

ОЦЕНКА РИСКОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАДИОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

**П.М. Орлов, к.х.н., Н.И. Аканова, д.б.н., А.А. Ермаков, к.б.н.,
ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова
127434 г. Москва, ул. Прянишникова, 31 а, e-mail: n_akanova@mail.ru**

Представлен анализ результатов динамики содержанием ^{137}Cs радиологического мониторинга почв земель сельскохозяйственного назначения на реперных участках в шести наиболее загрязненных районах Брянской области за 1991-2016 г. Приведена методика расчета мощности поглощенной, эффективной дозы и годовой эффективной дозы внешнего облучения сельскохозяйственных рабочих.

Ключевые слова: почвы, локальный мониторинг, мощность экспозиционной, поглощенной и эффективной дозы, годовая эффективная доза внешнего облучения, загрязнение почв ^{137}Cs .

Для цитирования: Орлов П.М., Аканова Н.И., Ермаков А.А. Оценка рисков загрязнения почв по результатам радиологического мониторинга// Плодородие. – 2024. – №1. – С. 66-70. DOI: 10.25680/S19948603.2024.136.17.

Конечной целью радиационного мониторинга почв РФ является оценка годовых эффективных доз облучения населения. После аварии на Чернобыльской АС сельскохозяйственные угодья 14 субъектов РФ подверглись загрязнению радиоактивными выпадениями. Наиболее интенсивное загрязнение наблюдалось в Брянской области. Нормами радиационной безопасности установлен предел годовой эффективной дозы дополнительного облучения населения в 1 мЗв/год. Эта доза соответствует уровню загрязнения почвы 15 Ки/км².

После Чернобыльской аварии в Брянской области существовали сельскохозяйственные угодья, уровень загрязнения которых превышал 80 Ки/км². Они были выведены из землепользования. Вследствие радиоактивного распада и миграционных процессов содержание ^{137}Cs в почве значительно снизилось. В настоящее время стоит задача возвращения в сельскохозяйственный оборот этих земель. Необходимы работы по реабилитации загрязненных ^{137}Cs почв.

Критической группой населения, проводящей работы на загрязненной территории являются сельскохозяйственные рабочие. При реабилитации загрязненных ^{137}Cs полей, выведенных из землепользования, и сельскохозяйственных работах на полях с высоким уровнем загрязнения, следует оценивать годовые эффективные дозы облучения сельскохозяйственных рабочих. В настоящей работе приводятся методика и результаты оценки мощности поглощенной, эффективной дозы внешнего облучения рабочих на сельскохозяйственных угодьях с глобальным радиационным фоном и на загрязненной после Чернобыльской аварии территории.

Методической основой оценки являются модели формирования дозы внешнего облучения сельскохозяйственного рабочего при проведении сельскохозяйственных работ в полевых условиях как на загрязненной, так и на не загрязненной радионуклидами территории.

Исходными для оценки доз являются экспериментально полученные данные о мощности экспозиционной дозы гамма-излучения, содержание ^{137}Cs , содержание естественных радионуклидов (^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th).

Оценка мощности экспозиционной, поглощенной, эффективной и годовой эффективной дозы. Мощность поглощенной дозы в воздухе рассчитывалась из данных о

мощности экспозиционной дозы, полученной по данным локального мониторинга по формуле:

$$D = fX, \quad (1)$$

где D – мощность поглощенной дозы, мкГр/ч,

X – мощность экспозиционной дозы, мкР/ч,

$$f = 0,00869 \text{ Гр/Р}.$$

Мощность эффективной дозы рассчитывали по формуле

$$H = SgD, \quad (2)$$

где H – мощность эффективной дозы в теле человека, мкЗв/ч,

$Sg = 0,7$, учитывает особенности строения тела человека.

Годовую эффективную дозу внешнего облучения рассчитывали по формуле $H = 6,1qD$, (3)

где H – годовая эффективная доза, мЗв/год, q – индекс облучаемости – время, которое находится человек в поле излучения.

В сельской местности уровень экспозиционной дозы в зданиях и на полях сельскохозяйственных угодий при нормальном радиационном фоне мало различается, поэтому индекс облучаемости принят равным 1 [1]. Результаты представлены в таблицах 1 и 2. В анализируемую совокупность данных не вошли результаты Брянской, Калужской, Тульской и Орловской областей, подвергшихся интенсивному загрязнению от Чернобыльской аварии.

