

УДК [546.36+546.42]:633.2.031:631.41(476)

А. Г. ПОДОЛЯК, И. М. БОГДЕВИЧ, И. И. ИВАШКОВА

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ НАКОПЛЕНИЯ ^{137}Cs И ^{90}Sr
В ТРАВСТОЯХ ОСНОВНЫХ ТИПОВ ЛУГОВ БЕЛОРУССКОГО ПОЛЕСЬЯ
ПО АГРОХИМИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ ПОЧВ**

Институт почвоведения и агрохимии

(Поступила в редакцию 10.10.2006)

В результате аварии на Чернобыльской АЭС произошло радиоактивное загрязнение лугов различных типов (суходольных, низинных, пойменных), которые в настоящее время интенсивно используются для производства кормов. По результатам последнего X тура радиологического обследования (по состоянию на 01.01.2006 г.), луговое кормопроизводство в Республике Беларусь ведется на 452,6 тыс. га сенокосно-пастбищных угодий с плотностью радиоактивного загрязнения ^{137}Cs более 37 кБк/м² (1 Ки/км²), из которых 156,5 тыс. га одновременно загрязнены ^{90}Sr выше 5,55 кБк/м² (0,15 Ки/км²).

Одна из важнейших задач лугового кормопроизводства на загрязненных территориях – довести продуктивность каждого гектара кормовых угодий до уровня 30–50 ц к.ед. и обеспечить получение грубых и сочных кормов (сена, зеленой массы, сенажа), отвечающих требованиям Республиканских допустимых уровней содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в сельскохозяйственном сырье и кормах (РДУ) [1–3].

Оценке влияния различных агрохимических свойств на поступление радионуклидов в сельскохозяйственные культуры и выявлению среди них наиболее важных показателей посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных исследователей [4–7]. В настоящее время из всех физико-химических характеристик почв, влияющих на подвижность и доступность ^{137}Cs и ^{90}Sr , учеными выделено около десяти основных параметров, которые по возрастающей значимости можно расположить в следующем порядке: влажность, соотношение форм нахождения радионуклидов в почве, гранулометрический состав, минералогический состав, содержание органического вещества, содержание обменных К, Са, Mg, емкость катионного обмена, величина обменной кислотности рН. Определение влияния отдельных почвенно-климатических факторов и агрохимических свойств на поступление радионуклидов в луговые растения является сложной задачей, поскольку большинство из них тесно взаимосвязаны между собой и изменение одного из них приводит к изменению других и всего комплекса показателей в целом.

В ряде нормативных документов [8–10] для прогноза содержания радионуклидов в растениеводческой продукции на всех типах почв используются только два агрохимических показателя: содержание подвижного калия (для прогноза ^{137}Cs) и величина обменной кислотности рН_{KCl} (для прогноза ^{90}Sr). Однако в работах ряда ученых приводятся данные, свидетельствующие о наличии более тесной статистической зависимости между коэффициентами перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr и другими агрохимическими показателями луговых почв (гидролитической кислотностью, содержанием обменного Са и Mg, содержанием гумуса, степенью насыщенности основаниями и др.) [11–13].

Цель настоящей работы – на основе статистической обработки массива данных, полученных в стационарных многолетних опытах за 11 лет исследований, установить агрохимические показатели луговых почв, имеющих тесную корреляционную связь с величиной коэффициентов пе-

рехода ^{137}Cs и ^{90}Sr в естественный и культурный травостои суходольных, низинных и пойменных лугов, и на их основе составить уравнения линейной и множественной регрессий, позволяющие прогнозировать величину коэффициентов перехода радионуклидов и степень загрязнения травостоя для каждого типа луга.

Объекты и методы исследования. Научные исследования проводили на протяжении 1992–2002 гг. в рамках Государственной программы Республики Беларусь по минимизации и преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС по теме «Разработка и оптимизация комплекса мер по эффективному землепользованию и снижению радиоактивного загрязнения сельскохозяйственной продукции, направленных на уменьшение доз облучения населения». Изучали влияние различных агротехнических и агрохимических способов улучшения суходольных, низинных и пойменных лугов на изменение основных агрохимических свойств луговых почв и величины коэффициентов перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr в урожай многолетние злаковых трав (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Почвенная, агрохимическая и радиологическая характеристики экспериментальных участков, 1992–2002 гг.

