

ПОВЕДЕНИЕ ^{90}Sr ЧЕРНОБЫЛЬСКИХ ВЫПАДЕНИЙ В СИСТЕМЕ “ПОЧВА - РАСТЕНИЕ” НА ТЕРРИТОРИИ УКРАИНЫ

Б. С. Пристер¹, Л. В. Перепелятникова², В. Д. Виноградская¹,
Т. Н. Иванова², В. А. Руденко³

¹Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев

²Институт гражданской защиты МЧС Украины, Киев

³Институт проблем национальной безопасности СНБ Украины, Киев

В ходе проведения многолетнего мониторинга сельскохозяйственных угодий Украины, загрязненных ^{90}Sr после аварии на ЧАЭС, получено 510 сопряженных пар значений концентрации нуклида в компонентах системы “почва - растение”, характеризующих накопление радионуклида пятью сельскохозяйственными культурами на трех типах наиболее распространенных почв. Подтверждено существование линейной зависимости между удельной активностью радиостронция в растениях и плотностью загрязнения почвы чернобыльскими выпадениями. Установлено, что коэффициент перехода TF ^{90}Sr из почвы в сельскохозяйственные культуры уменьшается со временем после выпадений. Разработана модель динамики TF ^{90}Sr и определены ее параметры для основных сельскохозяйственных культур и почв Украины, что позволяет прогнозировать загрязнение сельскохозяйственной продукции после радиоактивных выпадений.

Вступление

При аварии на ЧАЭС ^{90}Sr выпал в основном в составе мелкодисперсных частиц топливной матрицы, характеризующихся высокой плотностью. Масштабы и уровни загрязнения территории ^{90}Sr после аварии значительно меньше по сравнению с ^{137}Cs , который конденсировался из газопаровой фазы на поверхности аэрозолей различной природы [1]. Поступление нуклида в организм с продуктами питания в первые дни после аварии формирует дозу облучения костного мозга на долгий период, так как ^{90}Sr откладывается в минеральной части костной ткани и практически не выводится из организма. Обеспечение радиационной безопасности населения при загрязнении территории ^{90}Sr требует быстрого принятия мер по организации контроля загрязнения сельскохозяйственной продукции ^{90}Sr и введения ограничений на потребление загрязненных продуктов питания на основе оперативного прогнозирования радиационной обстановки.

Выброс ^{90}Sr после взрыва реактора 4-го блока ЧАЭС 26 апреля 1986 г. происходил в основном в составе крупных частиц топливной матрицы, и основная часть выброшенного радионуклида осела в пределах 30-километровой зоны станции. В последующие дни радиостронций поступал в атмосферу в составе тонкодисперсных частиц, образующихся в процессе отжига топлива при пожаре, которые сформировали дальнюю зону загрязнения. Соотношения уровней загрязнения территории ^{90}Sr и ^{137}Cs , осевшего на поверхности природных частиц аэрозоля, на территориях дальней и ближней зон варьировали от 0,1 до 10 [1]. Опасность, обусловленная поступлением ^{90}Sr или ^{137}Cs в растения и дальше в продукты питания человека, изменяется в зависимости от расстояния до эпицентра аварии.

Подвижность ^{90}Sr в звене “почва - растение” больше, чем у ^{137}Cs , поэтому предельные уровни загрязнения почвы для выращивания сельскохозяйственной продукции составили для ^{90}Sr $3,0 \text{ Ки} \cdot \text{км}^{-2}$, в то время как для ^{137}Cs – $15 \text{ Ки} \cdot \text{км}^{-2}$. В Украине наибольшему загрязнению радиостронцием, кроме 30-километровой зоны ЧАЭС, были подвержены Киевская, Житомирская, Ривненская и Черниговская области. Площади территорий с плотностью загрязнения почвы ^{90}Sr от 0,1 до $1,0 \text{ Ки} \cdot \text{км}^{-2}$ в этих областях составляли 35 тыс. км^2 , а $>1 \text{ Ки} \cdot \text{км}^{-2}$ – 3,7 тыс. км^2 ($\approx 35\%$ от общей площади) [2].

На подвижность ^{90}Sr в почве значительное влияние оказывают агрохимические свойства почвы - pH, содержание гумуса, сумма поглощенных оснований и др. [3, 4]. Изменения агрохимических свойств почвы приводят к различиям величины накопления ^{90}Sr одним

видом растений на разных типах почвы до 10 раз [5]. Критическими по накоплению растениями радиостронция являются минеральные почвы с кислой реакцией почвенного раствора. В органических почвах ^{90}Sr образует комплексы с органическим веществом и подвижность его значительно меньше ^{137}Cs , по отношению к которому органические почвы являются критическими [6, 7].

