

УДК 631.95.577.346+519.252

ФОРМИРОВАНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ТРАВЯНИСТЫХ РАСТЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ

Переволоцкий А.Н., Переволоцкая Т.В. (ВНИИРАЭ, г. Обнинск)

e-mail: forest_rad@mail.ru

На земном шаре есть регионы с повышенным содержанием в почвенном покрове естественных радионуклидов (^{40}K , ^{238}U и ^{232}Th). К ним относятся районы добычи и переработки урановых руд [1, 2]. В их пределах наблюдается повышенная доза облучения относительно территорий со среднемировым содержанием этих радионуклидов в почве [3–5]. Как правило, оценивают внутреннее α -, β - и внешнее γ -облучение биоты, однако внешнее β -излучение остается вне внимания исследователей [6]. В то же время последнее в однородных средах с низкой плотностью, к которым можно отнести травянистые растения, определяет многократное взаимодействие β -частиц с элементами наземной фитомассы и способно привести к дополнительной дозе облучения [7, 8].

Цель настоящего исследования — изучение закономерностей формирования мощности поглощенной дозы облучения травянистых растений при их произрастании на территории с повышенным содержанием естественных радионуклидов в почве.

Материалы и методика. Исходными данными для расчета мощности поглощенной дозы послужила удельная активность ^{40}K , ^{238}U , ^{226}Ra и ^{232}Th в поверхностном слое почвы, на территории ПАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение» и рекультивационных отвалах Лермонтовского производственного объединения «Алмаз» (табл. 1) [1–5].

Т а б л и ц а 1. Удельная активность естественных радионуклидов в почве, Бк/кг

Радионуклид или родоначальник семейства (подсемейства)	[1]	ПАО «ППГХО» [3]	ЛПО «Алмаз» [5, 6]
^{40}K	140—850	610—730	320—1700
^{238}U	16—110	45—205	90—1300
^{226}Ra	17—60	22—127	45—600
^{232}Th	11—64	40—56	27—260

При известной удельной активности родоначальников семейств ^{238}U и ^{232}Th и подсемейств

ва ^{226}Ra предполагали наличие установившегося радиоактивного равновесия между ними и остальными радионуклидами, входящими в состав их радиоактивных цепочек [9]. Так, для ^{238}U принимали условие равновесия с дочерними радионуклидами, входящими в состав цепочки распада до ^{226}Ra : ^{234}Th с дочерним ^{234m}Pa , ^{234}U , ^{230}Th . Предполагали радиоактивное равновесие ^{226}Ra с короткоживущими продуктами распада в составе его подсемейства ^{222}Rn , ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po , а также радионуклидами подсемейства ^{210}Pb и ^{210}Po . Для ^{232}Th принято радиоактивное равновесие с родоначальниками подсемейств ^{228}Ra в равновесии с дочерним ^{228}Ac и ^{228}Th в равновесии с дочерними ^{224}Ra , ^{220}Rn , ^{216}Po , ^{212}Pb , ^{212}Bi , ^{212}Po , ^{208}Tl .

Травянистые растения, формирующие травостой, рассматривали без учета их видовой принадлежности [6]. Предполагали распространение излучения в гомогенной воздушно-растительной среде толщиной 10 см, плотностью $13,7 \text{ кг/м}^3$, которая сформирована из элементов наземной фитомассы травянистых растений и воздуха, заполняющего промежутки между ними.

Источник внешнего облучения воздушно-растительной среды представлен бесконечно протяженным в продольном направлении слоем почвы толщиной 10 см с равномерным распределением радионуклидов.

Мощность поглощенной дозы внешнего облучения травянистых растений рассчитывали двумя методами: с применением коэффициентов дозового преобразования [6] и дозиметрической модели, основанной на интегрировании дозовой функции точечного источника излучения [7, 8]. Мощность дозы внутреннего облучения травянистых растений рассчитывали на основе коэффициентов дозового преобразования с учетом взвешивающего коэффициента для продуктов деления, равного 20, α -излучения — 10, низкоэнергетического β - и γ -излучения ($<10 \text{ кэВ}$) — 3, высокоэнергетического ($>10 \text{ кэВ}$) — 1. Удельную активность естественных радионуклидов в рас-

тениях оценивали с помощью коэффициентов накопления [10].

