

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ ^{137}Cs , ДОПУСКАЮЩЕЙ ПОЛУЧЕНИЕ НОРМАТИВНО ЧИСТОЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ, НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПЕРЕХОДА РАДИОНУКЛИДА В РАСТЕНИЯ

С.И. СПИРИДОНОВ, О.В. МОШАРОВ, В.М. СОЛОМАТИН, А.В. ПАНОВ, С.В. ФЕСЕНКО

Изучали динамику перехода ^{137}Cs из различных типов почвы в продукцию растениеводства и корма. Разработан комплекс моделей для прогнозирования интенсивности накопления ^{137}Cs в сельскохозяйственных растениях в разные периоды после аэрального поступления радионуклида на поверхность почвы в водорастворимой форме. Дан прогноз уровней загрязнения почв ^{137}Cs , при которых возможно получение сельскохозяйственной продукции, удовлетворяющей принятым в настоящее время нормативам.

Ключевые слова: сельскохозяйственные растения, радионуклиды, коэффициент перехода, математические модели, база данных.

В отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС радиационная обстановка на загрязненных территориях характеризуется установлением квазиравновесия между формами долгоживущих радионуклидов, находящихся в почве (1). Для прогнозирования накопления радионуклидов в сельскохозяйственных растениях используются статические модели, связывающие коэффициенты перехода радионуклидов в растения с совокупностью почвенных характеристик (2). Значительный объем радиоэкологической информации, накопленной в послечернобыльский период, позволяет разрабатывать динамические модели, описывающие поведение радионуклидов в различные периоды после радиоактивных выпадений (3), а использование таких моделей — прогнозировать изменение поступления радионуклидов в растения из почвы с течением времени. Нашей целью была разработка динамических моделей перехода ^{137}Cs из почвы в растения в зонах, подвергшихся чернобыльским выпадениям, и прогнозирование на их основе уровней загрязнения почв ^{137}Cs , при которых возможно получение нормативно чистой сельскохозяйственной продукции.

Методика. Объектами анализа были зерновые культуры, картофель и кормовые травы. Сформирована база данных, включающая информацию о содержании ^{137}Cs в почве и сельскохозяйственных растениях для территорий, подвергшихся чернобыльским выпадениям. В состав базы данных входят агрохимические показатели почв и значения коэффициентов перехода ^{137}Cs в растения (КП) в разные периоды времени после аварии. Закономерности изменения коэффициентов перехода идентифицировали для почв различного механического состава. При этом использовали международную радиоэкологическую классификацию почв (4), согласно которой они подразделяются на четыре группы с учетом особенностей и способности фиксировать ^{137}Cs . В первую группу включены торфяные почвы, для которых характерны наиболее высокие значения КП. Минеральные почвы объединяются в три группы в зависимости от механического состава: песчаные и супесчаные, легко- и среднесуглинистые, тяжелосуглинистые и глинистые. Выбор механического состава почвы как ведущего признака классификационной системы

вполне согласуется со сформировавшимися к настоящему времени представлениями о значительном влиянии этого показателя на интенсивность миграции ^{137}Cs в системе «почва—растение».

При выполнении анализа динамики коэффициентов перехода ^{137}Cs в растения рассчитывали среднегеометрические значения КП для набора сельскохозяйственных культур (картофель, ячмень, пшеница, рожь, овес) и двух групп сеяных трав (однолетних и многолетних) в зависимости от времени после аварии. Для выявления закономерностей перехода радионуклидов в растительность в различные периоды после радиоактивных выпадений использовали метод математического моделирования (5).

