

УДК 539.163:574.4:631.4

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В СИСТЕМЕ “НАДЗЕМНАЯ ФИТОМАССА РАСТЕНИЙ–ПОВЕРХНОСТЬ ПОЧВЫ” ПРИ ХРОНИЧЕСКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ВЫПАДЕНИЯХ В ЛЕСНОМ БИОГЕОЦЕНОЗЕ

© 2020 г. Т. В. Переволоцкая^{1,*}, А. Н. Переволоцкий¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Российская Федерация

*E-mail: forest_rad@mail.ru

Поступила в редакцию 20.02.2018 г.

В статье проанализированы особенности распределения радионуклидов при хронических радиоактивных выпадениях в системе “поверхность надземной фитомассы растений–поверхностный слой почвы” лесных биогеоценозов. Показано, что динамика распределения радионуклидов между компонентами исследуемой системы может быть описана системой линейных дифференциальных уравнений порядка I. Рассмотрены решения системы дифференциальных уравнений методом исключения и конечно-разностных уравнений. Установлено, что оба решения системы позволяют получить сопоставимые результаты по динамике распределения ¹³⁷Cs в системе “поверхность надземной фитомассы растений–поверхностный слой почвы” в течение вегетационного периода. Приведены примеры расчета динамики активности радионуклидов с различными периодами полураспада в системе “поверхность надземной фитомассы растений–поверхностный слой почвы” для лесных биогеоценозов, отличающихся периодами полураспада надземной фитомассы и коэффициентами первоначального задерживания.

Ключевые слова: хронические радиоактивные выпадения, радионуклиды, постоянная распада, постоянная очищения, плотность выпадений, радиоактивность, поверхность надземной фитомассы, поверхностный слой почвы

DOI: 10.31857/S0869803120020101

При изучении поступления и последующего распределения хронических радиоактивных выпадений в биогеоценозах научный и практический интерес представляет оценка динамики активности радионуклидов в системе “поверхность надземной фитомассы растений–поверхностный слой почвы”. Полученные данные, как правило, являются исходными для последующего изучения загрязненности радионуклидами хозяйственно-ценных частей растений, используемых человеком, что является важнейшей основой для оценки доз облучения и планирования мероприятий по обеспечению радиационной защиты населения, проживающего в зонах радиоактивных выбросов. Вторым, не менее важным аспектом изучения динамики активности радионуклидов в исследуемых компонентах системы является определение дозовых показателей облучения растений для оценок радиационного воздействия штатных радиоактивных выбросов предприятий ядерного топливного цикла [1, 2] на этапе обоснования их инвестирования или модернизации.

При хронических радиоактивных выпадениях характер распределения радионуклидов в системе

“поверхность надземной фитомассы растений–поверхностный слой почвы” в различных биогеоценозах и в лесных, в частности, достаточно сложен. Он обусловлен совокупностью одновременно протекающих процессов осаждения радионуклидов из атмосферы на поверхность растений и почвы, очищения фитомассы в результате удаления частиц с ее поверхности и радиоактивного распада, а также накопления радионуклидов на поверхности почвы при непосредственном поступлении частиц выпадений из атмосферы и удаляемых с поверхности растений. Радиоактивное загрязнение надземной фитомассы растений находится в прямой зависимости от ее биомассы, произрастающей на единице поверхности почвы, а в обратной – от дисперсности частиц выпадений [3–5], при этом с увеличением размеров частиц интенсивность очищения надземной фитомассы, как правило, возрастает [6].

Важно отметить, что к настоящему времени разработано большое количество моделей миграции радионуклидов в лесных биогеоценозах, обзор которых приведен в [7, 8], однако большинство из них рассматривают сценарий аварийного



Рис. 1. Схема поступления и перераспределения радионуклидов в биогеоценозе при хронических радиоактивных выпадениях.

Fig. 1. Scheme of the receipt and redistribution of radionuclides in the biogeocenosis in chronic radioactive fall-out.

поступления радионуклидов в лесной биогеоценоз с последующим моделированием долговременного распределения радиоактивных веществ в исследуемой экосистеме. Как правило, в описании большинства моделей приводятся основные формулы, обычно в виде системы линейных дифференциальных уравнений, отражающие динамику распределения радионуклидов между компонентами биогеоценоза и непосредственно результаты расчетов с верификацией для натурных условий, однако само решение систем уравнений с набором параметров, достаточных для проведения расчетов динамики, практически не приводится.

Целью настоящей работы являлось решение системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику распределения радионуклидов в системе “поверхность надземной фитомассы растений—поверхностный слой почвы” при хронических радиоактивных выпадениях в лесном биогеоценозе на протяжении вегетационного периода, для последующего применения в радиационно-экологических исследованиях.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследований является растительная и почвенная компоненты системы “поверхность надземной фитомассы растений—поверхностный слой почвы” в лесном биогеоценозе.