При расчете на основе коэффициентов дозового преобразования в качестве детектора облучения принят колос травы в виде эллипсоида размером 5×1×1 см. Для родоначальников каждого подсемейства (^{238}U , ^{234}Th , ^{234}U , ^{230}Th , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{232}Th , ^{228}Ra и ^{228}Th) с учетом вклада в облучение короткоживущих радионуклидов применены коэффициенты дозового преобразования внешнего и внутреннего облучения.

Дозиметрическая модель облучения травянистых растений базируется на интегрировании дозовой функции точечного источника внешнего β - и γ -излучения [8]. Для γ -излучения учитывали фактор накопления рассеянного излучения с помощью функции Тейлора, для β -излучения дозовую функцию интегрировали для точечного источника излучения с одним спектром. Если β -излучение радионуклида состояло из нескольких спектров, то рассчитывали суммарную мощность поглощенной дозы с учетом каждого из них. Предполагали, что детектор излучения находится на высоте 5 см от поверхности почвы и гомогенная воздушно-растительная среда между почвой и детектором играет роль защиты. Учитывали экранирование β -излучения поверхностной кутикулой растений.

Расчеты на основе дозиметрической модели выполняли для каждого радионуклида, входящего в состав цепочки радиоактивного распада. Мощность дозы суммировали в пределах каждого подсемейства для его родоначальника.

Результаты и обсуждение. Удельная активность естественных радионуклидов в поверхностном слое почвы в ПАО «ППГХО» и ЛПО «Алмаз» больше по сравнению с таковым для почвы. Максимум удельной активности ^{238}U и ^{226}Ra в 10 раз больше в ЛПО «Алмаз» и в 2 раза в ПАО «ППГХО» [1, 3, 5, 6]. Концентрация ^{40}K и ^{232}Th в почве ПАО «ППГХО» примерно соответствует удельной активности для почвы. На территории ЛПО «Алмаз» концентрация этих радионуклидов до 4 раз больше по сравнению с верхней границей диапазона, наблюдаемого в почве, что может быть связано с наличием в почве минералов с повышенным содержанием калия и тория. Отметим, что удельная активность естественных радионуклидов в почве рекультивационных отвалов ЛПО «Алмаз» харак-

теризуется значительным размахом, при котором отношение минимальной концентрации к максимальной может достигать 15 раз. В то же время на территории ПАО «ППГХО» наблюдается более равномерное распределение радионуклидов. Удельная активность ^{226}Ra в почве обоих объектов в 2 раза ниже по сравнению с таковой для родоначальника семейства ^{238}U . Это может быть связано с разными физико-химическими свойствами и, как следствие, с отличающейся скоростью миграции промежуточных продуктов распада урана в почве, что определяет различия в содержании этих генетически связанных радионуклидов в поверхностном слое.

В целом максимум удельной активности естественных радионуклидов в поверхностном слое почвы обоих объектов можно рассматривать в качестве консервативного значения, характеризующего наибольшее радиационное воздействие на биоту.

Мощность поглощенной дозы внешнего γ -облучения травянистых растений, рассчитанная с применением коэффициентов дозового преобразования, составляет 36—370 нГр/ч. При этом наибольший вклад вносят ^{40}K и радионуклиды, входящие в подсемейства ^{226}Ra , ^{228}Ra и ^{228}Th (табл. 2). Вклад излучения радионуклидов из состава других подсемейств, как правило, незначителен.

При минимальной удельной активности естественных радионуклидов в почве ПАО «ППГХО» вклад ^{40}K во внешнее γ -облучение составляет ~40%, на территории ЛПО «Алмаз» — 25%. Вклад во внешнее γ -облучение радионуклидов подсемейства ^{226}Ra оценивается 17 и 40% соответственно. С увеличением удельной активности естественных радионуклидов до максимума вклад ^{40}K во внешнее γ -облучение снижается в 2 раза, радионуклидов подсемейства ^{226}Ra , наоборот, возрастает до 50%. Вклад радионуклидов подсемейств ^{228}Ra и ^{228}Th почти не зависит от удельной активности почвы и составляет 13 и 20% соответственно.

