

Введение

Радиоэкология – наука, изучающая закономерности миграции радионуклидов в биосфере и ее структурных единицах – атмосфере, литосфере и гидросфере. Она выделилась из радиобиологии в 1940 году.

Первые работы по радиоэкологии были направлены на изучение поведения в почве и воде естественных радионуклидов урана (U), тория (Th), радия (Ra), свинца (Pb), которые проводил в России *В. И. Вернадский*, начиная с 1930 года. Он ввел понятие «коэффициент накопления», впервые были экспериментально определены параметры накопления естественных радионуклидов некоторыми растениями.

Новый этап в развитии радиоэкологии начался после 1945 года, когда в биосфере после испытания ядерного оружия появились искусственные радионуклиды (до испытания ядерного оружия их в биосфере не было). В 1950-х годах изучалось поведение искусственных радионуклидов в естественных экосистемах и их миграция в цепи: почва → растение → животное → продукция животноводства → человек (под руководством *В. М. Клечковского, Н. В. Тимофеев-Рессовского*).

Было установлено, что радионуклиды из почвы поступают в растения, где включаются в процессы обмена веществ. С растительным кормом они поступают в организм животных, где накапливаются в органах. С продуктами питания растительного и животного происхождения радионуклиды поступают в организм человека, где распределяются неравномерно: ^{137}Cs – в мышечных тканях и внутренних органах; ^{90}Sr – в костных тканях. В 70-е годы было издана первая карта загрязнения территории Восточной Европы ^{137}Cs . Плотность поверхностного загрязнения территории Восточно-европейской равнины ^{137}Cs составляла 2–4 кБк/м² (0,05–0,10 Ки/км²). Радионуклидные соотношения $^{90}\text{Sr}:$ ^{137}Cs составляли 0,63, а $^{239,240}\text{Pu}:$ ^{137}Cs – 0,21.

К 60-м годам были изучены закономерности поступления радионуклидов в растения и в организм животных и предложены мероприятия по снижению поступления радионуклидов в эти объекты. Основные работы в этом направлении были проведены *В. М. Клечковским, И. В. Гулякиным, Е. Г. Юдинцевой, А. Г. Егоровым, Р. М. Алексахиным, Б. Н. Анненковым, А. Д. Беловым, Н. А. Корневым, А. Н. Сироткиным, Б. С. Пристером, И. А. Чистяковым* и др.).

После катастрофы на ЧАЭС радиоэкология по актуальности вышла на ведущее место среди других наук. **В задачи радиоэкологии входит:** 1) выявление источников загрязнения окружающей среды радионуклидами; 2) изучение поведения радионуклидов в атмосфере; 3) изучение закономерностей миграции радионуклидов в агроценозах, лесных и луговых ценозах, водных экосистемах; 4) изучение поступления радионуклидов в организм растений, животных, человека; 5) прогнозирование поведения радионуклидов в окружающей среде; 6) проведение организационных, агротехнических, агрохимических, технологических, зооветеринарных и информационных мероприятий, направленных на снижение поступления радионуклидов в сельскохозяйственную продукцию; 7) прогнозирование содержания радионуклидов в продукции растениеводства и продукции животноводства; 8) организация радиационного контроля продуктов питания населения, сырья, кормов; 9) организация и проведение радиационного мониторинга окружающей среды.

К настоящему времени обозначились **приоритетные проблемы радиоэкологии:** углубленный радиационный мониторинг почв и окружающей среды, необходимый для прогноза радиационной обстановки и оптимизации природопользования на загрязненной радионуклидами территорий после катастрофы на ЧАЭС; разработка стратегии и новых технологий реабилитации загрязненных территорий; реабилитация земель, временно выведенных из хозяйственного оборота, требующая глубокого комплексного экологического и экономического обоснования; обеспечение радиационного мониторинга окружающей среды в районе воздействия Белорусской АЭС (Островецкая АЭС), а также в радиусе 30–100 км от АЭС сопредельных государств; разработка мер быстрого реагирования на радиационные аварии; подготовка кадров высшей квалификации по радиоэкологии. Информирование населения о радиационной обстановке.

Беларусь является самой радиационно-загрязненной страной мира. После катастрофы на ЧАЭС загрязнение территории цезием-137 составляло 23 %, а стронцием-90 – 10 %. Здесь осело 70 % радиоактивного выброса, поэтому в Беларуси уделялось и уделяется большое внимание изучению поведения радионуклидов в биосфере и мероприятиям, направленным на снижение поступления радионуклидов в сельскохозяйственную продукцию и в организм человека. Для этих целей выделяются большие материальные средства.

В Республике Беларусь создана сеть научно-исследовательских институтов и лабораторий, изучающих миграционные процессы радионуклидов и разрабатывающих мероприятия по снижению поступления радионуклидов в продукцию сельского хозяйства: Институт радиологии; Институт почвоведения и агрохимии; Институт экспериментальной ботаники; Центральный ботанический сад; Институт леса; Институт зоологии; Институт радиобиологии; Институт цитологии и генетики и др. В Республике Беларусь большую работу при решении задач радиоэкологии проводят ученые этих институтов: *И. М. Богдевич, В. Ю. Агеец, В. С. Аверин, А. Г. Подоляк, И. Б. Бондарь, Н. В. Путятин, В. И. Парфенов, В. А. Ипатьев, Б. И. Якушев, Б. С. Мартинович, А. Н. Переволоцкий, И. М. Булавик* и др.

В настоящее время радиоэкология развивается по *нескольким направлениям*: 1) радиоэкология сельскохозяйственных растений; 2) радиоэкология сельскохозяйственных животных; 3) радиоэкология пресноводных экосистем; 4) радиоэкология леса; 5) радиоэкология морских организмов и т. д.

1. Естественная и искусственная радиоактивность окружающей среды

1.1 ЕСТЕСТВЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ

1.1.1 Классификация и характеристика естественных радионуклидов

К естественным радионуклидам относятся радионуклиды, появление и присутствие которых на Земле не связано с деятельностью человека. Эти радионуклиды образовались одновременно со стабильным веществом Земли. К настоящему времени в окружающей среде присутствуют только те первичные радионуклиды, период полураспада которых соизмерим с возрастом Земли. Естественные радионуклиды находятся в рассеянном состоянии в земной коре, воздухе, воде и во всех живых объектах. Повышение концентрации естественных радионуклидов в окружающей среде регистрируется в месторождениях твердых, жидких и газообразных полезных ископаемых.

Известно около 80 естественных радионуклидов, которые по происхождению разделяются на 3 группы:

В первую группу входят 3 семейства радиоактивных элементов и их дочерние продукты распада:

первое семейство – семейство урана-238 (^{238}U , $T_{1/2} = 4,5 \times 10^9$ лет);

второе семейство – семейство тория-232 (^{232}Th , $T_{1/2} = 7,1 \times 10^8$ лет);

третье семейство – семейство урана-235 (^{235}U , $T_{1/2} = 1,4 \times 10^{10}$ лет)

При естественном радиоактивном распаде ядер урана-238 образуется 19 дочерних радионуклидов с разными периодами полураспада, в том числе торий-230, радий-226, радон-222, полоний-218, полоний-210, висмут-210, свинец-210.

При естественном радиоактивном распаде ядер тория-232 образуется 12 дочерних радионуклидов с разными периодами полураспада, в том числе радий-224, радон-220, полоний-212, висмут-212, свинец-212.

При естественном радиоактивном распаде ядер урана-235 образуется 17 дочерних радионуклидов с разными периодами полураспада, в том числе торий-231, радий-223, радон-219, полоний-215, полоний-211, висмут-211, свинец-211.

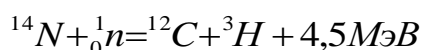
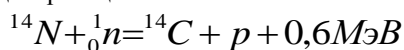
Конечные продукты радиоактивного распада радионуклидов этих семейств – соответственно стабильные изотопы ^{206}Pb ; ^{207}Pb ; ^{208}Pb .

В природе существовало четвертое семейство – семейство нептуния-237 ($T_{1/2} = 2,4 \times 10^6$ лет), радионуклиды которого к настоящему времени распались.

Во вторую группу входят радионуклиды, не входящие в эти три семейства. К этой группе относят 24 радионуклида с $T_{1/2} = 1,3 \times 10^9 - 1,4 \times 10^{21}$ лет, среди которых наиболее значимы калий-40 (^{40}K , $T_{1/2} = 1,3 \times 10^9$ лет), рубидий-87 (^{87}Rb , $T_{1/2} = 4,9 \times 10^9$ лет), неодим-150 (^{150}Nd , $T_{1/2} = 5,0 \times 10^9$ лет), самарий-147 (^{147}Sm , $T_{1/2} = 1,6 \times 10^{14}$ лет), лютеций-176 (^{176}Lu , $T_{1/2} = 3,6 \times 10^{10}$ лет), лантан-138 (^{138}La , $T_{1/2} = 1 \times 10^{11}$ лет).

В третью группу входят космогенные радионуклиды, которые образуются при взаимодействии космического излучения с атомами атмосферы, а также с атомами литосферы (почвы) и имеют $T_{1/2}$ от 37 мин до 7×10^4 лет: тритий (^3H), бериллий (^7Be , ^{10}Be), углерод (^{14}C), натрий ($^{22-23}\text{Na}$), сера (^{35}S), фосфор (^{32}P). Максимальная концентрация ^{14}C , ^3H , ^7Be регистрируется в стратосфере (70 %).

В атмосфере космогенные радионуклиды образуются при взаимодействии нейтронов с атомами кислорода, азота, углерода по следующим реакциям:



Естественные радионуклиды разделяются на: *легкие* (до №82 таблицы Менделеева) и *тяжелые* (с №83 таблицы Менделеева) радионуклиды. Наиболее значимы в биосфере следующие естественные радионуклиды: ^3H , ^{14}C , ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{210}Po , ^{210}Pb .

Тритий (^3H), $T_{1/2} = 12,3$ сут., β -излучатель. 95% природного ^3H превращается в тритиевую воду H_3NO , в составе которой он мигрирует в биогеохимических циклах водорода. В природе существует один радиоактивный изотоп.

Углерод (^{14}C), $T_{1/2} = 5730$ лет, β -излучатель. Углерод соединяется с O_2 и в виде CO_2 входит в состав органического вещества. В природе существует 1 радиоактивный изотоп.

Калий (^{40}K), $T_{1/2} = 1,28 \times 10^9$ лет, β - и γ -излучатель. Природа не известна. Преимущественно содержится в глинистой фракции почвы и во всех живых организмах. В природе существует 1 радиоактивный изотоп.

Уран (^{238}U), $T_{1/2} = 4,5 \times 10^9$ лет, α -излучатель. В природе существует 3 радиоактивных изотопа.

Торий (^{232}Th), $T_{1/2} = 7,1 \times 10^8$ лет, α -излучатель. В природе существует 6 радиоактивных изотопов.

Радий (^{226}Ra), $T_{1/2} = 1622$ лет, α -излучатель. В природе существует 4 изотопа.
 Радон (^{222}Rn) – инертный газ, $T_{1/2} = 3,8$ сут., α -излучатель. Образуется в почве при распаде ^{226}Ra , откуда по трещинам, разломам, порам поступает в приземный слой атмосферы (10-20 м).
 Полоний (^{210}Po), $T_{1/2} = 138,4$ сут., α -излучатель.
 Свинец (^{210}Pb), $T_{1/2} = 19,4$ лет, β -излучатель.

1.1.2 Источники загрязнения окружающей среды естественными радионуклидами

Технологический прогресс приводит к перераспределению естественных радионуклидов в окружающей среде и к радиоактивному загрязнению компонентов биосферы.

