

**Применение статистических методов для прогноза загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr
сельскохозяйственных культур в отдаленный период после катастрофы на
чернобыльской АЭС**

В.С. Аверин, К.Н. Буздалкин, Е.В. Копыльцова, Э.Н. Цуранков

Республиканское научно-исследовательское унитарное предприятие

«Институт радиологии»,

г. Гомель, Республика Беларусь

Введение

Прогноз загрязнения сельскохозяйственной продукции, произведенной на территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на чернобыльской АЭС, является важным этапом при планировании и ведении сельскохозяйственного производства на этой территории. При прогнозировании накопления радионуклидов сельскохозяйственной продукцией основными радиологическими параметрами являются коэффициенты перехода (K_p) радионуклидов из почвы в растения и далее в продукцию животноводства, и при построении прогноза используются их средние величины. неоднородность свойств почвы, определяющих переход радионуклидов в растения, погрешности, возникающие при отборе, усреднении и обработке проб, обуславливают значительную вариабельность (до порядка и более) коэффициентов перехода и снижают точность прогноза. Таким образом, точность прогноза загрязнения радионуклидами сельскохозяйственной продукции и его устойчивость можно улучшить, применяя системный подход к задаче прогнозирования. Данный подход предполагает комплексное изучение протекающих в системе «почва-растение» процессов и разработку методологических подходов, основанных на математическом моделировании и статистическом анализе. Для прогноза поступления радионуклидов из почвы в растительность могут использоваться математические модели, основанные на различных подходах [1–7]. Оценить свойства почвы количественно можно только на основе представления о неразрывной связи всех компонентов системы, включая при необходимости и привносимые вещества природного и техногенного происхождения — мелиоранты, удобрения и т. п. [2,8–10].

Целью исследования являлось применение математического моделирования на основе статистических методов анализа (в частности, множественной регрессии) для прогнозирования поступления ^{137}Cs и ^{90}Sr в сельскохозяйственные культуры с целью дальнейшего оперативного расчета рисков производства сельскохозяйственной продукции с превышением санитарно-гигиенических нормативов.

Материалы и методы исследований

Работа выполнена на основе многолетних экспериментальных данных по содержанию радионуклидов в сопряженных пробах почв и сельскохозяйственных культурах, включающих в себя результаты измерений содержания радионуклидов в почве и сельскохозяйственной продукции в отдаленный период после аварии на ЧАЭС, агрохимические показатели, гранулометрический состав почв. Данные были сгруппированы в выборки с дифференциацией по типам почв (дерново-подзолистая супесчаная, торфяная), виду сельскохозяйственной продукции (зеленая масса, зерно, корнеплоды) и сельскохозяйственных культур (кукуруза, сорго, пайза, горохо-овсяная смесь, люцерна и ряд других). Накопленная информация систематизировалась и подвергалась статистической обработке, включающей выявление резко выделяющихся наблюдений и отбраковку недостоверных данных [11,12].

С помощью статистических методов анализа (факторного и корреляционного) выделены наиболее существенные факторы, влияющие на поведение радионуклидов в системе «почва-растение» [11–13]. функциональный анализ позволил найти аналитический вид зависимости перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr из почвы в сельскохозяйственные культуры от влияющих факторов.

Для прогнозирования загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr сельскохозяйственной продукции и описания зависимости перехода радионуклидов в сельскохозяйственные культуры от свойств почв были разработаны семейства нелинейных многомерных регрессионных прогнозных моделей:

(1)

$$UA_{c,s,r} = Tf_{c,s,r}(f,t) \cdot Pl_{s,r}(t),$$

где $UA_{c,s,r}$ – прогнозируемая удельная активность радионуклида (r) в сельскохозяйственной продукции c -ой культуры на s -ом типе почвы, (Бк/кг);

$Tf_{c,s,r}(f,t)$ – функция количественного поступления r -го радионуклида в сельскохозяйственную продукцию;

$Pl_{s,r}(t)$ – функция плотности загрязнения почвы типа s от времени t ,

(отн. ед.); r – радионуклид (^{137}Cs или ^{90}Sr); t – время прогноза, лет.

