

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Кафедра радиоэкологии и экологической безопасности

Л.И. Лукина, Н.Н. Ленивенко, Т.Л. Щекатурина

**ОЦЕНКА РАДИОНУКЛИДНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ,
РАСЧЕТ И ПРОГНОЗ ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК НА ЧЕЛОВЕКА**

Методические указания
для выполнения курсовых, расчетно-графических работ
и практических занятий
по дисциплине «Радиационные источники»
для студентов очной и заочной форм обучения

Севастополь
СевГУ
2018

УДК 614.73:[635.07+637]
ББК 28.080.1я73
Л84

Р е ц е н з е н т ы:

П.А. Пономаренко - к.т.н., доцент, доцент кафедры
радиоэкологии и экологической безопасности
В.А. Ерофеев - к.т.н., доцент кафедры
химической инженерии и дозиметрии

Ответственный за выпуск: Н.Н. Ленивенко

Лукина Л.И.

Л84 Оценка радионуклидного загрязнения сельскохозяйственной продукции, расчет и прогноз дозовых нагрузок на человека: метод. указания для выполнения курсовых, расчет.-граф. работ и практ. занятий по дисциплине «Радиационные источники» / Л.И. Лукина, Н.Н. Ленивенко, Т.Л. Щекатурина. – Севастополь: СевГУ, 2018. – 47 с.

Рассмотрены естественные, техногенные и искусственные источники ионизирующих излучений, нормативы, регламентирующие содержание радионуклидов в природных сельскохозяйственных объектах, пути радиоактивного загрязнения сельскохозяйственной продукции, расчеты дозовых нагрузок на растения, животных и человека.

Предназначены для студентов 4-го курса очной и заочной форм обучения, направления подготовки 05.03.06 «Экология и природопользование» (бакалавриат), 1-го курса очной и заочной форм обучения, направления подготовки 05.04.06 «Экология и природопользование» (магистратура).

Приведен перечень справочной и нормативной литературы, что поможет в освоении необходимых компетенций и подготовке к курсовой работе, выполнении РГР и практических работ по дисциплине «Радиационные источники».

УДК 614.73:[635.07+637]
ББК 28.080.1я73

Рассмотрены и утверждены на заседании кафедры «Радиоэкология и экологическая безопасность», протокол № 11 от 03 апреля 2018 г.

© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	5
ВВЕДЕНИЕ	7
Раздел 1. РАДИАЦИОННЫЙ ФОН	8
1.1. Вклад различных источников ИИ в дозу облучения населения	8
1.2. Антропогенное радиоактивное загрязнение окружающей среды	9
Раздел 2. ОСНОВНЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ – ЗАГРЯЗНИТЕЛИ АГРОЭКОСИСТЕМ	15
2.1. Радионуклидное загрязнение окружающей среды в результате аварий Кыштыме и в Чернобыле	15
2.2. Периоды полувыведения радионуклидов из организма	18
2.3. Характеристика физических, химических и биологических свойств ^{137}Cs и ^{90}Sr	18
Раздел 3. НОРМАТИВЫ, РЕГЛАМЕНТИРУЮЩИЕ СОДЕРЖАНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ПРИРОДНЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ	21
3.1. Нормативы содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в продуктах питания	21
3.2. Контрольные уровни содержания радионуклидов $^{134,137}\text{Cs}$ и ^{90}Sr в кормах и кормовых добавках	21
Раздел 4. ДОЗОВЫЕ НАГРУЗКИ НА ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ	24
4.1. Формирование дозовой нагрузки на растения	24
4.2. Формирование дозовой нагрузки на животных	26
4.3. Формирование дозовой нагрузки на человека	28
4.3.1. Расчет дозы внешнего облучения человека	29
4.3.2. Расчет дозы внутреннего облучения человека	29
Раздел 5. ПРОГНОЗ ДОЗЫ ОБЩЕГО ОБЛУЧЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА	32
5.1. Цели и задачи прогностических расчетов	32
5.2. Основные показатели и характеристики минимума исходной информации для прогнозных оценок	33
5.3. Прогноз дозы внутреннего облучения	37
5.4. Прогноз дозы общего облучения	38
5.5. Прогноз загрязнения сельскохозяйственной продукции радионуклидами	38
5.5.1. Способ расчета ожидаемого уровня загрязнения продукции растениеводства и животноводства	39
5.5.2. Пример прогнозного расчета содержания радионуклидов в продукции растениеводства и животноводства	40
5.6. Прогнозная оценка дозовой нагрузки на население за счет внешнего и внутреннего облучения	43

5.6.1. Прогноз дозы внешнего облучения	43
5.6.2. Прогноз дозы внутреннего облучения	44
5.6.3. Прогноз общей дозовой нагрузки на человека	45
Раздел 6. ОРГАНИЗАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ	46
6.1. Общие положения	46
6.2. Порядок оформления пояснительной записки	46
ЛИТЕРАТУРА	47

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- АПК – агропромышленный комплекс;
АЭС – атомная электростанция;
 $a_{\text{п}}$ – удельная активности почвы, Бк/кг;
 $a_{\text{с}}$ – плотность поверхностного загрязнения почвы, Ки/км²;
 $a_{\text{р}}$ – ожидаемое содержание радионуклида в хозяйственной части урожая (Бк/кг);
 $a_{\text{пр}}$ – содержание радионуклида в продукции растениеводства (Бк/кг);
 $A_{\text{год}}$ – суммарная активность радионуклида, поступающего в организм человека за год (Бк/год);
ГП – годовое потребление продукта;
ГОСТ – государственный стандарт;
 $D_{\text{внешн}}$ – доза внешнего облучения, мЗв/г;
ДПР – дочерние продукты распада;
 E_{α} – энергия α -излучения, МэВ;
ЕРФ – естественный радиационный фон;
ИИ – ионизирующее излучение;
 $K_{\text{пп}}$ – коэффициент потерь активности в процессе переработки растительной продукции ($K_{\text{пп}} = a_{\text{пр}} / a_{\text{р}}$);
 $K_{\text{н}}$ – коэффициент накопления радионуклида растением, отн. ед.;
 $K_{\text{ос}}$ – коэффициент ослабления дозы;
 $K_{\text{д}}$ – дозовые коэффициенты;
 $K_{\text{п}}$ – коэффициент перехода радионуклида из почвы в растения ($K_{\text{п}} = a_{\text{р}} / a_{\text{с}}$);
КР – курсовая работа
КУ – контрольные уровни содержания радионуклидов в кормах и кормовых добавках, Бк/кг(л);
МАГАТЭ – Международное агентство по атомной энергии;
МРТ – магнитно-резонансная терапия;
НРБ – нормы радиационной безопасности;
ОС – окружающая среда;
ОЯТ – отработанное ядерное топливо;
ППП – пределы годового поступления радионуклидов в организм человека;
ПЯД – продукты ядерного деления;
 P – мощность дозы, Гр/с;
РАО – радиоактивные отходы;
РХЗ – радиохимический завод;
 C – концентрация радионуклида в почве, Бк/кг;
СР – суточный рацион животных;
 $T_{1/2}$ – период радиоактивного полураспада радионуклида;

T_b – биологический период полувыведения радионуклида из организма;

$T_{эф}$ – эффективный период полувыведения радионуклида из организма;

ТВС – тепловыделяющие сборки;

ТВЭЛы – тепловыделяющие элементы;

ТУЭ – трансурановые элементы;

ЯТ – ядерное топливо.

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с Рабочей учебной программой по дисциплине «Радиационные источники» **целью** изучения дисциплины является овладение теоретическими знаниями о техногенном повышении естественного радиационного фона вследствие загрязнения окружающей среды искусственными источниками ИИ и практическими навыками расчета дозовых нагрузок на население

Основные задачи курса - формирование системы знаний:

- о естественных и искусственных источниках ионизирующего излучения и их вклада в годовую эффективную дозу облучения населения;
- техногенно измененном радиационном фоне;
- радиоэкологических последствиях радиационных аварий;
- общеметодологических подходах к обеспечению радиационной защиты населения;
- методах расчета доз облучения;
- основных принципах государственной политики в сфере радиационной безопасности и обращения с радиационными источниками.

В результате изучения курса обучающийся должен:

уметь применять полученные теоретические знания при выполнении профессиональных обязанностей радиоэколога, производить расчет доз внешнего и внутреннего облучения населения, работать с научной и справочной литературой, нормативной документацией;

владеть способностью к анализу, обобщению, восприятию информации по источникам радиационного загрязнения окружающей среды; навыками решения практических задач по расчетам дозовых нагрузок на население, проживающее на радиационно-загрязненных территориях.

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование таких компетенций, как:

- умение использовать стандартные методики для решения практических задач по определению результатов радиационного загрязнения ОС, дозовых нагрузок на население, делать обобщающие выводы.

В данных методических рекомендациях приведены алгоритмы расчета дозовых и прогнозных нагрузок на растения, животных и человека при радионуклидном загрязнении ОС.