В таблице 1 даны средние значения и интервалы изменения доз для основных типов почв РФ и России в целом. Из таблицы видно, что средние значения доз близки между собой. Минимальное среднее для экспозиционной дозы равно 10,5 мкР/ч – дерново-подзолистые почвы, максимальное 11,6 мкР/ч – черноземы. Средние значения годовых доз находятся в интервале 0,56-0,62 мЗв/год. Погрешности оценки средних значений составляют 1-3 %. Это позволяет применять полученные результаты для оценки естественного радиационного фона на полях сельскохозяйственных угодий в различных расчетах и прогнозах.

В таблице 2 приведены данные о динамике изменения экспозиционной, поглощенной, эффективной и годовой эффективной дозы гамма-излучения за период с 1991 по 2014 г. С 1991 по 2011 г. мощность экспозиционной дозы

и соответственно другие параметры снижались. В 2011 г. отмечалось увеличение мощности экспозиционной дозы до 11,6 мкР/ч, которое связано с известным событием на АЭС «Фукусима». В 2014 и 2016 г. (см. табл. 1) выявлено её последовательное снижение. Временные изменения мощности экспозиционной дозы также были незначительны. Это позволяет принимать значения параметров 2016 г. в дальнейших статистических прогнозах и оценках в качестве естественного радиационного фона на полях сельскохозяйственных угодий.

1. Мощности экспозиционной, поглощенной, эффективной и годовой эффективной доз гамма-излучения на различных типах почвы для сельскохозяйственных рабочих в 2016 г. (по результатам локального мониторинга на реперных участках)

Почвы (количество РУ)	Мощность дозы гамма-излучения			Годовая эффективная доза, мЗв/год
	экспозиционная доза, мкР/ч	поглощенная в воздухе, мкГр/ч	эффективная, мкЗв/ч	
Черноземы (496)	11,6 ± 0,1/ 9,2 – 14,0	0,101±0,001/ 0,080-0,123	0,07±0,00/ 0,056-0,0086	0,62±0,00 0,49-0,75
Дерново-подзолистые (274)	10,5±0,02/ 7,5-13,5	0,091±0,002/ 0,065-0,117	0,064±0,001/ 0,045-0,082	0,56±0,00/ 0,40-0,71
Серые лесные (105)	10,8 ± 0,3/ 8,0-13,6	0,094±0,003/ 0,070-0,118	0,066±0,002/ 0,049-0,083	0,57±0,00/ 0,43-0,72
Каштановые (132)	10,7±0,02/ 7,9-13,5	0,093±0,002/ 0,069-0,117	0,065±0,001/ 0,048-0,082	0,57±0,01/ 0,42-0,71
Дальнего Востока (73)	10,9±0,2/ 9,0-12,7	0,095±0,002/ 0,078-0,111	0,067±0,001/ 0,088-0,078	0,58±0,010,48- 0,68
Россия в целом (1167)	11,1±0,1/ 8,4-13,8	0,096±0,001/ 0,073-0,120	0,067±0,001/ 0,051-0,084	0,59±0,01/ 0,45-0,73

Примечание. До черты – среднее значение ± погрешность среднего, после черты – стандартные интервалы (здесь и в табл. 2, 5, 6, 11, 12).

2. Мощности экспозиционной, поглощенной, эффективной и годовой эффективной дозы гамма-излучения на сельскохозяйственных угодьях России для сельскохозяйственных рабочих (по результатам локального мониторинга на реперных участках)

Период наблюдения (число участков)	Мощность дозы гамма-излучения			Годовая эффективная доза, мЗв/год
	Экспозиционная доза, мкР/ч	Поглощенная в воздухе, мкГр/ч	Эффективная, мкЗв/ч	
1991-1994 (1066)	11,4±0,3/ 9,1-13,7	0,099±0,003/ 0,079-0,119	0,069±0,002/ 0,055-0,081	0,60±0,02/ 0,48-0,73
1995-1998 (1685)	11,2±0,3/ 9,0-13,4	0,097±0,003/ 0,078-0,116	0,068±0,002/ 0,055-0,081	0,59±0,02/ 0,48-0,71
2003 (928)	11,1±0,1/ 7,3-14,9	0,096±0,001/ 0,063-0,129	0,067±0,001/ 0,044-0,090	0,59±0,01/ 0,38-0,71
2007 (1903)	10,8±0,1/ 8,3-13,3	0,094±0,001/ 0,072-0,116	0,066±0,001/ 0,050-0,081	0,57±0,01/ 0,44-0,71
2011 (1338)	11,6±0,1/ 7,8-15,4	0,100±0,001/ 0,068-0,134	0,070±0,001/ 0,048-0,094	0,61±0,01/ 0,41-0,82
2014 (869)	11,4±0,1/ 8,5-14,3	0,099±0,001/ 0,074-0,124	0,069±0,001/ 0,052-0,087	0,60±0,01/ 0,45-0,76