К основным источникам загрязнения окружающей среды естественными радионуклидами относятся:

1) *горнодобывающая и горно-перерабатывающая промышленность.* При добыче руды, содержащей ^{238}U и ^{232}Th , происходит отчуждение земли, нарушение ландшафта, плодородия почвы, развиваются эрозия, оползни, овраги, болота и происходит долговременное загрязнение почвы, воды и атмосферы. Радионуклиды включаются в процессы миграции биосферы;

2) *производство и использование стройматериалов.* Максимальное содержание естественных радионуклидов в граните, шлакобетоне, пемзе. В строительных материалах среднее содержание ^{40}K составляет 74–1480 Бк/кг; ^{226}Ra – 9,7–77 Бк/кг; ^{232}Th – 6,3–156 Бк/кг;

3) *производство и использование минеральных удобрений (фосфорных и калийных).* Содержание радионуклидов в удобрениях зависит от технологии получения и вида удобрения. В аммофосе содержатся ^{238}U и ^{232}Th , нет ^{226}Ra . В суперфосфате – много ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra . В фосфоритной муке – содержатся все виды радионуклидов. В фосфорных удобрениях содержатся ^{210}Po и ^{210}Pb . Все калийные удобрения содержат ^{40}K . Например, в сернокислом калие (K_2SO_4) содержится 33,1 мкКи/ц ^{40}K , в хлористом калие – 6,2 мкКи/ц ^{40}K . Внесение калийных удобрений за последние 25 лет повысило содержание ^{40}K в почве на 1,5 %. Существует определенный баланс между вносимым в почву калием и выносимым из почвы растениями калием. Из всех радионуклидов из почвы более интенсивно выносятся растениями ^{40}K (до 30 %), а менее интенсивно выносятся ^{238}U (1 %), ^{232}Th (0,03 %), ^{226}Ra (0,02 %). Установлено, что сельскохозяйственные культуры значительно различаются по выносу калия биологическим урожаем. Например, вынос калия в биологическом урожае кукурузы составляет 218,2 кг/га, ячменя – 98,9 кг/га, озимой пшеницы – 88,8 кг/га, гороха – 66,5 кг/га и сои – 51,7 кг/га, т. е. видовое различие для этих культур составляет 2–4 раза. Контакт удобрения с почвой приводит к изменению форм нахождения радионуклидов в почве. При внесении удобрений содержание подвижных форм ^{238}U , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po возрастает в 4–10 раз. Растворимость радионуклидов в удобрениях значительно выше, чем в исходном сырье;

4) *работа тепловых электростанций на угле, нефти, мазуте, газе.* При работе образуются аэрозоли, оседающие на землю, и твердые отходы в виде золы и шлаков, в которых содержится много ^{40}K (до 270 Бк/кг), ^{210}Pb (до 200 Бк/кг), ^{210}Po (до 170 Бк/кг), ^{232}Th (до 130 Бк/кг), ^{226}Ra (120 Бк/кг). Содержание естественных радионуклидов в почве в радиусе 5–10 км от тепловой электростанции в 1,5–3 раза выше фонового значения;

5) *сжигание ископаемого топлива – газа, нефти, угля.* В биосферу поступают ^{40}K , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{14}C ;

6) *поступление на Землю рассолов нефтяных и газовых месторождений.* В биосферу поступает ^{40}K , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po . В нефти содержание ^{226}Ra в 1000 раз больше, чем ^{232}Th .

1.1.3 Естественная радиоактивность почв, почвенных фракций, почвенных горизонтов

Естественная радиоактивность почв – это результат длительных процессов перераспределения радионуклидов между материнской породой и почвой, растительностью и почвой, воздухом и почвой.

Радиоактивность почв определяется по суммарной активности всех находящихся в ней радионуклидов и отдельно по каждому радионуклиду путем регистрации α -, β -, γ -излучения. Естественная радиоактивность почв обусловлена наличием в ней естественных радионуклидов, среди которых наиболее значимы: ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra и продукты их распада. *Максимальный вклад в естественную радиоактивность почвы вносит ^{40}K (табл. 1).*

Таблица 1. Естественные радионуклиды земной коры (средние показатели)

Радионуклид	Содержание, в % от всех радионуклидов	Вклад в радиоактивность почвы, %
^{40}K	3,0	66
^{238}U	2,5	2
^{232}Th	18,3	5
^{226}Ra	0,2	0,05

Со времени образования Земли за счет естественного радиоактивного распада количество ^{238}U уменьшилось в 30 раз, ^{40}K – в 12 раз. Средняя масса радионуклидов в почвах европейской части составляет 2 г/т почвы. В дерново-подзолистых почвах Республики Беларусь, относящихся к почвам таежной и таежно-лесной зоны, среднее содержание ^{238}U составляет 5,9 Бк/кг, ^{232}Th – 6,9, ^{226}Ra – 46,5, ^{40}K – 400 Бк/кг. В торфяных почвах содержание этих радионуклидов значительно ниже и составляет соответственно 1,7; 6,2; 13,6 и 200 Бк/кг. Максимальное содержание ^{238}U характерно для дерново-подзолистых почв, сформированных на мощном лессовидном суглинке, водно-ледниковых суглинках и водно-ледниковых супесях. Максимальное содержание ^{232}Th и ^{226}Ra отмечается на дерново-подзолистых почвах на мощных лессовидных суглинках.

Радиоактивность почвы зависит от радиоактивности материнской породы, так как минералы и частицы породы входят в скелетную часть минеральной фракции почвы. В вулканических породах содержание естественных радионуклидов выше, чем в осадочных породах (табл. 2).

Таблица 2. Средняя концентрация радия-226, урана-238, тория-232 и калия-40 в различных породах, г/г породы

Типы пород	Радионуклид			
	$^{226}\text{Ra} \times 10^{-12}$	$^{238}\text{U} \times 10^{-6}$	$^{232}\text{Th} \times 10^{-6}$	$^{40}\text{K} \times 10^{-2}$
Вулканические	1,3	4,0	12	2,6
Осадочные:				
песчаные	0,71	1,2	6	1,1
глинистые	1,08	1,2	10	2,7
известняк	0,42	1,3	1,3	0,27

Среди осадочных пород наиболее радиоактивны глины, менее – известняки. Из вулканических пород наиболее радиоактивны граниты, менее радиоактивны – базальты. Почвы, развивающиеся на гранитах (север Беларуси), имеют более высокую естественную радиоактивность, чем почвы, сформировавшиеся на известняках (юг Беларуси).

По возрастанию естественной радиоактивности почвы образуют ряд: 1) торфяники (минимальная активность); 2) болотно-луговые; 3) серые лесные; 4) темно-серые лесные; 5) дерново-подзолистые; 6) чернозёмы южные; 7) солонцы; 8) чернозёмы лесостепной зоны.

Доказано, что с увеличением плодородия почвы увеличивается ее естественная радиоактивность, или содержание всех естественных радионуклидов.

Распределение радионуклидов по горизонтам почвы неодинаково и зависит от типа почвы, материнской породы и характера почвообразовательного процесса. Естественная радиоактивность чернозёмов по всем горизонтам в 10 раз выше, чем активность горизонтов торфяника. Максимальная естественная радиоактивность торфяника у верхнего горизонта. С увеличением зольности торфа содержание естественных радионуклидов повышается. Верховые и переходные торфяники содержат больше естественных радионуклидов, чем низинные.

Естественная радиоактивность чернозёмов по профилю почвы практически не изменяется. Радиоактивность дерново-подзолистых и серых лесных почв изменяется по профилю почвы. В табл. 3 представлено распределение естественных радионуклидов по вертикальному профилю дерново-подзолистой суглинистой почвы (табл. 3).

В Республике Беларусь распространены дерново-подзолистые почвы (суглинистые, супесчаные, песчаные), торфяно-болотные почвы. Максимальная радиоактивность у суглинистых почв, минимальная у песчаных и торфяников. На суглинистых почвах радионуклиды, особенно ^{40}K , находятся на частицах, размером от 0,05 до 0,01 мм, составляющих 75–64 %. В песчаных почвах такие частицы составляют до 15 %, поэтому здесь содержание ^{40}K значительно меньше, чем на суглинистых почвах. Накопление радионуклидов в верхних горизонтах почвы связано с сорбционными свойствами органического вещества, которое интенсивно поглощает ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra .

Таблица 3. Распределение естественных радионуклидов по горизонтам дерново-подзолистой суглинистой почвы

№ п/п	Горизонт	Содержание радионуклидов, Бк/кг		
		Торий-232	Радий-226	Калий-40
1	A _d дернина	38,7	8,9	651,4
2	B ₁ иллювиальный	44,7	29,7	723,4
3	B ₂ иллювиальный	30,2	33,1	766,6
4	B ₃ иллювиальный	37,1	33,6	745,4
5	C-лесс	33,9	34,1	788,2
	Среднее значение	36,9	21,1	734,6

Распределение по профилю почвы ^{238}U аналогично распределению кальция, алюминия и подвижных оксидов железа. ^{238}U вымывается из подзолистого горизонта и обогащает иллювиальный горизонт. Распределение ^{232}Th по профилю почвы равномерное. ^{226}Ra выносится из подзолистого горизонта и накапливается в иллювиальном горизонте. Отношение величины содержания ^{226}Ra к ^{238}U в почвенных горизонтах в дерново-подзолистой суглинистой почве изменяется следующим образом:

A ₁	A ₂	B	C
1:9	1:8	1:12	1:15

Естественная радиоактивность фракций почвы значительно различается: илистая фракция большинства типов почвы в 2–10 раз активнее, чем песчаная. В состав илистой фракции входят наиболее радиоактивные глинистые минералы, группы монтмориллонита, каолинита, гидрослюд. В илистой фракции основной вклад в радиоактивность вносит ⁴⁰K.

1.1.4 Содержание и формы нахождения естественных радионуклидов в почве

Основной естественный радионуклид почвы – ⁴⁰K, содержание которого в земной коре от всех радионуклидов составляет 3 %. Наиболее распространены в природе 3 изотопа калия: 2 стабильные изотопа – ³⁸K, ³⁹K и 1 радиоактивный – ⁴⁰K. На долю ⁴⁰K приходится 0,012 % от всех изотопов калия. В 1 грамме природного калия содержится 276 Бк ⁴⁰K. Содержание радиоактивного ⁴⁰K в почве находится в прямой зависимости от содержания в почве общего и подвижного калия (табл. 4).

Таблица 4. Содержание общего калия и ⁴⁰K в дерново-подзолистой почве

Тип почвы	Общий калий, мг/100 г почвы	Удельная активность, Бк/кг	Содержание ⁴⁰ K, %
1 – суглинистая	19	724	2,0
2 – супесчаная	15	509	1,2
3 – песчаная	13	278	0,05–1,0

В пределах одного типа почвы содержание ⁴⁰K может изменяться в 1,5–2 раза. Максимальная концентрация ⁴⁰K в почвах Казахстана, Кыргызстана, Грузии. В Республике Беларусь, наибольшее содержание ⁴⁰K в почвах северных районов, где сформированы суглинистые почвы, развивающиеся на гранитах. В торфяных почвах содержание ⁴⁰K в 1,5–3 раза меньше, чем в дерново-подзолистых почвах. В почвах СНГ максимальная концентрация ⁴⁰K в черноземах, каштановых и бурых почвах.

Содержание ⁴⁰K в почве зависит от материнской породы. Максимальное содержание ⁴⁰K в почвах, развивающихся на гранитах, минимальное – в почвах, развивающихся на известняках и базальтах, при этом разница составляет до 10 раз. При взаимодействии калия с галогенами образуются соли калия – сильвин (KCl), сильвинит (смесь KCl и NaCl), карналлит (KCl·MgCl₂·H₂O), которые используются для производства калийных удобрений. В составе этих удобрений всегда присутствует радиоактивный калий-40. Калий вступает в ионно-обменные реакции с ионами глинистых минералов группы монтмориллонита и каолинита. Калий может фиксироваться на поверхности кристаллической решетки этих минералов или в незначительных количествах входить в состав кристаллических решеток этих минералов.

Плотность поверхностного загрязнения почвы полей в Республике Беларусь ⁴⁰K составляет 0,7–5,8 Ки/км² (25,9–214,0 кБк/м²). Поведение ⁴⁰K в почве определяется поведением его стабильных изотопных аналогов, т. е. ³⁸K, ³⁹K.