Мощность поглощенной дозы травянистых растений от внешнего γ -облучения, рассчитанная с применением дозиметрической модели, составляет 50—516 нГр/ч (табл. 3).

В целом можно констатировать удовлетворительную сходимость расчета, выполненного на основе принципиально различных подходов к

Т а б л и ц а 2. Мощность поглощенной дозы внешнего γ -облучения и вклад радионуклидов при расчете с применением коэффициентов дозового преобразования

Радионуклид или родона- чальник подсемейства	ПАО «ППГХО»		ЛПО «Алмаз»	
	Мощность поглощенной дозы, нГр/ч*	Вклад, %**	Мощность поглощен- ной дозы, нГр/ч	Вклад, %
^{40}K	18—21	43—24	9—49	25—13
^{238}U	—	—	—	—
^{234}Th	0,2—1	1	<6	<2
^{234}U	—	—	—	—
^{230}Th	—	—	—	—
^{226}Ra	7—42	17—47	15—200	42—52
^{210}Pb	—	—	—	—
^{210}Po	—	—	—	—
^{232}Th	—	—	—	—
^{228}Ra	7—10	17—11	5—44	14—12
^{228}Th	10—15	23—17	7—69	19—18
Сумма	42—89	—	36—368	—

*Соответствует минимальной и максимальной удельной активности радионуклида в почве.
 **Первая цифра — вклад в мощность поглощенной дозы минимальный, вторая — максимальный.

Т а б л и ц а 3. Мощность поглощенной дозы внешнего облучения и вклад радионуклидов при расчете с применением дозиметрической модели

Радионуклид или ро- доначальник подсе- мейства	β -Облучение		γ -Облучение		Сумма	
	Мощность погло- щенной дозы, нГр/ч	Вклад, %	Мощность погло- щенной дозы, нГр/ч	Вклад, %	Мощность погло- щенной дозы, нГр/ч	Вклад, %
ПАО «ППГХО»						
^{40}K	6—7	55—28	19—22	33—18	25—29	37—20
^{238}U	—	—	—	—	—	—
^{234}Th	2—10	18—40	1	<1	3—11	4—7
^{234}U	—	—	—	—	—	—
^{230}Th	—	—	—	—	—	—
^{226}Ra	1—4	9—16	10—60	18—50	11—64	16—44
^{210}Pb	—	—	—	—	—	—
^{210}Po	—	—	—	—	—	—
^{232}Th	—	—	—	—	—	—
^{228}Ra	1—2	9—8	10—14	18—11	11—16	16—10
^{228}Th	1—2	9—8	17—24	29—20	18—26	27—18
Сумма	11—25	—	57—121	—	68—146	—
ЛПО «Алмаз»						
^{40}K	3—17	30—15	10—52	20—10	13—69	22—11
^{238}U	—	—	—	—	—	—
^{234}Th	5—65	43—56	<4	<1	5—69	8—11
^{234}U	—	—	—	—	—	—
^{230}Th	—	—	—	—	—	—
^{226}Ra	1—18	10—15	21—283	43—56	22—301	38—48
^{210}Pb	<2	<2	—	—	<2	<1
^{210}Po	—	—	—	—	—	—
^{232}Th	—	—	—	—	—	—
^{228}Ra	<5	<5	7—69	14—13	7—74	12
^{228}Th	1—9	10—7	11—108	23—21	12—117	20—18
Сумма	10—116	—	49—516	—	59—632	—

моделированию распределения поля γ -излучения в окружающей среде при идентичных физических условиях сред распространения и поглощения излучения, что отмечалось ранее [11, 12]. Однако изменение физических характеристик детектора излучения при проведении расчетов с применением коэффициентов дозового преобразования требует введения специальных поправочных коэффициентов. Кроме того, этот метод расчета дозы жестко привязан к геометрии источника ионизирующего излучения, что делает невозможным получение корректных результатов при неравномерном распределении радионуклидов в почве.