На мощность экспозиционной дозы влияют несколько независимых друг от друга параметров: содержание естественных радионуклидов в почве, солнечная активность, вторичное космическое излучение, содержание

гамма-излучающих техногенных радионуклидов в почве, радиоактивные эманации из почвы. При нормальном радиационном фоне (отсутствие интенсивного техногенного загрязнения почвы радионуклидами) основной вклад в формирование экспозиционной дозы вносят естественные радионуклиды.

Радионуклиды всегда присутствуют в окружающей среде. При распаде естественных радионуклидов образуются альфа- и бета – частицы и электромагнитное излучение. Поскольку органы и ткани человека экранированы толщей ткани, по крайней мере в несколько миллиметров, то практически полностью поглощается вся энергия альфа- и бета-частиц. Следует рассматривать вклад в дозу внешнего облучения только гамма – квантов.

Оценка поглощенной, эффективной и годовой эффективной дозы внешнего облучения от естественных радионуклидов. Все природные радионуклиды можно отнести к одному из двух классов: нуклиды земного происхождения и нуклиды космогенные. Космогенные нуклиды рождаются главным образом при взаимодействии космического излучения с ядрами атомов атмосферы. Из нуклидов земного происхождения основной вклад во внешнее облучение вносят ⁴⁰K и нуклиды радиоактивных семейств ²³⁸U, ²³²Th. Они являются долгоживущими радионуклидами, которые существовали в земной коре на протяжении всей ее истории.

Концентрация радионуклидов в почве зависит от радиоактивности пород, из которых образовалась почва, а также процессов выщелачивания почв грунтовыми водами, увеличения пористости почв и заполнения образовавшихся пор водой и органическими веществами. Сорбция радионуклидов почвами, осаждение радионуклидов из поступающих в почву вод приводят к повышению радиоактивности почв.

Исследование содержания естественных радионуклидов (ЕРН) в почвах России приведено в таблицах 3, 4. В основу расчета положены данные радиационного мониторинга почв сельскохозяйственных угодий [2, 3].

3. Содержание ЕРН в основных типах почв России, Бк/кг

Статистические параметры	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
<i>Черноземы</i>			
Среднее значение	23,1±0,5	31,7±0,5	500±10
Стандартный интервал	12-34	22-42	390-610
Экссесс (без размерности)	8,1	3,4	0
Число участков	389	393	387
<i>Дерново-подзолистые почвы</i>			
Среднее значение	19,8±0,6+	23,8±0,6	480±10
Стандартный интервал	11-29	14-33	300-660
Экссесс (без размерности)	-0,5	1,0	-0,5
Число участков	254	254	228
<i>Серые лесные почвы</i>			
Среднее значение	18,9±0,8	28,2±0,9	400±20
Стандартные интервалы	11-27	19-38	240-560
Экссесс (без размерности)	-0,2	-0,1	-0,5
Число участков	100	100	92
<i>Каштановые почвы</i>			
Среднее значение	18,4±0,8	27,4±0,8	540±10
Стандартный интервал	10-26	19-36	430-650
Экссесс (без размерности)	-0,6	-0,2	1,1
Число участков	101	103	103
<i>Почвы Дальнего Востока</i>			
Среднее значение	26,5±1,5	36,5±1,3	510±20
Стандартный интервал	12-41	25-48	360-660
Экссесс (без размерности)	1,1	-0,7	-0,3
Число участков	91	91	91

В таблице 4 представлено распределение ЕРН в почвах сельскохозяйственных угодий различного

гранулометрического состава. Наблюдается немонотонное увеличение содержания ^{226}Ra от песчаных почв к тяжелосуглинистым. Содержание ^{232}Th последовательно возрастает от песчаных и супесчаных почв к глинистым почвам. Содержание ^{40}K в песчаных и супесчаных почвах ниже по сравнению с другими типами почв.