Формы нахождения калия-40 в почве аналогичны формам нахождения стабильных изотопов калия. Согласно классификации М. Р. Алексахина, выделяют 4 формы: 1) водорастворимый калий, или калий почвенного раствора, где калий находится в виде K⁺; 2) обменный калий – калий, находящийся на отрицательно заряженных минеральных и органических коллоидах в виде K⁺; 3) труднообменный калий – калий, находящийся в кристаллических решетках глинистых минералов в виде K⁺; 4) необменный калий – калий почвенных минералов (биотит, мусковит, иллит, микроклин, ортоклаз и др.).

Почвы Республики Беларусь по содержанию естественных радионуклидов разделяются на 3 типа: 1 тип – обогащенные ²³⁸U и обедненные ²³²Th; 2 тип – обедненные ²³⁸U и обогащенные ²³²Th; 3 тип – почвы с относительно одинаковым содержанием ²³⁸U и ²³²Th.

Радионуклиды ²³⁸U и ²³²Th относятся к семейству актиноидов, поэтому имеют одинаковые химические свойства. В природе ²³⁸U имеет два состояния окисления – U⁺⁴ и U⁺⁶. Все первичные минералы почвы, содержащие U⁺⁴, разделяются на 2 группы: 1 группа – группа уранита – это кристаллические формы с примесью тория и кремния; 2 группа – группа настурана – это безториевые оксиды урана. Минералы, содержащие уран в виде U⁺⁶, представлены солями уранила, которые хорошо растворимы в воде.

Торий-232 имеет одну степень окисления (Th⁺⁴), входит в состав многих почвенных минералов. К основным минералам, содержащим торий, относят торит, торианит, монацит. В почве ²³⁸U и ²³²Th находятся в виде диоксидов, гидроксидов, галогенидов, оксигалогенидов, растворимых и нерастворимых солей, комплексов с органическими и минеральными кислотами, соединений с редкоземельными элементами. В связи с этим выделяют 3 основные формы нахождения этих радионуклидов в почве: собственные минералы, растворимые формы, изоморфное вхождение в другие минералы. ²³⁸U в почве более подвижен, чем ²³²Th. Содержание ²³⁸U в земной коре – 2,5 %, ²³²Th – 18,3 %. Удельная активность ²³⁸U дерново-подзолистой почвы в Республики Беларусь составляет в среднем 6 Бк/кг, а ²³²Th – 7 Бк/кг.

Радий-226 находится в природе в равновесном состоянии с материнскими радионуклидами, т.е. с ^{238}U и ^{232}Th , образует растворимые соли с галогенами и слабо растворимые сульфаты и фосфаты, абсорбируется на твердых телах подобно ^{232}Th .

При радиоактивном распаде изотопов радия образуются радиоактивные изотопы радона. Среди изотопов радона наиболее распространены три изотопа: радон (^{222}Rn , $T_{1/2} = 3,8$ дня); торон (^{220}Rn , $T_{1/2} = 5,4$ сек.); актинон (^{219}Rn , $T_{1/2} = 3,9$ сек). В биосфере ^{222}Rn образуется в 20 раз больше, чем ^{220}Rn . Для радона характерны следующие свойства: радон не окисляется кислородом, находится в биосфере в молекулярной форме, хорошо растворим в воде, соединяется с водой с образованием гексагидратов, соединяется с фенолом и фтором; хорошо сорбируется на поверхности твёрдых тел, на органических коллоидах и неорганических гелях. Адсорбированный радон легко перераспределяется в твердом теле с крайних слоёв во внутренние. В почве радон постоянно накапливается в порах, капиллярах и трещинах пород почвы. В земной коре мигрирует в газообразной и растворимой форме.

При распаде радона образуются изотопы свинца и полония, среди них наиболее значимы ^{210}Pb и ^{210}Po , поведение которых в почве мало изучено. В то же время известно, что поведение ^{210}Pb подобно поведению радия и стабильного свинца. Полоний и свинец поступает в почву двумя путями: 1 путь – естественный радиоактивный распад радия-226 в почве и 2 путь – естественный радиоактивный распад радона-222 в атмосфере и выпадения этих радионуклидов в виде аэрозолей на почву.

Свинец-210 образует устойчивые комплексы с гуминовыми кислотами и нерастворимые гуматы. Поглощение ^{210}Pb глинистыми минералами носит обменный характер, поэтому подвижность ^{210}Pb на дерново-подзолистых почвах очень высокая. На этих почвах содержится до 90 % водорастворимых и обменных форм этого радионуклида.

Полоний-210 в почве связывается с органическим веществом и минеральными коллоидами.

Таким образом, среди естественных радионуклидов основной вклад в радиоактивность почвы, почвенных горизонтов и почвенных фракций вносят естественный радионуклид ^{40}K .

1.1.5 Естественная радиоактивность гидросферы

Понятие гидросферы включает океаны, моря, озера, реки, болота, льды, подземные воды и атмосферную влагу. Определяющую роль в радиоактивности гидросферы в настоящее время играют естественные радионуклиды, характер распределения которых в гидросфере определяется совокупностью геохимических и биогеохимических процессов, протекающих в гидросфере. На территории Республики Беларусь имеются только пресноводные источники.

На содержание естественных радионуклидов в пресноводных экосистемах влияют следующие факторы: природно-климатическая зона и состав материнской породы; возможность поступления радионуклидов в растворимой форме из твердой фазы почвы; растворимость радионуклидов и продолжительность нахождения их в растворимом виде; химические свойства радионуклидов; наличие изотопных и неизотопных носителей; форма нахождения и содержание радионуклидов в породах; способность образовывать коллоидные и другие соединения.

Основной вклад в природную радиоактивность гидросферы вносит ^{40}K , меньший вклад вносят ^{87}Rb , а также первичные радионуклиды ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th и продукты их распада. Кроме этого в гидросферу постоянно поступают космогенные радионуклиды – ^3H , ^{14}C , ^7Be . Концентрация в природных водах основных радионуклидов представлена в табл. 5.

Таблица 5. Средняя удельная активность естественных радионуклидов в природных водах (Бк/л)

Радионуклид	Дождевая вода	Вода озер, рек	Грунтовые воды	Питьевая вода	Поверхностные воды океана
^{40}K	$1,6 \cdot 10^{-2}$	0,26	$4 \cdot 10^{-2}$	0,2	13,0
^{87}Rb	-	$1,5 \cdot 10^{-3}$	-	-	0,11
^{222}Rn	$4 \cdot 10^{-2}$	0,8	37,0	11,0	$1 \cdot 10^{-3}$
^{226}Ra	-	$5 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
^{230}Th	-	$2,6 \cdot 10^{-3}$	-	-	$2 \cdot 10^{-6}$
^{232}Th	-	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-3}$	-	$4,4 \cdot 10^{-8}$
^{238}U	-	$1,1 \cdot 10^{-2}$	0,14	$2 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-2}$
^7Be	1,1	$7 \cdot 10^{-3}$	-	-	$2 \cdot 10^{-3}$

Прочерки в таблице означают отсутствие точных данных по концентрации указанных радионуклидов, связанное в основном с очень низкими концентрациями этих радионуклидов. Радиоактивность атмосферных осадков обусловлена наличием в них ^{222}Rn и продуктов его распада (изотопов свинца, полония и висмута), ^7Be и ^{40}K .

Атмосферные осадки (дождь, снег, град) захватывают находящиеся в воздухе аэрозольные минеральные частицы с адсорбированными на них радионуклидами, которые в составе осадков поступают на землю и водную поверхность рек и озер. Радиоактивность речной воды обусловлена в основном ^{40}K , содержание которого зависит от химического состава пород, омываемых этими водами, а также от погодноклиматических условий. Как правило, снеговые и дождевые воды содержат меньшее количество радионуклидов, чем грунтовые и поверхностные воды. В период весеннего таяния снега и во время интенсивных ливней поступление в реки больших масс воды сопровождается понижением удельной

активности речной воды. Во время паводков общая радиоактивность воды рек может возрасти за счет поступления с током паводковых вод почвенных частиц, содержащих естественные радионуклиды. В некоторых случаях в воде рек химический состав растворенных веществ в течение года может сильно изменяться, при этом возможно повышение гидрокарбонатных, сульфатных и хлоридных соединений. Резкое колебание в химическом составе воды сопровождается изменениями и в уровне радиоактивности воды рек.

Содержание радионуклидов в воде озер связано, во-первых, с химическим составом и с содержанием естественных радионуклидов в воде рек, впадающих в озера, и, во-вторых, с химическим составом и с содержанием естественных радионуклидов в воде подземных вод, питающих озера. Как правило, существует прямая зависимость между степенью минерализации и радиоактивностью озерной воды. В тех случаях, когда озеро находится в зоне избыточного увлажнения, и приток воды превышает ее испарение, возникает сток воды из озера. В результате этого процесса радиоактивность озерной воды практически не отличается от радиоактивности воды рек и, как правило, бывает невысокой. В условиях засушливого климата вследствие превышения испарения воды над притоком, сток воды из таких озер отсутствует или незначителен, в озерах происходит аккумуляция солей и, соответственно, увеличение радиоактивности воды.

В табл. 6 приведено среднее содержание естественных радионуклидов в поверхностных водах Республики Беларусь. В речных водах ^{40}K находится в растворимой форме, т. е. в виде K^+ , а также в виде адсорбированных катионов на органических и минеральных коллоидах и в виде солей. ^{238}U находится во взвешенном и растворимом состоянии, т. е. в состоянии гидрооксидных комплексов, коллоидов, комплексов с органическими кислотами и на взвесах.

Таблица 6. Среднее содержание естественных радионуклидов в воде рек и озер Республики Беларусь

Радионуклид	Удельная активность, Бк/л
^{40}K	0,3
^{222}Rn	0,8
^{226}Ra	$5,0 \times 10^{-3}$
^{232}Th	$1,1 \times 10^{-4}$
^{238}U	$1,1 \times 10^{-2}$
^7Be	$1,1 \times 10^{-3}$

^{232}Th находится на взвесах, т. е. на мельчайших частицах минералов и коллоидов (до 90 %). Растворимость и содержание ^{232}Th в воде в 100 и более раз меньше, чем ^{238}U . Из пород в воду переходит больше дочерних радионуклидов, т. е. изотопов радия и радона, чем материнского ^{232}Th .

^{222}Ra легко выщелачивается из твердой фазы в воду и соединяется с анионами SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , CO_3^{3-} , Cl^- , с которыми образует различные соединения и переходит в донные отложения.

Содержание ^{222}Rn зависит от содержания ^{226}Ra , поэтому содержание радона значительно выше в водах, обогащенных радием. ^{222}Rn хорошо растворим в воде, при этом могут образовываться гексогидраты радона. ^{222}Rn хорошо соединяется с органическими коллоидами и неорганическими гелями, а также сорбируется на поверхности твердых взвесей. Концентрация ^{222}Rn в водах рек и других поверхностных водах может значительно превышать концентрацию радия.

Продукты распада ^{222}Rn – ^{210}Po и ^{210}Pb находятся в форме заряженных коллоидов, содержащих железо, и на минеральных и органических взвесах. Поведение ^{210}Po и ^{210}Pb в водных системах подобно поведению ^{226}Ra .

Подземные воды заполняют пустоты земной коры, которые по условиям залегания разделяются на почвенные, грунтовые и межпластовые. В состав межпластовых вод входят и минеральные воды, которые часто имеют высокую радиоактивность. Как правило, радиоактивность подземных вод зависит от их химического состава, который определяется физико-географическими, геологическими, гидрологическими, физико-химическими, биологическими факторами.

Почвенные воды залегают вблизи земной поверхности почв и формируются за счет атмосферных осадков, поэтому их радиоактивность зависит в основном от количества растворимых радионуклидов, содержащихся в выше лежащих почвенных слоях.

Грунтовые воды – это первый от поверхности водоупорный слой, куда радионуклиды поступают при промывании почвы, поэтому их радиоактивность также зависит от количества растворимых радионуклидов, содержащихся в почвенных слоях.

