

ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ ^{137}Cs В ПОЧВАХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ ОТ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АВАРИИ

Орлов Павел Михайлович, канд. хим. наук, ст. науч. сотр. лаборатории сельскохозяйственной токсикологии, ФГБНУ «ВНИИ агрохимии».

127550, г. Москва, ул. Прянишникова, 31А.

E-mail: alex.orlov1988@gmail.com

Аканова Наталья Ивановна, д-р биол. наук, проф., гл. науч. сотр. лаборатории агрохимического обеспечения координатного земледелия, ФГБНУ «ВНИИ агрохимии».

127550, г. Москва, ул. Прянишникова 31А.

E-mail: N_Akanova@mail.ru

Ключевые слова: почвы, мониторинг, уровень, удобрения, известкование, продукция, загрязнения, калийные, радиационный.

Цель исследований – оценка современного содержания радионуклидов в почве земель сельскохозяйственного назначения, загрязненных чернобыльскими выпадениями. Представлены результаты радиационного мониторинга почв сельскохозяйственных угодий на территориях, загрязненных от чернобыльской аварии. Серьезные проблемы радиоактивного загрязнения почв остаются в Брянской области. В Гордеевском (7,4 Ки/км²), Злыковском (9,6 Ки/км²), Красногорском (6,9 Ки/км²) и Новозыбковском (10,6 Ки/км²) районах среднее содержание ^{137}Cs в почве превышает уровень 5 Ки/км². Это указывает на то, что на радиоактивно загрязненных территориях в районах Брянской области сохраняется риск получения нормативно чистой сельскохозяйственной продукции в течении 2,5-4 периодов полураспада ^{137}Cs (80-120 лет). В Плавском районе Тульской области снижение содержания ^{137}Cs до 1 Ки/км² произойдет в течение 70 лет. Основным типом почв Тульской области являются черноземы, поэтому содержание ^{137}Cs в сельскохозяйственной продукции, которое удовлетворяет нормативам, может быть достигнуто и в более короткие сроки. Высокая культура земледелия является основой снижения концентраций ^{137}Cs и ^{90}Sr в продукции растениеводства. Анализ пространственно-временных изменений показывает, что в течении первых 30 лет после аварии существенно снизились уровни загрязнения почв сельскохозяйственных угодий и сократилась площадь, на которой плотность загрязнения почвы превышает уровень в 1 Ки/км². При этом уменьшилось число субъектов РФ, имеющих сельскохозяйственные угодья с уровнем загрязнения более 1 Ки/км², с 18 (1993 г.) до 9 (2014 г.). При рассмотрении общей радиационной ситуации на сельскохозяйственных угодьях России целесообразно выделить почвы с плотностью загрязнения по ^{137}Cs в интервале 0,3-1,0 Ки/км² в отдельную группу.

После чернобыльской аварии прошло 30 лет. В результате радиоактивного распада содержание радионуклидов в почве сельскохозяйственных угодий, в том числе ^{90}Sr и ^{137}Cs , снизилось и на значительной площади уровень загрязнения ^{137}Cs стал ниже 1 Ки/км².

Цель исследований – оценка современного содержания радионуклидов в почве земель сельскохозяйственного назначения, загрязненных чернобыльскими выпадениями.

Задачи исследований – сопоставление данных по содержанию ^{90}Sr и ^{137}Cs в почве в Российской Федерации в целом с результатами мониторинга в отдельных регионах, а также оценка продолжительности периода снижения содержания ^{137}Cs в почве до 1 Ки/км² в отдельных районах загрязненных территорий.

Материалы и методы исследований. В данной работе использовались результаты по радиоактивному загрязнению территории населенных пунктов Российской Федерации [1] и радиационного локального мониторинга почв сельскохозяйственных угодий [2, 3]. При локальном мониторинге состояние окружающей среды оценивается с точки зрения здоровья человека, что служит самым важным, емким и комплексным показателем состояния окружающей среды. Для проведения оценки динамики содержания техногенных радионуклидов был использован статистический анализ данных мониторинга. Для каждого района субъекта РФ, загрязненного радиоактивными выпадениями от чернобыльской аварии, сформированы множества данных и из этих множеств оценены средние значения, стандартные отклонения и верхние границы типичных уровней загрязнения почв. Как показало радиологическое обследование почв сельхозугодий в 1992-

1993 г. 18 субъектов РФ имели в своем составе территории, на которых уровень загрязнения ^{137}Cs почвы превышал 1 Ки/км² [4]. В настоящее время их осталось только 9.