Раздел 1. РАДИАЦИОННЫЙ ФОН

1.1. Вклад различных источников ИИ в дозу облучения населения

Около 2/3 в годовую эквивалентную эффективную дозу облучения населения вносит естественный радиационный фон (ЕРФ) - обязательный, постоянно действующий фактор окружающей среды, обусловленный излучениями космического пространства и от естественных радионуклидов земной коры, которые рассеяны в почве и горных породах, а также содержатся в воздухе, воде, продуктах питания и живых организмах. Более половины ЕРФ приходится на радон и его дочерние продукты распада (ДПР). Почти 30 % дозовой нагрузки приходится на медицинские источники и менее 2 % приходится на искусственные источники ИИ и техногенное усиление ЕРФ (рис. 1.1).

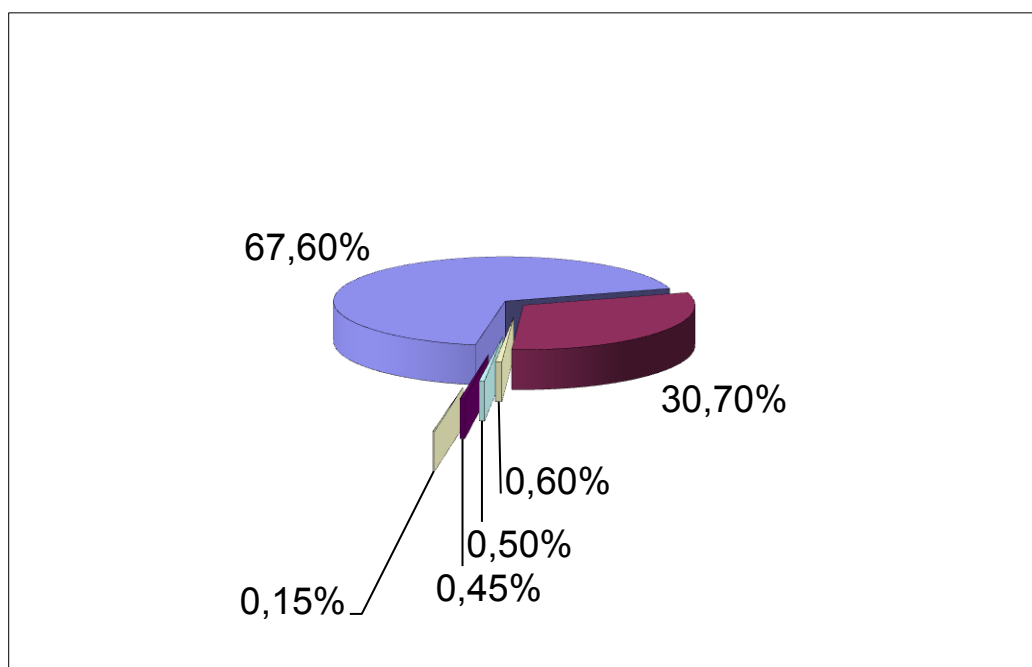


Рис. 1.1. Вклад различных источников ИИ в дозу облучения населения:
67,60 % - естественный радиационный фон; 30,70 % - медицинское облучение;
0,60 % - радиоактивные выпадения; 0,50 % - различные источники;
0,45 % - профессиональное облучение; 0,15 % - отходы атомной промышленности

Однако в случаях применения ядерного оружия или при радиационных авариях возможно локальное и даже глобальное радиационное загрязнение, что сопровождается большими радиоэкологическими проблемами. На рис. 1.2 приведена схема поступления природных и искусственных радионуклидов в продукты питания.



Рис. 1.2. Схема поступления радионуклидов в организм человека

1.2. Антропогенное радиоактивное загрязнение окружающей среды

Освоение человечеством ядерной энергии во второй половине XX века привело к глобальному радиоактивному загрязнению окружающей среды (ОС).

Источниками техногенных радионуклидов являются:

- ядерные взрывы;
- деятельность предприятий ядерного топливного цикла;
- эксплуатация атомных электростанций;
- аварийные ситуации.

Радиоэкологические последствия испытаний ядерного оружия определяются количеством испытаний, суммарными энерговыделением и активностью осколков деления, видами взрывов (воздушные, наземные, подводные, надводные, подземные) и геофизическими факторами окружающей среды в период испытаний (район, метеообстановка, миграция радионуклидов и др.). Испытания ядерного оружия, которые особенно интенсивно проводились в период 1954-1958 и 1961-1962 гг., стали одной из основных причин повышения радиационного фона Земли и, как следствие этого, глобального увеличения доз внешнего и внутреннего облучения на-

селения. В США, СССР, Франции, Великобритании и Китае в общей сложности проведено не менее 2060 испытаний атомных и термоядерных зарядов в атмосфере, под водой и в недрах Земли, из них непосредственно в атмосфере 501 испытание.

Испытания в атмосфере в СССР были завершены в 1962 г., подземные взрывы на Семипалатинском полигоне - в 1989 г., на Северном полигоне - в 1990 г. Франция и Китай испытывали ядерное оружие ещё несколько лет. По оценкам ученых, во второй половине 20-го века за счет ядерных испытаний во внешнюю среду поступило $1,81 \cdot 10^{21}$ Бк продуктов ядерного деления (ПЯД), из них на долю атмосферных испытаний приходится 99,84 %. Распространение радионуклидов приняло планетарные масштабы, что привело к повышению радиационного фона.

При ядерном взрыве осуществляется цепная реакция деления ядер тяжёлых элементов (U^{235} , Pu^{239}) под действием нейтронов. В ходе реакции образуется около 250 изотопов 35 элементов, из них 225 радиоактивных.

Во второй половине 20-го века за счет ядерных испытаний во внешнюю среду поступило $1,81 \cdot 10^{21}$ Бк продуктов ядерного деления (ПЯД), из них на долю атмосферных испытаний приходится 99,84 %. Некоторые ПЯД при ядерном взрыве приведены в табл. 1.1. Существенную опасность представляют долгоживущие продукты деления.

Таблица 1.1 – Образование некоторых ПЯД при ядерном взрыве

Элемент	Период полураспада	Выход на одно деление, %	Активность на 1 Мт, ПБк
1	2	3	4
^{89}Sr	50,5 сут	2,56	590
^{90}Sr	29,1 лет	3,5	3,9
^{95}Zr	64 сут	5,07	920
^{103}Ru	39,5 сут	5,2	1500
^{106}Ru	368 сут	2,44	78
^{131}I	8 сут	2,90	4200
Cs^{136}	13,2 сут	0,036	32
^{137}Cs	30,2 лет	5,57	5,9
^{140}Ba	12,8 сут	5,18	4700
^{141}Ce	32,5 сут	4,58	1600
^{144}Ce	284 сут	4,69	190

Кроме ПЯД в атмосфере образуются ^{14}C и 3H , в окружающей среде остаются исходные ядерные материалы и образовавшиеся ТУЭ – $^{239-242}Pu$, ^{242}Cm , ^{241}Am .

После атмосферного взрыва около 50 % образовавшихся активных продуктов выпадают в районе испытаний (в радиусе около 100 км), остальные уносятся в тропосферу или стратосферу и затем долгое время выпадают в разном количестве на различные участки поверхности всего зем-

ного шара. Глобальные выпадения из стратосферы в убывающем порядке значимости определяются долгоживущими продуктами деления - ^{137}Cs , ^{97}Zr , ^{90}Sr , ^{106}Ru , ^{144}Ce , ^3H , ^{239}Pu , ^{241}Am , ^{14}C .

Кроме ПЯД в состав продуктов ядерных взрывов входит и часть ядерного горючего (^{239}Pu или ^{235}U) атомной бомбы, не успевшего прореагировать во время взрыва, а также продукты нейтронной активации. Считается, что во время взрыва, в реакции деления участвуют только 20...30 % ядер тяжелых элементов. После взрыва атомной бомбы мощностью 20 килотонн в окружающую среду выбрасывается около $2,7 \cdot 10^3$ Ки ^{239}Pu . При ядерном взрыве в расчете на 1 килотонну мощности взрыва образуется $2,25 \cdot 10^{23}$ нейтронов, которые, взаимодействуя с конструктивными материалами бомбы и ядрами элементов почвы, воды и воздуха, превращают стабильные элементы в радионуклиды. При наземном взрыве бомбы мощностью 1 мегатонна через сутки радиоактивность осколков деления составляет $4 \cdot 10^9$ Ки, продуктов нейтронной активации - $1 \cdot 10^8$ Ки. С радиозэкологической точки зрения, из всех радионуклидов, являющихся продуктами нейтронной активации, наиболее важными являются ^3H , ^{14}C , ^{54}Mn и ^{56}Fe .

Медленное, растянувшееся на десятки лет оседание радионуклидов из стратосферного источника привело хотя и к небольшим, но заметным загрязнениям по всей поверхности Земли. Глобальные выпадения неравномерны, большая их часть, около 3/4, приходится на Северное, и только 1/4 - на Южное полушария. Минимальные выпадения образовались у полюсов и экватора, максимальные - на широтах от 30 до 60° в Северном полушарии.

Испытательные взрывы термоядерного оружия в середине XX в. явились основной причиной глобальных (из стратосферы) выпадений радионуклидов на большей части земной поверхности. Однако к настоящему времени уровень глобального загрязнения долгоживущими радионуклидами не превышает 2...3 % от естественной активности почв.