Функции количественного поступления ^{137}Cs и ^{90}Sr в сельскохозяйственные культуры можно представить как композицию нескольких функций:

$$^{137}\text{Cs}: Tf_{c,s} = f_1(\text{PPK})^a f_2(\text{gumus}) \quad (2)$$

$$^{90}\text{Sr}: Tf_{c,s} = f_1(\text{PPK})^a f_2(\text{pH})^b f_3(\text{gumus}),$$

где c – сельскохозяйственная культура; s – тип почвы;

$f_1(\text{PPK})$ – представляет собой функцию, характеризующую влияние

параметров почвенного поглощающего комплекса на Tf ; $f_2(\text{pH})$ – функциональная зависимость Tf от степени кислотности почвы; $f_3(\text{gumus})$ – функциональная зависимость Tf от содержания органического вещества в почве.

Качество модели регрессии, связанное с адекватностью модели наблюдаемым данным, проверялось на основе анализа остатков и по средней ошибки аппроксимации – средняя арифметическая относительных отклонений по каждому наблюдению. для проверки значимости модели регрессии использовался F-критерий Фишера.

Источниками информации для верификации прогнозных значений загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr кормовых сельскохозяйственных культур использовались данные, полученные в производственных посевах в 2010 году.

– Результаты исследования и обсуждение

Для выполнения прогноза загрязнения сельскохозяйственной продукции ^{137}Cs и ^{90}Sr в условиях реальной сельскохозяйственной практики в отдаленный период после катастрофы на черновильской АЭС целесообразно использовать статистические методы и модели, связывающие поступление радионуклидов в растения с совокупностью почвенных характеристик. должна быть подобрана математическая функция с ограниченным числом параметров, которая бы наилучшим образом описывала экспериментальные данные. Однако, нельзя ожидать, что математические абстракции, которые не подкреплены пониманием основных физических и химических процессов, дадут достоверную информацию для того, чтобы экстраполировать модель на периоды времени или области, которые находятся вне диапазона экспериментальных данных [5].

Из всех процессов, протекающих в почве, для задачи прогнозирования в отдаленный период после аварии интерес представляют только медленно протекающие процессы перераспределения ^{137}Cs и ^{90}Sr между различными формами нахождения, которые можно охарактеризовать двумя основными интегральными свойствами почвы:

- величиной емкости поглощения почвы;
- составом обменных катионов.

Эти свойства были выражены через величины, которые определяются экспериментальным путем. При этом следует учитывать, что все определения этих свойств почвы будут в той или иной мере приближенными и оценены косвенным путем. Так, величину емкости поглощения почвы с известной точностью можно описать гранулометрическим и минералогическим составами почвы, а также содержанием гумуса – для минеральных почв, зольностью и мощностью торфа – для торфяно-болотных почв. состав же обменных катионов можно охарактеризовать суммой концентраций основных обменных ионов (Ca , Mg , K_2O , P_2O_5), взятых с некоторыми весовыми коэффициентами v_i , отражающих индивидуальный вклад каждого иона в сочетанное влияние на поступление цезия и стронция. в результате проведенного статистического анализа было подтверждено, что наиболее важными почвенными характеристиками, влияющими на переход радионуклидов из почвы в сельскохозяйственные растения, являются содержание обменных форм стабильного элемента кальция (для ^{90}Sr), подвижных форм калия (для ^{137}Cs), органического вещества и степени кислотности почвы.

Это не противоречит литературным данным [1, 4, 8, 9, 10], однако влияние степени кислотности почвы на поступление ^{137}Cs неоднозначно.