Результаты исследований. В таблице 1 представлены субъекты РФ, имеющие в своем составе районы с верхней границей уровня загрязнения почв ^{137}Cs более 1 Ки/км². Для каждого района рассчитано время достижения верхних границ уровней загрязнения почвы (значения в 1 Ки/км²). В столбце 4 таблицы 1 оценено время достижения уровня в 1 Ки/км² с учетом радиоактивного распада. Однако, снижение концентрации ^{137}Cs в почве также происходит в результате миграционных процессов. На основе результатов локального радиологического мониторинга на реперных участках сельскохозяйственных угодий загрязненных областей, рассчитан период полувыведения ^{137}Cs из почв, который равен $24 \pm 1,5$ года [2]. С учетом этой величины в столбце 5 таблицы 1 приведено расчетное время спада верхних границ загрязнения до уровня 1 Ки/км².

Серьезные проблемы радиоактивного загрязнения почв остаются в Брянской области. В Гордеевском (7,4 Ки/км²), Злыковском (9,6 Ки/км²), Красногорском (6,9 Ки/км²) и Новозыбковском (10,6 Ки/км²) районах среднее содержание ^{137}Cs в почвах превышает уровень 5 Ки/км².

Таблица 1

Время снижения (годы) верхних границ уровней загрязнения почв ^{137}Cs
до уровня 1 Ки/км² на загрязненной территории для районов

Район области	Среднее	Верхняя граница	Время снижения до уровня 1 Ки/км ²	
	Уровень загрязнения, Ки/км ²		по периоду полураспада $T_{1/2} = 30$ лет	по периоду полувыведения $X_{1/2} = 24$ года
1	2	3	4	5
Брянская область, площадь загрязнения с.-х. угодий 6980 км ² , запас $^{137}\text{Cs} = (25 \pm 8) \cdot 10^3$ Ки				
Гордеевский	7,4	11,5	106	84
Дятьковский	0,9	1,4	15	12
Злыковский	9,6	15,8	120	95
Климовский	3,2	5,1	71	56
Клинцовский	4,4	7,6	88	70
Красногорский	6,9	16,9	123	98
Новозыбковский	10,6	14,7	117	93
Стародубский	1,0	1,7	23	18
Калужская область, площадь загрязнения с.-х. угодий 1620 км ² , запас $^{137}\text{Cs} = (1,8 \pm 0,5) \cdot 10^3$ Ки				
Жиздринский	1,7	3,0	48	38
Людиновский	0,9	1,3	11	9
Ульяновский	2,7	4,1	61	49
Хвастовичский	2,1	3,7	57	45
Орловская область, площадь загрязнения с.-х. угодий 4190 км ² , запас $^{137}\text{Cs} = (3,2 \pm 0,3) \cdot 10^3$ Ки				
Болховский	1,6	2,5	40	32
Глазуновский	0,91	1,5	18	14
Дмитровский	0,91	1,4	15	12
Залегощекинский	0,67	1,4	15	12
Знаменский	0,65	1,2	8	6
Мценский	0,85	1,3	11	9
Свердловский	0,76	1,4	15	12
Троснянский	0,91	1,5	18	14
Урицкий	0,84	1,2	8	6
Тульская область, площадь загрязнения с.-х. угодий 7790 км ² , запас $^{137}\text{Cs} = (10,1 \pm 1,6) \cdot 10^3$ Ки				
Арсеньевский	2,7	3,5	54	43
Белевский	1,2	2,0	30	24
Богородицкий	1,4	2,3	36	31
Воловский	0,74	1,07	3	2
Каменский	0,57	1,2	8	6
Кимовский	0,80	1,3	11	9
Киреевский	1,3	2,3	36	29
Плавский	3,0	5,1	71	56
Теплоогаревский	0,96	1,6	20	16
Узловской	1,7	2,6	42	33