Использование атомной энергии как в военных целях (подводный и надводный атомный флот, разработка и испытание ядерного оружия), так и в мирных (ядерная энергетика и другие области применения) сопряжено с возможностью радиоактивного загрязнения окружающей среды.

Ядерный топливный цикл (ЯТЦ) включает в себя добычу и переработку урановой руды, изготовление ядерного топлива, осуществление цепной ядерной реакции в реакторе и переработку или захоронение отработанного ядерного топлива (ОЯТ). Большая часть мировых запасов урана сосредоточена в Канаде, Австралии и Африке. До распада СССР основные рудные районы страны находились в Казахстане и Средней Азии, в настоящее время главным российским предприятием по добыче и первичной

переработке урановой руды является Стрельцовское месторождение в Забайкалье (Читинская область).

Добыча урана в настоящее время производится в основном методами подземного выщелачивания, тогда как раньше уран добывали в открытых карьерах или шахтах. Из руды методами флотации, сорбции, жидкостной экстракции выделяют чистую окись-закись U_3O_8 .

При добыче и первичной переработке руды накапливаются большие объемы «хвостов» - пустой породы и отходов флотационного обогащения. В «хвостах» может содержаться до 70 % исходного количества радиоактивных веществ - U, Th, Ra и продуктов их распада. «Пустая порода» складывается на открытых площадках, а отходы в виде пульпы удаляются в пруды-отстойники, отработанные карьеры и другие естественные углубления, ограждаемые насыпями, но высохшая масса впоследствии может подвергаться выветриванию и вторичному перемещению воздушными и водными путями. Неблагоприятная экологическая обстановка сложилась в Читинской области на Забайкальском и Приаргунском горно-обогатительных комбинатах, где в хвостохранилищах накоплено около 60 млн м³ пустой породы с общей активностью более 0,6 МКи.

Следующий этап - одна из наиболее технически сложных задач - изотопное обогащение урана, так как в природном уране количества ^{235}U (0,7 %) недостаточно для самоподдерживающейся цепной реакции деления. Атомную долю ^{235}U доводят до 2...4 % с использованием различных физических методов (газовой диффузии или центрифугирования), для чего предварительно переводят уран в газообразный гексафторид UF_6 . Обогащенный по изотопу ^{235}U уран затем снова переводят в твердую двуокись урана UO_2 . Ядерное топливо (ЯТ) представляет собой таблетки керамического типа $U + UO_2$, которые получают спеканием при высокой температуре. Таблетками заполняют циркониевые трубки - рабочие стержни реактора, называемые тепловыделяющие элементы (ТВЭЛ), которые обеспечивают сохранение ЯТ и образующихся осколков в небольшом замкнутом пространстве. Из комплекта ТВЭЛов формируются тепловыделяющие сборки ТВС (317 ТВЭЛ – 1 ТВС).

Срок службы ТВС равен примерно 3 годам, в течение которых степень выгорания ЯТ составляет 10...20 %. Отслужившие ТВС, содержащие внутри ЯТ, называются отработанным ядерным топливом (ОЯТ). Их переносят в бассейны выдержки, где хранят 3-4 года с определённым температурным режимом под слоем воды, защищающим персонал от ионизирующего излучения. Оставшееся ЯТ следует регенерировать. Регенерация – удаление осколков деления с высокой радиоактивностью и выделение урана и плутония – производится на радиохимических заводах (РХЗ). В таблице 1.2 представлены данные по содержанию и активности основных долгоживущих ПЯД и ТУЭ в ОЯТ.

Таблица 1.2 – Содержание и активности основных долгоживущих продуктов деления и трансурановых элементов в ОЯТ

Радионуклид	Вид излучения	$T_{1/2}$, лет	Масса, г/т ОЯТ	Удельная активность, Ки/т
1	2	3	4	5
^{241}Pu	β	14,4	1335	$1,38 \cdot 10^5$
^{137}Cs	β, γ	30,15	1223	$1,06 \cdot 10^5$
^{242}Cm	α, n	0,446	12	$4,04 \cdot 10^4$
^{90}Sr	β	28,15	520	$7,34 \cdot 10^3$
^{238}Pu	α	87,7	176	$3,01 \cdot 10^3$
^{244}Cm	α, n	18,11	21	$1,69 \cdot 10^3$
^{240}Pu	α	$6,55 \cdot 10^3$	2226	507
^{239}Pu	α	$2,41 \cdot 10^4$	5768	358
^{99}Tc	β, γ	$2,14 \cdot 10^5$	772	130
^{241}Am	α	432,6	33	112
^{243}Am	α	$7,38 \cdot 10^3$	90	16,9
^{242}Pu	α	$3,76 \cdot 10^5$	533	2,1
^{234}U	α	$2,45 \cdot 10^5$	153	0,95
^{237}Np	α	$2,14 \cdot 10^6$	482	0,34
^{236}U	α	$2,34 \cdot 10^7$	4451	0,29
^{235}Cs	β, γ	$2,95 \cdot 10^6$	218	0,195
^{129}I	β, γ	$1,57 \cdot 10^7$	185	0,033
^{235}U	α	$7,04 \cdot 10^8$	7861	0,02

Одной из важных проблем атомной промышленности является переработка и захоронение радиоактивных отходов (РАО): в настоящее время имеющиеся промышленные мощности не справляются с очень большими объемами постоянно накапливающихся РАО.

Наиболее важным источником загрязнения среды обитания человека являются аварии на предприятиях атомной энергетики, на долю которой в настоящее время приходится значительная часть мирового производства электроэнергии.

Атомная энергетика мира образует большое количество радиоактивных отходов, достигшее к настоящему времени уровня 10^{11} Ки в год, а по объему - десятки тысяч кубических метров высоко- и среднеактивных и сотни тысяч кубометров низкоактивных отходов. Основная масса отходов - ОЯТ и другие РАО - накапливаются на площадках самих АЭС и в хранилищах, ожидая последующей переработки или захоронения. Российские АЭС образуют ежегодно около 10 тыс. т отходов.

Наиболее важным источником загрязнения среды обитания человека являются аварии на предприятиях атомной энергетики. МАГАТЭ определяет степень опасности таких аварий на основе международной шкалы ядерных событий, которая имеет деления от 0 до 7. Высший, 7-й уровень

соответствует крупной аварии с катастрофическими последствиями. Таки-ми были авария на Чернобыльской АЭС в 1986 г. и авария на АЭС Фукусима в 2011 г. 6-й и 5-й уровни соответствуют серьезным авариям и авариям с риском для окружающей среды. В качестве примеров можно привести кыштымскую аварию на комбинате «Маяк» и аварии на реакторах в Уиндскейле и Три-Майл-Айленде. Уровнем ниже 4-го определяют инциденты и аномалии, не имеющие радиационных последствий. К нулевому уровню относят отклонения, не имеющие значимости с точки зрения безопасности.

Выбросы радиоактивных веществ в атмосферу приводят к поверхностным загрязнениям, которые по масштабам охвата территории делят на локальные (местные), региональные (тропосферные) и глобальные (стратосферные), характеристики которых приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3 – Основные виды радионуклидных выпадений

Виды выпадений	Протяженность	Размер частиц, мкм	Общая продолжительность	Время полуоседания
Локальные	10-100 км	>10	Несколько дней	10-20 ч
Региональные	100-1000 км	1-10	До 3-4 недель	15-20 сут.
Глобальные	Вся планета	<1	10-30 лет	0,5-2 года

В зависимости от мощности взрыва и от дисперсности образовавшегося радиоактивного материала, последний может оказаться в атмосфере на сравнительно небольшой высоте (в случае реакторных аварий - обычно не более 1 - 2 км), но может подняться до тропосферы (на высоту до 16 - 18 км) и даже до стратосферы (20 - 40 км). Последний случай соответствует испытаниям самого мощного, термоядерного оружия. Состав радиоактивных изотопов и от взрыва атомного заряда, и от аварии на ядерном реакторе, в основном, одинаков, так как в обоих случаях происходит осколочное деление тяжелых ядер с примерно одинаковым набором продуктов реакции.

Помимо атомной энергетики и испытаний ядерного оружия вклад в технологическое изменение естественного радиационного фона вносят:

- добыча и сжигание органического топлива (в первую очередь – каменного угля);
- добыча и переработка фосфатных руд;
- производство строительных материалов (в первую очередь из отходов различных производств);
- химическая промышленность и металлургия.

Раздел 2. ОСНОВНЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ – ЗАГРЯЗНИТЕЛИ АГРОЭКОСИСТЕМ

2.1. Радионуклидное загрязнение окружающей среды в результате аварий в Кыштыме и в Чернобыле

При авариях на ядерных реакторах или в технологических аппаратах по переработке материалов, полученных в реакторах, радиоизотопный состав выбросов зависит от состава изотопов в реакторе (аппарате) на момент аварии. Так, в Кыштымской аварии взорвавшаяся емкость содержала частично переработанные жидкие отходы, из которых ^{137}Cs был отделен, и главным долгоживущим нуклидом на территории восточно-уральского следа (ВУРСа) оказался ^{90}Sr . В табл. 2.1 приведены сравнительные данные по радиационно-физическим характеристикам аварий в Кыштыме и в Чернобыле.