На поведение радиостронция в звене “почва - растение” влияет содержание химического аналога стронция - кальция, который является неизотопным носителем радионуклида и присутствует в почве в макроконцентрациях. Интенсивность накопления ^{90}Sr сельскохозяйственными культурами определяется “кальциефильностью” растений. Растения, которые накапливают больше кальция, содержат пропорционально больше радиостронция. Отличия в накоплении ^{90}Sr различными видами растений на одном и том же типе почвы могут достигать 30 раз [7, 8].

Район мониторинга характеризуется значительным разнообразием почв и видов выращиваемых культур, что позволяет исследовать закономерности и динамику поведения радиостронция в системе “почва - растение” и использовать экспериментальные данные для разработки и параметризации модели этого процесса в достаточно широком диапазоне условий, характерных для Украины и Восточной Европы.

Материалы и методы

Материалами для обоснования модели накопления ^{90}Sr сельскохозяйственными культурами были данные радиоэкологического мониторинга, проведенного с 1987 по 2001 г. Сеть мониторинга охватывала 17 хозяйств четырех областей Украины: Киевской, Житомирской, Ривненской и Черниговской. Регион исследований представлен тремя характерными для Украинского Полесья и Лесостепи типами почвы: дерново-подзолистой, серой лесной и черноземом. Основные агрохимические показатели исследуемых почв представлены в табл. 1. Отличия агрохимических показателей в пределах одной группы почв не превышают 2,1 раза, в то время как междугрупповые отличия достигают восьми раз.

Таблица 1. Агрохимические свойства почв исследуемых сельскохозяйственных угодий

Тип почвы	pH	Гумус, %	Сумма поглощенных оснований, мг-экв/100 г почвы	Калий, мг/100 г почвы	Ил, %
Дерново-подзолистая	4,5 - 5,8	0,58 - 1,1	7,2 - 12	4,4 - 8,6	5,0 - 19
Серая лесная	5,4 - 6,4	1,1 - 1,6	13 - 18	9,0 - 11	12 - 25
Чернозем	6,3 - 7,1	2,4 - 3,3	16 - 28	18 - 32	27 - 32

Территория мониторинга размещена в зоне дальнего южного следа чернобыльских выпадений и частично – западного следа. Плотность загрязнения почвы по состоянию на 1987 г. изменялась от 9,3 до 15 $\text{кБк}\cdot\text{м}^{-2}$ (0,25 - 0,40 $\text{Ки}\cdot\text{км}^2$) для хозяйств Черниговской области, от 4,1 до 6,1 $\text{кБк}\cdot\text{м}^{-2}$ (0,11 - 0,16 $\text{Ки}\cdot\text{км}^2$) – Ривненской, от 6,0 до 15 $\text{кБк}\cdot\text{м}^{-2}$ (0,16 - 0,40 $\text{Ки}\cdot\text{км}^2$) – Житомирской. Для хозяйств, размещенных на востоке и юге Киевской области, плотность загрязнения почвы варьировала от 2,3 до 15 $\text{кБк}\cdot\text{м}^{-2}$ (0,06 - 0,40 $\text{Ки}\cdot\text{км}^2$), а для западных – от 15 до 36 $\text{кБк}\cdot\text{м}^{-2}$ (0,40 - 0,98 $\text{Ки}\cdot\text{км}^2$). Методика проведения мониторинга детально описана в предыдущих публикациях авторов работы [9].

В эксперименте исследовали пять видов сельскохозяйственных культур: озимую пшеницу, свеклу, картофель, капусту и томаты, которые представляют значительную часть рациона человека и формируют, в основном, дозу внутреннего облучения населения. Некоторые данные об удельной активности ^{90}Sr в сельскохозяйственных культурах представлены в табл. 2.

Образцы почв и растений отбирали в фазы продуктивной спелости растений методом конверта (по пять образцов в углах и на пересечении диагоналей поля) [9]. Методика отбора

проб обеспечивала сопряженность и репрезентативность образцов растений и почвы. Средний образец злаковых растений отбирали с площади $0,5 \times 0,5 \text{ м}^2$; средний образец пропашных культур и овощей состоял из 50 растений (отбирали по 10 растений в пяти рядах). Почву отбирали буром диаметром 10 см на глубину пахотного горизонта 20 - 25 см. Усредненные образцы почвы и растений высушивали до воздушно-сухого состояния и измельчали. Концентрацию ^{90}Sr в растениях и почве определяли радиохимическим методом, который базируется на переводе в раствор большинства элементов путем обработки образца раствором $0,1 \text{ моль} \cdot \text{дм}^{-3}$ азотной кислоты и на разделении редкоземельных элементов, в том числе стронция и иттрия, от щелочноземельных элементов осаждением оксалатов при pH 4. Измерения проводили на низкофоновом β -радиометре Canberra с газоразрядным счетчиком с очень низким уровнем собственного фона. Эффективность измерения $\approx 40 \%$.