Межпластовые (артезианские) воды находятся между водоупорными слоями в осадочных породах и в зависимости от радиоактивности омываемых пород имеют разную активность. Увеличение радиоактивности артезианских вод находится в прямой зависимости от общего содержания в них солей. В водах, связанных с нефтяными месторождениями, может содержаться значительное количество ^{226}Ra и продуктов его распада. Содержание естественных радионуклидов в воде артезианских скважин зависит от глубины скважины и от состава пород водоупорных слоев. В табл. 7 приведены сведения о содержании ^{226}Ra , ^{210}Po и ^{210}Pb в воде артезианских скважин на территории Могилевской области.

Таблица 7. Содержание ^{226}Ra , ^{210}Po и ^{210}Pb в воде артезианских скважин на территории Могилевской области

Населенный пункт	Удельная активность радионуклидов, Бк/л $\times 10^{-2}$		
	^{210}Po	^{226}Ra	^{210}Pb
Быхов	1,0	9,3	0,6
Климовичи	1,7	5,0	1,0
Кричев	2,0	2,4	1,2
Осиповичи	2,7	8,0	1,6

Согласно сведениям табл. 7, более высоким содержанием ^{226}Ra в воде артезианских скважин характеризуются города Быхов и Осиповичи. Содержание ^{226}Ra в воде артезианских скважин Кричева и Климович значительно ниже. Разница между максимальной и минимальной удельной активностью ^{226}Ra составляет 3,8 раза, ^{210}Po – 2,7 раза, ^{210}Pb – 1,6 раз.

Содержание ^{232}Th в подземных водах ниже содержания ^{238}U в 1,2 раза и составляет 2×10^{-4} – 2×10^{-6} г/л. Согласно принятой в радиогидрогеологии классификации, все воды радиоактивных минеральных источников, в зависимости от преобладания в их составе того или иного радиоактивного элемента делится на 3 группы: радоновые, радиевые и урановые. Кроме этого выделяют промежуточные типы вод: радоново-радиевые, ураново-радиевые и радиево-ториевые. Радоновые и радоново-радиевые воды используются для лечебных целей.

В Республике Беларусь с 2000 года проводится определение содержания естественных радионуклидов в воде артезианских скважин и колодцев городов и населенных пунктов, т. е. в питьевой воде. При проведении радиационного контроля питьевой воды определяют содержание следующих радионуклидов: урана-234, 235, 238; тория-228, 230, 232; радия-224, 226, 228; радона-220, 222; свинца-210; полония-210. Согласно НРБ-2000 установлены уровни вмешательства (УВ) при поступлении с водой этих радионуклидов. Например, УВ для ^{238}U – 3,1 Бк/кг; ^{232}Th – 0,6 Бк/кг; ^{226}Ra – 0,5 Бк/кг; ^{222}Rn – 60 Бк/кг; ^{210}Pb – 0,2 Бк/кг; ^{210}Po – 0,12 Бк/кг; ^{40}K – 22 Бк/кг.

1.1.6 Естественная радиоактивность атмосферного воздуха.

Факторы, влияющие на радиоактивность

Существует два основных источника поступления естественных радионуклидов в атмосферу: радионуклиды земной коры и продукты их распада; космогенные радионуклиды.

Радионуклиды земной коры поступают в атмосферу в результате следующих процессов: выветривание земных пород (^{40}K , ^{232}Th , ^{226}Ra); разложение органического вещества (^{14}C , ^3H); диффузия из почвы (^{222}Rn , ^{210}Po , ^{210}Pb).

Космогенные радионуклиды образуются в верхних слоях атмосферы, при взаимодействии космических излучений с атомами атмосферы. Поступают в приземный слой атмосферы при «возмущении» верхних слоев атмосферы, при турбулентном движении атмосферы в приземных слоях, при ветре, при осадках.

Естественные радионуклиды атмосферы разделяются на 4 группы:

первая группа – радионуклиды земной коры и продукты их распада (^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , изотопы ^{222}Rn , ^{210}Pb , ^{210}Po), а также ^{40}K . Радионуклиды поступают с поверхности почвы и в результате процесса эманации (из глубины почвы по трещинам и порам). Незначительная часть радионуклидов поступает с водной поверхности в составе водяных паров или аэрозолей;

вторая группа – космогенные радионуклиды (^7Be , ^{10}Be , ^{14}C , ^3H). Максимальная концентрация этих радионуклидов на высоте 15–20 км, при этом 70 % образуется в стратосфере и 30% в тропосфере;

третья группа – радионуклиды, входящие в космическую пыль (^{10}Be , ^{26}Al). Максимальная концентрация этих радионуклидов на высоте испарения микрометеоритов – 80–100 км;

четвертая группа – радионуклиды природных радиоактивных аэрозолей, поступающие в атмосферу с земной и водной поверхности.

Значительный вклад в естественную радиоактивность атмосферы вносят ^{222}Rn , ^{210}Pb , ^7Be , ^3H , ^{14}C , ^{40}K . Основная масса естественных радионуклидов в атмосфере оседает на частицах от 15 нм до 0,5 мкм, при этом больше всего радионуклидов оседает на частицах размером 0,1 мкм.

^{222}Rn образуется при распаде ^{226}Ra в почвах и горных породах, откуда по трещинам и порам поступает в атмосферу. В атмосферу ^{222}Rn может поступать из строительных материалов, содержащих ^{226}Ra , а также из гидросферы. При распаде ^{222}Rn образуются сравнительно короткоживущие радионуклиды, которые в момент их образования представляют собой положительно заряженные ионы, которые легко захватываются аэрозольными частицами атмосферы. Продукты распада ^{222}Rn (изотопы полония, свинца и висмута) в воздухе находятся в двух формах:

1) элементарные ионы или отдельные атомы, обладающие большим коэффициентом диффузии, равным $0,5 \text{ см}^3/\text{с}$;

2) атомы, осевшие на аэрозольных частицах, находящихся в воздухе, которые обладают слабой диффузией – $2 \cdot 10^{-4}$ – $3 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$.

Первая форма очень неустойчива из-за высокой способности атомов и ионов к адсорбции, однако она постоянно восполняется за счет радиоактивного распада атомов радона. Среди продуктов распада ^{222}Rn в

естественную радиоактивность атмосферы основной вклад вносит ^{210}Pb . Образование свинца в атмосфере и его поступление на землю постоянно во времени для данной местности. Широтное распределение атмосферных выпадений ^{210}Pb имеет два максимума, которые соответствуют 30–50° северной и южной широты. В северных широтах содержание ^{222}Rn и ^{210}Pb в атмосфере больше, чем в южных, потому что в северном полушарии сосредоточено большая часть земной поверхности. Сравнительно большой период полураспада ^{210}Pb (22 года) позволяет ему распределяться в атмосфере достаточно равномерно.

Средняя концентрация ^{222}Rn в приземной атмосфере над сушей составляет $2,3 \text{ Бк/м}^3$, ^{210}Pb – $1,5 \times 10^{-4} \text{ Бк/м}^3$, ^{210}Po – $1,2 \times 10^{-5} \text{ Бк/м}^3$.

В зданиях концентрация ^{222}Rn в воздухе выше и составляет $3,0\text{--}25,0 \text{ Бк/м}^3$. Она зависит от содержания ^{226}Ra и ^{232}Th в стройматериалах (прямая связь), от этажности (чем ниже этаж, тем больше концентрация ^{222}Rn в воздухе помещения). ^{222}Rn в 100 раз тяжелее воздуха, поэтому максимальная концентрация ^{222}Rn в атмосфере наблюдается у поверхности почвы (при этом на высоте 1 м находится до 90 % ^{222}Rn).

Известно, что 75 % ^7Be образуется в верхних слоях атмосферы, т. е. в стратосфере, при действии космического излучения на атомы азота. ^7Be также образуется при извержении и испарении материи с поверхности звезд и туманностей космоса. Входит в состав окиси и гидроокиси бериллия (BeO , $\text{Be}(\text{OH})_2$), которые сорбируются аэрозольными частицами, захватываются дождевыми каплями и поступают в нижние слои атмосферы. Концентрация бериллия в атмосферных выпадениях достигает $(400\text{--}4000) \times 10^{-3} \text{ Бк/л}$. Содержание ^7Be в атмосфере в 10 раз больше на полюсах, чем на экваторе.

Бериллий-10 образуется в стратосфере из ядер O_2 по реакции «скалывания». На землю выпадает с осадками. Часть ^{10}Be поступает в атмосферу с космической пылью. Концентрация ^{10}Be в атмосферных выпадениях составляет $(4\text{--}400) \times 10^{-3} \text{ Бк/л}$. Содержание ^7Be и ^{10}Be в атмосфере непостоянно в течение года. При этом максимальная концентрация с середины мая по август, так как в этот период максимальный приток космического излучения. Минимальная концентрация этих радионуклидов в октябре-январе, потому что в этот период минимальный приток космического излучения и больше пасмурных дней.

Углерод-14 образуется в атмосфере при взаимодействии быстрых нейтронов с атомами азота. Средняя концентрация ^{14}C в аэрозолях атмосферы составляет $0,23 \text{ Бк/л}$, а концентрация в атмосферных выпадениях – $40 \times 10^{-3} \text{ Бк/л}$.

Тритий образуется в атмосфере при взаимодействии нейтронов с ядрами атомов O_2 и N_2 . Средняя концентрация в аэрозолях атмосферы составляет $200\text{--}400 \times 10^{-3} \text{ Бк/л}$.

Калий-40 поступает в атмосферу с минеральной и органической пылью, морскими аэрозолями. Максимальная концентрация ^{40}K в атмосфере наблюдается при проведении сельскохозяйственных работ на сельскохозяйственных угодьях (предпосевная обработка почвы, посев и уборка).

Факторы, влияющие на радиоактивность атмосферы:

- *местонахождение на планете* (над поверхностью океана радиоактивность меньше, чем над поверхностью суши, потому что в литосфере содержится значительно больше естественных радионуклидов);

- *содержание естественных радионуклидов в материнской породе и почве* (максимальная концентрация над глинистыми почвами, развивающимися на гранитах, где высокое содержание ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th);

- *сезон года* (летом радиоактивность выше, чем зимой, так как больше приток космического излучения, поэтому больше образуется космогенных радионуклидов, а также летом высокое содержание пыли в воздухе);

- *состояние атмосферы* (в солнечные дни активность выше, чем в пасмурные, потому что снижается приток космического излучения);

- *солнечная активность* (вспышки на солнце сопровождаются повышением интенсивности солнечного излучения, поэтому образуется больше космогенных радионуклидов).

Согласно радиационному мониторингу, естественная радиоактивность атмосферы характеризуется двумя показателями: во-первых, содержанием естественных радионуклидов в аэрозолях атмосферы и, во-вторых, содержанием естественных радионуклидов в естественных выпадениях атмосферы, в которых определяют концентрацию ^7Be и ^{40}K .

1.1.7 Естественная радиоактивность флоры и фауны

Основной вклад в естественную радиоактивность флоры вносят естественные биогенные радионуклиды – ^{14}C , ^3H , ^{40}K , меньший вклад – ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{238}U и другие радионуклиды.

Филогенез и онтогенез растительного мира происходил и происходит в радиоактивной среде. Естественные радионуклиды находятся в почве, воде, воздухе и в самой растительности. В растительность они поступают через корни (*корневой путь поступления*) и вегетативные органы (*аэральный путь поступления*). Первые работы по изучению радиоактивности флоры провёл В. И. Вернадский в 1930 году, который определил наличие в растительности естественных радионуклидов ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra .

Концентрация естественных радионуклидов в растениях может быть в 10–20 раз выше, чем их концентрация в почвенном растворе и в твердой фазе почвы. Накопление радионуклидов в флоре зависит от следующих факторов: *физико-химических свойств радионуклидов и формы нахождения их в почве, типа почвы, биологических особенностей флоры.*

При изучении влияния физико-химических свойств радионуклидов и формы нахождения их в почве на поступление в растение было установлено, что при корневом поступлении естественные радионуклиды значительно различаются и образуют *убывающий ряд*: ^{40}K – ^{226}Ra – ^{232}Th – ^{238}U . Из физико-химических свойств радионуклидов оказывают влияние валентность, величина ионного радиуса, растворимость в почвенном растворе и присутствие в нем в виде ионов.