Чернский	1,4	2,4	38	30
Щекинский	0,98	2,2	34	27
Рязанская область, площадь загрязнения с.-х. угодий 5320 км ² , запас ¹³⁷ Cs = (3,8±0,3)·10 ³ Ки				
Корабликовский	1,1	1,7	23	18
Милославский	0,99	1,6	20	16
Михайловский	0,77	1,1	4	3
Ряжский	0,95	1,5	18	14
Скопинский	1,0	1,6	20	16
Старожиловский	0,78	1,1	4	3
Белгородская область, площадь загрязнения с.-х. угодий 1620 км ² , запас ¹³⁷ Cs = (1,8±0,5)·10 ³ Ки				
Красненский	0,87	1,08	3	2,5
Липецкая область, площадь загрязнения с.-х. угодий 1619 км ² , запас ¹³⁷ Cs = (1,0±0,1)·10 ³ Ки				
Краснинский	0,85	1,22	8	6
Воронежская область, площадь загрязнения с.-х. угодий 1320 км ² , запас ¹³⁷ Cs = (0,79±0,05)·10 ³ Ки				
Репьевский	0,81	1,1	4	3
Курская область, площадь загрязнения с.-х. угодий 1220 км ² , запас ¹³⁷ Cs = (1,1±0,2)·10 ³ Ки				
Железногорский	1,1	2,2	34	27
Повыревский	1,1	2,5	40	32

Это указывает на то, что на радиоактивно загрязненных территориях в этих районах Брянской области останутся сложности получения нормативно безопасной по качеству сельскохозяйственной продукции в течении 2,5-4 периодов полураспада ¹³⁷Cs (80-120 лет). В Климовском (3,2 Ки/км²) и Клинцовском (4,4 Ки/км²) районах эти проблемы останутся в течение 1,5-2,0 периодов полураспада (45-60 лет).

В Плавском районе Тульской области снижение содержания ¹³⁷Cs до 1 Ки/км² произойдет в течение 70 лет. Основным типом почв Тульской области являются черноземы. Переход ¹³⁷Cs из черноземов в сельскохозяйственные растения менее значителен по сравнению с другими типами почв. Поэтому содержание ¹³⁷Cs в сельскохозяйственной продукции, которое удовлетворяет нормативам, может быть достигнуто и в более короткие сроки. В Жиздринском, Ульяновском Хвастовичском районах Калужской области и Арсеньевском районе Тульской области снижение содержания ¹³⁷Cs в почве до уровня 1 Ки/км² можно ожидать через 1,5-2 периода полураспада (через 45-60 лет).

В Болховском районе Орловской области, Белевском, Богородицком, Киреевском, Узловском, Чернском и Щекинском районах Тульской области, Железногорском и Повыревском районах Курской области снижение содержания ¹³⁷Cs в почве до уровня 1 Ки/км² наступит приблизительно через 1 период полураспада. С учетом того, что эти загрязненные территории принадлежат к черноземной зоне, снижение до норматива уровней загрязнения сельскохозяйственной продукции, полученной в этих районах, может наступить раньше.

Для загрязненных районов Рязанской, Белгородской, Липецкой, Воронежской и также неотмеченных ранее районов Брянской, Тульской, Калужской и Орловской областей требуется менее 1 периода полураспада. Начало отсчета 1 января 2015 года.

На остальной территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению от чернобыльской аварии, верхняя граница содержания ¹³⁷Cs в почвах сельскохозяйственных угодий стала ниже (или достигла уровня) 1 Ки/км². Результаты мониторинга почв ряда областей Европейской части России, содержание ¹³⁷Cs в которых меньше 1 Ки/км², представлены в таблице 2. Почвы сельскохозяйственных угодий этих областей можно исключить из категории почв, загрязненных ¹³⁷Cs. В настоящее время их следует отнести к почвам, имеющим повышенное, чем в среднем по России, содержание ¹³⁷Cs.