4. Содержание ЕРН в почвах сельскохозяйственных угодий России различного гранулометрического состава, Бк/кг

Показатель	^{226}Ra	^{232}Th (^{238}Ra)	^{40}K
<i>Песчаные и супесчаные почвы</i>			
Среднее содержание	19,2±0,8	19,2±0,8	410±20
Стандартный интервал	11-28	11-28	230-590
Экссесс (без размерности)	-0,6	0,4	-0,9
Число участков	102	102	85
<i>Легкосуглинистые почвы</i>			
Среднее содержание	22,3±0,8	27,6±0,7	520±10
Стандартный интервал	12-32	19-36	380-660
Экссесс (без размерности)	0,4	7,3	0,1
Число участков	168	168	155
<i>Среднесуглинистые почвы</i>			
Среднее содержание	21,6±0,5	28,8±0,5	490±10
Стандартный интервал	12-31	20-38	350-630
Экссесс (без размерности)	4,6	4,8	0,7
Число участков	269	272	272
<i>Тяжелосуглинистые почвы</i>			
Среднее содержание	23,6±0,7	32,8±0,6	520±20
Стандартный интервал	11-36	21-44	240-800
Экссесс (без размерности)	5,4	0,7	150
Число участков	293	297	286
<i>Глинистые почвы</i>			
Среднее содержание	19,9±0,9	36,0±1,0	520±10
Стандартный интервал	12-28	27-45	410-630
Экссесс (без размерности)	-0,6	0,7	0,7
Число участков	73	72	73

Мощность поглощенной дозы от ЕРН может быть оценена по формуле

$$D = 4,3 \cdot 10^{-5} C_K + 4,2 \cdot 10^{-4} C_U + 6,6 \cdot 10^{-4} C_{Th}, \quad (4)$$

где D – мощность поглощенной дозы в воздухе, мкГр/ч; C_K , C_U , C_{Th} – концентрации ^{40}K , ^{238}U и ^{232}Th в почве, Бк/кг.

При выводе формулы 4 предполагалось равномерное распределение радионуклидов по глубине. Плотность этой почвы равна $1,6 \text{ г/см}^3$, а химический состав таков (%):

$\text{SiO}_2 - 67,5$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 13,5$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 4,5$; $\text{CO}_2 - 4,5$; $\text{H}_2\text{O} - 10$.

В цепочке распада ^{238}U гамма-излучение радионуклидов от ^{238}U до ^{226}Ra не вносит существенного вклада в формирование мощности поглощенной дозы, основные гамма-излучающие радионуклиды находятся за ^{226}Ra . В формуле 1 допустима замена содержания ^{238}U в почве на содержание ^{226}Ra (см. табл. 3, 4).

Для типичных условий естественного радиационного фона слой почвы, который вносит основной вклад в облучение на поверхности Земли, имеет толщину около 30 см.

В таблице 5 приведены результаты оценок мощности поглощенной, эффективной и годовой дозы от естественных радионуклидов для различных типов почв. Минимальное значение стандартного интервала равно $0,17 \text{ мЗв/год}$ и соответствует дерново-подзолистым почвам, максимальная верхняя граница составляет $0,41 \text{ мЗв/год}$ и соответствует почвам Дальнего Востока. Таким образом, годовые эффективные дозы на различных типах почвы находятся в интервале $0,16 - 0,47 \text{ мЗв/год}$. Из совокупности средних значений максимальное соответствует почвам Дальнего Востока.

5. Мощности поглощенной, эффективной и годовой доз от естественных радионуклидов для различных типов почв

Почвы	Поглощенная в воздухе доза, мкГр/ч	Эффективная, мкЗв/ч	Годовая эффективная, мЗв/год
Черноземы	0,053±0,001/ 0,037-0,068	0,037±0,001/ 0,26-0,048	0,32±0,06/ 0,23-0,41
Дерново-подзолистые	0,045±0,001/ 0,027-0,062	0,032±0,001/ 0,019-0,043	0,27±0,02/ 0,16-0,38
Серые лесные	0,044±0,02/ 0,027-0,060	0,031±0,02/ 0,19-0,42	0,27±0,02/ 0,17-0,37
Каштановые	0,049±0,001/ 0,035-0,063	0,034±0,001/ 0,025-0,044	0,30±0,01/ 0,21-0,38
Дальнего Востока	0,057±0,002/ 0,037-0,077	0,040±0,002/ 0,026-0,054	0,35±0,01/ 0,23-0,47
Россия в целом	0,050±0,001/ 0,032-0,067	0,035±0,001/ 0,022-0,047	0,31±0,01/ 0,20-0,41

