

ПОВЕДЕНИЕ ^{90}Sr В РЕГИОНАХ, ПОСТРАДАВШИХ В РЕЗУЛЬТАТЕ АВАРИИ НА ЧАЭС

В.А. Кашпаров,
С.Е. Левчук

Украина, Украинский научно-исследовательский институт
сельскохозяйственной радиологии

Рассмотрены вопросы перехода радионуклидов в мобильные формы при растворении черновобльских топливных частиц в естественных условиях в почвах и обусловленное этим загрязнение сельскохозяйственной продукции в регионах, пострадавших в результате Чернобыльской катастрофы.

Первые результаты, полученные на топливных следах радиоактивных черновобльских выпадений, показали ограниченность области применения ранее полученных закономерностей поведения радионуклидов. Так, на топливных следах радиоактивных выпадений радионуклиды отличались существенно меньшей мобильностью и биологической доступностью (наиболее сильно это проявлялось для ^{90}Sr) по сравнению с конденсационной формой выпадений (как глобальных, так и черновобльских). Со временем происходило растворение топливных частиц (ТЧ) в почве, что привело к увеличению загрязнения растительности ^{90}Sr и усилению его

миграции в поверхностные и грунтовые воды.

Отсутствие знаний о поведении в окружающей среде радионуклидов, выпавших в составе матрицы частиц облученного ядерного топлива, не позволяло в полной мере корректно оценить радиологическую обстановку в ближней зоне во время аварии на ЧАЭС и спрогнозировать ее изменение в будущем, а также оптимизировать применяемые контрмеры.

На основании измерений доли обменного чернобыльского ^{90}Sr и внесенного в почву в водорастворимой форме ^{89}Sr был разработан метод оценки степени растворения топливных частиц в почве и динамики перехода радионуклидов в мобильные формы в естественных условиях.

Полученные данные по содержанию радионуклидов в матрице ТЧ спустя десять лет после Чернобыльской аварии показали более высокую химическую устойчивость не окисленных топливных частиц в почве на узком Западном следе радиоактивных выпадений, образовавшемся в результате первого выброса во время аварии на ЧАЭС, по сравнению с частицами, выброшенными в других направлениях и образовавшимися в результате окисления ядерного топлива. Скорость растворения однотипных частиц в наибольшей степени коррелирует с кислотностью водной вытяжки $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$. Больше всего частиц сохранилось в нейтральных почвах ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} > 6$) независимо от направления и расстояния от ЧАЭС. Так, даже на удалении на юг более 30 км в окультуренных нейтральных почвах ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ около 7), используемых в сельскохозяйственном производстве после аварии, до настоящего момента основная доля активности ^{90}Sr находится в немобильной форме в составе топливных частиц (порядка 50-70%).

Проделанной работой показано, что для прогнозирования изменения радиологической ситуации правомерно применение уравнения кинетики первого порядка и полученных зависимостей для постоянных трансформации топливных частиц (k , год^{-1}) в почвах ближней зоны аварии на ЧАЭС (1):

$$dA(t)/dt = -(k + \lambda) \cdot A(t), \quad \text{FP} = A(t) / (A_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t)) = \exp(-k \cdot t) \quad (1),$$

где $A(t)$ и A_0 - активность частиц в момент времени t после выпадений и в начальный момент, соответственно. λ - постоянная радиоактивного распада, год^{-1} , а постоянные трансформации топливных частиц (k , год^{-1}) имеют следующие значения:

для Западного следа:

$$\begin{aligned} k &= 0.6 \cdot 10^{(-0.15 \cdot \text{pH})} && \text{при } \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} < 7.0 \\ k &= 0.05 && \text{при } 7.5 > \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} \geq 7.0 \end{aligned} \quad (2)$$

для всей ближней зоны без Западного следа:

$$\begin{aligned} k &= 40 \cdot 10^{(-0.45 \cdot \text{pH})} && \text{при } \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} < 6.5 \\ k &= 0.05 && \text{при } 7.5 > \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} \geq 6.5 \end{aligned}$$

На основании полученных результатов сделана оценка динамики растворения топливных частиц и перехода радионуклидов из их матрицы в различных почвенных условиях. Период полураспада ТЧ с увеличением кислотности почвы ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ с 7 до 4) изменяется с 14 до 1 года. Описание с помощью полученных нами параметров динамики перехода ^{90}Sr из матрицы топливных частиц в почву хорошо согласуется с литературными данными о формах его нахождения в почве на топливных следах чернобыльского выброса в различное время после аварии и динамике радиоактивного загрязнения растительности.

Полученные зависимости постоянных трансформации чернобыльских топливных частиц разного генезиса от кислотности почв (2) позволяют прогнозировать переход радионуклидов из их матрицы в почвенный раствор и вовлечение в процессы миграции, а также корневого поступления в растения.

Учитывая динамику растворения топливных частиц в почве, можно сделать вывод, что радиологическая ситуация на топливных следах радиоактивных выпадений в настоящее время стабилизировалась. В составе матрицы топливных частиц (в малодоступной форме) находится менее 50% радионуклидов от их общего запаса в почве. Учитывая радиоактивный распад ^{90}Sr , можно утверждать, что увеличение его абсолютного содержания в мобильной форме в нейтральных почвах будет наблюдаться в течение еще 10-20 лет, однако его максимальное содержание не превысит более чем на 20% существующий в настоящее время уровень. Для кислых же почв содержание ^{90}Sr в мобильном состоянии уже достигло своего максимума и со временем, как и обусловленное этим загрязнение растительности, будет уменьшаться.