Таблица 2.1 - Радиационно-физические характеристики аварий в Кыштыме и в Чернобыле

Показатель	Кыштым, 29.09.57 (осень)	Чернобыль, 26.04.86 (весна)
Выброс радионуклидов в окружающую среду, Ки	$2.1 \cdot 10^6$	$50 \cdot 10^6$
Площадь загрязнённых земель	$> 2 \text{ Ки/км}^2 \text{ } ^{90}\text{Sr} = 170 \text{ км}^2$	$> 2 \text{ Ки/км}^2 \text{ } ^{90}\text{Sr} = 2000 \text{ км}^2$ $> 5 \text{ Ки/км}^2 \text{ } ^{137}\text{Cs} = 30000 \text{ км}^2$
Продолжительность формирования первичного следа	11 часов	15 - 20 суток
Пространственное распределение радионуклидов	Равномерно убывает по оси следа, высокий градиент поперёк следа	Неравномерность распределения по площади и по формам нахождения
Радионуклидный состав выбросов	Один год хранения; ^{90}Sr - 5,4 %, ^{95}Zr - 25 %, ^{106}Ru - 3,7 %, ^{137}Cs - 0,04 %, ^{144}Ce - 66 %, ^{141}Ce , ^{147}Pm , Pu - следы	^{137}Cs - 2,2 %, ^{90}Sr - 2,0 %, $^{238-240}\text{Pu}$ - 0,01 %, $^{103,106}\text{Ru}$ - 23 %, $^{141,144}\text{Ce}$ - 36 %, ^{140}Ba - 8,2 %, ^{241}Am - следы
Основные радиологически значимые радионуклиды	^{90}Sr - все районы загрязнения	^{137}Cs - все районы; ^{90}Sr , ^{131}I , $^{103,106}\text{Ru}$, $^{141,144}\text{Ce}$, ^{140}Ba , $^{238-240}\text{Pu}$, ^{241}Am - следы в ближней зоне,
Форма состояния радионуклидов в составе выброса	Растворимые нитратно-ацетатные соли натрия	Растворимые (конденсационные) формы - за пределы 30 км; Малорастворимые (топливная матрица, «горячие» частицы) формы соединений – ближняя зона.

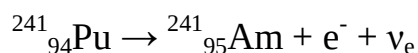
Для оценки радиозоологической обстановки и степени опасности загрязнения для населения очень важно знать, какие конкретно радионуклиды образуются в результате той или иной аварийной ситуации и какие попадают в сферу сельскохозяйственного производства. В качестве примера можно рассмотреть радионуклидный выброс аварии на Чернобыльской АЭС (табл. 2.2).

Инертные радиоактивные газы кrypton-85 и ксенон-133 при выбросе вышли из реактора почти полностью, однако из-за быстрого распада и рассеяния в воздухе они практически не сказались на загрязнении почвы и растительности в зоне аварии.

Первый период (период йодной опасности) вследствие достаточно короткого периода полураспада йода был непродолжителен и завершился в течение нескольких месяцев. Уже через 2 месяца после завершения основных выбросов количество йода-131 уменьшилось в 250 раз. В этот же период значительную опасность представляли стронций-89, цирконий-95 (твердые частицы).

В отдаленные периоды после большинства аварийных ситуаций главными радионуклидами-загрязнителями агроэкосистем становятся долгоживущие продукты ядерного деления (ПЯД) ^{137}Cs и ^{90}Sr . В чернобыльских выбросах содержались также трансурановые элементы (ТУЭ) – короткоживущий ^{239}Np с $T_{1/2}=2.35$ суток, радионуклиды плутония, среди которых наибольшая активность приходилась на ^{241}Pu с $T_{1/2}=14,4$ года, а также ^{242}Cm с $T_{1/2}=18.1$ лет. ТУЭ, выпадающие в виде твердых частиц в пределах 30-ти км зоны, не представляли глобальной экологической опасности, однако они чрезвычайно опасны для живых организмов и в локальных масштабах создают радиозоологическую проблему.

^{241}Pu является β -излучателем и при его распаде образуется ^{241}Am , α -излучатель с $T_{1/2} = 432,6$ года:



Таким образом, с уменьшением в окружающей среде концентрации ^{241}Pu возрастает концентрация ^{241}Am , являющегося α -излучателем. Америций концентрируется в верхних слоях почвы и обладает более высокой подвижностью, чем плутоний, вследствие чего вероятность его попадания в живые организмы выше. Учитывая большой период полураспада америция, радиозоологическая проблема загрязнения α -излучающим ^{241}Am территории 30-км зоны будет актуальна ещё длительное время.

Таблица 2.2 – Активность радионуклидов, выброшенных в окружающую среду вследствие Чернобыльской катастрофы на момент аварии и 20 лет спустя

Радионуклид	Период полураспада	Активность выброса, ПБк	
		26.04.1986	26.04.2006
Инертные газы			
⁸⁵ Kr	10.72 ч.	≈33	≈9.058000
¹³³ Xe	5.25 д.	≈6500	< 0.000000
Легко летучие элементы			
¹³¹ Te	33.6 д.	≈240	<0.000000
¹³² Te	3.26 д.	≈1150	< 0.000000
¹³¹ I	8.04 д.	≈1760	< 0.000000
¹³³ I	20.8 ч.	≈2500	<0.000000
¹³⁴ Cs	2.06 г.	≈54	< 0.065000
¹³⁶ Cs	13.1 д.	≈36	< 0.000000
¹³⁷ Cs	30.0 л.	≈85	≈53.550000
Элементы с промежуточной летучестью			
⁸⁹ Sr	50.5 д.	≈115	< 0.000000
⁹⁰ Sr	29.12 л.	≈10	≈6.210000
¹⁰³ Ru	39.3 д.	≈168	< 0.000000
¹⁰⁶ Ru	368 д.	≈73	< 0.000077
¹⁴⁰ Ba	12.7 д.	≈240	< 0.000000
Трудно летучие элементы			
⁹⁵ Zr	64.0 д.	≈196	< 0.000000
⁹⁹ Mo	2.75 д.	≈168	< 0.000000
¹⁴¹ Ce	32.5 д.	≈196	< 0.000000
¹⁴⁴ Ce	284 д.	≈116	< 0.000002
²³⁹ Np	2.35 д.	≈400	< 0.000000
²³⁸ Pu	87.74 л.	≈0.035	< 0.030000
²³⁹ Pu	24065 л.	≈0.030	< 0.030000
²⁴⁰ Pu	6537 л.	≈0.042	< 0.042000
²⁴¹ Pu	14.4 г.	≈6	< 2.292000
²⁴² Pu	376000 л.	≈0.00004	< 0.000040
²⁴² Cm	18.1 л.	≈0.9	< 0.419000
Общее загрязнение	≈13935.89593		<71.696119

2.2. Периоды полувыведения радионуклидов из организма

С точки зрения неблагоприятного воздействия радионуклидов на человека, необходимо учитывать скорость их выведения из организма, которая характеризуется биологическим периодом полувыведения — временем, в течение которого выводится половина поступившего в организм радиоактивного вещества (T_B).

Фактическая убыль радионуклида из организма измеряется эффективным периодом полувыведения ($T_{эф}$) — временем освобождения организма от половины депонированного вещества путем биологического выведения и физического распада (2.1):

$$T_{эф} = \frac{T_B \cdot T_{1/2}}{T_B + T_{1/2}} \quad (2.1)$$

Значения величины периодов полураспада и полувыведения некоторых радионуклидов из организма человека приведены в табл. 2.3.

Выведение радионуклидов из организма - сложный процесс: в отдельных органах радионуклиды имеют свой T_B , который может существенно отличаться от такового во всем теле.

Например, ^{131}I в щитовидной железе и во всем теле имеет $T_B = 138$ суток, в почках — 7 суток, в костях — 14 суток. Период полувыведения для цезия-137 из организма составляет 70 суток, из мышечной ткани — 140 суток.

Таблица 2.3 - Величины периодов полураспада и полувыведения некоторых радионуклидов из организма человека

Радионуклид	Физический период полураспада $T_{1/2}$	Биологический период полувыведения, T_B	Эффективный период полувыведения, $T_{эф}$
^{131}I	8,05 дня	138 сут. (щит. железа) 7 сут. (почки) 14 сут. (кости)	—
^{90}Sr	29,12 года	35,6 лет	до 15,6 лет
^{137}Cs	30,174 года	70 сут. (все тело) 140 сут. (мышцы)	50-70 сут.
^{239}Pu	~24000 лет	178 лет	175 лет

2.3. Характеристика физических, химических и биологических свойств ^{137}Cs и ^{90}Sr

По химическим свойствам цезий и стронций относятся к металлам - аналогам биогенных элементов: цезий является аналогом калия, стронций - аналогом кальция. Поэтому они активно вовлекаются в биологический

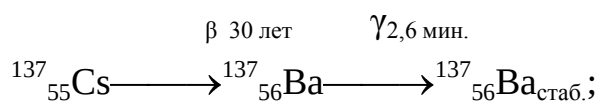
круговорот, поступая по пищевым цепочкам в растения, организмы животных и человека.