При изучении распределения мощности годовой эффективной дозы для почв различного гранулометрического состава отмечается, что минимальное значение стандартного интервала наблюдается в тяжелосуглинистых почвах, в тех же почвах отмечаются средняя ($0,33 \text{ мЗв/год}$) и максимальная ($0,48 \text{ мЗв/год}$) границы. В целом по России стандартные годовые дозы внешнего облучения находятся в интервале $0,20-0,41 \text{ мЗв/год}$.

6. Мощности поглощенной, эффективной и годовой доз от естественных радионуклидов для почв различного гранулометрического состава

Почвы по гранулометрическому составу	Поглощенная в воздухе доза, мкГр/ч	Эффективная, мкЗв/час	Годовая эффективная, мЗв/год
Песчаные и супесчаные	0,038±0,002/ 0,031-0,056	0,027±0,002/ 0,022-0,039	0,23±0,02/ 0,19-0,24
Легкосуглинистые	0,050±0,01/ 0,034-0,067	0,035±0,001/ 0,024-0,047	0,31±0,01/ 0,21-0,41
Среднесуглинистые	0,050±0,01/ 0,033-0,066	0,035±0,001/ 0,23-0,046	0,31±0,01/ 0,20-0,40
Тяжелосуглинистые	0,054±0,02/ 0,029-0,079	0,038±0,001/ 0,020-0,055	0,33±0,01/ 0,18-0,48

Для сравнения с полученными данными в таблице 7 представлены средние концентрации ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th в почвах различных типов в мире. Значения мощности поглощенной дозы в воздухе были рассчитаны исходя из предположения, что все продукты распада ^{238}U и ^{232}Th находятся в радиоактивном равновесии со своими предшественниками (табл. 8).

7. Среднее содержание ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th в почвах различных типов, Бк/кг [1]

Почвы	^{238}U	^{232}Th	^{40}K
Сероземы	48	31	670
Серо-коричневые	41	28	700
Каштановые	27	37	555
Черноземы	22	36	400
Серые лесные	18	27	370
Дерново-подзолистые	15	22	300
Подзолистые	9	12	150
Торфянистые	6	6	90

При сравнении данных, характерных для почв России и мира, можно видеть, что они согласуются между собой. Следует отметить, что мы не располагаем представительными данными о содержании естественных радионуклидов и мощностях поглощенных доз в сероземах, серо-коричневых, подзолистых и торфяных почвах. При необходимости оценки радиационной ситуации в названных почвах в России рекомендуется использовать мировые данные.

8. Мощности поглощенной, эффективной и годовой доз от естественных радионуклидов для различных типов почв в мире [1]

Почвы	Поглощенная в воздухе доза, мкГр/ч	Эффективная, мкЗв/ч	Годовая эффективная, мЗв/год
Сероземы	0,074	0,052	0,45
Серо-коричневые	0,069	0,048	0,42
Каштановые	0,060	0,042	0,37
Черноземы	0,051	0,036	0,31
Серые лесные	0,041	0,029	0,25
Дерново-подзолистые	0,034	0,024	0,21
Подзолистые	0,018	0,013	0,11
Торфянистые	0,011	0,008	0,07

Оценка годовой эффективной дозы внешнего облучения от содержания ^{137}Cs в почве. При высоких уровнях загрязнения почвы ^{137}Cs вклад гамма излучения ^{137}Cs в формирование экспозиционной дозы становится значительным. Ряд полей сельскохозяйственных угодий Брянской области были выведены из землепользования из-за высокого содержания ^{137}Cs в почве (более 80 Ки/км²). За время, прошедшее после аварии на АЭС, содержание ^{137}Cs в почве снизилось более чем в 2 раза. Возвращение полей в землепользование возможно. Соответственно необходимы реабилитационные мероприятия. Вопрос оценки дополнительного радиационного облучения сельскохозяйственных рабочих при проведении реабилитационных работ актуален.