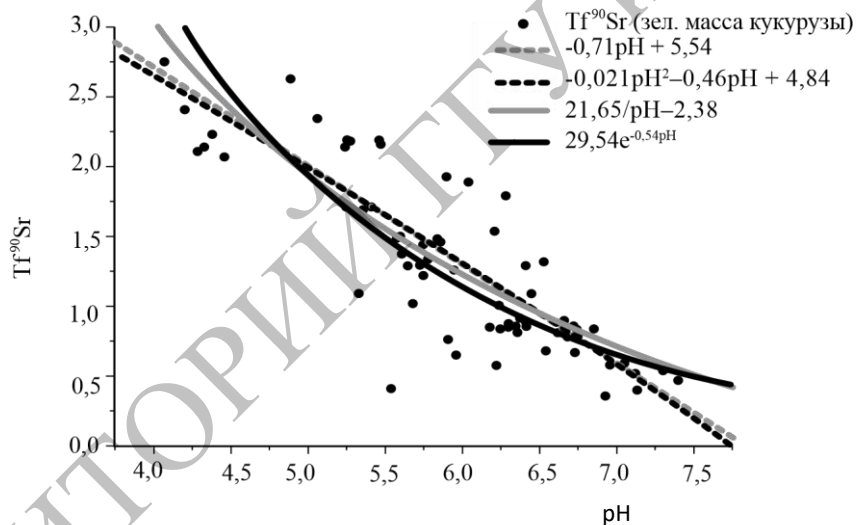


рисунок 1 – виды регрессионных кривых, описывающих влияние степени кислотности дерново-подзолистой супесчаной почвы на переход ^{90}Sr в зеленую массу кукурузы

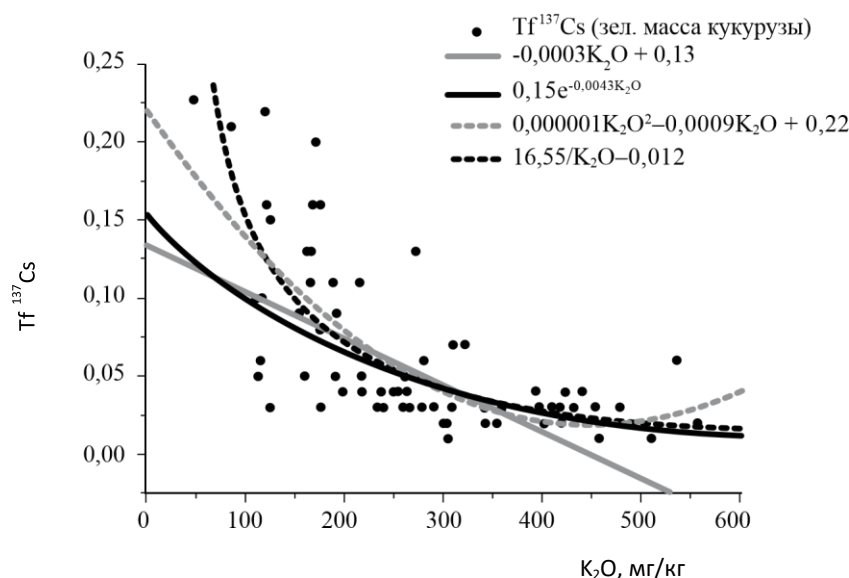


рисунок 2 – виды регрессионных кривых, описывающих влияние содержания подвижного калия в дерново-подзолистой супесчаной почве на переход ^{137}Cs в зеленую массу кукурузы

Одним из важных и сложных этапов в построении статистических моделей является выбор вида функциональной зависимости от выделенных факторов. в данной статье демонстрируется этот факт на примере построения регрессионной модели для прогноза поступления радионуклидов в зеленую массу кукурузы от одного из факторов (рисунок 1, 2).

В зависимости от вида функциональной зависимости функции количественного поступления от одного из агрохимических показателей для зеленой массы кукурузы были получены следующие значения статистических показателей (таблица 1).

Таблица 1 – значения статистических показателей при различных типах функциональной зависимости

$Tf^{90}\text{Sr}$ (зеленая масса кукурузы)	R_2	a	$F_{\text{рас}} > F_{\text{крит}} = 3,97$
$Tf_{c,s} = a1 + a2 / pH$	0,60	0,246	113
$Tf_{c,s} = a1 + a2 \cdot pH + a3 \cdot pH^2$	0,63	0,253	128,6
$Tf_{c,s} = a1 + a2 \cdot pH$	0,63	0,247	128
$Tf_{c,s} = a1 \cdot e^{-a2 \cdot pH}$	0,65	0,229	93,7
$Tf^{137}\text{Cs}$ (зеленая масса кукурузы)	R_2	a	$F_{\text{рас}} > F_{\text{крит}} = 3,97$
$Tf_{c,s} = a1 + a2 / K_2O$	0,50	0,50	76,5
$Tf_{c,s} = a1 + a2 \cdot K_2O + a3 \cdot K_2O^2$	0,52	0,51	80,1
$Tf_{c,s} = a1 + a2 \cdot K_2O$	0,42	0,64	53,3
$Tf_{c,s} = a1 \cdot e^{-a2 \cdot K_2O}$	0,51	0,50	76,4