Сравнивая физические, химические и биологические свойства ^{137}Cs и ^{90}Sr , можно отметить следующее:

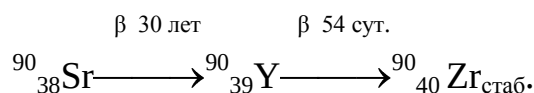
^{137}Cs и ^{90}Sr имеют близкие периоды полураспада и относятся к долгоживущим радионуклидам.

^{137}Cs является источником β - и γ -излучений, а ^{90}Sr - источником только β -излучения. Это означает, что ^{137}Cs может вызывать как внешнее, так и внутреннее облучения, а ^{90}Sr - в основном источник внутреннего облучения.

При распаде ^{137}Cs образуется одна β -частица:



а при распаде ^{90}Sr и его дочернего радионуклида ^{90}Y – две β -частицы:



Энергии этих частиц имеют значения 0,55 и 2,27 МэВ, что выше энергии β -частицы при распаде ^{137}Cs , которая составляет 0,51 МэВ. Поэтому ^{90}Sr является более опасным радионуклидом при внутреннем облучении.

Цезий – щелочной элемент главной подгруппы первой группы периодической системы элементов Д.И. Менделеева, аналог биологически значимого калия. Все его соединения растворимы в воде, однако миграция ^{137}Cs в почве затруднена, т.к. он связывается с гумусом почвы в прочный комплекс в верхнем 0...5 см слое и малодоступен для растений.

Стронций – щелочноземельный металл, расположен в главной подгруппе второй группы периодической системы элементов Д. И. Менделеева. По свойствам схож с биологически значимым кальцием. Несмотря на то, что ряд его соединений, таких как сульфат, карбонат, фосфат и др., нерастворимы или плохо растворимы в воде, миграция ^{90}Sr , который находится в основном в обменном состоянии, в почве происходит значительно быстрее, чем ^{137}Cs .

В наибольших количествах ^{90}Sr поступает в продукты питания, отличающиеся высоким содержанием кальция, например, в молоко, тогда как ^{137}Cs накапливается в тех продуктах, для которых характерно повышенное содержание калия. В организме человека и животных стронций накапливается в основном в костных тканях, откуда очень медленно выводится ($T_{\text{эфф}}$ может достигать 15,6 лет) и отрицательно влияет на кроветвор-

ную функцию костного мозга. Цезий накапливается в основном в мышечных тканях и сравнительно быстро выводится из организма ($T_{эфф} = 50-70$ суток).

Неодинаковые радиотоксикологические свойства ^{137}Cs и ^{90}Sr становятся причиной разного нормирования содержания этих радионуклидов в почвах, в кормах, продуктах питания и организме человека.

Раздел 3. НОРМАТИВЫ, РЕГЛАМЕНТИРУЮЩИЕ СОДЕРЖАНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ПРИРОДНЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ

3.1. Нормативы содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в продуктах питания

В настоящее время в России основным документом, регламентирующим содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в продуктах питания и сырье для их производства, являются «Санитарные правила и нормы», принятые в 2001 году (СанПиН-01, табл. 3.1).

Таблица 3.1 – Нормативные уровни содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в продуктах питания (СанПиН 2.3.2.1078-01)

Продукт питания	Удельная активность Бк/кг(л)	
	Цезий -137	Стронций-90
Хлеб	40	20
Картофель	120	40
Свекла	120	40
Морковь	120	40
Капуста	120	40
Огурцы	120	40
Помидоры	120	40
Бахчевые	120	40
Лук	120	40
Молоко	100	25
Мясо	160	50
Яйца	80	50
Мед	100	80
Орехи	200	100
Масло коровье	200	60
Масло растительное	60	80
Чай	400	200
Сахар, конфеты, кондитерские	160	100
Крупа, толокно, хлопья	50	30
Макаронные изделия	60	30
Напитки безалкогольные	70	100
Зеленые овощи	120	40
Рыба свежая и соленая	130	100

3.2. Контрольные уровни содержания радионуклидов $^{134,137}\text{Cs}$ и ^{90}Sr в кормах и кормовых добавках

Содержание радионуклидов в кормах регламентируется «Контрольными уровнями (КУ) содержания радионуклидов $^{134,137}\text{Cs}$ и ^{90}Sr в кормах и

кормовых добавках, импортируемых и произведенных в России» (табл. 3.2).

Для почв в настоящее время отсутствуют официально утвержденные регламентирующие значения содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr . Загрязненные территории дифференцируются согласно Зональному делению земель по уровню загрязнения (табл. 3.3).

Таблица 3.2 – Контрольные уровни (КУ) содержания радионуклидов $^{134,137}\text{Cs}$ и ^{90}Sr в кормах и кормовых добавках, импортируемых и произведенных в России

Виды кормов и добавок	КУ Бк/кг(л)	
	$^{134,137}\text{Cs}$	^{90}Sr
Грубые корма - сено, солома, мякина	600	100
Сочные корма-силос, сенаж, корнеплоды	600	100
Зеленый корм- травы естественное, сеянные	370	50
Концентрированные корма-зерно злаков, бобовых, отруби, комбикорма	600	65
Жом, меласса, шрот, жмых, мезга, барда	600	100
Мясо, рыба, субпродукты	600	100
Корма сухие животного происхождения, мясные, мясокостные, мука кормовая	370	100
Консервы кормовые животного происхождения с растительными и другими добавками	600	100
Молоко и заменители молочных кормов	370	50
Сухие молочные смеси и заменители	600	100
Белково-витаминные и минеральные добавки, премиксы, корма микробиологического синтеза	370	50

Таблица 3.3 – Зональное деление земель по уровню загрязнения

Радионуклид	Плотность поверхностного загрязнения, Ки/км ²	Среднегодовая доза облучения от р/а выпадения	Зона проживания
^{137}Cs	1-5	1 мЗв	Проживание с льготным экономическим статусом
^{137}Cs	5-15	1-5 мЗв	Проживание с правом отселения
^{137}Cs или ^{90}Sr или $^{239, 240}\text{Pu}$	>15 >3 >0,1	Более 5мЗв	Отселение с правом получения компенсаций и льгот
30-километровая зона вокруг Чернобыльской АЭС и территории, загрязненные в результате аварий			Зона отчуждения (отселения)

Определение радиоактивных загрязнений в природных, в частности, сельскохозяйственных объектах, включает следующие этапы:

- определение наличия радиоактивного загрязнения;
- идентификация (распознавание) радионуклидного состава радиоактивного загрязнения, оценка уровня радиоактивного загрязнения путем сравнения с существующими нормативными показателями.
- оценка биологической доступности загрязнений и способности каждого радионуклида мигрировать по пищевым цепочкам.

Раздел 4. ДОЗОВЫЕ НАГРУЗКИ НА ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ

4.1. Формирование дозовой нагрузки на растения

Величина дозовой нагрузки на сельскохозяйственные растения складывается из внешней и внутренней дозы и зависит от конкретной ситуации, в которой растения выращиваются. К наиболее значимым факторам, определяющим величину поглощенной дозы, следует отнести размер и состав радионуклидных загрязнений, время с момента начала загрязнения, характер трофических цепей и т. д.

Источниками облучения растений являются:

- загрязненная почва;
- радионуклиды, инкорпорированные в сами растения, т.е. поступившие в растения в результате корневого и листового (аэрального) поглощения;
- соседние растения, также содержащие радиоактивные изотопы.

Радиочувствительность разных органов растений к поглощенной дозе неодинакова. Наиболее чувствительным к ИИ органом растений является точка роста или апикальная меристема, ткань которой построена из быстро делящихся клеток.

При высоких дозовых нагрузках, равномерно распределенных по всему растению, происходит угнетение точки роста, что приводит к последующему увеличению кущения, росту боковых побегов и активизации спящих пазушных почек. Типичный морфологический дефект у хвойных деревьев представлен на рис. 4.1.

При радионуклидном загрязнении растения подвергаются смешанному облучению - внешнему и внутреннему. Суммарная дозовая нагрузка включает также облучение от природных источников радиации - космического фона, космогенных и естественных радионуклидов. При этом мощность дозы в верхушечной меристеме P_a (Гр/с) растений можно оценить следующим образом (4.1):

$$P_a = 1,6 \cdot 10^{-13} \cdot C \cdot E_\alpha \cdot K_H \cdot K_M, \quad (4.1)$$

где $1,6 \cdot 10^{-13}$ - коэффициент, учитывающий размерность единиц, Гр·кг/МэВ;

C - концентрация радионуклида в почве, Бк/кг;

E_α - энергия α -излучения, МэВ;

K_H - коэффициент накопления радионуклида растением, (отн. ед.);

K_M - относительное содержание радионуклида в верхушечной меристеме по сравнению с растением в целом, (отн. ед.).