Калий-40. Среди естественных радионуклидов почвы только ^{40}K одновалентен, что обеспечивает ему безбарьерное участие в ионно-обменных реакциях при корневом поступлении в растение. Небольшой ионный радиус обеспечивает высокую проникающую способность ионам калия через мембраны клеток всасывающих корней. Высокая растворимость ^{40}K в почвенном растворе определяет содержание в почве высокой концентрации катионов этого радионуклида. Калий-40 наряду со стабильными изотопными аналогами относится к основным макроэлементам питания растений. Вклад радиоактивного ^{40}K у культурных растений в общую β -активность составляет от 40 до 80 %. По содержанию ^{40}K в зерне зерновых культур установлен убывающий ряд: кукуруза > ячмень > пшеница > овес > рожь, при этом видовое различие составляет 1,3-3 раза. К настоящему времени доказано, что присутствие ^{40}K в почвенном растворе повышает ферментативную активность амилазы и пероксидазы на 10–40 %, особенно первые 7 дней роста. В растениях ^{40}K распределяется неравномерно, при этом в корнях накапливается до 60 %, а в вегетативных органах до 40 % при максимальной концентрации в листьях и стеблях. У мхов и лишайников содержание ^{40}K составляет 4–6 %.

Таким образом, чем ниже в эволюционном происхождении находятся виды флоры, тем меньше в их составе содержание ^{40}K и выше содержание ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{238}U .

Радий-226 – аналог бария и кальция, относится к двухвалентным элементам, поэтому поступление через корни не имеет биологического барьера, но коэффициент перехода радия из почвы в растения значительно ниже, чем калия. Максимальное содержание ^{226}Ra в корнях растений. Содержание материнского ^{226}Ra в флоре в 10 раз меньше, чем его дочерних продуктов распада – ^{210}Pb и ^{210}Po . Благодаря наличию в почвенном растворе в подвижных формах ^{210}Pb легко поступает через корневые системы в растение. ^{210}Pb и ^{210}Po могут поступать в аэрозольной форме через вегетативные органы растений. Максимальная концентрация ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po наблюдается у мхов и лишайников. Уран-238 и торий-232 – относятся к тяжелым химическим элементам, имеют большие ионные радиусы и высокую валентность, поэтому существует корневой барьер при поступлении их в растения по механизму ионно-обменных реакций. При высокой концентрации этих радионуклидов в почве они поступают в корни растений преимущественно в результате диффузии. В растениях ^{232}Th накапливается больше, чем ^{238}U . Максимальная концентрация ^{238}U наблюдается у мхов, ^{232}Th – у лишайников. У древесных пород ^{238}U и ^{232}Th накапливаются преимущественно в старых органах, у травянистых растений – в стеблях.

Углерод-14 и тритий поступают в растение через наземные органы в газообразном состоянии в процессе дыхания, через устьица и распределяются преимущественно в наземных вегетативных органах.

Естественная радиоактивность флоры была хорошо и более полно изучена в 1950–1960 гг. Основной вклад внесли ученые Украины, которые классифицировали всю флору и указали, что естественная радиоактивность связана с эволюционным развитием. Они предложили классификационный ряд флоры по содержанию в ней естественных радионуклидов: лишайники (максимальная радиоактивность); мхи; папоротники; голосеменные; покрытосеменные.

Более ранние в эволюционном происхождении виды флоры и примитивные формы растений характеризуются повышенной β - и α -активностью или высоким накоплением естественных β - и α -излучающих радионуклидов. Среди лишайников максимальная естественная радиоактивность у тех видов, которые поселяются на деревьях. Среди мхов – максимальная активность у сфагнума, среди папоротников – у многоножки обыкновенной, среди голосеменных – у видов сосны и можжевельника, среди покрытосеменных – у растений семейств вересковые, розоцветные, первоцветные, сложноцветные.

По значимости для растений естественные стабильные и радиоактивные изотопы делятся на макро-, микро- и ультрамикроэлементы. Физиологическая роль естественных радионуклидов очень сложна. При этом они практически все необходимы для роста и развития растений. В организме растений они не заменяют друг друга, способствуют усилению интенсивности обмена веществ, повышению содержания углеводов, белков, сахаров, а также усилению азотфиксирующей способности клубеньковых бактерий бобовых культур.

Таким образом, основной вклад в естественную радиоактивность покрытосеменных, куда относятся практически все сельскохозяйственные культуры, вносит ^{40}K .

В организме человека и животных присутствуют почти все естественные радионуклиды, которые поступают в организм с пищей (кормом), водой и воздухом. Содержание в организме того или иного радионуклида зависит от интенсивности его участия в процессах обмена веществ в организме. Все естественные радионуклиды, находящиеся в организме человека и животных условно разделяются на *две группы*:

первая группа – активно участвующие в процессах обмена веществ в организме вместе со стабильными изотопными аналогами – ^{40}K , ^{14}C , ^3H , поведение которых в организме неплохо изучены;

вторая группа – пассивно участвующие в процессах обмена веществ в организме – ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{238}U , ^{210}Pb и ^{210}Po , поведение которых в организме мало изучены.

Радионуклиды первой группы ^{40}K , ^{14}C , ^3H – это основные естественные радионуклиды организма, которые всегда входят в состав всех живых структур организма. Без стабильных аналогов этих радионуклидов невозможно существование организма. По содержанию в организме человека (весом 70 кг) естественных радионуклидов, оцененному по общей радиоактивности каждого радионуклида (Бк/организм) естественные радионуклиды располагаются в следующем порядке: ^{40}K (4200) – ^{14}C (3000) – ^{87}Rb (600) – ^3H (35) – ^{226}Ra (10) – ^{238}U (2) – ^{232}Th (2).

Калий-40 в организме распределен неравномерно. Максимальная средняя концентрация ^{40}K наблюдается в мышцах (107 Бк/кг), головном мозге (89 Бк/кг), печени (63 Бк/кг), при этом в других органах концентрация ниже, которая в легких составляет – 44 Бк/кг, а в жировой и костной тканях – по 18 Бк/кг. Содержание ^{40}K зависит от органа (максимальная концентрация в мышцах), интенсивности обмена веществ (чем интенсивнее обмен веществ, тем больше содержание калия), пола (у мужчин содержание калия больше), возраста (с возрастом содержание калия уменьшается), массы тела и характера мышечной деятельности (у спортсменов и людей, занятых тяжелой физической работой, содержание калия больше). В организм человека в день поступает 3-4 грамма общего калия. При этом за 1 минуту в организме распадается примерно 600 атомов ^{40}K . За год в организм человека поступает 135000 Бк ^{40}K .

Углерод-14 равномерно распределен по организму, при этом его много содержится в жировой ткани, где среднее содержание составляет до 52 Бк/кг. За год в организм человека поступает 20000 Бк ^{14}C .

Тритий концентрируется в мышцах (0,55 Бк/кг) и костных тканях (0,34 Бк/кг). За год в организм человека поступает 250 Бк трития.

Радий-226 – аналог кальция, который, подобно кальцию, концентрируется в костной ткани, замещая кальций. Среднее содержание ^{226}Ra в костной ткани – 25 Бк/кг; в печени – до 10 Бк/кг; в легких – до 7 Бк/кг. За год в организм человека поступает 13500 Бк ^{226}Ra .

Уран-238 и *торий-232* содержатся в организме в незначительных концентрациях, при этом в мягких тканях в 100 раз меньше, чем в костях. Максимальная концентрация наблюдается в костях головы, в бедренной и крестцовой кости.

При поступлении свинца в организм через желудочно-кишечный тракт и через легкие до 70% ^{210}Pb концентрируется в скелете. При этом содержание в костях составляет – 15 Бк/кг, в мягких тканях – 6 Бк/кг. ^{222}Rn в организм поступает через легкие с воздухом и оседает преимущественно в легочной ткани.

Таким образом, основным естественным радионуклидом, содержащимся в организме, является ^{40}K , который неравномерно распределяется в органах и тканях организма.

1.2 ИСКУССТВЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ

1.2.1 Классификация, характеристика искусственных радионуклидов

Радионуклиды, появление которых в биосфере связано с деятельностью человека, называются **искусственными** или **техногенными радионуклидами**. Основные причины появления искусственных радионуклидов в биосфере – испытание ядерного оружия и аварийные ситуации на атомных электростанциях. Искусственные радионуклиды разделяются на 3 группы:

первая группа – радиоактивные продукты ядерного деления, которые возникают при делении ядер радиоактивных элементов ^{238}U , ^{235}U , ^{239}Pu . Среди радионуклидов этой группы наиболее значимы изотопы цезия (Cs), стронция (Sr), йода (I), церия (Ce), рутения (Ru). Характеристика основных радиоактивных изотопов искусственных радионуклидов приводится ниже.

Среди изотопов стронция три изотопа радиоактивных: ^{89}Sr , β -излучатель, $T_{1/2} = 50,5$ сут; ^{90}Sr , β -излучатель, $T_{1/2} = 28$ лет, ^{85}Sr β - и γ -излучатель, $T_{1/2} = 65$ дней. Вход ^{90}Sr из продуктов деления составляет примерно 4%. Степень окисления +2. В почве находится в виде катионов, не участвует в ионно-обменных реакциях и не сорбируется глинистыми минералами. Поведение ^{90}Sr аналогично поведению кальция и стабильного стронция.

Среди изотопов цезия два изотопа радиоактивных: ^{134}Cs , β -излучатель, $T_{1/2} = 2,06$ года; ^{137}Cs , β -излучатель, $T_{1/2} = 30$ лет. Выход ^{137}Cs из продуктов деления примерно 6%, степень окисления +1, в почве присутствует в виде Cs^+ , он имеет самый большой радиус, среди одновалентных катионов первой группы, за счет большого ионного радиуса он прочно сорбируется глинистыми минералами и переходит в прочно связанную форму.

Цезий и стронций – это биогенные радионуклиды, потому что цезий является химическим аналогом калия, с которым они находятся в первой группе таблицы Менделеева. Стронций является аналогом кальция, с которым они находятся во второй группе таблицы Менделеева. Поэтому в биосфере они мигрируют соответственно по калиевым и кальциевым каналам, а в организме человека и животных распределяются аналогично калию и кальцию.

Среди радиоактивных изотопов йода наиболее значимыми являются: ^{131}I , β -излучатель, $T_{1/2} = 8$ сут.; ^{129}I , β -излучатель, $T_{1/2} = 1,57 \times 10^7$ лет.

Среди изотопов церия 20 радиоактивных, среди которых наиболее значимы: ^{141}Ce , β - и γ -излучатель, $T_{1/2} = 32$ дня; ^{144}Ce , β - и γ -излучатель, $T_{1/2} = 28$ дней. Выход ^{144}Ce из продуктов деления – 6%. Степень окисления +3. В почве малоподвижен.

Среди изотопов рутения 14 радиоактивных, среди которых наиболее значимы: ^{103}Ru , β - и γ -излучатель, $T_{1/2} = 39$ дней; ^{106}Ru , β -излучатель, $T_{1/2} = 368$ сут. Выход ^{106}Ru из продуктов деления до 10%. Степень окисления +4; +3; +6; +8.

В первую группу также входит много короткоживущих газообразных радионуклидов, среди которых наиболее значимы изотопы криптона и ксенона.

вторая группа – радионуклиды наведенной активации, которые образуются при взаимодействии нейтронов с ядрами атомов металлов, входящих в состав конструкций реакторов, корпусов ядерных боеголовок и других объектов. Характеристика основных радионуклидов: марганец (^{55}Mn), $T_{1/2} = 31$ день (β -излучатель); кобальт (^{60}Co), $T_{1/2} = 5$ лет (β/γ -излучатель); железо (^{55}Fe), $T_{1/2} = 2$ года (β/γ -излучатель); (^{59}Fe), $T_{1/2} = 45$ сут. (β/γ -излучатель); цинк (^{65}Zn), $T_{1/2} = 244$ дня (β/γ -излучатель). Эти радионуклиды наряду со своими стабильными изотопными аналогами относятся к микроэлементам.

третья группа – трансурановые радионуклиды, которые возникают при ядерных реакциях в ядерно-энергетических установках и при ядерных взрывах.