Результаты. Как известно, один из вариантов прогнозирования динамики интенсивности поступления радионуклидов в растения — разработка и использование имитационных математических моделей, отражающих особенности поведения радионуклидов в почвах разного типа на основе идентификации механизмов, управляющих радиоэкологическими процессами (5). В рамках другого подхода изучение накопления радионуклидов во времени может быть описано комплексом регрессионных моделей, каждая из которых предназначена для прогноза накопления радионуклидов в растениях, произрастающих на конкретном типе почвы (3). Такой подход представляется целесообразным с практической точки зрения, поскольку для параметризации подобного рода «частных» моделей не требуется привлечения дополнительных данных по почвенным характеристикам и условиям, определяющим интенсивность миграции радионуклидов в системе «почва—растения». В то же время совокупность этих моделей вполне пригодна для осуществления количественного прогноза и охватывает широкий спектр возможных вариантов для определенных типов почв и сельскохозяйственных культур.

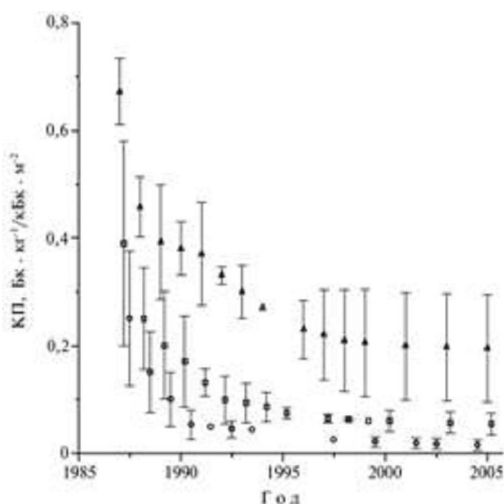


Рис. 1. Динамика коэффициентов перехода (КП) ^{137}Cs в зерно пшеницы, произрастающей на почвах разных типов: треугольники — песчаные и супесчаные, квадраты — легко- и среднесуглинистые, круги — тяжелосуглинистые и глинистые (средние и среднеквадратичные отклонения).

с собой совокупность трех функций, каждая из которых характеризует экспоненциальную зависимость рассматриваемого показателя от времени, прошедшего после радиоактивных выпадений:

Рассчитанные среднегеометрические значения КП для изученных растений в зависимости от времени после аварии представлены на рисунке 1.

Динамика КП ^{137}Cs хорошо описывается совокупностью экспонент, каждая из которых аппроксимирует изменение этого показателя в определенный период времени (3). Анализ данных, характеризующих изменение КП, показывает, что для разработки регрессионных моделей целесообразно выделить три временных периода. В течение 1-го (1987-1991 годы) протекали интенсивные процессы перераспределения и фиксации ^{137}Cs в почве, обусловившие значительное снижение КП, во 2-й (1992-1997 годы) уменьшение КП происходило с гораздо меньшей скоростью, а 3-й характеризовался стабилизацией КП в результате достижения квазиравновесного состояния в поведении ^{137}Cs в почве (6).

В результате нами были разработаны модели, описывающие динамику содержания ^{137}Cs в сельскохозяйственных растениях (для разных культур и групп почв). Модели представляют

$$CR_{rel}(t) = \begin{cases} A_0 \times \exp(-\lambda a t) \dots\dots t_1 < t < t_2, \\ B_0 \times \exp(-\lambda b t) \dots\dots t_2 < t < t_3, \\ C_0 \times \exp(-\lambda c t) \dots\dots t > t_3 \end{cases} \quad [1],$$

где $CR_{rel}(t)$ — содержание ^{137}Cs в растениях, нормированное на плотность выпадений, (Бк/кг)/(кБк/м²); t — время после радиоактивных выпадений, число лет; $\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c$ — константы скорости снижения коэффициента перехода, год⁻¹; A_0, B_0, C_0 — параметры модели, (Бк/кг)/(кБк/м²) (табл.).