Дозиметрическая модель, основанная на интегрировании дозовой функции точечного источника излучения, несмотря на сложность и трудоемкость, а также погрешность при оценке дозы в случае распространения в многослойных средах показывает большую гибкость к изменению физических свойств источника и приемника излучения. С ее помощью можно моделировать поле γ -излучения в среде с разной плотностью, а также при неравномерном распределении радионуклидов в вертикальном профиле почвы.

Полученная в исследованиях мощность поглощенной дозы внешнего γ -облучения травянистых растений сопоставима с расчетами [3] на территории ПАО «ППГХО» и [5] на ЛПО «Алмаз». Однако эти работы основаны на применении коэффициентов дозового преобразования, которые не учитывают внешнее β -облучение и не позволяют в полной мере оценить радиационное воздействие на травянистые растения.

Учет внешнего β -облучения в дозиметрической модели на основе интегрирования дозовой функции точечного источника излучения определяет увеличение общей мощности поглощенной дозы травянистых растений как минимум на 20%. Соответственно при максимальной удельной активности естественных радионуклидов в почве ПАО «ППГХО» суммарная мощность поглощенной дозы внешнего облучения может возрасти до 146 нГр/ч, на рекультивационных отвалах ЛПО «Алмаз» — до 630 нГр/ч. Наиболее значимыми β -облучающими являются ^{40}K и радионуклиды подсемейства ^{234}Th . Повышение удельной активности естественных радионуклидов в почве до макси-

муму приводит к снижению в 2 раза вклада ^{40}K во внешнее β -облучение, но увеличению до 50 и 15% вклада излучения радионуклидов подсемейств ^{234}Th и ^{226}Ra соответственно. При этом основным β -излучающим является ^{234m}Pa максимальной энергией β -частиц 2,3 МэВ при выходе на распад 98%. Учет внешнего β -облучения важен при оценке последствий радиационного воздействия на травянистые растения, что связано с большим пробегом β -частиц в средах с низкой плотностью.

Мощность дозы внутреннего облучения травянистых растений в районе расположения ПАО «ППГХО» может достигать 2050 нГр/ч, на рекультивационных отвалах ЛПО «Алмаз» — 24 330 нГр/ч, что сопоставимо с оценками дозы [3, 5] (табл. 4). При минимальной удельной активности естественных радионуклидов в почве ПАО «ППГХО» наибольший вклад во внутреннее облучение вносит подсемейство ^{228}Th — до 47% и ^{226}Ra — до 20%, а также ^{210}Po и ^{230}Th — примерно по 10%. С возрастанием удельной активности в почве до максимума вклад во внутреннее облучение ^{228}Th снижается до 34%, ^{226}Ra возрастает до 30%. В почве ЛПО «Алмаз» в исследуемом диапазоне концентрации радионуклидов мощность дозы внутреннего облучения на ~30% обусловлена излучением радионуклидов подсемейства ^{226}Ra , 20% — ^{228}Th и ^{210}Po . При этом основная доля внутреннего облучения 92—95% травянистых растений формируется за счет α -излучения.

В целом расчеты свидетельствуют о том, что суммарная мощность дозы внешнего и внутреннего облучения травянистых растений при максимальной удельной активности естественных радионуклидов в почве может достигать 25 мкГр/ч, что почти в 15 раз меньше по сравнению с допустимым уровнем облучения 0,4 мГр/ч [6]. Тем не менее в связи с высокой неравномерностью содержания радионуклидов в почве районов расположения уранодобывающих и перерабатывающих предприятий вероятно наличие участков с большим уровнем радиоактивного загрязнения и соответственно дозой облучения живых организмов. Кроме того, представляется важным дальнейшее развитие дозиметрии биологических объектов, направленных на разработку моделей для различных физических характеристик источников и приемников излучения.