Характеристика основных радионуклидов приведена ниже.

Среди изотопов плутония (Pu) известно 5 радиоактивных: ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu . Из них наиболее значимы: ^{239}Pu , $T_{1/2} = 2,4 \times 10^6$ лет (α -излучатель); ^{238}Pu , $T_{1/2} = 87$ лет, (α -излучатель), ^{241}Pu , $T_{1/2} = 14,4$ года, (α -излучатель). Pu – степень окисления +3; +4; +5; +6; +7. Поведение подобно поведению Th.

Среди изотопов нептуния (Np) известно 15 радиоактивных, из которых наиболее значим ^{237}Np , $T_{1/2} = 2,4 \times 10^4$ лет, (α -излучатель).

Среди изотопов америция (Am) известно 11 радиоактивных изотопов, из которых наиболее значимы ^{241}Am , $T_{1/2} = 432$ года, (α -излучатель) и ^{243}Am , $T_{1/2} = 7380$ лет, (α -излучатель). Америций в почве более подвижен по сравнению с плутонием и находится преимущественно в водорастворимой форме.

1.2.2 Источники загрязнения окружающей среды искусственным радионуклидами

К основным источникам поступления искусственных радионуклидов в окружающую среду относят:

- 1) испытание ядерного и термоядерного оружия в различных природных средах (атмосфере, воде, земле);
- 2) газообразные выбросы атомных станций при работе в штатном режиме, аварии на атомных электростанциях, аварии на предприятиях с ядерно-топливным циклом;
- 3) радиохимическая промышленность (добыча, переработка и обогащение урана);
- 4) радиационные отходы и места их захоронения;
- 5) транспортировка и хранение радиоактивных отходов;
- 6) морской флот (атомные подводные лодки и аварии на них);
- 7) воздушный военный флот и искусственные спутники Земли;
- 8) ядерные взрывы в мирных целях (сейсмическое зондирование земли; формирование пустот в твердых породах грунта для хранения нефти и газа; закладка котлованов для строительства водохранилищ, каналов; добыча и дробление руды и др.).

При радиационных инцидентах возможны следующие варианты загрязнения окружающей среды: 1) одним радионуклидом; 2) смесью радионуклидов; 3) продуктами деления радионуклидов; газообразными радионуклидами; 4) радионуклидами, входящими в состав «горячих» частиц.

1.2.3 Загрязнение окружающей среды при испытании ядерного оружия. Локальное и глобальное загрязнение территории

Ядерное оружие – это оружие массового поражения взрывного действия, основанное на использовании внутриядерной энергии.

Ядерный взрыв – это взрыв, при котором вся или основная часть энергии образуется в результате ядерной реакции деления или синтеза, или их сочетания.

Источниками энергии при ядерных взрывах являются *2 типа ядерных превращений*:

1) энергия выделяется при делении ядер природного ^{235}U или ^{239}Pu , получаемого в реакторе из ^{238}U при облучении нейтронами (атомная бомба);

2) энергия выделяется при синтезе атомов гелия из ^3H и ^2H при высоких температурах порядка нескольких миллионов градусов (водородная бомба).

Возможно сочетание этих двух реакций в одном ядерном устройстве. В зависимости от типа заряда ядерное оружие бывает ядерное, термоядерное и нейтронное.

В продуктах ядерного взрыва содержится более 200 изотопов 36 элементов таблицы Менделеева (от №72 до №161) с периодами полураспада от доли секунды до миллионов лет.

При ядерном взрыве в окружающую среду поступают,

- *во-первых*, продукты ядерного деления ^{238}U , ^{235}U и ^{239}Pu , среди которых наиболее значимы радионуклиды цезия, стронция и йода;
- *во-вторых*, продукты ядерного синтеза дейтерия и трития, представленные атомами гелия и нейтронами;
- *в-третьих*, продукты нейтронной активации, возникающие при облучении нейтронами ядер атомов атмосферы и конструкций ядерного устройства – ^3H , ^{14}C , ^{60}Co , ^{55}Mn , ^{55}Fe , ^{56}Fe ;
- *в-четвертых*, трансурановые радионуклиды (америций, нептуний и кюрий) и часть ядерного топлива, которое не прореагировало с нейтронами при взрыве.

Выделяют 3 основных вида ядерных взрывов: 1) воздушные взрывы, которые производились в стратосфере и тропосфере; 2) земные взрывы, которые производились под землей и на земле; 3) водные взрывы, которые производились под водой и над водой морей и океанов.

При загрязнении биосферы наиболее опасны наземные взрывы. При наземных взрывах по пути движения радиоактивного облака, образовавшегося при ядерном взрыве, формируется *территория загрязнения почвы радионуклидами* или *радиоактивный след*. Эта территория условно разделяется на 4 зоны: *первая зона* – зона умеренного загрязнения, которая занимает 70–80 % всей площади радиоактивного следа; *вторая зона* – зона сильного загрязнения; *третья зона* – зона опасного загрязнения; *четвертая зона* – зона чрезвычайно опасного загрязнения. На эти зоны может приходиться по 10–15 % всей площади радиоактивного следа.

При наземном ядерном взрыве в почве образуется воронка с оплавленными краями грунта, а над почвой образуется огненный шар, в который вовлекается много грунта из воронки, а также пыли с прилегающей к месту взрыва территории. Взрыв сопровождается сейсмическими колебаниями земной поверхности. Общий выброс грунта при наземном взрыве мощностью 1 килотонна составляет примерно 5000 тонн. Высота подъема огненного шара и размеры образовавшегося грибовидного облака зависят от мощности взрыва и метеоусловий. При мощности взрыва 100 килотонн высота подъема составляет 10–12 км, а при мощности 1 мегатонна – 15–20 км. По мере подъема вверх огненный шар охлаждается и принимает форму «гриба», «ножка» которого состоит из крупных высоко радиоактивных частиц грунта и топлива, а «шляпка» – расширенное облако – из мелких радиоактивных частиц и аэрозолей.

Выпадение радиоактивных продуктов ядерного взрыва начинается сразу после взрыва. В непосредственной близости от эпицентра выпадают довольно крупные частицы диаметром около 1 см. Более мелкие частицы оседают на поверхность земли в отдаленных местах на расстоянии нескольких сотен километров от эпицентра. Частицы пыли диаметром 0,1 мм выпадают с высоты 12 км примерно через 4 часа после взрыва, а частицы диаметром 0,01 мм – через 2 недели. Размеры частиц радиоактивных выпадений зависят от характера почвы, с которой соприкоснулся огненный шар. При проведении взрывов на почвах, сформированных на силикатных породах, образуются крупно дисперсные остекленные частицы, практически нерастворимые в воде. На почвах, развивающихся на карбонатных почвообразующих породах, образуются хорошо растворимые радиоактивные частицы, растворимость которых не зависит от их дисперсности или размера.

Часть продуктов наземного ядерного взрыва находится в мелких частицах (5 мк и меньше), которые поднимаются в верхние слои тропосферы (нижний слой атмосферы) на высоту 10–18 км. С тропосферными воздушными массами эти частицы переносятся на 1000 км от места взрыва, загрязняя обширную территорию. Выпадение радионуклидов из тропосферы происходит очень медленно. При этом период полуочищения тропосферы составляет приблизительно 20 дней. По существу выпадение радиоактивных осадков из тропосферы в основном заканчивается в течение двух месяцев после взрыва. За время пребывания радиоактивных частиц в тропосфере большая часть короткоживущих радионуклидов распадается, поэтому вклад тропосферных выпадений в загрязнение поверхности земли относительно небольшой.

При наземных ядерных взрывах большой мощности (1 мегатонна и более) и атмосфере ядерных взрывах на больших высотах радиоактивные частицы попадают в стратосферу. Аэрозольные частицы из стратосферы удаляются в результате вымывания осадками (дождем, снегом и градом) и в виде «*мокрого выпадения*» оседают на землю. Часть частиц оседает на землю под действием гравитационных сил в виде «*сухого выпадения*». Эти выпадения носят глобальный характер. При этом основная часть радионуклидов выпадает в том полушарии, где произведен ядерный взрыв по направлению географической широты, при максимальной концентрации между 30° и 60° северной широты. Загрязнение территории радионуклидами из стратосферы характеризуется как «*глобальное загрязнение*». Выпадение и загрязнение территории радионуклидами из стратосферы происходит медленно. Время нахождения радионуклидов на высоте 15–25 км составляет от 3 месяцев до 2 лет и зависит от высоты и географической широты. Радионуклиды из стратосферы могут осесть на поверхность всего земного шара в течение 10 и более лет после атомного взрыва. В среднем за 1 год оседает около 10 % образовавшихся радионуклидов. В связи с большой продолжительностью времени нахождения радионуклидов в стратосфере коротко- и среднеживущие радионуклиды полностью распадаются и основное радиоэкологическое значение приобретают долгоживущие радионуклиды – цезий-137 и стронций-90, которые называются глобальными радионуклидами. Они многократно огибают Землю с воздушными массами и со временем распределяются по направлению географической широты. Выпадение глобальных радионуклидов на Землю зависит от сезона года

(максимальное выпадение в конце весны и в начале лета), и количества выпавших осадков (прямая связь). Радионуклиды, входящие в состав «глобальных выпадений», хорошо растворимы в воде, поэтому обладают высокой подвижностью в почве, особенно первые 1–2 года после выпадения. В последующие годы цезий-137 хорошо закрепляется в почвенно-поглощаемом комплексе, поэтому содержание в почве водорастворимой и обменной формы цезия значительно снижается. Стронций-90 практически не связывается минералами почвенно-поглощающего комплекса, поэтому очень долгое время находится в почве преимущественно в водорастворимой и обменной форме. Глобальные радионуклиды включаются в миграционные процессы биосферы.

Одним из важнейших последствий стратосферного ядерного взрыва является образование под действием рентгеновского излучения, гамма-излучения и нейтронного излучения обширных областей повышенной ионизации верхних слоев атмосферы, что приводит к сокращению содержания озона в защитном слое земной атмосферы.

При *подземном взрыве* продукты деления попадают в атмосферу в незначительных количествах. Выпадение радиоактивных осадков на землю происходит только в районе взрыва, при этом основным источником загрязнения биосферы являются радиоактивные газы, которые постепенно в виде аэрозольных и газообразных выпадений оседают на земную поверхность.

При *подводном взрыве* образуется огромный газовый пузырь и водяной столб («султан») с радиоактивным облаком, в составе которого преобладают радиоактивные аэрозоли. Взрыв сопровождается образованием основной высокой волны и серией мелких гравитационных волн.

Испытания ядерного оружия в атмосфере были запрещены с 1963 года.

Всего в атмосфере, космосе и под водой в бывшем СССР было произведено 715 взрывов, в США – 1032; под землей в СССР – 491 взрыв, в США – 806 взрывов. А в мирных целях: в СССР – 124 взрыва; в США – 27.

1.2.4 Загрязнение окружающей среды при работе ядерных реакторов, переработке ядерного топлива и захоронении радиоактивных отходов

При работе реакторов на атомных станциях используют *ядерную реакцию деления ^{238}U при обработке его нейтронами*. Уран-238 предварительно обогащают ураном-235 с концентрацией 1,8-4,4%. Обогащенный уран в виде окиси урана (UO_2) в форме таблеток (твелов) заправляется в стержни реактора.

Ядерно-топливный цикл включает *следующие процессы*: добыча урановой руды; переработка руды до UO_2 и его перевод в форму UF_6 (фтористый уран) для последующего разделения изотопов; обогащение ^{238}U ураном ^{235}U ; изготовление твелов; работа реактора на АЭС; хранение и переработка отработанного топлива.

При работе реактора накапливается *3 вида отходов*: газообразные, жидкие, твердые.

В состав радиоактивных отходов входят: *во-первых*, продукты ядерного деления, которые остаются в твелах; из них выходит только ^3H , 99 % которого связывается с цирконием стержней. Дефект твелов может вызывать загрязнение охладителя (в качестве охладителя используется вода) благородными газами и другими радионуклидами; *во-вторых*, продукты активации топлива; *в-третьих*, продукты активации материалов конструкции реактора и охладителя.