Предмет исследований — закономерности распределения радионуклидов между поверхностью надземной фитомассы растений и поверхностным слоем почвы в лесном биогеоценозе при хро-

нических радиоактивных выпадениях в течение вегетационного периода.

Принятые допущения:

— лесной биогеоценоз, в котором прогнозируется перераспределение радионуклидов хронических радиоактивных выпадений, может быть представлен в виде блок-схемы (рис. 1) с выделением растительной и почвенной компонент;

— под растительной компонентой понимается поверхность надземной фитомассы растений, формирующей преобладающую долю биомассы в исследуемом биогеоценозе. Предполагается, что состав растительности представлен одним видом — сосной обыкновенной, характеризующейся относительно стабильными биометрическими характеристиками надземной фитомассы в течение вегетационного периода;

— под почвенной компонентой подразумевается поверхностный слой почвы, толщиной 0.5 г/см² [9]. На поверхность почвы происходит поступление частиц радиоактивных выпадений из атмосферы и с поверхности надземной фитомассы растений в течение времени прогнозирования;

— в течение времени хронических радиоактивных выпадений биометрические показатели надземной фитомассы древесных растений лесного биогеоценоза (высота над поверхностью почвы и биомасса на единице площади земной поверхности) остаются условно постоянными, и частицы выпадений равномерно распределяются по высоте растений;

— в течение вегетационного сезона происходит поступление, с постоянной интенсивностью $\sigma_{\text{вып}}$ (Бк/сут) радионуклида из атмосферы в лесной биогеоценоз на 1 м² земной поверхности, при этом некоторая часть радионуклида задерживается поверхностью надземной фитомассы, а остаток поступает на поверхностный слой почвы;

— радионуклид, поступивший на поверхность надземной фитомассы растений, удаляется с ее поверхности за счет процессов поверхностного очищения с интенсивностью $\lambda_{\text{очищ}}$ (сут⁻¹) и радиоактивного распада со скоростью $\lambda_{\text{расп}}$ (сут⁻¹);

— на поверхностный слой почвы происходит постоянное поступление радионуклида как непосредственно из атмосферы, так и с поверхности надземной фитомассы растений, удаление радионуклида из данной компоненты происходит за счет радиоактивного распада и миграции в более глубокие почвенные слои.

Таким образом, в соответствии с принятыми допущениями динамика распределения активности радионуклида между поверхностью надземной фитомассы растений и поверхностным слоем почвы при постоянной величине осадения $\sigma_{\text{вып}}$

может быть описана системой линейных дифференциальных уравнений I порядка:

$$\begin{cases} \frac{dA_{\text{раст}}}{dt} = \sigma_{\text{вып}} K_3 - A_{\text{раст}} \lambda_{\text{эфф_п}} \\ \frac{d\sigma_{\text{почв}}}{dt} = \sigma_{\text{вып}} (1 - K_3) + A_{\text{раст}} \lambda_{\text{очищ}} - \sigma_{\text{почв}} \lambda_{\text{эфф_п}} \end{cases} \quad (1)$$

где $A_{\text{раст}}$ — активность в надземной фитомассе растений, произрастающих на 1 м² поверхности почвы, Бк; $\sigma_{\text{почв}}$ — активность радионуклида в поверхностном слое почвы на 1 м² ее поверхности, Бк; $\sigma_{\text{вып}}$ — величина активности выпадений радионуклида из приземного слоя атмосферы на 1 м² земной поверхности, Бк/сут; K_3 — коэффициент первоначального задерживания радионуклида поверхностью надземной фитомассы растений от величины $\sigma_{\text{вып}}$, отн. ед.; $\lambda_{\text{расп}}$ — постоянная распада, сут⁻¹; $\lambda_{\text{эфф_п}}$ — эффективная постоянная удаления радионуклида из поверхностного слоя почвы $\lambda_{\text{эфф_п}} = \lambda_{\text{расп}} + \lambda_{\text{мигр}}$, сут⁻¹; $\lambda_{\text{эфф_п}}$ — эффективная постоянная удаления радионуклида с поверхности надземной фитомассы растений $\lambda_{\text{эфф_п}} = \lambda_{\text{расп}} + \lambda_{\text{очищ}}$, сут⁻¹; t — время, сут.