В зависимости от скорости растворения ТЧ корневое загрязнение ^{90}Sr растительности в первые годы растет и достигает максимума только на 2-20 год. Наиболее поздно достигает максимума загрязнение растительности ^{90}Sr на нейтральных почвах (через 20-25 лет), однако его максимальное содержание не превысит более чем на 20% существующий в настоящее время уровень.

На основании полученных данных сделана оценка возможности сельскохозяйственного использования земель Зоны отчуждения. Лимитирующим фактором при рассмотрении различных сценариев использования 30-км зоны является загрязнение продукции ^{90}Sr , а не ^{137}Cs , или внешнее облучение персонала. В настоящее время и в обозримом будущем в сельскохозяйственном производстве могут использоваться только отдельные участки периферии юго-западной части 30-км зоны. Другим вариантом возможного использования территории Зоны отчуждения является заготовка древесины. Проведенная оценка показала, что за пределами наиболее загрязненной 10-км зоны ЧАЭС загрязнение древесины ^{90}Sr и, тем более, ^{137}Cs будет соответствовать существующим нормативам.

С введением в Украине в 1997 году новых допустимых уровней (ДУ-97) загрязнения ^{90}Sr пищевых продуктов (для хлебопродуктов – 5 Бк/кг, для овощей, мяса и молока – 20 Бк/кг) вновь возникла острая необходимость в сертификации сельскохозяйственной продукции, так как малые уровни загрязнения ^{90}Sr растительности в первые годы после аварии, обусловленные топливной компонентой радиоактивных выпадений, привели к ослаблению или полному прекращению подобного контроля. Исследования загрязнения ^{90}Sr сельскохозяйственной продукции в 1997-1999г.г. в наиболее критических районах Киевской, Черниговской и Житомирской областей Украины, примыкающих к Зоне отчуждения, показали, что для молока и овощей не наблюдается превышения ДУ-97. Во всех обследованных регионах плотность загрязнения ^{90}Sr сельскохозяйственных угодий, включая пастбища, не превышала 30 кБк/м². Загрязнение молока ^{90}Sr составляло 0,5-10 Бк/л с медианой 2,4 Бк/л (n=119). Медианные значения загрязнения радиостронцием молока в общественных и частных хозяйствах сильно не отличались и составляли 3,3 Бк/л (n=72) и 1,4 Бк/л (n=20), соответственно. Исходя из соотношения содержания ^{90}Sr в молоке и мышечной ткани КРС, можно сделать вывод, что и для мяса не будет наблюдаться превышения ДУ-97. Удельное загрязнение ^{90}Sr картофеля, как в общественном, так и в частном секторах, составляет 1-2 Бк/кг. Для других видов овощей также не наблюдается превышения ДУ-97, что обусловлено использованием под овощные культуры наиболее плодородных почв, отличающихся низкими коэффициентами перехода радионуклидов из почвы в растения.

В соответствии с ДУ-97, «продукт (кроме специальных продуктов детского питания) подлежит реализации и потреблению, если выполняется соотношение: $C_{\text{Cs}}/\text{ДУ}_{\text{Cs}} + C_{\text{Sr}}/\text{ДУ}_{\text{Sr}} \leq 1$, где C_{Cs} и C_{Sr} – удельная активность ^{137}Cs и ^{90}Sr в пищевом продукте, а ДУ_{Cs} и ДУ_{Sr} – нормативные уровни для данного продукта. Поэтому даже достаточно низкое содержание ^{90}Sr в пищевых продуктах приводит к ужесточению минимально допустимого содержания в них ^{137}Cs . Так, при удельной активности молока на уровне 10 Бк/л по ^{90}Sr , удельная активность в нем ^{137}Cs не должна превышать 50 Бк/л.

Наиболее критическими, с точки зрения загрязнения сельскохозяйственной продукции ^{90}Sr , в настоящее время являются зерновые культуры в случае их использования непосредственно для производства хлебопродуктов. Так, медианные значения удельной активности зерна озимой ржи составляли 5,5 Бк/кг (n=78), озимой пшеницы – 4 Бк/кг (n=22) и овса – 8,5 Бк/кг (n=16). Приблизительно в 30% случаев удельная активность зерна превышала 10 Бк/кг, что не гарантирует производства из него хлебопродуктов (коэффициент разбавления 2), удовлетворяющих требованиям ДР-97. Коэффициенты перехода радиостронция из почвы в зерно ржи и пшеницы [(Бк/кг)/(кБк/м²)] в настоящее время сильно не отличаются в одинаковых почвенно-климатических условиях и уменьшаются с увеличением в почве содержания обменного Са [мг·экв/100г (почвы)]: $K_p = 3.9/\text{Ca}$. Таким образом, исходя из типичных уровней содержания обменного кальция в почвах на загрязненных территориях, можно сделать вывод, что критическими, с точки зрения производства зерновых культур для производства хлебопродуктов, являются сельскохозяйственные угодья с плотностью загрязнения, начиная уже с 5 кБк/м². Относительно высокий возможный уровень содержания ^{90}Sr в хлебопродуктах, в соответствии с ДУ-97, приводит и к более жестким требованиям по содержанию в них ^{137}Cs .