Значения параметров модели, описывающей динамику перехода ^{137}Cs в сельскохозяйственные растения разных видов в зависимости от периода времени после радиоактивного выпадения и группы почв									
Группа почв	Период								
	1-й, 1987-1991 годы			2-й, 1992-1997 годы			3-й, 1998-2004 годы		
	A0	λ_a	R2	B0	λ_b	R2	C0	λ_c	R2
<i>Зерновые культуры</i>									
<i>Ячмень</i>									
Песчаные, супесчаные	0,540	0,102	0,98	0,370	0,039	0,89	0,314	0,026	0,73
Легко- и среднесуглинистые	0,300	0,235	0,99	0,130	0,055	0,94	0,095	0,023	0,72
Тяжелосуглинистые, глинистые	0,100	0,182	0,98	0,053	0,048	0,87	0,041	0,026	0,75
<i>Пшеница</i>									
Песчаные, супесчаные	0,670	0,202	0,90	0,280	0,031	0,89	0,220	0,025	0,94
Легко- и среднесуглинистые	0,380	0,307	0,98	0,130	0,036	0,93	0,110	0,023	0,72
Тяжелосуглинистые, глинистые	0,250	0,474	0,99	0,050	0,043	0,79	0,040	0,023	0,72
<i>Рожь</i>									
Песчаные, супесчаные	0,850	0,087	0,99	0,610	0,025	0,85	0,600	0,023	0,73
Легко- и среднесуглинистые	0,270	0,178	0,98	0,130	0,039	0,91	0,100	0,023	0,81
Тяжелосуглинистые, глинистые	0,260	0,256	0,98	0,110	0,057	0,76	0,090	0,051	0,73
<i>Овес</i>									
Песчаные, супесчаные	0,450	0,087	0,97	0,280	0,025	0,85	0,250	0,027	0,75
Легко- и среднесуглинистые	0,200	0,178	0,96	0,100	0,037	0,87	0,080	0,024	0,64
Тяжелосуглинистые, глинистые	0,100	0,256	0,89	0,040	0,057	0,84	0,030	0,023	0,76
<i>Картофель</i>									
Песчаные, супесчаные	0,610	0,189	0,99	0,290	0,042	0,87	0,180	0,024	0,90
Легко- и	0,450	0,170	0,99	24,00	0,065	0,82	0,160	0,035	0,96

среднесуглинистые									
Тяжелосуглинистые, глинистые	0,081	0,254	0,98	0,030	0,033	0,85	0,023	0,009	0,90
Естественные и сеяные травы									
<i>Многолетние</i>									
Песчаные, супесчаные	14,700	0,213	0,99	6,000	0,043	0,88	4,900	0,023	0,70
Легко- и среднесуглинистые	3,300	0,213	0,98	1,600	0,035	0,86	1,400	0,025	0,75
Тяжелосуглинистые, глинистые	0,800	0,190	0,99	0,400	0,035	0,93	0,350	0,024	0,78
<i>Однолетние</i>									
Песчаные, супесчаные	9,300	0,194	0,99	4,500	0,033	0,90	3,900	0,023	0,74
Легко- и среднесуглинистые	5,000	0,179	0,99	2,500	0,038	0,90	2,100	0,024	0,74
Тяжелосуглинистые, глинистые	2,900	0,218	0,98	1,540	0,084	0,89	0,790	0,025	0,79
Примечание. Описание параметров см. в описании модели [1]; R2 — коэффициент детерминации.									

Коэффициенты детерминации R2, отражающие степень соответствия результатов расчетов экспериментальным данным при использовании этих моделей, составляют 0,64-0,96. Иными словами, разработанные модели могут быть использованы для прогнозирования интенсивности накопления ^{137}Cs в сельскохозяйственных растениях в разные периоды после аэрального поступления радионуклида на поверхность почвы в водорастворимой форме.