Постоянные распада радионуклида или очищения компоненты системы связаны с соответствующими периодами полураспада или полураспада следующим соотношением:

$$T_{1/2\text{расп(очищ)}} = \frac{\ln(2)}{\lambda_{\text{расп(очищ)}}} \quad (2)$$

$$k_{(1,2)} = \frac{-(\lambda_{\text{эфф_п}} + \lambda_{\text{эфф_п}}) \mp \sqrt{(\lambda_{\text{эфф_п}} + \lambda_{\text{эфф_п}})^2 - 4\lambda_{\text{эфф_п}}\lambda_{\text{эфф_п}}}}{2} \quad (5)$$

Коэффициенты C_1 и C_2 рассчитываются по следующим формулам:

$$C_2 = \frac{1}{k_2 - k_1} \left(\sigma_{\text{вып}} (1 - K_3) + \frac{k_1 (\sigma_{\text{вып}} K_3 \lambda_{\text{очищ}} + \sigma_{\text{вып}} (1 - K_3) \lambda_{\text{эфф_п}})}{\lambda_{\text{эфф_п}} \lambda_{\text{эфф_п}}} \right) \quad (6)$$

$$C_1 = -C_2 - \frac{\sigma_{\text{вып}} K_3 \lambda_{\text{очищ}} + \sigma_{\text{вып}} (1 - K_3) \lambda_{\text{эфф_п}}}{\lambda_{\text{эфф_п}} \lambda_{\text{эфф_п}}} \quad (7)$$

II. Решение системы линейных дифференциальных уравнений осуществлено путем замены дифференциалов на конечно-разностные аналоги с шагом дифференцирования $\Delta t = 1$ сут.

$$\frac{dA}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta A}{\Delta t} \approx \frac{A_{t+\Delta t} - A_t}{\Delta t} \Big|_{\text{при } \Delta t=1} = A_{t+1} - A_t \quad (8)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Решение системы линейных уравнений порядка I было выполнено двумя методами: исключения и конечно-разностных уравнений. В качестве начальных условий принято, что при $t = 0$ радионуклиды в составе хронических радиоактивных выпадений не поступают в исследуемый биогеоценоз, соответственно, $A_{\text{раст}}(0) = 0$ и $\sigma_{\text{почв}}(0) = 0$.

I. Решение системы линейных дифференциальных уравнений порядка I (1) методом исключения найдено в следующем виде:

— динамика активности радионуклида на поверхности надземной фитомассы растений, произрастающих на 1 м² поверхности почвы, может быть выражена в виде функции (Бк):

$$A_{\text{раст}}(t) = \frac{1}{\lambda_{\text{очищ}}} \left[(k_1 C_1 e^{k_1 t} + k_2 C_2 e^{k_2 t}) - \sigma_{\text{вып}} (1 - K_3) + \lambda_{\text{эфф_п}} \left(C_1 e^{k_1 t} + C_2 e^{k_2 t} + \frac{\sigma_{\text{вып}} K_3 \lambda_{\text{очищ}} + \sigma_{\text{вып}} (1 - K_3) \lambda_{\text{эфф_п}}}{\lambda_{\text{эфф_п}} \lambda_{\text{эфф_п}}} \right) \right] \quad (3)$$

— динамика активности радионуклида в поверхностном слое почвы (Бк):

$$\sigma_{\text{почв}}(t) = C_1 e^{k_1 t} + C_2 e^{k_2 t} + \frac{\sigma_{\text{вып}} K_3 \lambda_{\text{очищ}} + \sigma_{\text{вып}} (1 - K_3) \lambda_{\text{эфф_п}}}{\lambda_{\text{эфф_п}} \lambda_{\text{эфф_п}}} \quad (4)$$

Коэффициенты k_1 и k_2 — корни характеристического уравнения, выраженные формулой:

После подстановки конечно-разностных аналогов в каждое из уравнений системы (1) и соответствующих преобразований система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} A_{\text{раст},t+1} = \sigma_{\text{вып}} K_3 + A_{\text{раст},t} (1 - \lambda_{\text{эфф_п}}) \\ \sigma_{\text{почв},t+1} = \sigma_{\text{вып}} (1 - K_3) + \\ + \sigma_{\text{почв},t} (1 - \lambda_{\text{эфф_п}}) + A_{\text{раст},t} \lambda_{\text{очищ}} \end{cases} \quad (9)$$

Расчет динамики активности радионуклида на поверхности надземной фитомассы растений ($A_{\text{раст}}$) и поверхностном слое почвы ($\sigma_{\text{почв}}$) производился с помощью рекуррентных соотношений. Заданы начальные значения на момент начала хронических радиоактивных выпадений $t = 0$, при этом предполагалось отсутствие радиоактивного загрязнения почвы и растений: $\sigma_{\text{почв},t} = 0$ и $A_{\text{раст},t} = 0$ при интенсивности хронических радио-

Таблица 1. Расчетная активность ^{137}Cs в компонентах системы “поверхность надземной фитомассы растений—поверхностный слой почвы” на 1 м^2 земной поверхности при интенсивности выпадений 1 Бк/сут