Таблица 2

Содержание ¹³⁷Cs в почве сельскохозяйственных угодий на радиоактивном пятне
и субъекте РФ в целом

Субъект РФ (область)	Среднее содержание, Бк/кг (Ки/км ²)		Верхняя граница, Бк/кг (Ки/км ²)	
	радиоактивное пятно	субъект	радиоактивное пятно	субъект
Рязанская	75 (0,61)	56 (0,46)	106 (0,86)	92 (0,75)
Пензенская	54 (0,44)	35 (0,28)	70 (0,57)	41(0,33)
Мордовия	37 (0,30)	25 (0,20)	60 (0,49)	40 (0,33)

Ульяновская	45 (0,37)	4,1 (0,03)	52 (0,43)	4,6 (0,04)
Белгородская	72 (0,59)	22 (0,18)	91(0,74)	30 (0,24)
Липецкая	62 (0,50)	49 (0,40)	88 (0,71)	71 (0,58)
Воронежская	55 (0,45)	36 (0,29)	71 (0,58)	53 (0,43)
Курская	50 (0,41)	32 (0,26)	94 (0,77)	63 (0,51)
Тамбовская	44 (0,36)	38 (0,31)	54 (0,44)	54 (0,44)
Ленинградская	61 (0,50)	36 (0,29)	85 (0,70)	80 (0,65)
Смоленская	29 (0,24)	13 (0,11)	33 (0,27)	19 (0,15)

Радиологический мониторинг в Нижегородской, Саратовской, Тверской областях и Республиках Чувашия и Татарстан в 1992 и 1993 г. выявил площади радиоактивно загрязненных почв сельскохозяйственных угодий. В настоящее время в этих субъектах РФ радиоактивное загрязнение почв не обнаружено.

Обследование загрязненных территорий в 1992-1994 гг. показало, что уровень загрязнения основных площадей сельскохозяйственных угодий по ^{137}Cs находился в интервале 1-5 Ки/км², причем большинства площадей черноземной зоны – в интервале 1-3 Ки/км² [4, 11]. По истечении 1 периода полураспада ^{137}Cs (30 лет) следовало ожидать, что на значительной части загрязненных сельскохозяйственных угодий содержание ^{137}Cs в почве станет менее 1 Ки/км² (~120 Бк/кг). Современные данные мониторинга (табл. 2) подтверждают этот прогноз.

При рассмотрении общей радиационной ситуации на сельскохозяйственных угодьях России целесообразно выделить почвы с плотностью загрязнения по ^{137}Cs в интервале 0,3-1,0 Ки/км² в отдельную группу. Для этой группы почв внесение повышенных калийных и известковых удобрений не требуется. В практике землепользования важно применять агрохимические и агротехнические приемы снижения уровня загрязнения сельскохозяйственной продукции, проведение которых не требует существенного изменения применяемой технологии возделывания культур и коренной перестройки севооборотов.

Высокая культура земледелия является основой снижения концентраций ^{137}Cs и ^{90}Sr в продукции растениеводства. Результаты многочисленных и многолетних исследований показывают, что из почв, характеризующихся высоким плодородием, техногенные радионуклиды поступают в растения и накапливаются в урожае в значительно меньших количествах, чем из низко плодородных почв [5-10]. Поэтому на почвах с плотностью загрязнения 0,3-1,0 Ки/км² по ^{137}Cs при высокой культуре земледелия, обеспечивающей получение высоких урожаев, следует ожидать относительно низкого уровня загрязнения растительной продукции.

На рисунке 1 представлена динамика содержания ^{137}Cs в почвах реперных и контрольных участков 1991-2016 гг., загрязненных чернобыльскими выпадениями, субъектов РФ (Белгородская, Воронежская, Курская, Липецкая, Пензенская, Саратовская, Тамбовская области, республика Мордовия) и Российской Федерации в целом. Показано, что на загрязненной территории спад радиоактивного загрязнения протекал более быстро, чем в целом для страны.