Мощность экспозиционной дозы гамма-излучения является быстрым и простым в измерении параметром. Исследование может быть проведено на местности. Нормами радиационной безопасности установлен предел доз дополнительного облучения для населения в 1 мЗв/год [4].

Загрязнение почвы ^{137}Cs обуславливает вклад в формирование дозы внешнего облучения человека. В зависимости от уровня загрязнения этот вклад может превышать дозу от естественных радионуклидов.

Среднегодовая эффективная доза внешнего облучения (H_1) рассчитывается по формуле

$$H_1 = \frac{B_1 \cdot K_1}{J} \left(\omega + \frac{1-\omega}{K_x} \right), \quad (5)$$

где B_1 – дозовый коэффициент внешнего облучения, т.е. мощность эквивалентной дозы поля внешнего облучения от поверхностного загрязнения ^{137}Cs почвы 1 Ки/км² на высоте 1 м ($B = 0,341$ мЗв·км²/год Ки;

K_1 – фактор самопоглощения гамма-излучения в пахотном слое при равномерном распределении в нем ^{137}Cs ($K_1 = 0,4$);

J – коэффициент изотропности, учитывающий самоэкранирование тела человека в поле внешнего гамма-излучения (для ^{137}Cs $J=1,5$);

ω – доля времени пребывания человека на открытой местности (в среднем за год $\omega=0,5$);

K_x – кратность ослабления внешнего гамма-излучения деревянной жилой застройки (для гамма-излучения ^{137}Cs $K_x= 2,5$).

Подстановка этих значения в формулу 5 дает величину $H_1 = 0,0637$ мЗв· км²/год Ки, которая будет одинаковой для всех типов почв [5].

На глобальном уровне вклад ^{137}Cs в годовую эффективную дозу внешнего облучения может быть рассчитан из данных радиационного мониторинга почв сельскохозяйственных угодий России. Основное количество ^{137}Cs в почву было внесено при испытаниях ядерного оружия в 60-

х годах прошлого столетия. Оно обусловило глобальный уровень радиоактивного загрязнения почвы ^{137}Cs .

В таблице 9 представлены данные о содержании ^{137}Cs в основных типах почв России. В анализируемую совокупность данных не вошли показатели загрязнения почвы ^{137}Cs Брянской, Калужской, Орловской и Тульской областей, подвергшихся интенсивному загрязнению от Чернобыльской аварии. Они образуют отдельное множество, а расчет доз облучения сельскохозяйственных рабочих в названных областях будет приведен позже.

9. Содержание ^{137}Cs в основных типах почв России, Бк/кг (Ки/км²) (2016 г.) [2]

Почвы	Среднее значение	Стандартный интервал	Число участков
Черноземы	15,9 (0,13)	< 32 (0,26)	550
Дерново-подзолистые	8,4 (0,07)	< 18 (0,15)	282
Серые лесные	12,1(0,1)	< 33 (0,27)	111
Каштановые	8,1 (0,07)	5- 12 (0,04-0,10)	136
Дальний Восток	5,2 (0,04)	3 -8 (0,02-0,06)	73
Россия в целом	12 (0,1)	< 26 (0,21)	1152

В таблице 10 приведены годовые эффективные дозы облучения ^{137}Cs для основных почв России. При сравнении данных таблицы 12 с дозами от естественных радионуклидов видно, что дозы от ^{137}Cs на глобальном уровне загрязнения существенно ниже доз от ЕРН (см. табл. 6).

10. Годовая эффективная доза облучения ^{137}Cs сельскохозяйственных рабочих для основных типов почв России, мЗв/год

Почвы	Среднее значение	Стандартный интервал
Черноземы	0,008	< 0,02
Дерново-подзолистые	0,004	< 0,01
Серые лесные	0,006	< 0,02
Каштановые	0,004	0,003-0,006
Дальний Восток	0,003	0,002 -0,004
Россия в целом	0,006	< 0,013

В загрязненных от Чернобыльской аварии областях количество ^{137}Cs в почве в 10-100 раз превышает глобальное содержание. Соответственно, вклад названного радионуклида в формирование доз внешнего облучения сельскохозяйственного рабочего будет существенно выше по сравнению с глобальным. В таблице 11 приведены уровни загрязнения почвы ^{137}Cs в 2014, 2022 и 2025 г., в таблице 12 – годовые эффективные дозы облучения.