Суходольный луг	Низинный луг	Пойменный луг
д. Савичи (Брагинский р-н)	д. Дублин (Брагинский р-н)	д. Тульговичи (Хойникский р-н)
<i>Тип почвы</i>		
дерново-подзолистая, песчаная, глееватая	торфяно-болотная низинного типа	аллювиальная, дерново-глееватая, песчаная
<i>Плотность радиоактивного загрязнения, кБк/м² (Ки/км²)</i>		
^{137}Cs – 1026±84 (27,7±2,3) ^{90}Sr – 162±19 (4,4±0,5)	^{137}Cs – 250±36 (6,7±1,0) ^{90}Sr – 65±11 (1,7±0,3)	^{137}Cs – 864±93 (23,4±2,5) ^{90}Sr – 72±12 (1,9±0,3)
<i>Основные агрохимические показатели луговых почв</i>		
Гумус – 1,7–2,2% рН _{KCl} – 3,5–5,7 Нг – 2,3–8,8 смоль/кг S – 1,8–17,3 смоль/кг V – 16–82% Подвижный K ₂ O – 57–216 мг/кг Подвижный P ₂ O ₅ – 25–181 мг/кг Обменный Ca – 235–1280 мг/кг Обменный Mg – 55–630 мг/кг Иок – 0,22–0,88	Зольность – 16,0–17,5% рН _{KCl} – 5,4–5,9 Нг – 20,0–31,6 смоль/кг S – 65–75 смоль/кг V – 66,5–79,8% Подвижный K ₂ O – 250–1200 мг/кг Подвижный P ₂ O ₅ – 176–670 мг/кг Обменный Ca – 9220–12375 мг/кг Обменный Mg – 930–1084 мг/кг Иок – 0,48–0,98	Гумус – 3,4–4,2% рН _{KCl} – 5,0–6,3 Нг – 0,96–2,3 смоль/кг S – 4,2–10,5 смоль/кг V – 65,4–90,5% Подвижный K ₂ O – 90–301 мг/кг Подвижный P ₂ O ₅ – 93–155 мг/кг Обменный Ca – 515–1225 мг/кг Обменный Mg – 170–330 мг/кг Иок – 0,60–1,00
<i>Агротехнические и агрохимические защитные мероприятия</i>		
<ul style="list-style-type: none"> • Поверхностное улучшение путем внесения минеральных удобрений и доломитовой муки на дернину без создания культурного травостоя. • Перезалужение с использованием различных видов обработки почвы (дискование, вспашка) и их сочетаний и создание культурного травостоя. • Перезалужение с использованием различных видов обработки почвы в сочетании с применением обычных доз минеральных удобрений и доломитовой муки и создание культурного травостоя. • Применение повышенных доз (120–150 кг. д. в.) калийных удобрений при перезалужении с последующим ежегодным применением обычных доз минеральных удобрений под каждый укос многолетних сеяных трав. • Применение повышенных доз (до 60 т/га) органических удобрений при перезалужении суходольных лугов с последующим ежегодным применением обычных доз минеральных удобрений под каждый укос многолетних сеяных трав. 		

Плотность загрязнения почвы ^{137}Cs и ^{90}Sr на экспериментальных участках определяли согласно Методике крупномасштабного агрохимического и радиологического исследования почв сельскохозяйственных угодий Республики Беларусь [14].

Перезалужение экспериментальных участков проводили с помощью серийной сельскохозяйственной техники, имеющейся в хозяйствах Брагинского и Хойникского районов: дискова-

ние в 4 следа тяжелыми дисковыми боронами БДТ-7,0 на глубину 10–12 см; вспашку плугом ПЛН-5-35 на глубину 18–20 см; предпосевную культивацию – АКШ-7,2 на глубину 6–8 см; посев травосмеси – агрегатом для перезалужения АПР-2,6 на глубину 2–4 см, агрегатируемых с трактором Т-150К в оптимальные для региона сроки (суходольного и низинного – с 20.04 по 10.05.92 и 97 гг. и пойменного – с 20.07 по 10.08.92 и 97 гг.).

В экспериментах высевали травосмесь (30 кг/га) из многолетних злаковых трав: овсяница луговая + тимофеевка луговая + костреч безостый (14,5 + 10,5 + 5,0 кг/га).

Система применения удобрений в опытах предусматривала внесение доломитовой муки, навоза (только на суходольном луге) и 2/3 дозы азотных, калийных и всей дозы фосфорных удобрений в основное внесение при перезалужении и 1/3 дозы азотных и калийных удобрений в подкормку после проведения укоса. В последующие годы (1993–1996 и 1998–2002 гг.) вносили 1/2 расчетной дозы азотных и калийных удобрений под каждый укос и 1/2 полной дозы фосфорных удобрений весной под 1-й укос. Дозы минеральных удобрений рассчитывали при помощи балансового метода, основанного на знании выноса питательных веществ планируемым урожаем, обеспеченности почвы питательными элементами, а также коэффициентов использования питательных веществ из почвы и удобрений, а известковых – с учетом гидролитической кислотности почв и величины pH_{KCl} для доведения реакции почвенной среды до оптимальных значений. Также проводили корректировку доз минеральных, органических и известковых удобрений с учетом плотности загрязнения почв ^{137}Cs и ^{90}Sr . Использовали следующие виды удобрений: азотные – аммиачная селитра; фосфорные – аммофос; калийные – хлористый калий; известковые – доломитовая мука; органические – подстилочный навоз КРС на солоистой подстилке. Повторность в опытах четырехкратная. Общая площадь делянки: на суходольном и пойменном лугах – 36 м², на низинном – 18 м², учетная – 25 и 10,5 м² соответственно. Схемы опытов приведены в табл. 2–4.

Основные агрохимические показатели почв определяли по общепринятым методикам: гумус – по Тюрину в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26212-91), зольность и содержание органического вещества в торфяно-болотной почве – по ГОСТ 27784-88, pH_{KCl} – потенциометрическим методом (ГОСТ 26483-85), гидролитическую кислотность – по Каппену (ГОСТ 26212-84), сумму поглощенных оснований – по Каппену-Гильковицу (ГОСТ 27821-88), подвижные формы фосфора и калия – по Кирсанову (ГОСТ 26207-91), обменный кальций и магний – на атомно-абсорбционном спектрофотометре ААС-30 (ГОСТ 26487-85), степень насыщенности почв основаниями – расчетным методом [15].