Таблица 2. Удельная активность ^{90}Sr в сельскохозяйственных культурах после аварии на ЧАЭС в разные годы исследований, Бк·кг $^{-1}$

Район	1987	1988	1989	1994	2000	2001
Капуста, дерново-подзолистая почва, ДУ-97 = 20 Бк·кг $^{-1}$						
Вышгородский	6,0	6,3	6,6	4,1	2,5	1,1
Иванковский	14	14	15	9,9	5,4	3,2
Бородянский	12	9,5	9,1	6,6	2,6	2,0
Броварской	4,2	4,4	6,0	3,8	1,8	0,84
Народичский	6,1	4,6	5,2	4,1	1,7	1,0
Овручский	2,7	2,2	2,7	1,9	0,60	0,43
Дубровицкий	1,9	1,9	1,6	0,73	0,50	0,44
Сарненский	1,2	0,78	1,2	0,94	0,46	0,41
Свекла, серая лесная почва, ДУ-97 = 20 Бк·кг $^{-1}$						
Киево-Святошинский	1,9	1,2	1,0	0,59	0,51	0,24
Бориспольский	1,2	0,61	0,78	0,36	0,29	0,12
Белоцерковский	0,78	1,0	0,81	0,69	0,24	0,18
Озимая пшеница, чернозем, ВДУ-91 = 37, ДУ-97 = 5 Бк·кг $^{-1}$ *						
Фастовский	3,9	2,7	2,3	1,9	0,99	0,77
Сквирский	1,9	2,1	1,5	1,0	1,4	0,40
Богуславский	0,94	0,75	1,2	1,1	0,47	0,41
Барышевский	3,4	1,8	1,3	0,90	0,27	0,15
Переяслав-Хмельницкий	1,5	1,2	0,83	0,92	0,91	0,31
Яготинский	1,2	0,92	0,78	0,57	0,34	0,13

* Значения ПДК для хлеба и хлебопродуктов.

Данные мониторинга были организованы в базу данных, общее количество которых составило 510 сопряженных пар удельной активности в компонентах системы “почва - растение”. Наибольшее количество данных получено для группы дерново-подзолистой почвы ($n = 240$), которая включает восемь почвенных разностей. Количество данных для серой лесной почвы составляет 90, а для чернозема 180 пар “почва - растение”.

Анализируя имеющиеся данные, мы пришли к выводу о необходимости установления каждому значению удельной активности ^{90}Sr в почве и растении “степени доверия” с учетом соотношения измеренной активности с минимально детектируемой.

В ходе систематизации данных применили критерий “экспертная оценка”, которая отражает степень соответствия агрохимических, радиологических и динамических показате-

лей конкретной группе почв. Учитывая такие показатели, как тип почвы, вид растения, год после выпадений, было сформировано 90 выборок значений коэффициентов перехода ^{90}Sr из почвы в растения. Распределение $TF^{90}\text{Sr}$ из почвы в растения для 85 из 90 выборок не противоречит гипотезе о существовании нормального закона. После применения критерия Стьюдента было отсеяно 37 значений $TF^{90}\text{Sr}$ из почвы в сельскохозяйственные культуры. Значения коэффициентов перехода радиостронция внутри каждой выборки были усреднены. Каждая экспериментальная точка представлена минимум тремя и максимум восемью значениями $TF^{90}\text{Sr}$.

Зависимость удельной активности ^{90}Sr в растениях от плотности загрязнения почвы

Плотность загрязнения почвы ^{90}Sr σ в разных точках мониторинга варьировала в широких пределах. Усреднять значения $TF^{90}\text{Sr}$ в растения, полученные на одном типе почвы в разноотдаленных от эпицентра аварии точках с различным уровнем загрязнения, можно только в случае линейной зависимости удельной активности радиостронция в растениях SA от σ . ^{90}Sr чернобыльских выпадений, осевших на разных удаленьях от АЭС, находился в составе топливных частиц различной дисперсности [6], поэтому скорость деструкции радионуклида из частиц и биологическая доступность нуклида, а значит, и величина $TF^{90}\text{Sr}$, может изменяться в зависимости от расстояния до эпицентра выброса.

Линейная зависимость между концентрацией радионуклида в почве и растениях была установлена ранее при проведении вегетационных или микрополевых экспериментов многими исследователями [3, 10]. После аварии на ЧАЭС ряд исследователей опровергал линейную зависимость накопления радионуклидов от плотности загрязнения почвы. Такие результаты можно объяснить рядом объективных причин.

В некоторых экспериментах концентрация радионуклидов в почве была такой, что вызывала радиационное поражение корневой системы растений [11].