Из рисунков 1, 2 и таблицы 1 видно, что выбранные регрессионные кривые достаточно хорошо описывают поступление ^{90}Sr и ^{137}Cs и мало различаются между собой, а статистические показатели качества этих моделей различаются в среднем не более чем на 10 %. если учесть то, что процессы, протекающие в почве и влияющие на параметры перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr в культуры, описываются дифференциальными уравнениями 1 и 2-го порядков, решение которых находится как экспоненциальная функция, выбор становится очевидным. для верификации параметров

прогнозных математических моделей была проведена статистическая обработка и анализ данных по удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в сопряженных пробах почв и ряда сельскохозяйственных культур (сорго, пайза, просо, горох) на дерново-подзолистых супесчаных почвах и многолетних злаковых трав культурных кормовых угодий на торфяной почве по результатам экспериментов 2010 года. прогнозные значения содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в сельскохозяйственных культурах, как правило, не отличались от фактически наблюдаемых больше чем на 25 % и были несколько выше по сравнению с ними, что является надежной основой для прогнозирования накопления радионуклидов.

Математическая модель была реализована в виде программного обеспечения для персонального компьютера, предназначенного для оперативного анализа агроэкологических рисков. на рисунке 3 приведены результаты работы программы.

Заключение

на основе статистического анализа экспериментальных данных по различным сельскохозяйственным культурам (кукуруза, люпин, озимый рапс, люцерна и др.), травам естественных сенокосов и пастбищ выбран набор факторов, существенно влияющих на переход ^{137}Cs и ^{90}Sr в растения. показано, что поступление ^{137}Cs и ^{90}Sr в сельскохозяйственные культуры от различных характеристик почв наилучшим образом описываются экспоненциальной зависимостью, и вид функции не зависит от выбранной культуры.

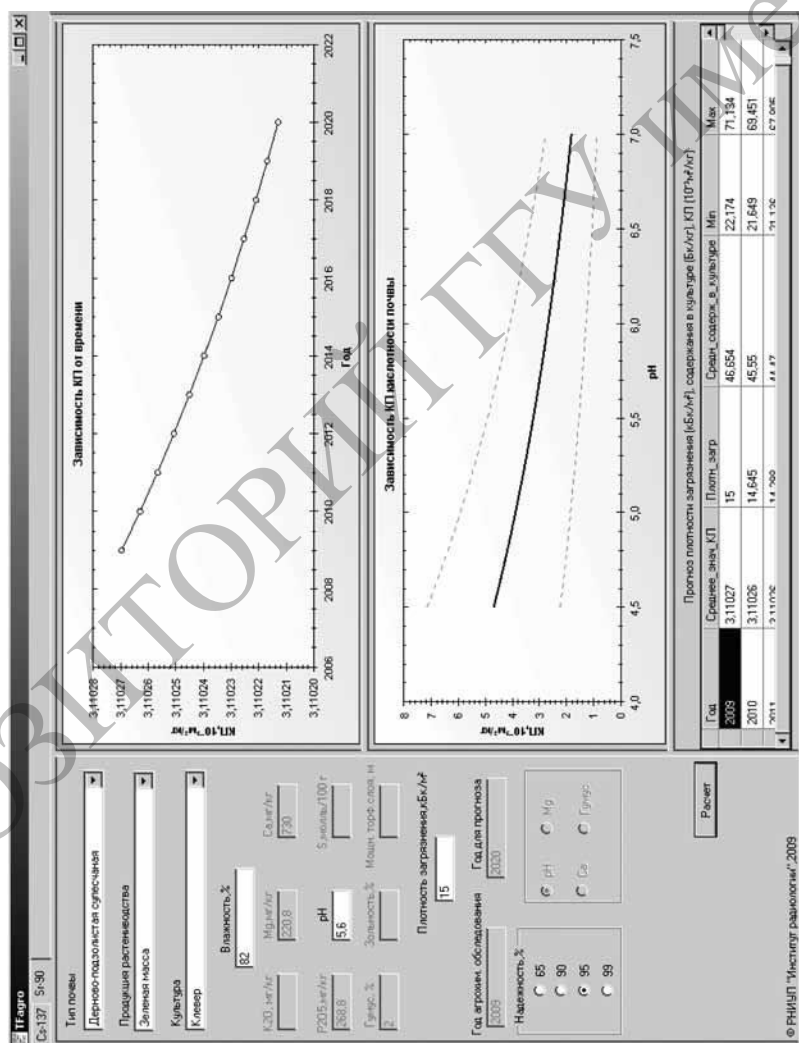


рисунок 3 – пример прогнозирования загрязнения ^{90}Sr зеленой массы клевера с помощью разработанного программного обеспечения для персонального компьютера