11. Уровни загрязнения почв ^{137}Cs в наиболее загрязненных районах Брянской области, Ки/км² [6]

Район	Среднее значение/ стандартный интервал		
	2014 г.	2022 г.	2025 г.
Гордеевский	7,4/ 3,3-11,5	6,0/2,6-9,4	5,6/2,6-8,6
Злыковский	9,8/4,6-15,0	8,0/3,8-12,2	7,4/3,5-11,3
Климовский	5,3/3,4-7,2	4,3/2,7-5,9	4,0/2,6-5,4
Клинцовский	4,5/1,4-7,6	3,7/1,2-6,2	3,4/1,1-5,7
Красногорский	7,0<17	5,7/<13,9	5,3/<12,8
Новозыбковский	10,8/6,9-14,7	8,8/5,6-12,0	8,1/5,2-11

12. Годовые эффективные дозы внешнего облучения в наиболее загрязненных районах Брянской области, мЗв/год

Район	Среднее значение/ стандартный интервал		
	2014 г.	2022 г.	2025 г.
Гордеевский	0,50/0,22-0,78	0,38/0,17-0,60	0,36/0,16-0,56
Злыковский	0,62/0,29-0,95	0,51/0,24-0,78	0,47/0,22-0,72
Климовский	0,34/0,22-0,46	0,27/0,17-0,38	0,25/0,17-0,34
Клинцовский	0,29/0,09-0,48	0,24/0,08-0,39	0,22/0,07-0,36
Красногорский	0,45/<1,1	0,36/<0,88	0,34/<0,81
Новозыбковский	0,69/0,44-0,93	0,55/0,35-0,75	0,52/0,33-0,70

Из таблицы 12 следует, что годовые эффективные дозы облучения сельскохозяйственного рабочего в шести, наиболее загрязненных районах Брянской области, не превышают значение 1 мЗв/год – предел годовой дозы для населения, определенный нормами радиационной безопасности [5]. Можно полагать, что в настоящее время проживание и производственная деятельность на загрязненной радионуклидами от Чернобыльской аварии территории не приведут к превышению годовых доз внешнего облучения сельскохозяйственных рабочих в 1 мЗв.

После Чернобыльской аварии в Брянской области появились сельскохозяйственные угодья с уровнем загрязнения почвы более 80 Ки/км². Эти сельскохозяйственные угодья были выведены из землепользования. В результате радиоактивного распада ¹³⁷Cs и миграционных процессов уровень радиоактивного загрязнения на выведенных из землепользования территориях снизился более чем в 2 раза. Возможен возврат этих территорий в сельскохозяйственное производство.

Следует отметить, что в формулу 5 входит параметр K₁ – фактор самопоглощения гамма – излучения в пахотном слое (20 см) при равномерном распределении в нем ¹³⁷Cs (K₁ = 0,4). На непашотных сельскохозяйственных угодьях ¹³⁷Cs находится в 5 см слое почвы, поэтому фактор самопоглощения имеет другое численное значение. Было рассчитано численное значение фактора самопоглощения гамма-излучения ¹³⁷Cs почвой для различных слоев.

Фактор самопоглощения мощности эффективной дозы от глубины распространения по профилю почвы ¹³⁷Cs приведен ниже.

Глубина распространения по профилю почвы ¹³⁷ Cs, см	Фактор самопоглощения мощности эффективной дозы ¹³⁷ Cs
0	1,0
5	0,80
10	0,60
15	0,50
20	0,40
25	0,30
30	0,25

На непашотных сельскохозяйственных угодьях фактор самопоглощения в 2 раза больше, чем на пахотных. Соответственно, мощность эффективной дозы также увеличится в 2 раза.

Расчет ориентировочно допустимого времени пребывания сельскохозяйственного рабочего за 1 год на облученных сельскохозяйственных угодьях при реабилитационных работах. С момента радиоактивных выпадений на сельскохозяйственные угодья России и Беларуси после Чернобыльской аварии прошло более 35 лет. После систематического радиологического обследования территории были выявлены сельскохозяйственные угодья с уровнем загрязнения почвы ¹³⁷Cs более 80 Ки/км², которые вывели из землепользования. В настоящее время уровень загрязнения почвы в результате радиоактивного распада и миграционных процессов снизился более чем в 2 раза. Актуален вопрос о возвращении земель, выведенных из сельскохозяйственного производства. С этой

целью необходимы реабилитационные мероприятия на радиоактивно загрязненных полях.