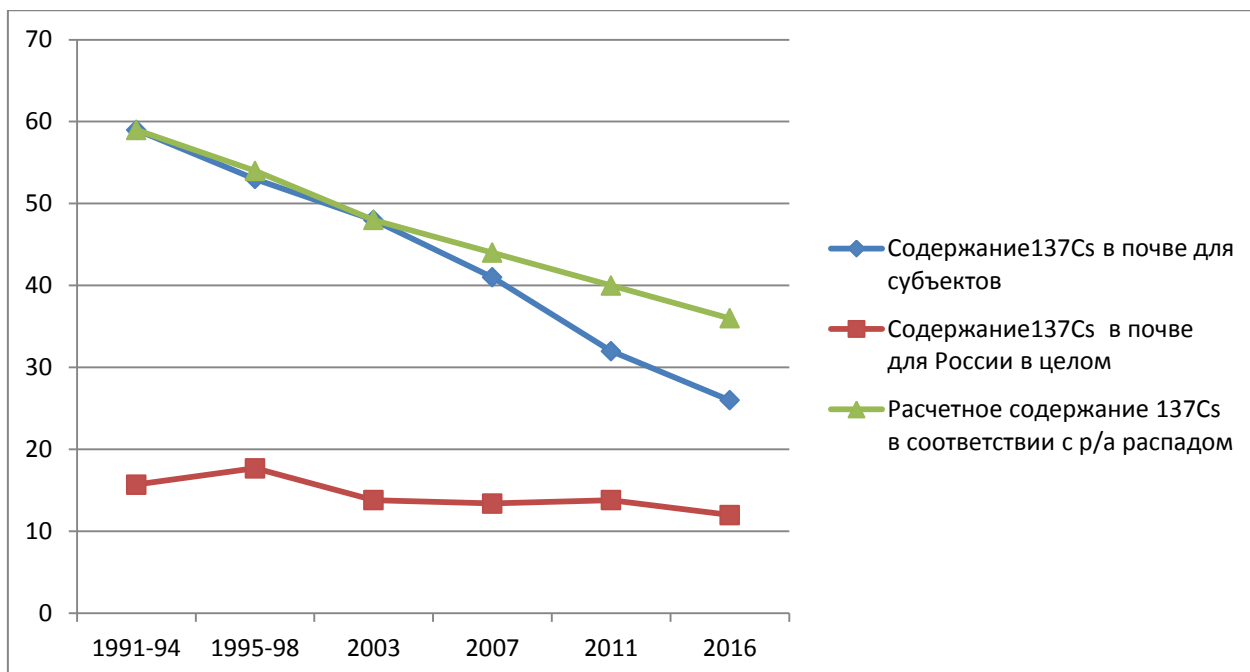


Рис. 1. Изменение во времени среднего содержания ¹³⁷Cs, Бк/кг (Ки/км²), в почвах субъектов РФ, загрязненных чернобыльскими выпадениями, и России в целом

В 2011 г. в Японии на АЭС «Фукусима» произошла радиационная авария. В окружающую среду было выброшено значительное количество ¹³⁷Cs. Эта авария скомпенсировала те положительные тенденции по снижению уровней загрязнения почв радионуклидами, которые наблюдались с 1998 по 2011 г. в целом по России. На рисунке 1 также приведена в соответствии с законом радиоактивного распада ($T_{1/2}=30$ лет) расчетная зависимость снижения содержания ¹³⁷Cs в почве субъектов. Видно, что в натуральных условиях с 2007 г. реальное снижение содержания ¹³⁷Cs в почве происходило интенсивнее в сравнении с расчетным. Это может быть обусловлено дополнительным выносом ¹³⁷Cs с весенним паводком. Более быстрому снижению содержания ¹³⁷Cs в почвах также способствует внесение повышенных доз калийных удобрений. В результате реакций изотопного (ионного) обмена ¹³⁷Cs между цезием (калием и рубидием) почвы и удобрениями часть радионуклида переходит в калийное удобрение и соответственно выносится с полей весенним паводком.