Например, в работе [12] проанализированы результаты мониторинга молока на загрязненных территориях Беларуси, России и Украины. Авторы отметили, что по мере увеличения плотности загрязнения почвы почти в 100 раз - от 10 до 1000 $\text{кБк}\cdot\text{м}^{-2}$ - значения $TF^{137}\text{Cs}$ уменьшались в 10 раз. Классификацию почв в этой работе проводили с использованием ГИС-карт большого масштаба, поэтому в одну систематическую группу попали почвы с одинаковыми названиями по легенде карты без учета возможных принципиальных отличий их агрохимических свойств.

Значения $TF^{90}\text{Sr}$ для каждой культуры на одном типе почвы с разным уровнем загрязнения были объединены в одну выборку. Для 90 таких выборок была проверена гипотеза о существовании линейной зависимости между удельной активностью радиостронция в растениях и плотностью загрязнения почвы (рис. 1).

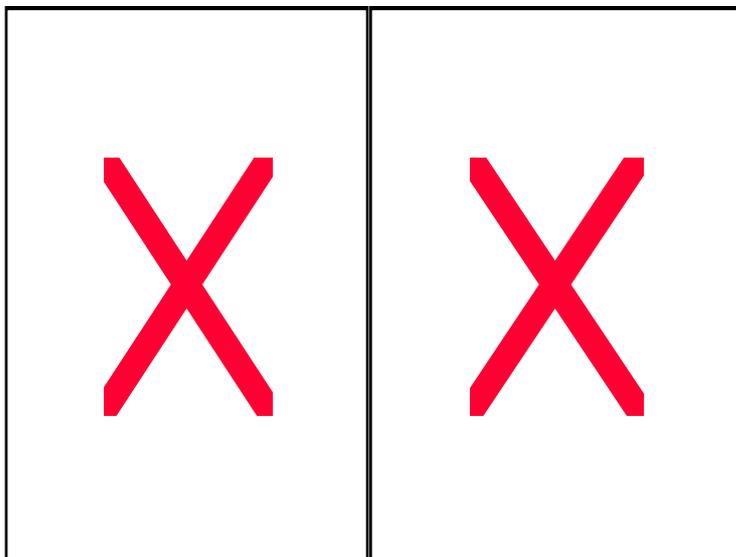


Рис. 1. Зависимость удельной активности ^{90}Sr в растениях SA от плотности загрязнения почвы: *a* – для дерново-подзолистой почвы в 1988 г. в: 1 – зерне озимой пшеницы, 2 – корнеплодах свеклы, 3 – кочанах капусты; *б* – в клубнях картофеля в 1994 г. для: 1 – дерново-подзолистой почвы, 2 – серой лесной почвы, 3 – чернозема.

Графическое представление такой зависимости позволяет записать ее в математическом виде

$$SA = TF_f \cdot \sigma \quad (1)$$

при условии, что в случае отсутствия радиоактивного загрязнения почвы концентрация ^{90}Sr в растениях будет равна нулю, т.е. если $\sigma = 0$, то $SA = 0$.

Основными критериями для принятия гипотезы о линейной зависимости были значения коэффициента детерминированности R^2 и отличия между средними значениями TF , рассчитанными по выборке, и аппроксимированными по методу наименьших квадратов значениями TF_f . Некоторые результаты такой проверки представлены в табл. 3.

Таблица 3. Параметры уравнения линейной зависимости удельной активности ^{90}Sr в растениях от плотности загрязнения почвы

Год	Интервал плотности загрязнения почвы полей ^{90}Sr σ , кБк·м ⁻²		Количество точек n	Экспериментальные средние значения TF , кг ⁻¹ ·м ⁻²	Аппроксимированные по МНК* значения TF_f , кг ⁻¹ ·м ⁻²	R^2
	минимум	максимум				
Озимая пшеница, дерново-подзолистая почва						
1987	4,0	30,5	7	3,4	3,2	0,91
1989	3,9	21,9	7	2,3	2,2	0,94
1994	4,0	28,9	8	1,4	1,4	0,96
2000	3,5	26,6	7	0,70	0,83	0,98
2001	4,0	25,7	7	0,44	0,44	0,87
Свекла, серая лесная почва						
1987	4,1	6,7	3	0,24	0,26	0,84
1989	4,5	7,0	3	0,16	0,16	0,71
1994	4,0	5,3	3	0,11	0,11	0,71
2000	4,1	5,6	3	0,073	0,077	0,73
2001	3,0	4,0	3	0,050	0,052	0,67
Картофель, чернозем						
1987	2,7	11,5	5	0,052	0,059	0,93
1989	2,9	10,4	5	0,062	0,060	0,92
1994	2,0	8,7	5	0,048	0,050	0,84
2000	2,3	10,0	5	0,024	0,021	0,75
2001	2,4	11,2	5	0,022	0,022	0,70

* Метод нелинейной корреляции.