Степень окультуренности луговых почв оценивали с помощью интегрированного показателя – индекса агрохимической окультуренности почв (Иок). Этот показатель используется для количественной оценки плодородия почв Беларуси, варьирует в пределах 0,2–1,0 и рассчитывается на основании относительных индексов обменной кислотности, содержания подвижных форм P_2O_5 , K_2O , гумуса [16].

Содержание ^{137}Cs в образцах определяли на γ -спектрометрических комплексах «Canberra» и «Oxford», а ^{90}Sr – радиохимическим методом по стандартной методике ЦИНАО с радиометрическим окончанием на α - β -счетчике «Canberra-2400». Аппаратурная ошибка измерений не превышала 15%.

Для количественной оценки поступления радионуклидов из почвы в растения рассчитывали коэффициенты пропорциональности (Кп) – отношение содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в единице массы растения (Бк/кг) к плотности загрязнения единицы площади почвы (кБк/м²) [17, 18]. Полученные данные обрабатывали методом дисперсионного и регрессионного анализа с использованием компьютерного программного обеспечения (Excel 7.0, Statistic 7.0) [19].

Результаты и их обсуждение. Результаты экспериментальных исследований (табл. 2–4) показали, что наиболее эффективными способами улучшения, позволяющими получать высокую прибавку урожая сена, отвечающего зоотехническим требованиям и существующим Республиканским допустимым уровням содержания цезия-137 и стронция-90 в сельскохозяйственном сырье и кормах, являются следующие.

Т а б л и ц а 2. Влияние различных способов улучшения сукходольного луга на урожайность сена и накопление ^{137}Cs и ^{90}Sr в естественном травостое и многолетних злаковых сеяных травах, 1992–2002 гг.

Вариант опыта	Урожайность, ц/га		^{137}Cs		^{90}Sr	
	средняя	прибавка к контролю	Бк/кг	Кп Бк/кг:кБк/м ²	Бк/кг	Кп Бк/кг:кБк/м ²
I. Естественный травостой (абсолютный контроль)	11,1	–	4937±700	3,61±0,51	4254±280	18,21±1,20
II. Доломитовая мука 15 т/га + N ₉₀ P ₁₀₀ K ₁₅₀ поверхностно	20,8	9,7	3325±825	2,43±0,61	3130±507	13,40±2,17
III. Дискование без удобрений	16,9	5,8	3867±631	3,54±0,58	3381±980	22,08±6,40
IV. Доломитовая мука 15 т/га, дискование + N ₉₀ P ₁₀₀ K ₁₅₀	51,0	39,9	540±295	0,49±0,27	1209±412	7,90±2,69
V. Дискование, вспашка без удобрений	14,2	3,1	5577±867	3,78±0,59	5747±1282	45,08±10,05
VI. Доломитовая мука 5 т/га, дискование, вспашка, доломитовая мука 10 т/га, дискование + N ₉₀ P ₁₀₀ K ₁₅₀	46,2	35,1	735±130	0,50±0,09	2073±696	16,25±5,45
VII. Подстилочный навоз 60 т/га, дискование, вспашка	36,0	24,9	1141±485	0,77±0,33	2671±663	20,95±5,20
VIII. Подстилочный навоз 60 т/га, доломитовая мука 5 т/га, дискование, вспашка, доломитовая мука 10 т/га, дискование + N ₉₀ P ₁₀₀ K ₁₅₀	70,7	59,6	351±100	0,24±0,07	1375±502	10,78±3,94
НСР ₀₅	2,7		1006		935	

Т а б л и ц а 3. Влияние различных способов улучшения низинного луга на урожайность сена и накопление ^{137}Cs и ^{90}Sr в естественном травостое и многолетних злаковых сеяных травах, 1992–2002 гг.