Table 1. Calculation of ^{137}Cs activity in the components of the system “surface of above-ground phytomass plant—surface soil layer” on 1 м^2 of the earth’s surface at the intensity of fallout 1 Bq/day

Время с момента радиоактивных выпадений, сут	Расчетная активность радионуклида в компоненте, Бк			
	“поверхность надземной фитомассы растений” $A_{\text{раст}}$		“поверхностный слой почвы” $\sigma_{\text{почв}}$	
	по формуле (3)	по формуле (9)	по формуле (4)	по формуле (9)
1	0.7	0.7	0.3	0.3
5	3.5	3.4	1.6	1.6
10	6.8	6.7	3.2	3.3
15	10.0	9.9	5.1	5.1
20	13.0	13.0	7.0	7.0
25	16.0	15.9	9.0	9.1
30	18.8	18.7	11.2	11.2
40	24.2	24.1	15.8	15.9
60	33.7	33.6	26.2	26.3
80	41.8	41.7	38.0	38.1
100	48.8	48.7	50.9	51.0
150	62.2	62.0	87.1	87.3
200	71.2	71.1	127.6	127.7

активных выпадений $\sigma_{\text{вып}} = 1\text{ Бк/сут}$ и рассчитаны активности для момента времени $t = 1$. Для расчета активности компонент в момент времени $t = 2$, данные, полученные для момента времени $t = 1$, были приняты за исходные и т.д.

Использование результатов решения системы линейных дифференциальных уравнений в соответствии с рассмотренными методами для моделирования распределения радионуклидов в системе “поверхность надземной фитомассы растений—поверхностный слой почвы” проиллюстрируем на примере соснового биогеоценоза с $K_3 = 0/7$, $T_{\text{очищ}} = 90$ сут (постоянная очищения надземной фитомассы $\lambda_{\text{очищ}} = 7.7 \times 10^{-3}\text{ сут}^{-1}$) и ^{137}Cs (постоянная распада $\lambda_{\text{расп}} = 6.3 \times 10^{-5}\text{ сут}^{-1}$) (миграцией за пределы поверхностного слоя почвы в течение моделируемого времени пренебрегали и $\lambda_{\text{мигр}} = 0$) (табл. 1). Как следует из представленных в табл. 1 данных, различия в величинах активности на поверхности надземной фитомассы растений и в поверхностном слое почвы, полученные двумя различными методами решения системы линейных дифференциальных уравнений порядка I (1), не превышают десятых долей процента. Это позволяет констатировать о применимости обоих методов при прогнозировании радиоактивного загрязнения поверхностного слоя почвы и поверхности надземной фитомассы растений в случае хронических радиоактивных выпадений.

С помощью полученного решения системы линейных дифференциальных уравнений также были исследованы особенности динамики активности радионуклида в системе “поверхность надземной фитомассы растений—поверхностный слой почвы” соснового биогеоценоза в зависимости от различных факторов: 1) периода полураспада радионуклида, поступившего с выпадениями (^{137}Cs , ^{95}Zr , ^{131}I); 2) коэффициента первоначального задерживания частиц выпадений поверхностью надземной фитомассы (0.5, 0.7, 0.9), 3) периода ее полуочищения (40, 90, 180 сут). Расчеты выполнены при различных градациях одного из факторов, но при фиксированных значениях двух остальных (результаты приведены на рис. 2–4).

1. Зависимость динамики активности радионуклидов (^{137}Cs , ^{95}Zr , ^{131}I) в системе “поверхность надземной фитомассы растений—поверхностный слой почвы” от их периода полураспада при постоянных величинах коэффициента задерживания ($K_3 = 0.7$) и периода полуочищения поверхности надземной фитомассы ($T_{\text{очищ}} = 90$ сут) приведена на рис. 2. Согласно полученным данным, активность исследованных радионуклидов на поверхности надземной фитомассы, произрастающей на 1 м^2 земной поверхности, в течение первых 7–10 сут возрастает до 4–5 Бк практически независимо от периода полураспада (рис. 2, а). Аналогичная картина в изменении активности радионуклидов наблюдается и на поверхностном слое

