих межах. Отримані результати дають змогу зробити висновок, що величина відношення „стронцій - кальцій” у ґрунтовому розчині є достатньо адекватним критерієм для передбачення величини цього відношення в рослині.

З експериментальних результатів видно, що для наших дослідних ділянок та досліджуваних рослин відношення для виділеного ізотопу $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ в рослині перевищує це відношення у ґрунтовому розчині. З даних табл. 1 - 3 можна обчислити середні значення величини $(^{90}\text{Sr}/\text{Ca})_p / (^{90}\text{Sr}/\text{Ca})_{ss}$ усіх ділянок у 2002 та 2003 р. Середнє значення цієї величини для ділянки № 2 дорівнює 2,14 у 2002 р. та 1,14 у 2003 р. Для ділянки № 3 – 1,49 у 2002 р. та 1,41 у 2003 р. Для ділянки № 4 – 1,77 у 2002 р. та 1,39 у 2003 р. Перевищення вказаної величини над одиницею у 2003 р. невелике, його навіть не можна вважати достовірним, зважаючи на декларовану експериментальну похибку визначення вмісту ^{90}Sr у досліджуваних зразках. У 2002 р. це перевищення значно більше. Воно суттєво виходить за межі експериментальної похибки.

Коефіцієнти переходу різних ізотопів стронцію („ґрунтовий розчин - рослина”) для даної рослини можуть істотно відрізнитися тільки в тому випадку, коли ці ізотопи в ґрунті знаходяться в різних фізико-хімічних станах.

Вважаємо, що найбільш імовірною причиною більшої величини відношення $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ в рослині, ніж у відповідному ґрунтовому розчині, є нерівноважність ґрунтового розчину відносно ^{90}Sr внаслідок поступового розчинення паливних частинок. У 2002 р., як видно з табл. 1 - 3, відносна вологість ґрунтів на наших експериментальних ділянках була значно більшою, ніж у 2003 р., особливо на ділянках № 2 та № 4. А тому розчинення паливних частинок у 2002 р. проходило більш інтенсивно, що приводило до того, що на всіх ділянках у 2002 р. ґрунтові розчини були більш нерівноважні, ніж у 2003 р.

Щоб вивчити цей процес більш детально, треба проводити додаткові дослідження.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Russell R.S.* Deposition of Strontium-90 and its Content in Vegetation and in Human Diet in the United Kingdom // *Nature*. – 1958. - Vol. 182. - P. 834 - 839.
2. *Nisbet A.F., Konoplev A.V., Shaw G. et al.* Application of Fertilizers and Ameliorants to Reduce Soil to Plant Transfer of Radiocaesium and Radiostrontium in the Medium to Long Term a Summary // *The Science of the Total Environment*. - 1993. - Vol. 137. - P. 173 - 182.
3. *Пророк В.В., Масон К.Ф.В., Тимофеев С.Ф та ін.* Стронцій-кальцієве відношення для стабільних стронцію та кальцію у рослині та у ґрунтовому розчині // *Вісник Київ. ун-ту*. - 2003. - № 1. - С. 399 - 405.
4. *Papanicolaou E.P., Apostolakis C.G., Skarlou V et al.* Ratios of Strontium-85 to Cations for Crops and Soils of Greece // *Journal of Agricultural Science. Cambridge*. - 1992. - Vol. 119. - P. 83 - 87.
5. *Sandalls F.J., Segal M.G., Victorova N.* Hot Particles from Chernobyl: A review // *J. Environ. Radioactivity*. - 1993. - Vol. 18, No. 2. - P. 5 - 22.
6. *Доспехов Б.А., Васильев И.П., Туликов А.М.* Практикум по земледелию. - М.: Агропромиздат, 1980. - 172 с.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОТНОШЕНИЯ “СТРОНЦИЙ - КАЛЬЦИЙ” В РАСТЕНИЯХ
И В СООТВЕТСТВУЮЩЕМ ПОЧВЕННОМ РАСТВОРЕ
ДЛЯ ^{90}Sr И ПРИРОДНОГО ВАЛОВОГО СТРОНЦИЯ**

**В. В. Пророк, К. Ф. В. Масон, А. П. Ганушевич, В. В. Осташко,
Т. И. Макаренко, Л. Ю. Мельниченко**

Определены отношения Sr/Ca для валового стронция и $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ в растениях и в соответствующих почвенных растворах для трех опытных участков с “топливным” типом загрязнения для нескольких видов растений в природных условиях. Указанные участки с тремя разными типами почв находятся в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС. Полученные экспериментальные результаты показывают, что для всех исследуемых растений и опытных участков отношение Sr/Ca в растении равно этому отношению в соответствующем почвенном растворе. Отношение $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ в растении превышает это отношение в соответствующем почвенном растворе.

**INVESTIGATION OF RATIO “STRONTIUM - CALCIUM” IN THE PLANTS AND IN THE
CORRESPONDING SOIL SOLUTION FOR ^{90}Sr AND FOR NATURAL TOTAL STRONTIUM**

**V. V. Prorok, C. F. V. Mason, A. P. Ganushevich, V. V. Ostashko,
T. I. Makarenko, L. Yu. Melnichenko**

Ratios Sr/Ca for natural total strontium and $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ in the plants and in the corresponding soil solutions for three experimental lands with “fuel” type of pollution for several plants at natural conditions are determined. The lands with tree different types of soil are at the Exclusive Zone of the Chernobyl Power Station. The obtained experimental results shown that ratio Sr/Ca in plant is equal to this ratio in the corresponding soil solution for all investigated lands and plants. Ratio $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ in plant exceeds this ratio at the corresponding soil solution.

Надійшла до редакції 28.07.04,
після доопрацювання – 07.02.05.