Вариант опыта	Урожайность, ц/га		^{137}Cs		^{90}Sr	
	средняя	прибавка к контролю	Бк/кг	Кп Бк/кг:кБк/м ²	Бк/кг	Кп Бк/кг:кБк/м ²
I. Естественный травостой (абсолютный контроль)	26,4	–	13152±545	44,15±1,83	530±82	9,36±1,45
II. Доломитовая мука 2 т/га + N ₉₀ P ₆₀ K ₁₃₀ поверхностно	47,9	21,5	7185±1621	24,12±5,44	415±82	7,32±1,45
III. Дискование без удобрений	35,8	9,4	6731±1699	25,34±6,39	446±70	9,68±1,51
IV. Дискование + N ₉₀ P ₆₀ K ₁₃₀	66,1	39,7	3293±711	12,40±2,68	411±76	8,93±1,65
V. Дискование + N ₉₀ P ₆₀ K ₁₃₀ + K ₁₂₀	78,0	51,6	1679±381	6,32±1,43	318±42	6,91±0,92
VI. Доломитовая мука 2 т/га, дискование + N ₉₀ P ₆₀ K ₁₃₀	69,3	42,9	2755±244	10,37±0,92	382±72	8,30±1,56
VII. Доломитовая мука 2 т/га, дискование + N ₉₀ P ₆₀ K ₁₃₀ + K ₁₂₀	77,8	51,4	1477±496	5,56±1,87	312±66	6,76±1,44
VIII. Доломитовая мука 2 т/га, дискование + N ₉₀ P ₆₀ K ₁₃₀ + P ₁₂₀	69,0	42,6	2415±300	9,09±1,13	354±49	7,68±1,06
IX. Дискование, вспашка, доломитовая мука 2 т/га, дискование + N ₉₀ P ₆₀ K ₁₃₀ + K ₁₂₀	97,2	70,8	532±172	2,00±0,64	232±80	5,04±1,73
X. Дискование, вспашка без удобрений	43,3	16,9	3728±626	13,10±2,20	368±35	6,83±0,66
XI. Дискование, вспашка + N ₉₀ P ₆₀ K ₁₃₀	88,8	62,4	1822±718	6,40±2,53	317±33	5,88±0,61
XII. Дискование, вспашка + N ₉₀ P ₆₀ K ₁₃₀ + K ₁₂₀	96,7	70,3	749±243	2,63±0,86	231±35	4,29±0,66
XIII. Дискование, вспашка, доломитовая мука 2 т/га, дискование + N ₉₀ P ₆₀ K ₁₃₀	86,9	60,5	1338±343	4,70±1,20	284±36	5,27±0,67
XIV. Дискование, вспашка, доломитовая мука 2 т/га, дискование + N ₉₀ P ₆₀ K ₁₃₀ + K ₁₂₀	100,9	74,5	644±242	2,26±0,85	208±39	3,87±0,73
XV. Дискование, вспашка, доломитовая мука 2 т/га, дискование + N ₉₀ P ₆₀ K ₁₃₀ + P ₁₂₀	85,2	58,8	1260±348	4,43±1,22	264±54	4,90±1,01
XVI. Доломитовая мука 2 т/га, дискование + N ₉₀ P ₆₀ K ₁₃₀ + K ₁₂₀	80,8	54,4	1099±431	3,86±1,52	262±38	4,86±0,70
НСР ₀₅	3,4		918		50	

Т а б л и ц а 4. Влияние различных способов улучшения пойменного луга на урожайность сена и накопление ^{137}Cs и ^{90}Sr в естественном травостое и многолетних злаковых сеяных травах, 1992–2002 гг.

Вариант опыта	Урожайность, ц/га		^{137}Cs		^{90}Sr	
	средняя	прибавка к контролю	Бк/кг	Кп, Бк/кг:кБк/м ²	Бк/кг	Кп, Бк/кг:кБк/м ²
I. Естественный травостой (абсолютный контроль)	31,3	–	2924±540	3,39±0,63	980±61	13,71±0,86
II. N ₆₀ P ₆₀ K ₁₂₀ поверхностно	58,6	27,3	781±567	0,91±0,65	619±184	8,65±2,57
III. N ₉₀ P ₆₀ K ₁₂₀ поверхностно	67,3	36,0	1050±707	1,22±0,82	714±213	9,99±3,00
IV. N ₉₀ P ₆₀ K ₁₈₀ поверхностно	71,3	40,0	623±504	0,72±0,58	469±204	6,56±2,85
V. Доломитовая мука 3 т/га поверхностно	35,0	3,7	840±692	0,97±0,80	396±15	5,54±0,21
VI. Доломитовая мука 3 т/га + N ₉₀ P ₆₀ K ₁₈₀ поверхностно	73,2	41,9	620±595	0,72±0,69	381±133	5,33±1,86
VII. Дискование без удобрений	39,5	8,2	2144±828	2,48±0,96	1323±643	18,51±9,00
VIII. Дискование + N ₉₀ P ₆₀ K ₁₂₀	72,6	41,3	1044±294	1,21±0,34	561±130	7,85±1,82
IX. Дискование + N ₉₀ P ₆₀ K ₁₂₀ + K ₁₅₀	80,3	49,0	356±303	0,41±0,35	352±53	4,92±0,74
X. Доломитовая мука 3 т/га, дискование+N ₉₀ P ₆₀ K ₁₂₀	76,3	45,0	628±215	0,73±0,25	453±49	6,34±0,68
XI. Доломитовая мука 3 т/га, дискование + N ₉₀ P ₆₀ K ₁₂₀ + K ₁₅₀	88,3	57,0	235±123	0,27±0,14	310±26	4,32±0,36
XII. Дискование, вспашка без удобрений	42,3	11,0	1058±601	1,23±0,70	1106±983	15,46±13,76
XIII. Дискование, вспашка + N ₉₀ P ₆₀ K ₁₂₀	78,2	46,9	607±309	0,70±0,36	380±18	5,32±0,25
XIV. Дискование, вспашка + N ₉₀ P ₆₀ K ₁₂₀ + K ₁₅₀	87,5	56,2	272±175	0,32±0,20	291±47	4,07±0,67
XV. Дискование, вспашка, доломитовая мука 3 т/га, дискование + N ₉₀ P ₆₀ K ₁₂₀	82,8	51,5	383±229	0,44±0,26	357±72	5,00±1,00
XVI. Дискование, вспашка, доломитовая мука 3 т/га, дискование + N ₉₀ P ₆₀ K ₁₂₀ + K ₁₅₀	93,9	62,6	151±75	0,18±0,09	201±34	2,82±0,47
НСР ₀₅	2,6		283		154	

Для суходольного луга – послойное внесение 15 т/га доломитовой муки, 60 т/га подстилочно-го навоза под вспашку с последующим ежегодным внесением минеральных удобрений в дозе N₉₀P₆₀K₁₅₀ под два укоса (вариант VIII), обеспечивающее высокую прибавку урожая сена (до 60 ц/га за два укоса), отвечающего зоотехническим требованиям: содержание сырого протеина – 14,4–16,1%, сырой клетчатки 24,1–28,5%, жира – 3,56–4,32, К₂O – 1,88–2,76%, P₂O₅ – 0,40–0,50%, Са – 0,66–0,78%, Mg – 0,24–0,29%, отношение Са/P – 1,56–1,68 раза, К/(Са+Mg) – 2,02–2,60 раза, питательная ценность 0,50–0,55 к.ед. и содержание ^{137}Cs – 350–450 Бк/кг и ^{90}Sr – 1300–1800 Бк/кг (табл. 2).