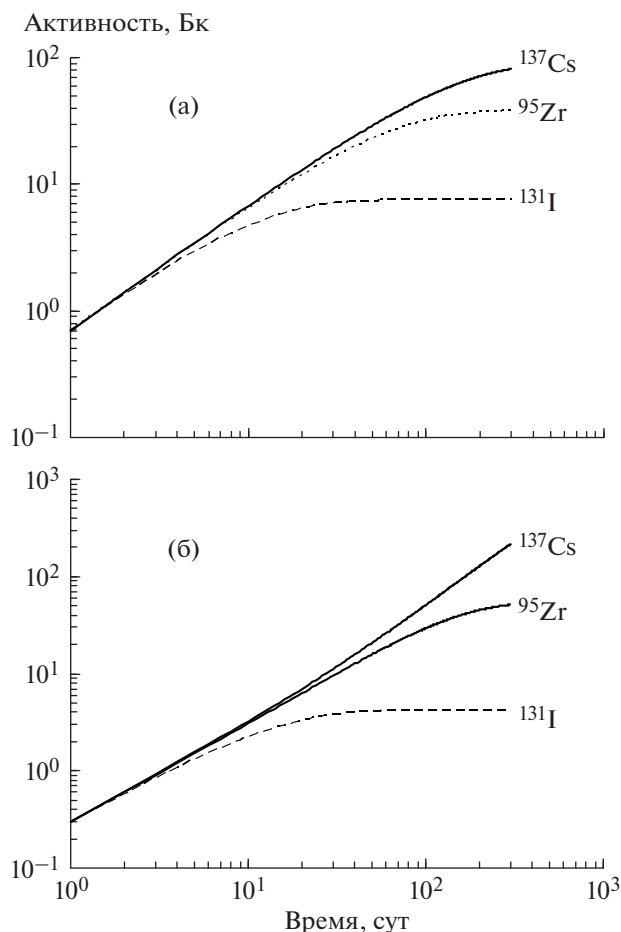


Рис. 2. Динамика активности радионуклидов в компонентах системы при хронических радиоактивных выпадениях интенсивностью 1 Бк/сут при $K_3 = 0.7$ и $T_{\text{эфф}} = 90$ сут: а — поверхность надземной фитомассы растений; б — поверхностный слой почвы.

Fig. 2. The dynamics of the activity of radionuclides in the components of the system in case of chronic radioactive fallouts with an intensity of 1 Bq/day at $K_3 = 0.7$ and $T_{\text{эфф}} = 90$ days: а — surface of above-ground phytomass; б — surface soil layer.

почвы (рис. 2, б). Однако при долгосрочной оценке загрязнения исследованных компонент системы различия становятся тем существеннее, чем больше разница между величинами периода полураспада конкретного радиоактивного изотопа. Так, например, активность ^{131}I на поверхности надземной фитомассы стабилизируется на уровне ~ 7 Бк и поверхности почвы ~ 4 Бк спустя примерно 40 сут с момента начала выпадений. Для ^{95}Zr активность на поверхности надземной фитомассы становится близка к постоянной по истечении ~ 300 сут с момента поступления радионуклидов в биосферу, а по ^{137}Cs равновесие между поступлением—выведением в течение моделируемого времени не устанавливается.

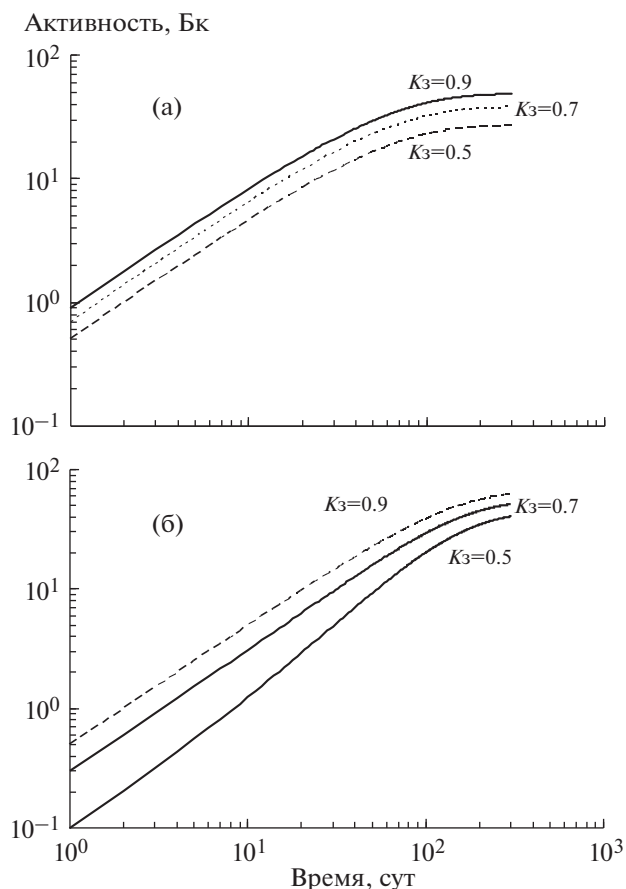


Рис. 3. Динамика активности ^{95}Zr в компонентах системы при хронических радиоактивных выпадениях интенсивностью 1 Бк·сут $^{-1}$ при различной величине коэффициента первоначального задерживания и $T_{\text{эфф}} = 90$ сут: а — поверхность надземной фитомассы растений; б — поверхностный слой почвы.