Как видно, на всех типах почв для всех исследуемых сельскохозяйственных культур во все годы после аварии наблюдаются высокие значения R^2 (>0,70). Только в тех случаях, когда кратность различий σ не превышает 2,5 раз, наблюдаются низкие значения R^2 . Различия между экспериментальными средними значениями TF ^{90}Sr из почвы в растения и аппроксимированными TF_f не превышают 15 %. Значения этих параметров очень близки даже в случаях с относительно низкими значениями R^2 .

Линейный закон зависимости удельной активности ^{90}Sr в растениях от плотности загрязнения почвы сохраняется на участках, разноотдаленных от ЧАЭС, что имеет принципиальное методологическое значение. Линейность зависимости между SA и σ позволяет отклонить гипотезу о влиянии размера топливных частиц и скорости их растворимости на величину TF ^{90}Sr на больших удалениях от эпицентра выброса. Это дает основание усреднять значения коэффициента перехода TF ^{90}Sr из почвы в растения в пределах конкретного типа почвы, полученные в условиях чернобыльского следа на территориях с разной плотностью загрязнения почвы.

Как видим, линейный закон зависимости удельной активности ^{90}Sr в сельскохозяйственных культурах от плотности загрязнения почвы сохраняется во времени, а угол наклона прямой, который определяет $TF^{90}\text{Sr}$, уменьшается. Так, величина $TF^{90}\text{Sr}$ для разных культур за 15 послеаварийных лет уменьшилась на дерново-подзолистой почве в 3 - 8 раз, на серой лесной почве – в 3 - 5 раз, на черноземе – в 2 - 5 раз. Это свидетельствует об изменении доступности радионуклида для усвоения растениями из почв во времени и требует исследования динамики этого процесса.

Динамика коэффициента перехода ^{90}Sr из почвы в сельскохозяйственные культуры

Полученные в ходе мониторинга данные свидетельствуют о том, что даже в первые годы после аварии на ЧАЭС концентрация ^{90}Sr в сельскохозяйственной продукции хозяйств за пределами 30-километровой зоны не превышала допустимых уровней содержания радионуклида в продуктах питания. Концентрация радиостронция на одном типе почвы уменьшалась в ряду: зерно злаковых, клубни картофеля, корнеплоды свеклы, плоды капусты и томатов. Различия в величине накопления ^{90}Sr составляли 4 - 10 раз для разных видов культур на одном типе почвы. С течением времени концентрация ^{90}Sr в сельскохозяйственных культурах уменьшалась.

По доступности для усвоения радиостронция сельскохозяйственными культурами почвы образуют такую убывающую последовательность: дерново-подзолистая, серая лесная, чернозем. Концентрация ^{90}Sr в растениях на дерново-подзолистой почве больше, чем на серой лесной в 2 - 5 раз, а на черноземе – в 6 - 20 раз.

Усредненные по каждой группе почв и виду культуры коэффициенты перехода $TF^{90}\text{Sr}$ за весь послеаварийный период наблюдений были объединены в 15 выборок « TF - время после аварии, годы». Уменьшение $TF^{90}\text{Sr}$ из почвы в сельскохозяйственные культуры с течением времени носило экспоненциальный характер (рис. 2).

Динамику коэффициента перехода $TF^{90}\text{Sr}$ из почвы в сельскохозяйственные культуры за счет трансформации форм в почве описывали уравнением

$$TF_{ij} = TF_{0ij} \cdot \exp\left(-\frac{0.623}{T_{ij}^e} \cdot t\right), \quad (2)$$

где i – тип почвы; j – вид культуры; TF_{0ij} – значения коэффициента перехода, полученное путем экстраполяции нисходящей части кривой на момент выпадений $t = 1986$ год, $(\text{Бк} \cdot \text{кг}^{-1})/(\text{кБк} \cdot \text{м}^{-2})$; t - время после выпадений, годы; T_{ij}^e – период полууменьшения коэффициента перехода ^{90}Sr из почвы в растения, годы.

Параметры уравнения (2) динамики $TF^{90}\text{Sr}$ из почвы в сельскохозяйственные культуры представлены в табл. 4.

Коэффициент детерминированности R^2 принимает достаточно высокие значения для всех выборок ($>0,80$), что подтверждает возможность аппроксимации выражением вида (2), описывающим динамику $TF^{90}\text{Sr}$ из почвы в исследуемые сельскохозяйственные культуры.

Скорость выщелачивания радионуклида из частиц, а следовательно и биологическая доступность, выше в кислых дерново-подзолистых почвах, чем в нейтральных черноземах. Анализ динамики TF позволяет отметить некоторое повышение коэффициента перехода в начальный период после выпадений на серой лесной почве, которое еще более четко проявляется на черноземе (см. рис. 2).