Для низинного луга – внесение 2 т/га доломитовой муки и повышенных доз калия в составе полного минерального удобрения N₉₀P₆₀K₂₅₀ (K₁₂₀ под вспашку и K₁₃₀ после вспашки) с последующим ежегодным внесением минеральных удобрений в дозе N₉₀P₆₀K₁₂₀ под два укоса (вариант IX и XIV), обеспечивающее ежегодную прибавку урожая сена в 70–75 ц/га с оптимальными показателями качественного и химического состава: питательная ценность – 0,50–0,51 к.ед., содержание сырого протеина – 14,5–14,7%, сырой клетчатки – 22,9–23,2%, сырого жира – 3,90–3,93%, БЭВ – 50,8–51,1%, К₂O – 2,44–2,46%, P₂O₅ – 0,53–0,54%, Са – 0,83–0,85%, Mg – 0,27–0,28%, отношение Са/P – 1,59–1,61 раза, отношение К/(Са+Mg) – 2,17–2,19 раза и содержание ^{137}Cs – 530–900 Бк/кг и ^{90}Sr – до 260 Бк/кг (табл. 3).

Для пойменного луга – поверхностное внесение 3 т/га доломитовой муки и минеральных удобрений в дозе N₉₀P₆₀K₁₈₀ на естественный травостой пойменного луга под два укоса (вариант VI), обеспечивающее ежегодную прибавку урожая сена до 40–45 ц/га при оптимальных значениях качественного и химического состава травостоя, соответствующих зоотехническим требованиям: содержание сырого протеина – 13,4%, сырой клетчатки – 25,2%, сырого жира – 3,07%, БЭВ – 51,4%, К₂O – 2,23%, P₂O₅ – 0,63%, Са – 0,88%, Mg – 0,35%, отношение Са/P – 1,97 раза, отношение К/(Са+Mg) – 1,84–2,12 раза, питательная ценность – 0,52 к.ед. и содержание ^{137}Cs – 620–1200 Бк/кг, ^{90}Sr – 380–500 Бк/кг (табл. 4).

Установлено, что эффективность применяемых контрмер по снижению поступления радионуклидов на лугах связана с оптимизацией основных агрохимических показателей почв. Так, известкование позволило довести уровень pH_{KCl} до 5,7–6,3, снизить гидролитическую кислотность, увеличить содержание обменного Ca и Mg. Совместное внесение 60 т/га подстилочного навоза, доломитовой муки и фосфорно-калийных удобрений ($P_{100}K_{150}$) при перезалужении суходольного луга и повышенных доз калийных удобрений (K_{250}) при перезалужении низинного и пойменного лугов, а также внесение оптимальных доз минеральных удобрений в течение 11 лет эксплуатации угодий позволило увеличить содержание подвижного K_2O до 200–220 мг/кг на суходольном, до 900–1200 мг/кг на низинном и 250–300 мг/кг на пойменном лугах, повысить степень насыщенности основаниями до 80–90% и индекс агрохимической окультуренности луговых почв до 0,9–1,0 ед., что обеспечило снижение коэффициентов перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr в травостой всех типов лугов [20–23].

На основе результатов исследований установлены оптимальные параметры агрохимических свойств для дерново-подзолистых глееватых, торфяно-болотных глеевых и аллювиальных дерново-глееватых песчаных луговых почв, при достижении которых наблюдаются минимальные величины коэффициентов перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr в травостой суходольного, низинных и пойменных лугов, загрязненных радионуклидами (табл. 5).

Т а б л и ц а 5. **Оптимальные параметры агрохимических свойств и показателей почвенного плодородия основных типов лугов Белорусского Полесья**

Показатель	Суходольные луга (дерново-подзолистые глееватые почвы)	Низинные луга (торфяно-болотные глеевые почвы)	Пойменные луга (дерново-глееватые почвы)
Содержание гумуса, %	2,5–3,0	–	3,5–4,0
Обменная кислотность pH_{KCl}	5,5–6,0	5,5–6,0	6,0–6,5
Подвижный K_2O , мг/кг	200–250	1000–1200	250–300
Подвижный P_2O_5 , мг/кг	200–250	800–1000	200–250
Степень насыщенности основаниями V , %	80–90	80–90	80–90
Июк	0,8–1,0	0,8–1,0	0,8–1,0

Выявлено, что величина **коэффициентов перехода ^{137}Cs** в травостой лугов имеет тесную корреляционную связь со следующими агрохимическими показателями: для *суходольного луга* – со степенью насыщенности основаниями V ($r = -0,83$), с величиной гидролитической кислотности Нг ($r = 0,79$), с содержанием подвижного K_2O ($r = -0,79$); для *низинного луга* – с содержанием подвижного K_2O ($r = -0,79$), с индексом окультуренности ($r = -0,76$), с содержанием органического вещества ($r = 0,73$); для *пойменного луга* – со степенью насыщенности основаниями V ($r = -0,67$), с величиной гидролитической кислотности Нг ($r = 0,66$), с содержанием обменного Ca ($r = -0,65$).