На основе разработанных моделей был осуществлен прогноз изменения содержания радионуклидов в растениях на период до 2020 года. Временные ряды значений рассматриваемого показателя использовали для оценки степени загрязнения почв, допускающей получение сельскохозяйственной продукции с содержанием ^{137}Cs согласно современным нормативам: для продовольственного зерна, картофеля и корнеплодов, а также сена естественных и сеяных трав соответственно 70, 120 и 400 Бк/кг (7, 8). Допустимые плотности выпадений оценивали соотношением:

$$Q_{ij}(t) = \frac{C_i}{CR_{rel} \cdot ij(t)} \quad [2],$$

где $Q_{ij}(t)$ — плотность радиоактивных выпадений ^{137}Cs , при которой содержание ^{137}Cs в i -м виде растений, произрастающих на j -м типе почвы, не превышает принятый норматив; C_i — значение норматива для i -го вида растений; $CR_{rel} \cdot ij(t)$ — содержание ^{137}Cs в растениях i -го вида на j -м типе почвы, нормированное на плотность выпадений. Следует отметить, что величина $Q_{ij}(t)$ меняется с течением времени (t), что связано с изменением накопления ^{137}Cs в растительности в результате экологических процессов (сорбция и вертикальная миграция этого радионуклида в почвенном профиле) и радиоактивного распада. Плотности выпадений ^{137}Cs , при которых его содержание в растениях не превышает контрольных показателей, рассчитаны для зерновых культур (ячменя, пшеницы, ржи, овса), картофеля, многолетних и однолетних трав (рис. 2).

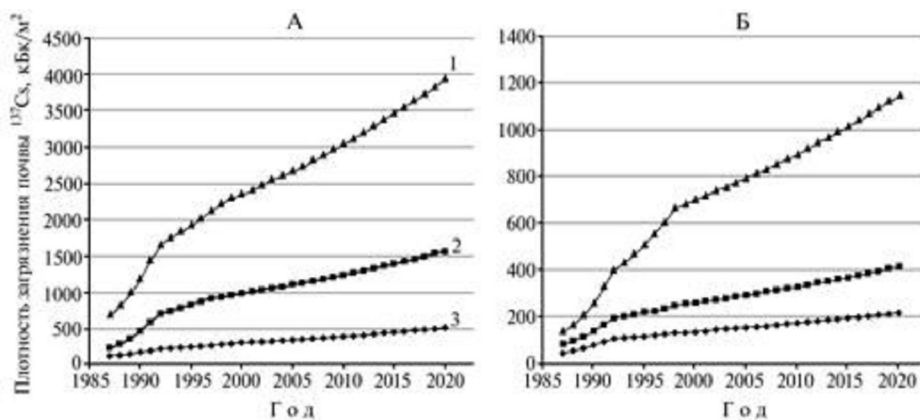


Рис. 2. Динамика плотности выпадений ^{137}Cs , при которых его содержание в зерне ячменя (А) и сене многолетних трав (Б) при выращивании на почвах разных типов не превышает контрольного значения: 1 — песчаные и супесчаные, 2 — легко- и среднесуглинистые, 3 — тяжелосуглинистые и глинистые почвы.

Полученные результаты свидетельствуют, что в 2006 году содержание ^{137}Cs в зерновых культурах, произрастающих на песчаных и супесчаных почвах (первая группа), для территорий с плотностью выпадений ^{137}Cs менее 300-500 $\text{кБк}/\text{м}^2$ соответствовало нормативам СанПиН 2.3.2.1078-2001; на почвах, относящихся ко второй группе (легко- и среднесуглинистые), их превышение зафиксировали при значениях 1000-1200 $\text{кБк}/\text{м}^2$, на тяжелосуглинистых и глинистых почвах (третья группа) — при 2000-2500 $\text{кБк}/\text{м}^2$. Величины $Q_{ij}(t)$ для однолетних и многолетних трав, при которых содержание ^{137}Cs в сене не превышает норматива СанПиН 2.3.2.1078-2001, были меньше значений этого показателя для зерновых культур, овса и картофеля (поскольку КП ^{137}Cs в травы выше, чем в зерно) и составили в 2006 году для песчаных и супесчаных почв — 150-300, легко- и среднесуглинистых — 300-500, тяжелосуглинистых и глинистых — 800-1800 $\text{кБк}/\text{м}^2$. Отметим, что 7,8 % территории, занятой сенокосами и пастбищами в Брянской области, после аварии на Чернобыльской АЭС подверглось радиоактивным выпадениям с плотностью выше 1489 $\text{кБк}/\text{м}^2$ (40 $\text{Ки}/\text{км}^2$) (по ^{137}Cs). Рассчитанные нами значения критических плотностей выпадений для однолетних и многолетних трав в большинстве случаев меньше этой величины, то есть кормовые травы следует отнести к виду растениеводческой продукции, для которой сохраняется опасность радиоактивного загрязнения.