Рис. 4.1. Угнетение вегетативного роста и гигантизм некоторых частей сосны в чернобыльской зоне отчуждения

На приведенном фото молодая сосна из чернобыльской зоны отчуждения через два года после аварии, у которой верхняя часть кроны повреждена первоначальным выпадением радионуклидов на верхушку, а нижняя часть растения повреждена излучением осевшего на поверхность материала, который был смыт с верхней части кроны, причем средняя часть кроны оказалась неповрежденной [6].

Радионуклиды-загрязнители при свежих выпадениях концентрируются в верхних слоях почвы. Обычно глубина проникновения свежих выпадений не превышает 1...3 мм. В этом случае β -излучение, наряду с γ -излучением, имеет большое значение.

Со временем в результате переноса источников ИИ (смывание и сдувание с поверхности листьев, ветровой перенос), ветровой и водной эрозии почвы, а также агротехнических мероприятий происходит вторичное перераспределение радионуклидов в компонентах агроэкосистем. При этом они распределяются по всему пахотному слою почвы (обычно 0...20 см) и за счет экранирующего влияния слоя почвы роль β -активных радионуклидов в формировании дозы внешнего облучения снижается.

4.2. Формирование дозовой нагрузки на животных

В условиях радионуклидного загрязнения дозовая нагрузка на сельскохозяйственных животных при их облучении формируется иначе. Животные, в отличие от растений, которые локализованы территориально, способны перемещаться пространственно по территории, которая, как правило, является неоднородной по степени и составу радионуклидного загрязнения. Вследствие этого создаются различные ситуации формирования внешнего и внутреннего их облучения и оценка дозовой нагрузки усложняется.

Доза **внешнего** облучения сельскохозяйственных животных формируется за счет γ - и β -излучения, причем наибольший вклад вносит проникающее γ -излучение, так как γ -излучение внешних источников ИИ может формировать дозовые нагрузки и на внутренние органы животных. Вследствие того, что β -излучение обладает гораздо меньшей проникающей способностью, оно воздействует только на внешние покровы животных. Более значимым β -излучение становится при максимальном приближении животных к загрязненному приземному слою воздуха или к поверхности загрязненной почвы. Поэтому наибольшие дозовые нагрузки, обусловленные β -облучением, животные получают во время лежания на загрязненной почве, на долю которого приходится 30...60 % суточного времени.

Кроме того, дозовая нагрузка на сельскохозяйственных животных при внешнем облучении зависит также от микрорельефа поверхности, на которой они находятся. Например, в случае открытой местности при одинаковой плотности загрязнения мощность дозы γ -излучения на лугу в 1,3 раза, а на вспаханной пашне - в 2 раза меньше по сравнению с гладкой поверхностью. Поглощенные дозы γ -излучения в воздухе и в биообъекте различаются. Уровни доз в различных органах животного различаются и зависят от их расположения в теле животного. На боковых поверхностях животного и в области головы формируются максимальные дозы. Доза, создаваемая γ -излучением, резко снижается при увеличении расстояния от кожного покрова внутрь. Так, по сравнению с дозой на поверхности, в центре тела формируемая внешним облучением доза уменьшается в 5-7 раз для крупного рогатого скота и в 2-3 раза для овец.

На величину доз, создаваемых γ -излучением при внешнем облучении, также влияет тип содержания сельскохозяйственных животных, которое может быть стойловым или пастбищным. Кратность ослабления γ -излучения стенами построек характеризуется коэффициентом защиты (коэффициентом ослабления), который определяется отношением мощности дозы излучения на открытой местности к мощности дозы внутри помещения в его центре. Коэффициенты защиты (в первом приближении) для построек и транспортных средств приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1 – Средние значения коэффициента ослабления дозы радиации укрытиями и транспортными средствами

Наименование укрытий и сооружений	K_{oc}
Открытое расположение на местности	1
Одноэтажные деревянные дома, животноводческие деревянные сооружения	2
Подвал одноэтажного деревянного дома	4
Двухэтажные жилые деревянные дома	8
Одноэтажные жилые каменные дома, каменные животноводческие помещения	10
Подвал двухэтажного деревянного дома	12
Двухэтажные жилые каменные дома	15
Подвал одноэтажного каменного дома	40
Подвал двухэтажного каменного дома	100
Автомобили, автобусы, крытые вагоны	2
Кабины трактора, бульдозера, экскаватора	4
Железнодорожные пассажирские вагоны	3
Лес	2
Убежище	1000 и более

При **внутреннем** облучении животных источниками поступления радионуклидов в их организм являются загрязненные компоненты окружающей среды: воздух, вода, растения и частицы почвы. Основные пути поступления радиоизотопов внутрь животных – ингаляционный и пероральный. Определяющим фактором является степень загрязненности кормов.

Поглощенная доза внутреннего облучения животных определяется:

- скоростью и особенностями включения радионуклидов в метаболические процессы, протекающие в организме животного;
- интенсивностью их выведения;
- физическими характеристиками радионуклидов (вид и энергия излучения, длительность периода полураспада).

Вследствие того, что поступающие в организм радионуклиды распределяются в нем неравномерно, наибольшему облучению подвергаются критические органы. Так, для ^{131}I критическим органом является щитовидная железа, для ^{90}Sr – костная ткань. Так как ^{137}Cs , являющийся аналогом калия, распределяется в организме равномерно, для него критическим органом являются мышечная ткань и печень (основная биохимическая лаборатория организма).

При многократном поступлении радионуклидов в организм поглощенная доза внутреннего облучения определяется частотой и длительностью их поступления. При хроническом поступлении доза внутреннего облучения будет гораздо большей, различия могут достигать десятков, сотен и даже тысяч раз в зависимости от времени наблюдения. На накопление радионуклидов в организме животных и в получаемой от них продукции

влиять такие факторы, как возраст и физиологическое состояние животных, их продуктивность, тип рациона. Молодые животные гораздо активнее накапливают радионуклиды, чем взрослые и старые, что связано с особенностью и интенсивностью обмена веществ в молодом организме.

4.3. Формирование дозовой нагрузки на человека

Суммарная доза облучения человека, проживающего на территории, загрязненной радионуклидами включает воздействия естественных и искусственных источников радиации. Суммарное воздействие ИИ складывается из доз внешнего облучения от источников излучения, находящихся вне человека, и внутреннего облучения от источников излучения, попадающих в организм человека с воздухом, водой, пищей или другими ингаляционным, пероральным и кожно-резорбтивным путями (рис. 4.2).

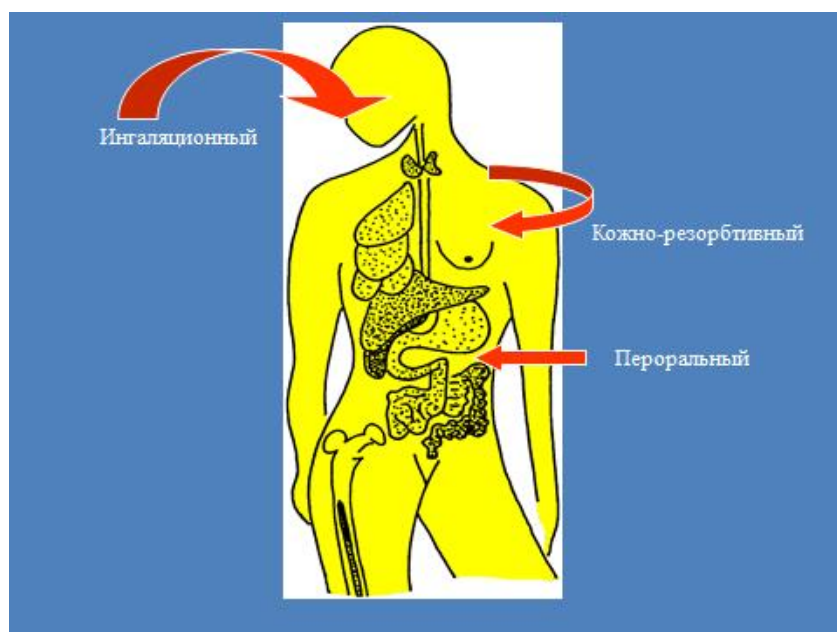


Рис. 4.2. Способы поступления радиоактивных веществ в организм

При радиационном загрязнении через несколько лет после аварии основными компонентами загрязнения являются долгоживущие радионуклиды. Известно, что ^{137}Cs является основным загрязнителем территорий, пострадавших в результате чернобыльской катастрофы. Поэтому главным источником внешнего облучения человека является ^{137}Cs , распад которого сопровождается β - и γ -излучениями. Другие долгоживущие радионуклиды - ^{90}Sr и ^{239}Pu - не представляют опасности как источники внешнего излучения по причине невысокой проникающей способности β - и α -излучений.

Суммарную дозу, которую может получить население, проживающее на радиационно-загрязненных территориях, оценивают по результатам прогностических расчетов.

Дозу внешнего облучения рассчитывают, как правило, по эмпирическим формулам. Источник излучения обычно распределен в окружающей среде - почве, растениях, стенах зданий и т. д. В этом случае доза внешнего облучения зависит от целого ряда факторов: вида и энергии излучения радионуклида, количества радионуклида в почве (его активности), распределения радионуклида в слое почвы, времени нахождения человека на открытой территории, наличия защитных сооружений, расстояния от загрязненной поверхности и др. В такой ситуации обычно прибегают к использованию эмпирических, т. е. определяемых из опыта, зависимостей.