Величина **коэффициентов перехода ^{90}Sr** в травостой зависит от следующих агрохимических показателей: для *суходольного луга* – от величины гидролитической кислотности Нг ($r = 0,66$), индекса окультуренности ($r = -0,65$), степени насыщенности основаниями V ($r = -0,64$); для *низинного луга* – от содержания обменного K_2O ($r = -0,77$), степени окультуренности ($r = -0,75$), содержания органического вещества ($r = 0,65$); для *пойменного луга* – от степени насыщенности основаниями, V ($r = -0,72$), содержания обменного Ca ($r = -0,70$), содержания обменного K_2O ($r = -0,69$), индекса окультуренности ($r = -0,68$) (табл. 6).

На основе достоверной выборки данных за 1992–2002 гг. исследований для каждого типа луга составлены уравнения линейной и множественной регрессий, позволяющие рассчитывать величину коэффициентов перехода радионуклидов в травостой, а также прогнозировать содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr в получаемых кормах по основным агрохимическим показателям луговых почв (табл. 7) [20, 23–25].

Т а б л и ц а 6. Коэффициенты корреляции (r) между Кп, Бк/кг:кБк/м² радионуклидов и агрохимическими показателями почв лугов различных типов

Агрохимический показатель	Суходольный луг		Низинный луг		Пойменный луг	
	$n=320$		$n=640$		$n=320$	
	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr
r						
pH _{KCl}	-0,78	-0,63	-0,51	-0,56	-0,62	-0,63
Hг, смоль/кг	0,79	0,66	0,37	0,35	0,66	0,64
S, смоль/кг	-0,75	-0,61	0,33	0,55	-0,60	-0,62
T, смоль/кг	-0,55	-0,34	0,52	0,70	-0,60	-0,62
V, %	-0,83	-0,64	-0,14	-0,02	-0,67	-0,72
Обменный Са, мг/кг почвы	-0,76	-0,64	0,41	0,60	-0,65	-0,70
Обменный Mg, мг/кг почвы	-0,73	-0,61	0,22	0,38	-0,49	-0,60
Подвижный К ₂ O, мг/кг почвы	-0,79	-0,51	-0,79	-0,77	-0,61	-0,69
Подвижный P ₂ O ₅ , мг/кг почвы	-0,63	-0,54	-0,47	-0,42	-0,42	-0,48
Гумус (органическое вещество), %	0,05	-0,63	0,73	0,65	0,18	0,26
Июк	-0,77	-0,65	-0,76	-0,75	-0,62	-0,68

Т а б л и ц а 7. Уравнения регрессии для определения величины коэффициентов перехода ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в травостой лугов различных типов

¹³⁷ Cs		⁹⁰ Sr	
<i>Суходольные луга на дерново-подзолистых глееватых песчаных почвах</i>			
КП ¹³⁷ Cs = -0,06 V + 4,53	$R^2 = 0,689$	КП ⁹⁰ Sr = 3,97 Hг - 7,01	$R^2 = 0,436$
КП ¹³⁷ Cs = -0,23 К ₂ O + 4,15	$R^2 = 0,624$	КП ⁹⁰ Sr = -35,08 Иок + 34,41	$R^2 = 0,423$
КП ¹³⁷ Cs = 0,59 Hг - 2,04	$R^2 = 0,624$	КП ⁹⁰ Sr = -0,36 V + 35,15	$R^2 = 0,410$
КП ¹³⁷ Cs = -1,60 pH + 9,04	$R^2 = 0,608$	КП ⁹⁰ Sr = -0,026 Са + 34,18	$R^2 = 0,410$
КП ¹³⁷ Cs = -5,48 Иок + 4,26	$R^2 = 0,593$	КП ⁹⁰ Sr = -10,13 pH + 64,36	$R^2 = 0,397$
КП ¹³⁷ Cs = 6,49 - 0,63 pH - 0,0014 Са - 0,10 К ₂ O		$R^2 = 0,659$	
КП ⁹⁰ Sr = 92,0 - 0,015 Са - 0,65 К ₂ O - 27,25 Гумус		$R^2 = 0,581$	
<i>Низинные луга на торфяно-болотных глеевых типичных мощных почвах</i>			
КП ¹³⁷ Cs = -0,39 К ₂ O + 34,53	$R^2 = 0,624$	КП ⁹⁰ Sr = -0,069 К ₂ O + 10,07	$R^2 = 0,593$
КП ¹³⁷ Cs = -62,05 Иок + 56,11	$R^2 = 0,578$	КП ⁹⁰ Sr = -10,43 Иок + 13,56	$R^2 = 0,563$
КП ¹³⁷ Cs = 6,61 орг. в-во - 525,42	$R^2 = 0,533$	КП ⁹⁰ Sr = 0,26 T - 17,95	$R^2 = 0,490$
КП ¹³⁷ Cs = 1,24 T - 100,04	$R^2 = 0,270$	КП ⁹⁰ Sr = 0,97 орг. в-во - 72,45	$R^2 = 0,423$
КП ¹³⁷ Cs = -36,12p H + 214,07	$R^2 = 0,260$	КП ⁹⁰ Sr = 0,0014 Са - 9,02	$R^2 = 0,360$
КП ¹³⁷ Cs = -229,9 - 6,19 pH - 0,22 К ₂ O + 3,5 органическое вещество		$R^2 = 0,648$	
КП ⁹⁰ Sr = -11,53 - 3,94 pH - 0,12 К ₂ O + 0,56 органическое вещество		$R^2 = 0,518$	
<i>Пойменные луга на аллювиальных дерново-глееватых песчаных почвах</i>			
КП ¹³⁷ Cs = -0,12 V + 10,86	$R^2 = 0,449$	КП ⁹⁰ Sr = -0,43 V + 40,80	$R^2 = 0,518$
КП ¹³⁷ Cs = 1,79 Hг - 1,98	$R^2 = 0,436$	КП ⁹⁰ Sr = -0,016 Са + 21,28	$R^2 = 0,490$
КП ¹³⁷ Cs = -0,004 Са + 4,68	$R^2 = 0,423$	КП ⁹⁰ Sr = -0,32 К ₂ O + 11,94	$R^2 = 0,476$
КП ¹³⁷ Cs = -1,79 pH + 10,99	$R^2 = 0,384$	КП ⁹⁰ Sr = -16,91 Иок + 19,18	$R^2 = 0,462$
КП ¹³⁷ Cs = -4,68 Иок + 4,47	$R^2 = 0,384$	КП ⁹⁰ Sr = 5,99 Hг - 3,23	$R^2 = 0,410$
КП ¹³⁷ Cs = -0,085 К ₂ O + 2,38	$R^2 = 0,372$	КП ⁹⁰ Sr = -5,93 pH + 39,87	$R^2 = 0,397$
КП ¹³⁷ Cs = 7,50 - 0,97 pH - 0,00003 Са - 0,036 P ₂ O ₅		$R^2 = 0,436$	
КП ⁹⁰ Sr = 30,84 - 2,0 pH - 0,006 Са - 0,42 К ₂ O		$R^2 = 0,384$	