Газы сбрасываются через систему очистки в трубу высотой 100–150 м. При нормальном (штатном) режиме АЭС в атмосферу поступают тритий, углерод-14, йод-131, 129, и благородные газы криптон, ксенон. Радиационный фон в радиусе 10 км от АЭС может превышать существующий на данной территории радиационный фон на 4 %.

Жидкие отходы в окружающую среду не поступают, потому что они очищаются на АЭС. Очищенная вода повторно используется для охлаждения, а твердый радиоактивный остаток отправляют на захоронение. Иногда воду, используемую для охлаждения, сбрасывают в водохранилище. В этой воде содержится только ^3H , от которого воду не очищают ($T_{1/2} \text{ } ^3\text{H} = 12$ лет).

Твердые отходы с низкой активностью подлежат захоронению на территории АЭС, высокорadioактивные отходы помещают в специальные контейнеры и хранят в специальных хранилищах. В работе АЭС твелы используются 3 года, затем осуществляют их замену. После распада короткоживущих радионуклидов отработанные твелы отправляются на перерабатывающие радиационно-химические заводы, где из них извлекается стратегический ^{239}Pu .

В отработанном топливе (твелах) содержится около 96 % ^{238}U и более 1 % ^{239}Pu . При переработке топлива образуются твердые отходы, содержащие ^{238}U и ^{239}Pu и другие отходы, среди которых выделяют: 1) газообразные отходы, которые сбрасываются в атмосферу через трубу, высотой двести метров. Среди этих отходов наиболее значимы ^3H , ^{14}C , ^{129}I , ^{131}I , ^{85}Kr . В атмосфере тритий связывается с водой, а изотопы йода – с кислородом; 2) жидкие отходы низкой активности сбрасываются в водную среду (реки, моря и океаны); 3) жидкие отходы высокой активности отправляются на захоронение на специальные хранилища.

При захоронении радиоактивных отходов учитывается их активность. По активности *радиоактивные отходы разделяются на 3 категории*: 1 категория – низкая активность ($< 1 \times 10^{-5}$ Ку/л); 2 категория – средняя активность ($1 \times 10^{-5} - 1$ Ку/л); 3 категория – высокая активность (> 1 Ку/л).

Отходы 1 и 2 категории представлены радионуклидами 1-й стадии ядерно-топливного цикла. Отходы 3 категории – это жидкие отходы, помещенные в специальные контейнеры с раствором азотной кислоты. Здесь находится 99 % продуктов деления, часть ^{239}Pu , трансурановые элементы. Для захоронения радиоактивных отходов используют следующие способы и места хранения:

1) хранение в жидкой и твердой форме в специальных контейнерах при нормальной температуре и влажности воздуха;

2) хранение отходов, вплавленных в стеклоблоки, керамические блоки, блоки с добавлением металла, которые помещаются в металлические свинцовые контейнеры, толщиной 10 см, которые сверху для усиления прочности покрываются титановой оболочкой, толщиной до 6 мм;

3) захоронение радиоактивных отходов в геологических формациях, на морском дне, под морским дном, в скальных породах, в солевых формациях, в глинистых породах, в условиях вечной мерзлоты.

Срок хранения отходов высокой активности без трансурановых элементов составляет 500-600 лет, а с трансурановыми элементами – десятки тысяч лет. Нарушение герметичности контейнеров и условий хранения может привести к поступлению радионуклидов в окружающую среду и загрязнению ее компонентов радионуклидами.

1.2.5 Загрязнение территории Республики Беларусь искусственными радионуклидами после катастрофы на ЧАЭС. Характеристика радиоактивного выброса

На атомных станциях мира было зарегистрировано около 300 аварий, среди которых самая крупная в истории человечества – авария на ЧАЭС.

К экологическим особенностям загрязнения территории Республики Беларусь искусственными радионуклидами относятся:

- 1) высокая неравномерность и пятнистость загрязнения территории;
- 2) наличие в выбросе биологически значимых радионуклидов – цезия и стронция;
- 3) наличие в радиоактивном выбросе «горячих частиц».

Высокая неравномерность и пятнистость загрязнения территории наблюдается в пределах всей территории, областей, районов, населенных пунктов, полей сельскохозяйственных угодий и отдельных участков. Во время аварии происходило многократное, неравномерное, сухое и мокрое выпадение радионуклидов, различного радионуклидного состава и различных форм нахождения в выбросе радионуклидов. При этом на одну и ту же территорию происходило наложение или одновременное загрязнение несколькими радионуклидами. «Горячие частицы» распределялись на большие расстояния, при этом в 30 км зоне осело более 80 % частиц крупного размера. Аэрозоли радионуклидов на парах влаги и на мелких частицах пыли, разносились на тысячи километров по направлению движения ветра в приземных слоях атмосферы. В состав выброса входили продукты деления топлива изотопы цезия и стронция, которые являются химическими аналогами К и Са.

Причина аварии на ЧАЭС – нарушение техники безопасности при работе реактора. Взрывное разрушение реактора (два взрыва) и пожар (в течение 10 дней) привели к выбросу в окружающую среду большого количества топлива, трансурановых элементов и продуктов деления. Суммарная активность аварийного выброса составила около 1 млрд. Ки.

На территории РБ осело 70 % радиоактивного выброса. Выброс состоял из 3 компонент: 1) топливная компонента – это твердофазные выпадения, состоящие из оксида урана и продуктов его деления; 2) конденсатная компонента – это аэрозольные выпадения, образовавшиеся в результате конденсации паров, испаряющихся радионуклидов на аэрозолях влаги и мелких частиц. В составе конденсатной компоненты преобладали короткоживущие радионуклиды и ^{137}Cs ; 3) газообразная компонента – радиоактивные газы в различных формах.

Топливная компонента осела в 30 км зоне. Конденсатная и газообразная компоненты распределились по всей территории РБ.

В РБ выделено 5 основных регионов, характеризующихся максимальной плотностью загрязнения цезием-137: 1. 30-километровая зона вокруг ЧАЭС; 2. южные и юго-западные районы Могилевской области; 3. центральные районы Брестской, Гродненской, Минской областей; 4. северные районы Гомельской области; 5. центральные районы Могилевской области.

В зависимости расстояния от ЧАЭС выделяют ближнюю зону (250 км от АЭС) и дальнюю зону (более 250 км).

1.2.6 Зонирование территории Республики Беларусь по плотности загрязнения радионуклидами

Плотность поверхностного загрязнения – это отношение активности радионуклида к площади, которая измеряется в $\text{кБк}/\text{м}^2$ или в $\text{Ки}/\text{км}^2$ ($1 \text{ Ки}/\text{км}^2 = 37 \text{ кБк}/\text{м}^2$)

Поверхностное загрязнение территории нашей Республики Беларусь ^{137}Cs и ^{90}Sr до аварии на ЧАЭС составляло от 0,04 до 0,12 $\text{Ки}/\text{км}^2$, а изотопами Pu – 0,001-0,003 $\text{Ки}/\text{км}^2$.

После аварии 23% территории РБ загрязнено ^{137}Cs с плотностью загрязнения более $1 \text{ Ки}/\text{км}^2$, 10 % территории РБ загрязнено ^{90}Sr и около 2 % – ^{239}Pu .

Наземный след выброса имел сложную конфигурацию и неравномерное распределение радионуклидов по поверхности почвы. Направление движения радиоактивного выброса и дальность его переноса зависели от метеоусловий (направление ветра, выпадения осадков), а также от физических свойств радионуклидов (температура испарения, летучесть). Температура испарения $^{137}\text{Cs} = 400 \text{ }^\circ\text{C}$, а $^{90}\text{Sr} = 800 \text{ }^\circ\text{C}$, поэтому в выбросе содержание ^{137}Cs было больше, чем ^{90}Sr , а, следовательно, он распределился на большую территорию.

Согласно Закону Республики Беларусь «О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на ЧАЭС», все загрязненные земли разделены на 5 зон (табл. 8).

При зонировании учитывалось: 1) плотность загрязнения почвы ^{137}Cs , ^{90}Sr , изотопами Pu; 2) возможность проживания населения (по средней величине годовой эффективной дозы, которая не должна превышать $1 \text{ мЗв}/\text{год}$); 3) возможность получения экологически чистой продукции, т.е. продукции, соответствующей РДУ-99.

В Законе указано, что производство сельскохозяйственной продукции может осуществляться при плотности загрязнения территории $^{137}\text{Cs} - 1-40 \text{ Ки}/\text{км}^2$, а $^{90}\text{Sr} - 0,15-0,30 \text{ Ки}/\text{км}^2$.

В Законе дано определение **территории радиоактивного загрязнения** – это земли, на которых возникло долговременное загрязнение цезием-137 – $1 \text{ Ки}/\text{км}^2$ и более, стронцием-90 – $0,15 \text{ Ки}/\text{км}^2$ и более, изотопами плутония $0,01 \text{ Ки}/\text{км}^2$ и более; территории, на которых среднегодовая эквивалентная доза внешнего и внутреннего облучения населения может превышать 1 мЗв за год, и земли, на которых невозможно получение нормативно-чистой продукции.

Таблица 8. Зонирование территории Республики Беларусь по уровню радиоактивного загрязнения и величины дозовых нагрузок на население

Наименование зоны	Эквивалентная доза, мЗв/год	Плотность загрязнения, кБк/м ²		
		^{137}Cs	^{90}Sr	$^{238,240}\text{Pu}$
Зона проживания с периодич. радиац. контролем	< 1	37-185	5,55-18,5	0,37-0,74
-- с правом на отселение	< 5 > 1	185-555	18,5-74	0,74-1,85
-- последующего отселения	> 5	555-1840	74-111	1,85-3,7
-- первоочеред. отселения		> 1840	> 111	> 3,7
-- отчуждения (эвакуации)	территория вокруг ЧАЭС, с которой в 1986 году было эвакуировано население			

В Законе указаны все виды деятельности, при использовании загрязненных земель и особенности ведения сельскохозяйственного производства. Наиболее загрязненными областями Республики Беларусь являются Гомельская область – 58 % территории является радиоактивно загрязненной и Могилевская область – 30 %, далее в зависимости от площади радиоактивного загрязнения области расположились в следующем порядке: Минская область – 9 %, Гродненская область – 8 %, Брестская область – 5 %, Витебская область – менее 1 %.

Необходимо отметить, что загрязнение цезием-137 произошло повсеместно, а изотопами стронция-90 и плутония – локально. Стронций-90 распределен преимущественно в 50-километровой зоне и отдельных районах Гомельской и Могилевской областей, радиоактивные изотопы плутония – преимущественно в 30-ти километровой зоне.

Таким образом, после катастрофы на ЧАЭС, плотность загрязнения почвы цезием-137 и стронцием-90 возросла в 10–1000 раз.

1.2.7 Загрязнение атмосферы искусственными радионуклидами. Факторы, влияющие на загрязнение

К источникам загрязнения атмосферы искусственными (техногенными) радионуклидами относят: наземные испытания ядерного оружия; испытания термоядерного оружия в атмосфере; выбросы предприятий по переработке ядерного топлива; безаварийные выбросы атомных станций; аварийные ситуации на атомных станциях. В атмосферу поступают тритий, углерод, изотопы йода, криптона, рутения, цезия, цезия и стронция.

При радиационных авариях наибольший вклад в радиоактивность атмосферы вносят следующие продукты деления урана и плутония: радиоактивные газы – изотопы криптона (Kr), изотопы йода (I); изотопы цезия и стронция (Cs, Sr), а также трансурановые элементы (изотопы плутония (Pu), тритий (^3H), углерод (^{14}C)).

При катастрофе на ЧАЭС выброс искусственных радионуклидов в атмосферу разделяется на 4 периода: *первый период*: первый день – при двух взрывах и пожаре в атмосферу поступали короткоживущие газообразные радионуклиды; *второй период*: второй и шестой день – выброс уменьшился до 6 раз по причине тушения и охлаждения реактора; *третий период*: с 6 по 9 день – выброс увеличился на 70 %. Произошло саморазогревание топлива до $2000 \text{ }^\circ\text{C}$, в атмосферу поступили – Cs, Sr, Ce, Ru, Pu и др.