Критической группой населения, подвергшейся радиоактивному облучению при реабилитационных работах, будут сельскохозяйственные рабочие. Нормами радиационной безопасности определен верхний предел дополнительного годового облучения населения в 1 мЗв/год.

В данной статье приводится метод оценки времени пребывания сельскохозяйственных рабочих в течение года на сельскохозяйственных угодьях, подлежащих реабилитации.

Необходимо провести измерение мощности экспозиционной дозы гамма – излучения на поле, подлежащем реабилитации, в 8-10 точках. Рассчитать среднее значение результатов измерений (X_{ср}, мкр/ч). Оценить увеличение мощности экспозиционной дозы, связанной радиоактивным загрязнением (ΔX, мкр/ч), по сравнению со средним значением мощности экспозиционной дозы, характерной для почв России (X₁ = 11,1 мкр/час, табл.1) по формуле:

$$\Delta X = X_{cp} - X_1. \quad (6)$$

Исходя из ΔX, рассчитать прирост мощности поглощенной дозы в воздухе (ΔD, мкГр/час) и эффективной дозы (ΔH, мкЗв/ч). По формуле 7 рассчитать допустимое время пребывания (t, час/год) сельскохозяйственного рабочего на реабилитационном поле:

$$t = 1000(1 - H_g) / \Delta H, \quad (7)$$

где H_г – годовая эффективная доза облучения, которую получает сельскохозяйственный рабочий, работая и проживая в данной местности (населенном пункте) по формуле 5.

При среднем уровне загрязнения почвы ¹³⁷Cs 15,7 Ки/км² средняя годовая эффективная доза (H_г) для сельскохозяйственного рабочего равна 1 мЗв/год. Не рекомендуется привлекать сельскохозяйственных рабочих, проживающих в населенных пунктах с уровнем загрязнения почвы ¹³⁷Cs более 15,7 Ки/км² к работе на реабилитационных сельскохозяйственных угодьях.

Проведенная оценка позволит снизить риски ущерба здоровью сельскохозяйственных рабочих при проведении ими реабилитационных мероприятий.

Литература

1. Источники и действие ионизирующей радиации. Научный комитет организации объединенных наций по действию атомной радиации. Доклад за 1977 г. Генеральной Ассамблее с приложениями, т.1, Организация объединенных наций – Нью-Йорк, 1978.
2. Орлов П.М., Аканова Н.И. Результаты радиационного мониторинга почв на реперных участках сельскохозяйственных угодий Российской Федерации // Международный сельскохозяйственный журнал. – 2020. – № 1. – С. 27-32.
3. Орлов П.М., Сычев В.Г., Аканова Н.И. Естественные радионуклиды в почвах России и фосфатных рудах планеты// Международный сельскохозяйственный журнал. – 2020. – № 4. – С. 62-67.
4. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99) СП 2.6.1. 758-99.
5. Козлов В.Ф. Справочник по радиационной безопасности. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
6. Орлов П.М., Аканова Н.И. Периоды полувыведения и миграционная способность ¹³⁷Cs из почв, загрязненных Чернобыльскими выпадениями на территории Брянской, Калужской, Тульской и Орловской областей// Международный сельскохозяйственный журнал. – 2021. – № 5. – С. 101-104.

ASSESSMENT OF SOIL CONTAMINATION RISKS BASED ON THE RESULTS RADIOLOGICAL MONITORING

Orlov P.M., Akanova N.I., Ermakov A.A.

Pryanishnikov Institute of Agrochemistry, Pryanishnikova ul. 31a, Moscow, 127434, Russia, e-mail: n_akanova@mail.ru

The article presents the results of the analysis of the results of the dynamics of the content of ¹³⁷Cs radiological monitoring of soils of agricultural lands on reference plots in the 6 most polluted districts of the Bryansk region for the period 1991 – 2016. A method for calculating the rate of absorbed, effective dose and annual effective dose of agricultural workers is presented.

Keywords: soils, local monitoring, exposure, absorbed and effective dose rate, annual effective dose of external radiation, soil pollution ¹³⁷Cs.