Выводы

1. Минимальные величины коэффициентов перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr в травостой основных типов лугов Белорусского Полесья (суходольных, низинных и пойменных) наблюдаются при достижении оптимальных значений агрохимических свойств почв и высокого уровня почвенного плодородия (Иок – 0,8–1,0) за счет применения агрохимических и агротехнических приемов их улучшения (контрмер).

2. При улучшении загрязненных радионуклидами суходольных лугов на дерново-подзолистых глееватых песчаных почвах обязательным приемом должно быть внесение органических удобрений (до 60 т/га) под вспашку и доломитовой муки с последующим ежегодным внесением минеральных удобрений в дозе $\text{N}_{60-90}\text{P}_{60}\text{K}_{120-150}$ в два приема ($\text{N}_{30-45}\text{P}_{60}\text{K}_{60-75}$ под 1-й укос и $\text{N}_{30-45}\text{K}_{60-75}$ под 2-й укос).

3. Улучшение загрязненных радионуклидами низинных лугов, представленных торфяно-болотными глеевыми мощными почвами, целесообразно проводить путем внесения повышенных доз калия в составе полного минерального удобрения $\text{N}_{90}\text{P}_{60}\text{K}_{250}$ (K_{120} под вспашку и K_{130} после вспашки) и доломитовой муки с последующим ежегодным внесением минеральных удобрений в дозе $\text{N}_{60-90}\text{P}_{60}\text{K}_{120-180}$ в два приема ($\text{N}_{30-45}\text{P}_{60}\text{K}_{60-90}$ под 1-й укос и $\text{N}_{30-45}\text{K}_{60-90}$ под 2-й укос).

4. На пойменных лугах, представленных аллювиальными дерново-глееватыми песчаными почвами с низкой плотностью радиоактивного загрязнения (до 370 кБк/м² ^{137}Cs и до 11,1 кБк/м² ^{90}Sr) и высокой долей в структуре травостоя злаковых трав, эффективно поверхностное внесение доломитовой муки с ежегодным поверхностным внесением минеральных удобрений в дозе $\text{N}_{60-90}\text{P}_{60}\text{K}_{120-180}$ в два приема ($\text{N}_{30-45}\text{P}_{60}\text{K}_{60-90}$ под 1-й укос и $\text{N}_{30-45}\text{K}_{60-90}$ под 2-й укос).

5. Для прогноза содержания радионуклидов в травостое основных типов лугов в отдаленный период после аварии целесообразно использовать величины коэффициентов перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr , установленных не только по общепринятым показателям (содержание подвижного K_2O и величина обменной кислотности почвы pH), но и целесообразно использовать комплексные агрохимические показатели почвенного плодородия: индекс агрохимической окультуренности почв и степень насыщенности основаниями (для суходольных и пойменных лугов).

6. Величины коэффициентов перехода радионуклидов в травостой суходольных, низинных и пойменных лугов целесообразно определять по уравнениям линейной и множественной регрессий, составленных на основе результатов исследований, полученных в многолетних стационарных опытах.