Таблица 4. Мощность поглощенной дозы внутреннего облучения и вклад радионуклидов при расчете с применением коэффициентов дозового преобразования

Радионуклид или родона- чальник подсемейства	ПАО «ППГХО»		ЛПО «Алмаз»	
	Мощность поглощенной дозы, нГр/ч	Вклад, %	Мощность поглощенной дозы, нГр/ч	Вклад, %
^{40}K	52	3—1	52	<3
^{238}U	49—224	2—3	98—1419	5—6
^{234}Th	2—8	<0,1	3—50	<0,1
^{234}U	55—250	4	115—1588	6
^{230}Th	17—533	8—9	233—3379	12—14
^{226}Ra	300—1734	19—29	614—8191	31—34
^{210}Pb	<2	<0,1	1—11	<0,1
^{210}Po	160—923	10—15	327—4359	16—18
^{232}Th	93—364	6—4	62—601	3
^{228}Ra	1—3	<0,1	1—6	<0,1
^{228}Th	719—2050	47—34	486—4676	24—19
Сумма	1548—6042	—	1988—24 332	—

Заключение. Мощность поглощенной дозы внешнего γ -облучения травянистых растений на территориях ПАО «ППГХО» и ЛПО «Алмаз», рассчитанная с применением коэффициентов дозового преобразования, составляет 36—370 нГр/ч, на основе дозиметрической модели — 50—516 и 10—116 нГр/ч γ - и β -облучения соответственно. Основными дозообразующими радионуклидами при внешнем γ -облучении являются ^{40}K и представители подсемейства ^{226}Ra , ^{228}Ra и ^{228}Th . Внутреннее облучение травянистых растений составляет 1,5—25 мкГр/ч. Суммарная мощность поглощенной дозы примерно в 15 раз меньше по сравнению с допустимым уровнем облучения травянистых растений 0,4 мГр/ч.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Sources and Effects of Ionizing Radiation.** Rep. of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly with scientific annexes. V. 1. Sources. New York: United Nations, 2000. 76 p.
2. **Радиационная** обстановка на территории России и сопредельных государств в 2018 г. Ежегодник. Обнинск, НПО «Тайфун», 2019. 324 с.
3. **Крышев И.И., Сазыкина Т.Г., Крышев А.И. и др.** Влияние радиоактивных выбросов уранодобывающего и перерабатывающего производств ОАО «ППГХО» на население и биоту. — Атомная энергия, 2012, т. 113, вып. 3, с. 173—177.
4. **Титов А.В., Шандала Н.К., Маренный А.М. и др.** Радиационная обстановка на объекте бывшего предприятия ЛПО «Алмаз». — Гигиена и санитария, 2017, т. 96, № 6, с. 822—826.
5. **Карпенко Е.И.** Комплексная оценка радиационного воздействия объектов ядерной энергетики на окружающую среду и человека. Дис. на соискание ученой степени докт. биол. наук. Обнинск, ВНИИРАЭ, 2020. 317 с.
6. **Dose Coefficients for Non-Human Biota Environmentally Exposed to Radiation.** Publication 136. London: SGSE Publications Ltd., 2017. 136 p.
7. **Спирин Е.В., Алексахин Р.М., Панченко С.В.** Оценка радиоэкологической безопасности уранового месторождения для биоты. — Атомная энергия, 2013, т. 115, вып. 5, с. 279—284.
8. **Переволоцкий А.Н., Переволоцкая Т.В.** Миграционно-дозиметрическая модель формирования облучения травянистых растений луговых биогеоценозов при постоянных радиоактивных выпадениях. — Там же, 2019, т. 127, вып. 5, с. 284—291.
9. **Титаева Н.А.** Ядерная геохимия. М.: Изд-во Московского ун-та, 2000. 336 с.
10. **Environmental Protection: Transfer Parameters for Reference Animals and Plants.** Publication 114. London: SGSE Publications Ltd., 2009. 111 p.
11. **Спирин Е.В.** Метод расчета доз облучения животных для оценки последствий загрязнения окружающей среды. — Радиационная биология. Радиоэкология, 2009, т. 49, № 5, с. 608—616.
12. **Переволоцкая Т.В., Переволоцкий А.Н., Кураченко Ю.А.** Методы расчета мощности поглощенной дозы γ -излучения при радиоактивном загрязнении луговых биогеоценозов. — Атомная энергия, 2020, т. 128, вып. 2, с. 99—103.

Поступила в Редакцию 12.01.22