Fig. 3. The dynamics of the activity of ^{95}Zr in the components of the system in chronic radioactive fallouts with an intensity of 1 Bq·day $^{-1}$ at different values of the initial retention coefficient and $T_{\text{эфф}} = 90$ days: а — surface of above-ground phytomass; б — surface soil layer.

2. На рис. 3 приведена зависимость динамики активности ^{95}Zr на поверхности надземной фитомассы растений и в поверхностном слое почвы от величины коэффициента первоначального задерживания (K_3 0.5, 0.7, 0.9) при постоянном периоде полураспада поверхности надземной фитомассы ($T_{\text{очищ}} = 90$ сут). Активность радионуклида на поверхности надземной фитомассы пропорциональна коэффициенту первоначального задерживания, а для поверхностного слоя почвы — находится в обратной зависимости от этого параметра. С течением времени активность ^{95}Zr в обеих компонентах системы возрастает, причем наиболее интенсивно в течение первого месяца с момента начала радиоактивных выпадений, а в последующем, по мере приближения к моменту

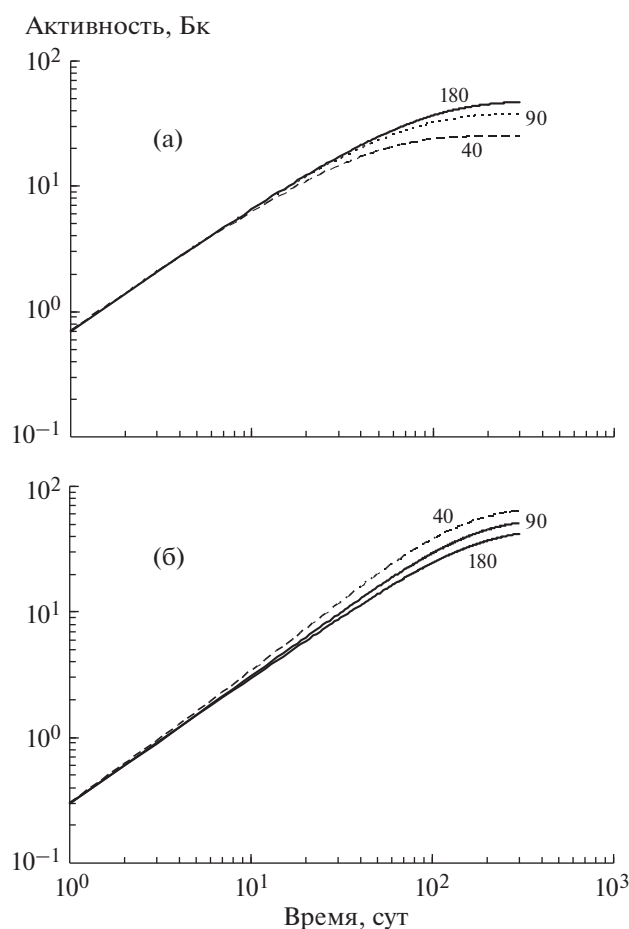


Рис. 4. Динамика активности ^{95}Zr в компонентах системы при хронических радиоактивных выпадениях интенсивностью $1 \text{ Бк} \cdot \text{сут}^{-1}$ для различного периода полуочищения надземной фитомассы и $K_3 = 0.7$: а — поверхность надземной фитомассы растений; б — поверхностный слой почвы.

Fig. 4. Dynamics of ^{95}Zr activity in the system components during chronic radioactive fallouts with an intensity of $1 \text{ Bq} \cdot \text{day}^{-1}$ for a different half-life of the aboveground phytomass and $K_3 = 0.7$: а — surface of above-ground phytomass; б — surface soil layer.

установления динамического равновесия, практически стабилизируется для поверхности надземной фитомассы и продолжает повышаться в поверхностном слое почвы. Максимальная величина активности ^{95}Zr в первой из компонент системы может достигнуть $\sim 30 \text{ Бк}$ при $K_3 = 0.5$ и $\sim 50 \text{ Бк}$ при $K_3 = 0.9$, а в поверхностном слое почвы — ~ 60 и $\sim 40 \text{ Бк}$ соответственно.