4.3.1. Расчет дозы внешнего облучения человека

Эмпирическая зависимость средней годовой дозы внешнего облучения человека ($D_{\text{внешн.}}$) от плотности поверхностного загрязнения территории (a_s) имеет вид (4.1):

$$D_{\text{внешн}} (\text{мЗв/год}) \sim 0,1 \cdot a_s (\text{Ки/км}^2), \quad (4.1)$$

В соответствии с этой формулой единственным источником внешнего облучения является гамма-излучение ^{137}Cs , при этом радионуклид равномерно распределен в слое почвы толщиной 20см, учтено также ослабление потока излучения при прохождении этого слоя, учитываются усредненные условия проживания человека. Формула может быть использована для приближенной оценки дозы внешнего излучения.

Если рассмотреть частный случай, когда a_s для ^{137}Cs составляет 10 Ки/км^2 , прогнозируемая доза внешнего облучения для работника АПК составит приблизительно 1 мЗв/год:

$$D_{\text{внешн}} (\text{мЗв/год}) \sim 0,1 \cdot a_s (\text{Ки/км}^2) = 0,1 \cdot 10 (\text{Ки/км}^2) = 1 \text{ мЗв/год}.$$

Эта величина соответствует допустимой общей дозовой нагрузке сверх естественного фона (НРБ-99) (табл. 4.2)

4.3.2. Расчет дозы внутреннего облучения человека

Расчет дозы **внутреннего** облучения человека основан на использовании дозового коэффициента (K_D), установленного Нормами радиационной безопасности (НРБ-99).

Таблица 4.2 - Основные дозовые пределы по НРБ-99

Нормируемые величины	Дозовые пределы	
	лица из персонала	лица из населения
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год	1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год
Эквивалентная доза за год: - в хрусталике, - в коже, - в кистях и стопах	150 мЗв 500 мЗв 500 мЗв	15 мЗв 30 мЗв 30 мЗв

Дозовый коэффициент K_D - величина ожидаемой эффективной дозы облучения человека при поступлении 1 Бк данного радионуклида через органы дыхания или пищеварения. Значения дозовых коэффициентов и пределов годового поступления радионуклидов приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3 – Дозовые коэффициенты (K_D) и пределы годового поступления (ПГП) радионуклидов в организм человека (по НРБ-99)

Радионуклид	K_D , мкЗв/Бк		ПГП, Бк/год	
	с воздухом	с пищей	с воздухом	с пищей
для персонала				
^{131}I	0,0076	—	2600000	—
^{137}Cs	0,0048	—	4200000	—
^{90}Sr	0,024	—	830000	—
^{239}Pu	15	—	1300	—
для населения				
^{131}I	0,072	0,18	14000	5600
^{137}Cs	0,0046	0,013	220000	77000
^{90}Sr	0,05	0,08	20000	13000
^{239}Pu	50	0,42	20	2400

Из табл. 4.3 следует, что для каждого радионуклида, а также для различных путей поступления радионуклидов в живой организм дозовый коэффициент, а значит, и ожидаемая доза облучения человека, различны.

Это объясняют тем, что для каждого радионуклида характерны свои вид и энергия излучения, период полураспада, физические и химические свойства, место локализации в организме человека, участие в обменных процессах, эффективный период полувыведения из организма.

Зная общую активность радионуклида, поступающего в организм человека, дозу внутреннего облучения можно рассчитать по формуле 4.2:

$$D_{\text{внутр}}(\text{мкЗв}) = A \cdot K_D, \quad (4.2)$$

где A - активность радионуклида, поступающего в организм человека, Бк;
 K_D - дозовый коэффициент, мкЗв/Бк.

Пример:

Предположим, что человек ежедневно питается продовольственными продуктами, содержащими ^{137}Cs и ^{90}Sr на уровне значений, разрешенных СанПиН-01 (табл. 3.1), включающими 12 наименований продуктов питания. Для расчета дозы внутреннего облучения, используя величину дозовых коэффициентов для ^{137}Cs и ^{90}Sr (табл. 4.3), получают дозы внутреннего облучения, соответствующие каждому радионуклиду, и суммарную дозу (табл. 4.4).

Таблица 4.4 – Расчет дозы внутреннего облучения человека за счет продуктов питания при содержании ^{137}Cs и ^{90}Sr , равном указанному в СанПиН-01

в СанПиН 91

Продукт питания	Годовое потребление,кг	Доза по СанПиН, Бк/кг,л		Поступление в организм человека, Бк/год	
		Радионуклид			
		Cs	Sr	Cs	Sr
1	2	3	4	5	6
Хлеб	100	120	20	4000	200
Картофель	120	120	40	14400	4800
Свекла	0	120	40	1080	360
Морковь	9	120	40	1080	360
Капуста	42	120	40	5040	1680
Огурцы	15	120	40	1800	600
Помидоры	22	120	40	2640	880
Бахчевые	20	120	40	2400	800
Лук	10	120	40	1200	400
Молоко	300	100	25	30000	7500
Зеленые овощи	10	120	40	1200	400
Мясо	60	160	50	9600	300
Итого				74440	18280
Дозовый коэффициент K_D , мкЗв/Бк				0,013	0,080
Доза облучения человека, мкЗв/год				968	1462
Суммарная доза облучения человека, мкЗв/год				2430	
Дозовый предел для населения по НРБ-99, мкЗв/год				1000	

Расчетная суммарная доза облучения человека равна 2430 мкЗв/год. Эта величина, не включающая дозу внешнего облучения, в 2,4 раза превышает установленный НРБ-99 предел, который равен 1000 мкЗв/год.

Полученные данные свидетельствуют об очень жестких регламентах дозовой нагрузки в РФ. K_D является условной интегральной величиной и не всегда соответствует регламентирующим нормам.

Раздел 5. ПРОГНОЗ ДОЗЫ ОБЩЕГО ОБЛУЧЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА

5.1. Цели и задачи прогностических расчетов

В зависимости от поставленных задач прогнозы разделяют на краткосрочные и длительные. Краткосрочные прогнозы делают обычно ориентировочно на начальном этапе радионуклидного загрязнения. Долговременный прогноз делается только после уточнения радиационной обстановки и вида радионуклидных выпадений. Он предусматривает решение проблемы ведения дальнейшего производства продукции.

Прогноз уточняется и корректируется с течением времени по мере распада радионуклидов, миграции долгоживущих радионуклидов и изменения их биологической доступности.

Для прогнозных оценок радиоэкологического загрязнения сельскохозяйственной продукции необходим определенный минимум исходной информации, без которой прогноз невозможен. Оценки размеров возможного радиоактивного загрязнения сельскохозяйственной продукции и соответствующих дозовых нагрузок от внутреннего облучения при потреблении такой продукции дают возможность:

- определить целесообразность производства той или иной продукции на имеющихся землях;
- выяснить возможность прямого использования продукции или необходимость ее переработки;
- выявить критические продуктов питания и разработать рекомендаций по изменению структуры пищевых рационов населения;
- определить необходимость проведения и эффективность защитных мероприятий для снижения загрязнения продукции;
- определить целесообразность изменений структуры посевных площадей и выработать рекомендаций по размещению культур по индивидуальным участкам (полям);
- определить возможность проживания на загрязненной местности и разработать ограничительные условия проживания и хозяйственной деятельности;
- разработать мероприятия на случай возникновения чрезвычайной ситуации.

Прогноз позволяет предупредить или сократить непроизводительные затраты труда и средств на выращивание урожая при сомнительных шансах на получение достаточно чистой продукции. Расчет прогнозируемого

загрязнения продукции и оценка дозовых нагрузок на человека при известных средних уровнях поверхностного загрязнения земель имеет весьма приблизительный характер из-за множественности факторов, влияющих на интегральные дозы внешнего и внутреннего облучения, высокой вариабельности этих факторов, а также большой пестроты распределения радионуклидов по территории.

5.2. Основные показатели и характеристики минимума исходной информации для прогнозных оценок

1. Уровни радионуклидной загрязненности почв данной территории.

Необходимо иметь информацию, отражающую пестроту загрязнений не только в пределах одного крупного хозяйства, но, желательно, и одного поля. Эта информация должна содержать данные по уровням загрязнения территории отдельными радионуклидами ^{137}Cs , ^{90}Sr и другими:

- в единицах удельной активности почвы $a_{\text{п}}$, обычно в Бк/кг
- единицах плотности поверхностного загрязнения $a_{\text{с}}$, в Ки/км².

2. Характеристика почвенного покрова территории.

Тип почв, уровень окультуренности и гранулометрический состав пахотных почв и сенокосно-пастбищных угодий.

3. Сведения о направлении хозяйственной деятельности предприятия: основная производимая продукция, соотношения в производстве растениеводческой и животноводческой продукции.

4. Сведения о структуре посевных площадей и севооборотах, а также их размещении на территории

5. Сведения об обработке почв, применении удобрений, мелиорантов.