Значения коэффициента перехода TF_{0ij} получены путем экстраполяции на 1986 г. «хвостовой» части кривой, которая характеризует период максимальной доступности радионуклида и их можно использовать для прогнозирования загрязнения продукции растворимыми формами выпадений ^{90}Sr . Величина TF_{0ij} из различных типов почв уменьшается в 7 - 10 раз в ряду культур: озимая пшеница, свекла, картофель, томаты, капуста. Наибольшие значения этого параметра характерны для дерново-подзолистой почвы, для серой лесной почвы они в 2 - 5 раз, а для чернозема в 6 - 18 раз меньше.

Анализ полученных значений T_{ij}^e показывает, что на конкретном типе почвы величина этого параметра для всех культур практически одинакова в пределах точности ее определения. Это указывает на то, что динамика коэффициента перехода ^{90}Sr определяется процессами трансформации форм связи радионуклида с почвой, а не биологическими особенностями растений, как это было показано нами и для ^{137}Cs [9]. Период полууменьшения коэффициента перехода из почвы в растения увеличивается в ряду почв: дерново-подзолистая – 9,5 года, серая лесная – 11,7 года, чернозем – 12 лет. Иначе говоря, скорость трансформации ^{90}Sr в почве из обменного состояния в необменное наибольшая на дерново-подзолистой почве, а наименьшая – на черноземе.