3. Изменение активности ^{95}Zr в системе “поверхность надземной фитомассы растений—поверхностный слой почвы” при постоянной величине коэффициента задерживания ($K_3 = 0.7$) в зависимости от периода полуочищения поверхности надземной фитомассы ($T_{\text{очищ}}$ 40, 90 и 180 сут) приведено на рис. 4. Как следует из представленных данных,

период полуочищения поверхности надземной фитомассы в течение первых 10–20 сут с начала хронических радиоактивных выпадений практически не влияет на величину активности ^{95}Zr (рис. 4). В последующем, для поверхности надземной фитомассы растений динамическое равновесие между поступлением и выведением радионуклида устанавливается тем быстрее, чем меньше период полуочищения данной компоненты системы. Так, при величине данного показателя равной 40 сут активность ^{95}Zr на поверхности надземной фитомассы практически стабилизируется по истечении примерно 4 мес. на уровне $\sim 25 \text{ Бк}$, а при периоде полуочищения 180 сут достигает 50 Бк и продолжает возрастать. Активность радионуклида в поверхностном слое почвы возрастает обратно пропорционально периоду полуочищения поверхности надземной фитомассы растений (рис. 4б): чем меньше величина периода полураспада, тем больше активность ^{95}Zr в поверхностном слое почвы для одного и того же момента времени.

ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе предлагается решение системы линейных дифференциальных уравнений порядка I, моделирующих распределения радионуклидов в системе “поверхность надземной фитомассы растений—поверхность почвы” при хронических радиоактивных выпадениях двумя методами: исключения и конечно-разностных уравнений.

Функциональные зависимости активности радионуклидов в исследуемых компонентах системы, полученные на основе решения методом исключения (I), позволяют получить исследуемые величины в произвольный момент времени от начала хронических радиоактивных выпадений. Однако данное решение применимо только для случая неизменных во времени параметров, характеризующих поступление и очищение компонент биогеоценоза от радиоактивных выпадений: плотности выпадений радионуклида на земную поверхность ($\sigma_{\text{вып}}$), коэффициента первоначального задерживания (K_3), постоянной очищения надземной фитомассы ($\lambda_{\text{очищ}}$). В случае, если любой из параметров зависит от времени, найденное в работе решение системы требует введения соответствующих поправок.

В то же время решение системы линейных дифференциальных уравнений методом конечно-разностных аналогов (II) позволяет каждый из вышеупомянутых параметров ($\sigma_{\text{вып}}$, K_3 , $\lambda_{\text{очищ}}$) изменить в любой из моментов времени. В частности, рассчитать динамику активности поверхности надземной фитомассы и поверхностного слоя почвы при радиоактивных выпадениях раз-

личной интенсивности или изменяющемся коэффициенте первоначального задерживания, обусловленного приростом биомассы, которые можно задать в аналитической или табличной формах. Недостаток применения данного метода заключается в необходимости последовательного расчета динамики активности на все время радиоактивных выпадений, например, если необходимо рассчитать активность в компонентах на 120-е сутки, то для этого обязателен расчет для каждого предыдущих суток, т.е. нужно просчитать 119 итераций.

Коэффициент первоначального задерживания (K_3) определяет пропорциональное увеличение активности на поверхности надземной фитомассы растений и обратно пропорциональное – в поверхностном слое почвы при прочих равных условиях (поступление одного и того же радионуклида при одинаковой величине периода полуочистения поверхности надземной фитомассы растений). Вполне очевидно, что определяя пропорциональное увеличение активности на поверхности надземной фитомассы при постоянной интенсивности хронических радиоактивных выпадений, на динамику содержания радионуклида в исследуемых компонентах системы биогеоценоза данный показатель не влияет.

Длительность установления динамического равновесия между поступлением радионуклида в рассматриваемую компоненту системы и выведением из нее определяется величиной эффективного периода полуочистения, который в свою очередь определяется наименьшей величиной из периодов полураспада радионуклида выпадений и полуочистения соответствующей компоненты (рис. 2 и рис. 4, а). При равных величинах коэффициента первоначального задерживания и периода полуочистения в случае хронических выпадений ^{131}I активность на поверхности надземной фитомассы стабилизируется наиболее быстро, а для ^{137}Cs – равновесие между его поступлением и выведением не устанавливается в течение моделируемого времени (рис. 2). Аналогичная ситуация прослеживается и при поступлении ^{95}Zr на поверхность надземной фитомассы при различных периодах полуочистения: при величине исследуемого показателя, равной 40 сут, равновесие устанавливается намного раньше, чем при 180 (рис. 4, б). Соответственно, чем меньше период полураспада радионуклида в составе выпадений или период полуочистения исследуемой компоненты системы, тем быстрее устанавливается равновесие между поступлением и выведением радионуклида из нее.