В таблице 3 представлены параметры радиоактивного загрязнения почв Российской Федерации в 2016 г. по данным локального мониторинга: среднее значение равно 12,0 Бк/кг (~ 0,1 Ки/км²), стандартное отклонение – 14 Бк/кг. Верхняя граница загрязнения ¹³⁷Cs почв сельскохозяйственных угодий России составляет 26 Бк/кг (~0,2 Ки/км²). Отметим высокое значение эксцесса, что свидетельствует о том, что во множестве данных, характеризующих загрязнение почв, экстремальные значения встречаются достаточно редко, а большинство результатов группируются вблизи среднего значения.

Таблица 3

Мощность экспозиционной дозы и содержание ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в почвах России, 2016 г.

Статистический параметр	МЭДГ, мкР/ч	Содержание, Бк/кг	
		¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr
Среднее	11,0	12,0	4,7
Стандартное отклонение	2,7	14	3,7
Стандартное отклонение среднего	0,1	0,4	0,1
Эксцесс	0	32	6,5
Количество участков	1088	1167	1070

При обобщении результатов радиологического мониторинга почвы сельскохозяйственных угодий РФ можно условно разделить на три группы.

К 1 группе (по ^{137}Cs) следует отнести радиоактивно загрязненные почвы с плотностью загрязнения больше 1 Ки/км². Для этой группы введена градация по плотности радиоактивного загрязнения (Ки/км²): 1-5; 5-15; 15-40; 40-80; более 80. В эту группу входят почвы загрязненных территорий Брянской, Тульской, Калужской и Орловской областей. При отсутствии крупных радиационных аварий следует ожидать, что спад загрязнения почвы ^{137}Cs будет происходить с периодом полувыведения 24-30 лет. Ввиду того, что уровень загрязнения почв значительно превышает таковые среднестатистические значения по России, то совокупность данных по радиоактивному загрязнению целесообразно выделить в отдельное множество.

К 2 группе следует отнести почвы, имеющие уровень загрязнения ^{137}Cs 30-120 Бк/кг (0,3-1,0 Ки/км², табл. 2). В основном это почвы центральных черноземных областей и Поволжья. Они имеют повышенное содержание ^{137}Cs в почве по сравнению со стандартным содержанием по России. Установлено, что с 1991 по 2011 гг. период полувыведения ^{137}Cs из этих почв составлял $24,0 \pm 1,5$ года [2]. В дальнейшем при приближении среднего содержания ^{137}Cs в почве субъектов к среднему содержанию по РФ следует ожидать увеличения периода полувыведения ^{137}Cs из почвы и замедление спада.

В 3 группу почв следует включить почвы, в которых содержание ^{137}Cs не превышает 37 Бк/кг (менее 0,3 Ки/км²). Большинство сельскохозяйственных угодий России входит в эту группу. Статистические параметры уровней радиоактивного загрязнения почв этой группы с 2003 г. стабильны в пределах погрешности оценки.

Изменение содержания радионуклидов в сельскохозяйственных растениях во времени связано не только со снижением уровней загрязнения почвы в результате радиоактивного распада и миграции, но и с изменением изотопных и ионных соотношений $^{137}\text{Cs}^+/\text{Cs}^+$; $^{137}\text{Cs}^+/\text{Rb}^+$; $^{137}\text{Cs}^+/\text{K}^+$. Вполне возможно, что K^+ и Rb^+ являются групповыми носителями (щелочные металлы) $^{137}\text{Cs}^+$. Внесение калийных удобрений снижает указанные изотопные и ионные соотношения, что способствует снижению коэффициентов накопления (перехода) и уровня загрязнения сельскохозяйственной продукции.

Заключение. Анализ пространственно-временных изменений уровней загрязнения почв сельскохозяйственных угодий показывает, что в течении первых 30 лет после аварии существенно снизились уровни загрязнения и сократились площади угодий, в которых плотность загрязнения почвы превышает уровень в 1 Ки/км². При этом сократилось и число субъектов РФ, имеющих такой уровень загрязнения, с 18 (1992 г.) до 9 (2014 г.). Проблема загрязнения почв и сельскохозяйственной продукции остаются в Гордеевском, Злыковском, Красногорском и Новозыбковском районах Брянской области. Снижение последствий радиоактивного загрязнения почв в этих районах останется актуальным еще несколько десятилетий.