радионуклиды. Летучие газообразные радионуклиды распределились в различных направлениях, а тугоплавкие – осели вблизи АЭС; *четвертый период*: 10-й день – выброс снизился до минимума. В последующее время выброс радионуклидов в атмосферу происходил до конца августа.

В 1986 г. при аварии на ЧАЭС радиоактивность приземной атмосферы возросла в сотни и тысячи раз. В последующее время, начиная со 2-й половины мая, постепенно снижалась до конца 1986 г. Например, до аварии среднегодовая концентрация ^{137}Cs в атмосфере г. Минска составляла $1,5 \cdot 10^{-6}$ Бк/м³, а в 1986 г. – $3,8 \cdot 10^{-3}$ Бк/м³, т. е. увеличилась в 2000 раз. Радиоактивность воздуха снижалась по 2 причинам: 1) естественный радиоактивный распад короткоживущих радионуклидов; 2) осаждение долгоживущих радионуклидов из атмосферы на земную поверхность под действием силы тяжести и с атмосферными осадками.

Период полураспада атмосферы от ^{137}Cs для Гомеля составлял 25 месяцев, Могилева – 40 месяцев, Минска – 50 месяцев. Это связано с различной дисперсностью аэрозольных частиц, в составе которых ^{137}Cs распространялся с воздушными массами по территории Беларуси. Период полураспада атмосферы от изотопов Рн был одинаков во всех городах и составлял 14 месяцев.

На удельную активность приземного атмосферного воздуха оказывают влияние следующие факторы: 1) *сезон года*. Максимальное загрязнение атмосферы наблюдается в апреле – мае и в августе – сентябре, т.е. во время основных сельскохозяйственных работ, когда радионуклиды в составе почвенной пыли поднимаются в атмосферу и переносятся на большие расстояния по направлению движения воздушных масс; 2) *природные факторы*. При ветровых и пыльных бурях (особенно при сухой погоде) радионуклиды в составе почвенной пыли поднимаются на большую высоту и разносятся на большие расстояния; 3) *техногенные явления*. При пожарах в лесах, на болотах, а также при сжигании пожнивных остатков и других объектов на территории радиоактивного загрязнения, радионуклиды в составе дыма и пепла могут разноситься на значительные расстояния; 4) *плотность загрязнения почвы радионуклидами*. Установлена прямая связь между плотностью поверхностного загрязнения почвы радионуклидами и содержанием радионуклидов в приземном атмосферном воздухе. Максимальная радиоактивность атмосферы в Гомельской и Могилевской областях, а минимальная – в Витебской области; 5) *Состояние подстилающей поверхности и ее способность к пылеобразованию*. Максимальная радиоактивность атмосферы наблюдается над поверхностью почвы лишенной растительности, а минимальная над почвой с плотным растительным покровом. Установлено, что максимальное пылеобразование наблюдается на осушенных торфяниках.

Содержание радионуклидов в атмосфере продолжает снижаться, но еще не достигло доаварийного уровня, так как самоочищение атмосферного воздуха происходит медленно. К основным механизмам самоочищения атмосферы относят: действие гравитационных сил тяжести; вымывание радиоактивных аэрозолей и частиц дождевыми каплями (снегом) и выпадение их на землю.

1.2.8 Методы оценки радиоактивности атмосферы. Радиоактивность атмосферных аэрозолей и естественных выпаждений

До аварии на ЧАЭС регулярные наблюдения за радиоактивностью воздуха проводились с 1963 г., при этом в Минске и в Бресте определялась среднегодовая концентрация ^{137}Cs и двух изотопов плутония ^{239}Pu , ^{240}Pu . После аварии радиоактивность воздуха определяется на всех реперных точках и в крупных городах РБ, согласно схеме «Радиационного мониторинга атмосферы». Загрязнение приземного атмосферного воздуха характеризуют 2 показателя: *активность естественных выпадений, активность аэрозолей приземного слоя атмосферы*.

Суммарная β -активность естественных выпадений определяется на 25 метеостанциях ежедневно в 7 час. 30 мин. При этом в пробах естественных выпадений также определяется содержание ^{137}Cs и содержание естественного радионуклида ^7Be .

Выпадения собираются на специальных планшетах, на дне которых помещается мокрый (клейкий) фильтр. Планшета устанавливается на расстоянии 1,5 м от поверхности земли. Жидкие осадки сливаются в специальную емкость. Планшета и жидкость доставляются в Областной гидрометеорологический центр для радиометрического анализа.

Для определения активности аэрозолей пробы атмосферного воздуха отбираются при помощи специальных фильтр-вентиляционных установок на 6 метеостанциях в городах Могилев, Минск, Гомель, Мозырь, Брест, Пинск ежедневно в 1.00; 7.00; 13.00; 19.00 часов. В пробах атмосферных аэрозолей определяют содержание ^{137}Cs , ^7Be , ^{40}K и ^{210}Pb .

Активность выпадений и аэрозолей зависит в основном от плотности загрязнения почвы радионуклидами, типа почвы, и от сезона года.

В Республики Беларусь в настоящее время при радиационном мониторинге атмосферы осуществляется анализ содержания радиоактивного йода в аэрозолях атмосферы на территориях, расположенных на расстоянии 30 – 100 км от атомных станций сопредельных государств.

1.2.9 Радиационный фон. Компоненты, формирующие радиационный фон Земли

В настоящее время выделяют: *во-первых, естественный или природный радиоактивный фон* – это ионизирующие излучения, действующие на человека на поверхности земли от природных источников космического и земного происхождения; *во-вторых, технологически измененный естественный радиационный фон* – это ионизирующие излучения от природных источников, поступивших в атмосферу в результате деятельности человека; *в-третьих, техногенный (искусственный) радиационный фон* – это ионизирующие излучения от радионуклидов, входящих в состав ядерных взрывов, выбросов при радиационных авариях на АЭС и других технических источников.

Радиоактивный фон измеряется на рКлассификация этих радионуклидов приведена в разделе 1.1.1. асстоянии 1 м от поверхности земли дозиметрами, при этом регистрируется гамма-излучение и определяется мощность эквивалентной дозы (мкЗв/час или мкР/час).

До катастрофы на ЧАЭС в Республике Беларусь радиационный фон составлял 0,12 мкЗв/час, при этом его величина на юге республики составляла – 0,2–0,6 мкЗв/час, а на севере – 0,10–0,15 мкЗв/час. В настоящее время величина радиационного фона не должна превышать 0,2 мкЗв/час на всей территории республики.

Естественный радиационный фон складывается из **2 компонент:**

первая компонента – *земная компонента* – это излучение естественных радионуклидов Земли и продуктов их распада. Среди естественных радионуклидов основной вклад в радиационный фон Земли вносит радиоактивный изотоп калия – ^{40}K , содержание которого в почве зависит от типа почвы. В связи с этим более высокий радиационный фон в Республике Беларусь регистрируется над поверхностью дерново-подзолистой суглинистой почвы; **вторая компонента** – это *космическое излучение*, которое разделяется на *первичное и вторичное*.

Первичное излучение – образуется при испарении и извержении материи звезд и туманностей галактики, т.е. его источниками могут быть звездные вспышки, взрывы новых звезд и др. Оно обладает очень высокой энергией (10^{17} – 10^{15} эВ). К причинам высокой энергии космического излучения относят: *во-первых*, многократное ускорение в переменных электромагнитных полях звезд; *во-вторых*, ускорение в магнитных полях межзвездного пространства и в расширяющихся оболочках новых и сверхновых звезд. Взаимодействие первичного космического излучения с атомами атмосферы сопровождается различными реакциями, в результате которых возникают атомы других химических элементов и вторичное космическое излучение сложного состава. В состав *вторичного космического излучения* входят μ^+ - мезоны и π^+ -мезоны – 70 %; электроны и позитроны – 26 %; γ -излучение, протоны и нейтроны – около 4 %. Поверхности Земли достигает только 0,05 % первичного излучения.

В состав космического излучения входит **3 вида излучений:** *первый вид* – *частицы, захваченные магнитным полем Земли* – это электроны и протоны. Известно, что у Земли имеется два радиационных пояса. Энергия излучения на внешнем поясе больше, чем на внутреннем. Это вид излучений не создает радиационных доз при облучении человека на поверхности Земли; *второй вид* – *галактическое космическое излучение*, энергия которого составляет от нескольких МэВ до сотен МэВ. Состоит из протонов – 79 %, ядер атомов гелия или α -частиц – 20 %, ядер атомов бериллия, бора, углерода, кислорода, азота и др. – 0,7 %; *третий вид* – *корпускулярное излучение Солнца*. Состав излучения аналогичен составу галактического излучения. Однако, энергия солнечного излучения меньше галактического, но в пик максимальной солнечной активности, который наблюдается 1 раз в 11 лет, энергия солнечного излучения превышает энергию галактического излучения. В настоящее время основной вклад в радиационный фон вносят искусственный радионуклид ^{137}Cs , при этом величина радиационного фона на территории республики значительно различается и имеет более высокие значения на территории радиоактивного загрязнения и зависит от плотности загрязнения почвы этим радионуклидом. Радиационный фон стабилизировался, но по-прежнему его значение превышает дочернобыльский уровень.

1.3 МИГРАЦИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В БИОСФЕРЕ И В СФЕРЕ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Пути миграции радионуклидов в биосфере имеют сложный и многообразный характер. Первоначально радионуклиды поступают в атмосферу, а затем в результате различных процессов оседают на почву, растительность, водные системы, где в последующем включаются в миграционные процессы.

Миграция радионуклидов – это перераспределение радионуклидов между компонентами биосферы и в пределах каждого компонента.

Миграционная способность радионуклидов зависит от: 1) высоты и мощности взрыва (чем выше взрыв, тем интенсивнее миграция или перенос радионуклидов); 2) физико-химических свойств радионуклидов, т.е. фазового состояния (твердое, жидкое, газообразное), формы и характер дисперсности частиц, способности частиц и радионуклидов образовывать нерастворимые и растворимые соединения; 3) способности радионуклидов включаться в процессы биогенной миграции (наиболее интенсивно включаются Cs и Sr); 4) погодных-климатических условий и распределения в атмосфере, обусловленного ветровым переносом; 5)

типа осаждения на поверхность почвы (сухое или мокрое); 6) перемещения по земной поверхности, обусловленным стоком поверхностных вод, действием ветра, деятельностью человека.

Пути миграции радиоактивных выбросов в биосфере отличаются многообразием и большой сложностью. Искусственные радионуклиды, образовавшиеся при испытании ядерного оружия и авариях на атомных электростанциях, попадают в атмосферу, из которой в виде «мокрых» и «сухих» выпадений в составе аэрозолей и частиц поступают на поверхность почвы, водных систем и растительности (рис. 1).

Среди миграционных цепей наиболее значима цепь: почва–растение–животное. В звеньях этой цепи можно регулировать поступление радионуклидов. Например, в цепи почва–растение это осуществляется внесением минеральных удобрений, а в цепи растение–животное – путем подбора кормов рациона и введения в рацион сорбентов радионуклидов. Пути поступления радионуклидов в организм человека различны. Значительная их доля поступает в организм человека по двум пищевым цепям: почва–растение–человек и почва–растение (корм) – животное (продукция животноводства) – человек.

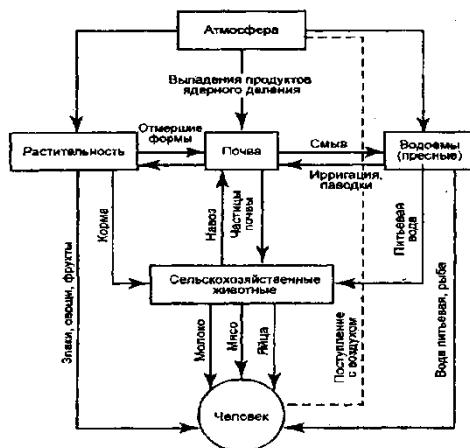


Рис 1. Схема миграции радионуклидов по биологическим цепям