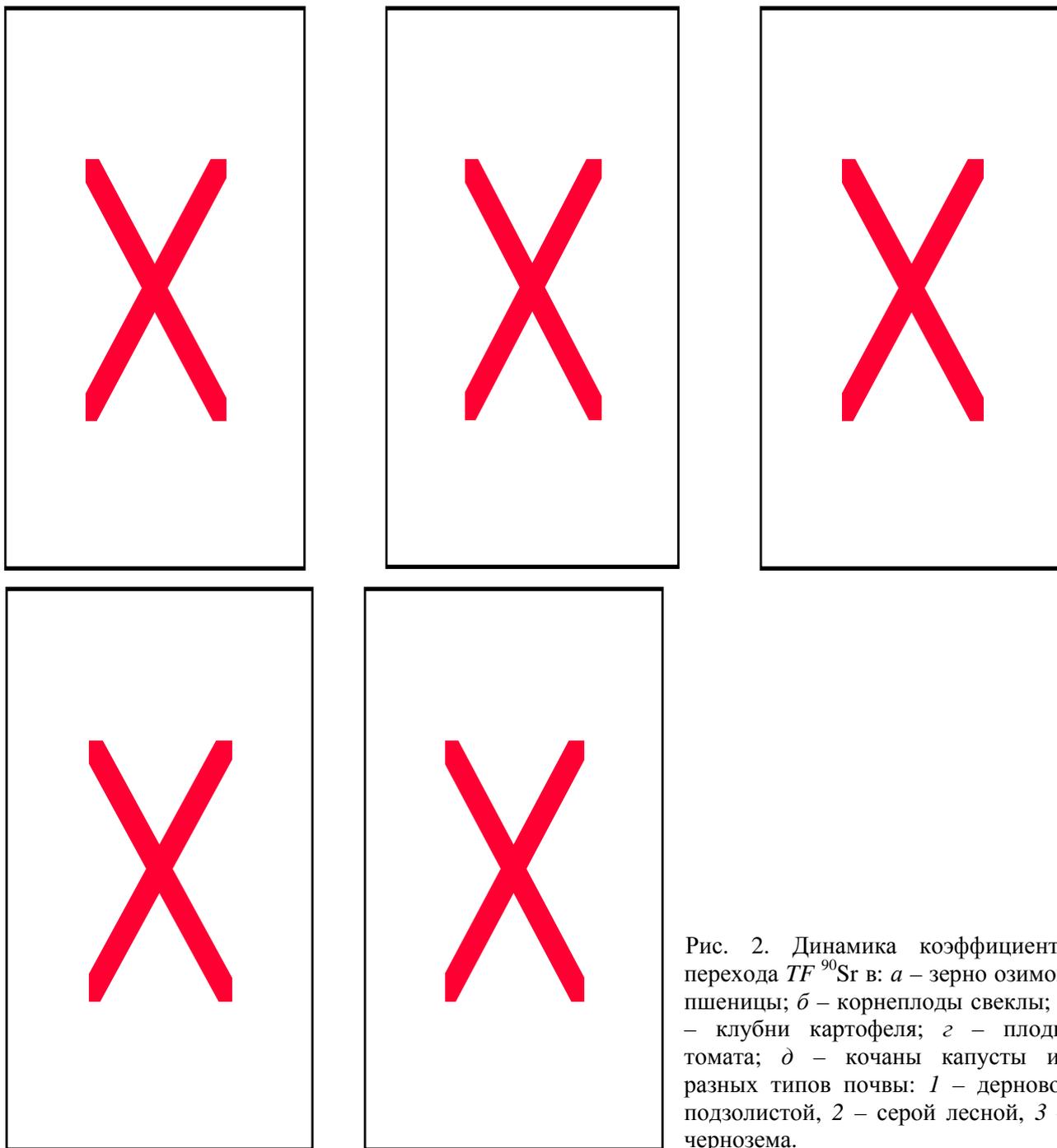


Рис. 2. Динамика коэффициента перехода $TF^{90}\text{Sr}$ в: *a* – зерно озимой пшеницы; *b* – корнеплоды свеклы; *в* – клубни картофеля; *г* – плоды томата; *д* – кочаны капусты из разных типов почвы: 1 – дерново-подзолистой, 2 – серой лесной, 3 – чернозема.

Исследования, проведенные в 30-километровой зоне ЧАЭС, показали, что ^{90}Sr медленно высвобождается из матрицы топливных частиц выпадений. Вследствие этого в ближней зоне наблюдали увеличение коэффициента перехода ^{90}Sr из почвы в растения [6, 13]. Полученные в настоящей работе данные для дальней зоны выпадений не выявили

существенного влияния изменения размеров и форм выпадений ^{90}Sr на значение TF . Очевидно, что топливные частицы дальней зоны загрязнения характеризуются значительно меньшими размерами и поэтому скорость их деструкции значительно выше. К сожалению, детальные исследования характеристик топливных частиц в дальней зоне чернобыльских выпадений не проведены.

Таблица 4. Коэффициенты перехода ^{90}Sr из почвы в сельскохозяйственные культуры TF ($\text{м}^2/\text{кг}^{-1}$), периоды их полууменьшения T^e (годы) и коэффициент детерминированности R^2 (уравнение 2)

Культура	Тип почвы								
	дерново-подзолистая			серая лесная			чернозем		
	TF_0	T^e	R^2	TF_0	T^e	R^2	TF_0	T^e	R^2
Озимая пшеница	3,5	7,9	0,97	0,72	14	0,86	0,32	11	0,91
Свекла	1,1	6,9	0,97	0,23	11	0,95	0,13	12	0,84
Картофель	0,47	11	0,85	0,23	11	0,94	0,071	14	0,90
Томаты	0,58	9,7	0,79	0,17	16*	0,57	0,032	31*	0,64
Капуста	0,46	12	0,87	0,10	11	0,96	0,033	11	0,89
Среднее	9,5 ± 3,9			11,7 ± 3,8			12 ± 2,3		

*Значение не учтено при вычислении среднего.

Значения периодов полууменьшения TF на всех типах почв были меньше значений физического периода полураспада радионуклида, что свидетельствует о значительном вкладе автореабилитационных процессов в снижение загрязнения сельскохозяйственной продукции радиоактивным стронцием.

Выводы

Результаты многолетнего мониторинга поведения ^{90}Sr в системе “почва - растение” на территории Украины показали, что коэффициент перехода ^{90}Sr из почвы в сельскохозяйственные культуры TF в дальней зоне чернобыльских выпадений не зависит от плотности загрязнения почвы σ . Величина TF характеризует видовые особенности растений и уменьшается в ряду: зерно злаковых, корнеплоды, клубни картофеля, плоды овощных культур. Для одного вида растений коэффициент перехода ^{90}Sr уменьшается в среднем на порядок величин в ряду почв: дерново-подзолистая, серая лесная, чернозем.

Динамика значений TF ^{90}Sr из почвы для всех исследованных сельскохозяйственных культур после аварии аппроксимирована экспоненциальной зависимостью. Периоды полууменьшения коэффициента перехода радиостронция T^e составляют на дерново-подзолистой почве 9,5 года, на серой лесной – 11,7 года, на черноземе - 12 лет.

Полученные динамические параметры служат основой для разработки модели прогнозирования загрязнения сельскохозяйственной продукции ^{90}Sr в аварийных ситуациях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Израэль Ю.А., Вакуловский С.М., Стукин Е.Д. и др. Чернобыль: Радиоактивное загрязнение природных сред. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 296 с.
2. 20 лет Чернобыльской катастрофы. Взгляд в будущее // Национальный доклад Украины. – К., 2006. – 224 с.
3. Клечковский В.М., Гулякин И.В. Поведение в почвах и растениях микроколичеств стронция, цезия, рутения и циркония // Почвоведение. - 1958, № 3. - с. 1 - 15.
4. Архипов А.Н., Озорнов А.Г. Динамика трансформации физико-химических форм радионуклидов в зоне отчуждения // V Междунар. науч.-техн. конф. «Чернобыль-96»: Сб. тез. – Зеленый мыс, 1996. – 242 с.