разработаны семейства нелинейных регрессионных моделей, предназначенных для прогнозирования поступления ^{137}Cs и ^{90}Sr в растения из различных типов почв.

Математическая модель была реализована в виде программного обеспечения для персонального компьютера, предназначенного для оперативного расчета и анализа рисков производства продукции, не соответствующей санитарно-гигиеническим нормативам.

авторы выражают благодарность сотрудникам РНИУП «институт радиологии» А.Г. Подоляку, Т.В. Арастович, Г.В. Седуковой за предоставленные данные.

Литература

- 1 Сельскохозяйственная радиоэкология / под ред. Р.М. Алексахина и Н.А. Корнеева. – Москва : Экология, 1991. – 397 с.
- 2 Пристер, Б.С. Количественная комплексная оценка свойств почвы при прогнозировании поведения радионуклидов в системе почва-растение / Б.С. Пристер // вестник аграрной науки. – 2002. – с. 61–66.
- 3 Пристер, Б.С. Модель для прогнозирования дозы внутреннего облучения населения при почвенном пути включения долгоживущих радионуклидов в пищевые цепи / Б.С. Пристер, В. Д. Виноградская // проблемы атомных электростанций и чернобыля. – 2009. – № 11. – с. 128–135.
- 4 Мошаров, О.В. прогнозирование накопления долгоживущих радионуклидов в сельскохозяйственных растениях : статистические методы и модели : дис. канд. биол. наук : 03.00.01/ О.В. Мошаров. – обнинск. – 2006. – 127 с.
- 5 Konshin, O.V. Applicability of the convection-diffusion mechanism for modeling migration of ^{137}Cs and ^{90}Sr in the soil / O.V. Konshin // Health Phys. – 1992. – № 3. – P. 291–300.
- 6 Мошаров, О.В. сравнительный анализ применения статистических методов прогнозирования поступления ^{90}Sr в растения / О.В. Мошаров [и др.] // анри. – 2006. – № 4. – с. 42–44.
- 7 Спиридонов, С.И. прогнозирование поведения ^{137}Cs в системе почва-растение на территории семипалатенского испытательного полигона / С.И. Спиридонов [и др.] // радиационная биология. радиоэкология. – 2005. – т. 45, № 4. – с. 488–497.
- 8 Путятин, Ю.В. оптимизация кислотности почв агроценозов, загрязненных ^{137}Cs и ^{90}Sr : пороговые параметры / Ю.В. Путятин, Т.М. Серая // радиационная биология. радиоэкология. – 2005. – т. 45, № 3. – с. 358–364.
- 9 Тимофеев, С.Ф. влияние удобрений на аккумуляцию ^{90}Sr сельскохозяйственными культурами / С.Ф. Тимофеев, А.Г. Подоляк // вести национальной академии наук. – 2003. – № 2. – с. 74–80.
- 10 Подоляк, А.Г. агрохимическая и радиологическая оценка применения различных видов и доз органических удобрений при улучшении суходольных лугов, загрязненных ^{137}Cs и ^{90}Sr / А.Г. Подоляк, И.М. Богдевич, С.Ф. Тимофеев [и др.] // радиационная биология. радиоэкология. – 2007. – т. 47, № 3. – с. 377–388.
- 11 Дмитриев, Е. А. Математическая статистика в почвоведении / Е. А. Дмитриев. – Москва : Мгу, 1995. – 320 с.
- 12 Зайцев, Г.Н. Методика биометрических расчетов. Математическая статистика в экспериментальной ботанике / Г. Н. Зайцев. – Москва : наука, 1973. – 256 с.
- 13 Боровиков, В.П. STATISTICA – статистический анализ и обработка данных в среде Windows / В.П. Боровиков, И.П. Боровиков. – Москва : финансы и статистика, 1998. – 592 с.