Итак, на основе анализа экспериментальных данных разработан комплекс моделей, описывающих динамику перехода ^{137}Cs из почвы в сельскохозяйственные растения. Модели параметризованы для почв разных групп по радиоэкологической классификации. Сделан прогноз уровней загрязнения почв ^{137}Cs , при которых возможно получение сельскохозяйственной продукции, удовлетворяющей принятым в настоящее время нормативам. Полученные данные актуальны для долгосрочного прогнозирования при планировании посевов сельскохозяйственных культур на радиоактивно загрязненных территориях с целью получения продукции, удовлетворяющей санитарно-гигиеническим требованиям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексихин Р.М., Гончарик Н.В. Актуальные проблемы агропромышленного производства за отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС. Вест. РАСХН, 2000, 3: 39-40.
2. Мошаров О.В., Спиридонов С.И., Соломатин В.М. и др. Сравнительный

анализ применения статистических методов прогнозирования поступления ^{90}Sr в растения. АНРИ, 2006, 47(4): 42-44.

3. Фесенко С.В., Санжарова Н.И., Лисянский К.Б. и др. Динамика снижения коэффициентов перехода ^{137}Cs в сельскохозяйственные растения после аварии на Чернобыльской АЭС. Рад. биол. радиэкол., 1996, 38(2): 256-273.

4. IAEA Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in temperate environments. (Technical report series № 364, International Atomic Energy Agency). Vienna, 1994.

5. Сельскохозяйственная радиэкология /Под ред. Р.М. Алексахина, Н.А. Корнеева. М., 1991.

6. Фокин А.Д., Лурье А.А., Торшин С.П. Сельскохозяйственная радиология. М., 2005.

7. Гигиенические требования к безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. Санитарно-эпидемиологические правила и нормы СанПиН 2.3.2.1078-2001. М., 2002.

8. Ветеринарно-санитарные требования к радиационной безопасности кормов, кормовых добавок, сырья кормового. Допустимые уровни содержания радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs . Ветеринарные правила и нормы. ВП 13.5.13/06-01. Вет. патол., 2002, 4: 44-45.

ESTIMATION OF ^{137}Cs SOIL POLLUTION PERMISSIVE THE FORMING OF THE PURE AGRICULTURAL PRODUCTION CORRESPONDING TO NORM ON THE BASIS OF MATHEMATICAL MODEL FOR RADIOACTIVE NUCLIDE TRANSFER TO THE PLANTS

S.I. Spiridonov, O.V. Mosharov, V.M. Solomatin, A.V. Panov, S.V. Fesenko

The dynamics of ^{137}Cs transfer from different types of soil to the crop and fodder production was studied. The authors have developed the complex of the models for a forecasting of ^{137}Cs accumulation in agricultural plants at the different periods after aerial nuclear fallout on soil surface in water-soluble form. The forecast was made for the doses of ^{137}Cs soil pollution which permit to receiving the agricultural production satisfactory to the contemporary standards.

Key words: agricultural plants, radionuclides, transfer factor, mathematical models, data base.

*ГНУ Всероссийский НИИ сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии Россельхозакадемии, 249032 Калужская обл., г. Обнинск, Киевское ш., 109 км,
e-mail: spiridonov@riar.obninsk.org*

*Поступила в редакцию
18 октября 2006 года*