Литература

1. Фирсакова С. К. Луговые биогеоценозы как критические радиоэкологические системы и принципы ведения лугового хозяйства в условиях радиоактивного загрязнения (на примере Белорусского Полесья после аварии на ЧАЭС): Дис. ... д-ра биол. наук. Обнинск, 1992.
2. Санжарова Н. И. Радиоэкологический мониторинг агроэкосистем и ведение сельского хозяйства в зоне воздействия атомных электростанций: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Обнинск, 1997.
3. Богдевич И. М., Шмигельская И. Д., Тарасюк С. В. // Природ. ресурсы. 1997. № 4. С. 15–28.
4. Фирсакова С. К. Накопление стронция-90 луговыми травами при аэрозольном и почвенном поступлении радионуклида: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1974.
5. Алексахин Р. М., Архипов Н. П., Книжников В. А. и др. Тяжелые естественные радионуклиды в биосфере. Миграция и биологическое действие на популяции и биогеоценозы: Коллективная монография. М., 1990.
6. Gerzabek M. H., Mohamad S. A., Muck K. K. // Commun. Soil Sci. Plant. Anal. 1992. Vol. 23. P. 321–330.
7. Bell J., Bates T. H. // Sci. Total. Environ. 1998. Vol. 69. P. 297–317.
8. Рекомендации по ведению агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель Республики Беларусь на 2003–2005 гг. / Под ред. И. М. Богдевича. Минск, 2003.
9. Алексахин Р. М., Ратников А. Н., Жигарева Т. Л. и др. Рекомендации по ведению растениеводства на радиоактивно загрязненных территориях России. М., 1997.
10. Кашпаров В. О., Лазарев М. М., Перепелятничкова та ін. Ведення сільського господарства в умовах радіоактивного забруднення території України внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС на період 1999–2002 рр.: Методичні рекомендації. МінАПК України. Київ, 1998.
11. Дергунов И. Д., Мороз В. Д., Рябова Г. В. // Почвоведение. 1982. № 5. С. 22–25.
12. Бондарь П. Ф. // Агрохимия. 1983. № 7. С. 69–79.
13. Коноплев А. В., Коноплева И. В. // Радиационная биология. Радиоэкология. 1999. Т. 39. № 4. С. 455–461.

14. Богдевич И. М., Лапа В. В., Барашенко В. В. и др. Крупномасштабное агрохимическое и радиологическое обследования почв сельскохозяйственных угодий Беларуси: Метод. указания. Минск, 2001.
15. Практикум по агрохимии: Учеб. пособие для с.-х. вузов / Под ред. И. Р. Вильдфлуша, С. П. Кукреша. Минск, 1998.
16. Смян Н. И., Зинченко В. С., Богдевич И. М. Оценка плодородия почв Белоруссии. Минск, 1989.
17. Кузнецов А. В., Силин В. И., Павлоцкая Ф. И. и др. Методические указания по определению ^{90}Sr и ^{137}Cs в почвах и растениях. М.: ЦИНАО, 1985.
18. Алексахин Р. М., Корнеев Н. А. Сельскохозяйственная радиоэкология. М., 1991.
19. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. М., 1989.
20. Подоляк А. Г. Влияние агрохимических и агротехнических приемов улучшения основных типов лугов Белорусского Полесья на поступление ^{137}Cs и ^{90}Sr в травостой: Дис. ... канд. с.-х. наук. Гомель, 2002.
21. Vidal M., Campas M., Grebenshchikova N. et al. // Radiation Protection Dosimetry. 2000. Vol. 92. N 1-3. P. 65-70.
22. Подоляк А. Г., Тимофеев С. Ф., Гребенщикова Н. В., Персикова Т. Ф. // Природ. ресурсы. 2001. № 4. С. 103-108.
23. Богдевич И. М., Подоляк А. Г., Арастович Т. В. // Земляроб. і ахова раслін. 2003. № 6. С. 14-16.
24. Подоляк А. Г., Тимофеев С. Ф., Гребенщикова Н. В. и др. // Радиационная биология. Радиоэкология. 2005. Т. 45. № 1. С. 100-111.
25. Подоляк А. Г. // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. 2005. № 6. С. 96-104.

A. G. PODOLYAK, I. M. BOGDEVICH, I. I. IVASHKOVA

PROGNOSIS OF ACCUMULATION OF ^{137}Cs AND ^{90}Sr IN THE HERBAGE OF THE MAIN TYPES OF THE BELARUS POLESSJE MEADOWS UTILIZING AGROCHEMICAL SOIL PROPERTIES

Summary

On the basis of long-term stationary experience it was established that the minimum accumulation of ^{137}Cs and ^{90}Sr in the herbage of the waterless valley, marshed and flood types of the Belarus Polesse meadows contaminated by Chernobyl radionuclides is seen when the optimum basic agrochemical soil properties are achieved with the application of the scientifically reasonable protective measures. It was demonstrated that in the remote period of the accident for the prognosis of radionuclides contents in natural and cultural meadows herbage it is advisable to use of transfer factors (TF_a , $\text{Bq/kg} : \text{kBq/m}^2$) based on the complex agrochemical parameters – basic saturation degree (V , %) and agrochemical cultivation soils index (I_{ac}), which take into account several soil characteristics simultaneously.

This article provides the equations of linear and multiple regressions that can be used to calculate the transfer factors for ^{137}Cs and ^{90}Sr uptake and the herbage contamination degree for the main types of meadows of the region, which will allow one to reduce the volume of forages production (hay, green bulk) that is not adequate to the established permissible levels: Republican allowable levels of the contents of cesium-137 and strontium-90 in agricultural raw material and forages.