Таким образом, предлагаемые решения системы линейных дифференциальных уравнений, описывающие динамику распределения радионуклидов хронических выпадений в системе “по-

верхность надземной фитомассы растений – поверхностный слой почвы”, могут быть применены при прогнозировании активности в компонентах данной системы в зависимости от имеющегося набора исходных данных и задач исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Практические рекомендации по вопросам оценки радиационного воздействия на человека и биоту / Под общ. ред. И.И. Линге и И.И. Крышева. М., 2015. 265 с. [Prakticheskiye rekomendatsii po voprosam otsenki radiatsionnogo vozdeystviya na cheloveka i biotu / Pod obshchey redaktsiyei I.I. Linge i I.I. Krysheva. M., 2015. 265 s. (In Russian)]
2. Защита окружающей среды при эксплуатации и выводе из эксплуатации радиационно опасных объектов / Под ред. И.П. Коренкова, К.В. Котенко. М.: БИНОМ, 2014. 440 с. [Zashchita okruzhayushchey sredy pri ekspluatatsii i vyvode iz ekspluatatsii radiatsionno opasnykh ob'ektov / Pod red. I.P. Korenkova, K.V. Kotenko. M.: BINOM, 2014. 440 s. (In Russian)]
3. Гусев Н.Г., Беляев В.А. Радиоактивные выбросы в биосфере: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 256 с. [Gusev N.G., Belyayev V.A. Radioaktivnyye vybrosy v biosfere: Spravochnik. M.: Energoatomizdat, 1991. 256 s. (In Russian)]
4. Романов Г.Н. Ликвидация последствий радиационных аварий: Справочное руководство. М.: ИздАТ, 1993. 336 с. [Romanov G.N. Likvidatsiya posledstviy radiatsionnykh avari: Spravochnoye rukovodstvo. M.: Izdat, 1993. 336 s. (In Russian)]
5. The Transfer of Radionuclides in Natural and Semi-Natural Environments / Proceedings of the Workshop / Eds G. Desmet, P. Nassimbeni, M. Belli. Passariano (Udine), Italy, 11–15 September 1989. London and New York: Elsevier Applied Science, 1989. 720 p.
6. Тихомиров Ф.А. Действие ионизирующих излучений на экологические системы. М.: Атомиздат, 1972. 176 с. [Tikhomirov F.A. Deystviye ioniziruyushchikh izlucheni na ekologicheskiye sistemy. M.: Atomizdat, 1972. 176 s. (In Russian)]
7. Modeling the migration and accumulation of radionuclides in forest ecosystems. A literature review: Report of the Forest Working Group of the Biosphere Modeling and Assessment (BIOMASS) Programme. Vienna: IAEA, 2002. 127 p.
8. Переволоцкий А.Н., Гончаров Е.А., Переволоцкая Т.В. К вопросу о моделировании распределения радионуклидов в лесных биогеоценозах // Радиационная биология. Радиоэкология. 2016. Т. 56. № 6. С. 655–663. [Perevolotskiy A.N., Goncharov E.A., Perevolotskaya T.V. K voprosu o modelirovani raspredeleeniya radionuklidov v lesnykh biogeotsenozakh // Radiats. biologiya. Radioekologiya. 2016. V. 56. № 6. S. 655–663. (In Russian)]
9. Защита окружающей среды: концепция и использование референтных животных и растений. Публикация МКРЗ 108 / Пер. с англ. М.: Академ-Принт, 2013. 216 с. [Zashchita okruzhayushchey sredy: kontseptsiya i ispolzovaniye referentnykh zhivotnykh i rasteniy. Publikatsiya MKRZ 108 / Per. s angl. M.: Akadem-Print, 2013. 216 s. (In Russian)]

Mathematical Model of Radionuclide Distribution in the System “Aboveground Plant Phytomass—Soil Surface” for Chronic Radioactive Fallout in the Forest Biogeocenosis

T. V. Perevolotskaya^{a,#} and A. N. Perevolotsky^a

^a*Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia*

[#]*E-mail: forest_rad@mail.ru*

The article analyses of the distribution of radionuclides in chronic radioactive fallout in the system “the surface of the overground phytomass of plants—the surface soil layer” of forest biogeocenoses. The authors have shown that the dynamics of the distribution of radionuclides between the components of the system under study can be described by a system of linear differential equations of the first order. The article considers the solution of a system of differential equations by the elimination method and the finite-difference equations. The authors found that both solutions of the system make it possible to obtain comparable results on the distribution dynamics of ^{137}Cs in the system “surface of the overground phytomass of plants—the surface layer of soil” during the vegetative period. The article gives examples of calculation of the dynamics of activity of radionuclides with different half-lives in the system “surface of plant overground plant phytomass—surface layer of soil” for forest biogeocenoses differing in periods of semi-purification of the overground phytomass and coefficients of initial retention.

Keywords: Chronical radioactive fallout, radionuclides, decay constant, constant cleansing, density of the deposition, activity, surface of above-ground phytomass, surface soil layer