5. *Льїн М.І.* Закономірності поведінки ^{90}Sr і ^{137}Cs чорнобильських випадінь у системі ґрунт - рослина на природних та меліорованих луках Полісся України: Автореф. дис. ... канд. біол. наук. – К., 1994. – 22 с.(укр.).
6. *Кашипаров В.А.* Оценка и прогнозирование радиозоологической обстановки при радиационных авариях с выбросом частиц облученного ядерного топлива: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. – Обнинск, 2000. – 48 с.
7. *Маликов В.Г., Перепелятнікова Л.В., Жуков Б.И.* Накопление стронция-90 и цезия-137 в урожае культур в зависимости от физико-химических свойств почвы // *Агрохимия*. - 1982, №7. - С. 117 - 119.
8. *Бондарь П.Ф.* Влияние почвенно-климатических условий на накопление ^{90}Sr растениями из почвы и прогнозирование загрязнения урожая // *Агрохимия*. - 1983, № 7. - С. 69 - 79.
9. *Priester B.S., Baryakhtar V.G., Perepelyatnikova L.V. et al.* Experimental Substantiation and Parameterization of the Model Describing ^{137}Cs and ^{90}Sr Behavior in a Soil-Plant System // *Environmental Science and Pollution Research*. - 2003, Special Issue No. 1. - P. 126 - 136.
10. *Гулякин И.В., Юдинцева Е.В.* К вопросу агрохимии радиоактивных продуктов деления // *Агрохимия*. - 1978, № 1. - С. 145 - 153.
11. *Гродзинский Д.М., Гудков И.Н.* Защита растений от лучевого поражения. - М.: Атомиздат, 1973. - 384 с.
12. *Beresford N.A., Howard B, Strand P et al.* Fluxes of radionuclides // Time dependent optimization of strategies for countermeasures use to reduce population radiation dose and reclaim abandoned land (RECLAIM). Strategies for countermeasures use to reduce population radiation dose and reclaim abandoned lands EU Contract № ERBIC15 CT 960209. – 2000.
13. *Иванов Ю.А., Архипов А.Н.* Автореабилитационные процессы на загрязненных землях // Наукові і технічні аспекти Чорнобиля: Зб. наук. ст. – К.: Політехніка, 2002. – С. 405 - 409.

Поступила в редакцію 28.11.06

7 ПОВЕДІНКА ^{90}Sr ЧОРНОБИЛЬСЬКИХ ВИПАДІНЬ У СИСТЕМІ “ГРУНТ - РОСЛИНА” НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ**Б. С. Прістер, Л. В. Перепелятнікова, В. Д. Виноградська, Т. М. Іванова, В. О. Руденко**

У ході проведення багаторічного моніторингу сільськогосподарських угідь України, забруднених ^{90}Sr після аварії на ЧАЕС, отримано 510 спряжених пар значень концентрації нукліда в системі “грунт - рослина”, що характеризують накопичення радіонукліда п’ятьма сільськогосподарськими культурами на трьох типах найбільш розповсюджених ґрунтів. Підтверджено існування лінійної залежності між питомою активністю радіостронцію в рослинах та щільністю забруднення ґрунту чорнобильськими випадіннями. Установлено, що коефіцієнт переходу TF ^{90}Sr з ґрунту в сільськогосподарські культури зменшується з часом після випадінь. Розроблено модель динаміки TF ^{90}Sr і визначено її параметри для основних сільськогосподарських культур і ґрунтів України, що дає змогу прогнозувати забруднення сільськогосподарської продукції після радіоактивних випадінь.

7 BEHAVIOUR ^{90}Sr CHERNOBYL FALLOUT IN SYSTEM “SOIL TO PLANT” ON TERRITORY OF UKRAINE**B. S. Prister, L. V. Perepelyatnikova, V. D. Vynogradskaya, T. M. Ivanova, V. O. Rudenko**

At operation of perennial monitoring of Ukrainian ^{90}Sr contaminated after Chernobyl accident agricultural holding was taken 510 conjugate couple of nuclide concentration values in system “soil to plant”, which characterized of radionuclide accumulation by 5 agricultural crops on 3 prevalent soil types. The existence of linear dependency between radiostrontium specific activity in plants and soil density contamination by Chernobyl fallout was confirmed. It is determined what transfer factor TF ^{90}Sr from soil in agricultural crops decrease with time after fallout. The model of TF ^{90}Sr dynamic was developed and its parameters for basic agricultural crops and Ukrainian soil were estimated qualitative. This admitted to predict the agricultural crops contamination after radioactive fallout.