6. Сведения о животноводческом секторе хозяйства: его направленность, формирование кормовой базы, рационы питания в стойловый и пастбищный периоды.

7. Сведения о коэффициентах накопления (КН) радионуклидов сельскохозяйственными растениями и кормовыми культурами или коэффициентах перехода радионуклида из почвы в растения (КП)(5.1):

$$\text{КН} = a_{\text{р}}/a_{\text{п}}, \quad (5.1)$$

где $a_{\text{р}}$ - удельная активность данного радионуклида в растении;

$a_{\text{п}}$ - удельная активность почвы.

Величина КН позволяет прогнозировать содержание радионуклида в растениях по его содержанию в почве.

8. Сведения о коэффициентах перехода радионуклида из суточного рациона сельскохозяйственных животных ($K_{П_{рац}}$)(5.2):

$$K_{П} = a_{П}/a_{с}, \quad (5.2)$$

где $a_{с}$ - плотность поверхностного загрязнения.

Коэффициент перехода численно равен удельной активности растения при уровне загрязнения почвы в 1 Ки/км². В табл. 5.1 приведены коэффициенты перехода радионуклидов из суточного рациона кормов в продукцию животноводства.

Таблица 5.1 - Коэффициенты перехода радионуклидов из суточного рациона кормов в 1 кг (л) продукции животноводства

Переход	$K_{П_{рац}}$	
	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr
Корма - мясо говяжье	0,04	0,006
Корма - молоко коровье	0,01	0,001

В табл. 5.1 для ¹³⁷Cs и табл. 5.3 для ⁹⁰Sr приведены обобщенные и усредненные значения $K_{П}$.

9. Сведения об изменении удельной активности при переработке сельскохозяйственного сырья в готовый продукт ($K_{пп}$).

При переработке в несколько этапов следует учитывать сведения об изменении концентрации радионуклида на каждом этапе переработки.

Значения $K_{пп}$ для некоторых видов сельскохозяйственной продукции представлены в табл. 5.2, 5.3. В табл. 5.4 дано уменьшение содержания радионуклидов в сельскохозяйственной продукции при переработке.

Таблица 5.2 - Усредненные значения коэффициентов перехода (КП) ^{137}Cs в растения из почвы ($[\text{Бк/кг}] / [\text{Ки/км}^2]$)

Культуры	Дерново-подзолистые почвы					серые лесные суглинистые	черноземы выщелоченные	черноземы типичные
	песчаные	суперпесчаные	легкосуглинистые	среднесуглинистые	тяжелосуглинистые			
Травы с естественных угодий (сено)	7740	6600	5530	4450	3370	400	200	150
Сеяные травы	2220	1150	1100	660	440	40	40	40
Вико-овсяная смесь (зеленый корм)	440	220	115	55	22	2	2	2
Кукуруза на силос	220	110	44	33	22	3	1	0,7
Кормовая свекла	335	115	112	44	11,5			
Овес (зерно)	77	66	55	55	44	3	2	2
Ячмень (зерно)		77	55	44	22	3	2	2
Яровая пшеница (зерно)	220	77	55	44	33	4	2	1
Озимая пшеница (зерно)	110	33	22,5	22	11,5	2	1	0,5
Озимая рожь	88		22,3	11,8	11,3	1,5	1	0,5
Картофель	110	77	66	44	33	3	2	2
Свекла (столовая)	220	115	112	99	44	6	4	3
Морковь	110	88	77	55	44	5	4	3
Капуста ранняя	110	66	55	33	22	3	1,5	1
Капуста поздняя	77	44	33	11,3	11	1,2	0,8	0,5
Огурцы	11,2	00,9	00,8	00,6	00,4	0,5	0,3	0,2
Помидоры	11	00,8	00,7	00,5	00,3	0,5	0,3	0,2
Тыквенные	11,2	00,8	00,7	0,5	0,4			
Лук	00,7	00,5	00,4	0,4	0,3			
Чеснок	11,0	00,8	00,7	0,5	0,4			
Зеленые овощи	3	2	2	1,5	1			

Таблица 5.3 - Усредненные значения коэффициентов перехода (КП) ^{90}Sr в растительную продукцию из почвы ([Бк/кг]/ [Ки/км²])

Культуры	Дерново-подзолистая почва					серые лесные среднесуглинистые	черноземы выщелоченные
	песчаные	суперпесчаные	легкосуглинистые	среднесуглинистые	тяжелосуглинистые		
Травы с естественных угодий (сено)	10000	6000	4000	2500	1500	2000	500
Сеянные травы (сено)	2000	1500	1000	400	800	500	1000
Вико-овсяная смесь (зеленый корм)	220	150	120	90	50	70	20
Кукуруза на силос	450	300	250	150	100	150	60
Кормовая свекла	150	100	80	70	60		
Овес (зерно)	220	150	119	70	50	60	20
Ячмень (зерно)	150	100	80	65	60	70	20
Яровая пшеница	120	100	70	50	30	45	20
Озимая пшеница	40	30	25	15	10	15	5
Озимая рожь (зерно)	40	30	25	15	10	15	5
Картофель	100	75	65	50	30	40	6
Свекла (столовая)	220	150	110	80	60	70	30
Морковь	100	80	60	45	30	40	25
Капуста ранняя	60	45	35	25	15	18	10
Капуста поздняя	45	30	25	15	10	13	6
Огурцы	60	40	20	15	10	13	6
Помидоры	25	20	15	8	5	6	3
Тыквенные	50	40	25	15	12		
Зеленые овощи	600	400	300	200	150		

Таблица 5.4 – Уменьшение содержания радионуклидов в сельскохозяйственной продукции при переработке

Мероприятия	Коэффициент потери активности при переработке, $K_{пп}$	
	^{137}Cs	^{90}Sr
Помол зерна на муку	0,4 - 0,7	0,4 - 0,7
Производство крупы из зерна	0,4 - 0,7	0,4 - 0,7
Промывание овощей и картофеля	0,1 - 0,5	0,1 - 0,5
Срезание головок корнеплодов, удаление кроющих листьев	0,1 - 0,5	0,1 - 0,5
Производство осветленных соков	0,3 - 0,4	Мало данных
Производство компотов, варений, джемов	0,5	0,5
Очистка картофеля	0,8	0,8
Переработка картофеля на крахмал	0,02	0,02
Переработка зерна на крахмал	0,02	0,02
Переработка зерна на спирт	0,001	0,001
Переработка молока: - на обезжиренное молоко - сливки - творог обезжиренный - масло - масло топленое	0,8 0,15 0,1 0,025 <0,01	0,9 0,07-0,1 0,12 0,015 <0,01
Непродолжительное вымачивание мяса в воде или солевом растворе	0,3 - 0,5	0,3 - 0,5
Вываривание мяса (около 0,5 часа)	0,15 - 0,3	0,5 - 0,7
Перетапливание сала	0,05	0,05

5.3. Прогноз дозы внутреннего облучения

Для прогноза доз внутреннего облучения, получаемых за счет продуктов питания, необходима следующая информация:

- знание годового потребления (ГП) человеком различных продуктов питания.
- знание содержания отдельных радионуклидов в продуктах питания, составляющих рацион. Данную информацию берут или из прогнозных оценок уровней загрязнения продуктов питания, или непосредственно на

основании прямых измерений содержания радионуклидов в продуктах питания.

- знание значений дозовых коэффициентов K_D для радионуклидов, которыми загрязнены продукты питания.

5.4. Прогноз дозы общего облучения

Для расчета перспективной дозы общего облучения, необходимо оценить вклад в общую нагрузку каждой составляющей: отдельных продуктов питания, воды, внешнего облучения и др.

5.5. Прогноз загрязнения сельскохозяйственной продукции радионуклидами

5.5.1. Способ расчета ожидаемого уровня загрязнения продукции растениеводства и животноводства

Использование метода коэффициентов перехода является простым способом расчета ожидаемого уровня загрязнения продукции растениеводства и животноводства радионуклидами. Метод основан на последовательном рассмотрении всего пути радионуклида от почвы через растения и животных - до человека по пищевым (трофическим) и технологическим цепочкам. Переход радионуклидов на каждом звене этих цепочек предполагается пропорциональным их содержанию в предшествующем элементе цепи.

Для завершения прогноза содержания радионуклидов в сельскохозяйственной продукции необходимо все отдельные звенья переходов радионуклидов: почва → растение; растения → сельскохозяйственные животные; растительное сырье → готовый продукт и другие выстроить в одну общую последовательную цепочку, которую можно назвать производственно-трофической цепью радионуклидов.

Эта цепочка представляет собой схему движения радионуклида от первичного источника, т. е. почвы, до готового продукта питания и затем - до человека (рис. 5.1).

Схема поступления радионуклидов в организм человека с продукцией животноводства приведена на рис. 5.2.

Так как уровни радиационного загрязнения частного и общественного секторов могут существенно различаться, при прогнозной оценке уровня загрязнения продукции целесообразно дифференцировать расчеты для частного и общественного секторов. Причина различий состоит в использовании разных технологий выращивания культур и производства животноводческой продукции, в различном соотношении кормов, полученных с естественных угодий и с пахотных почв.

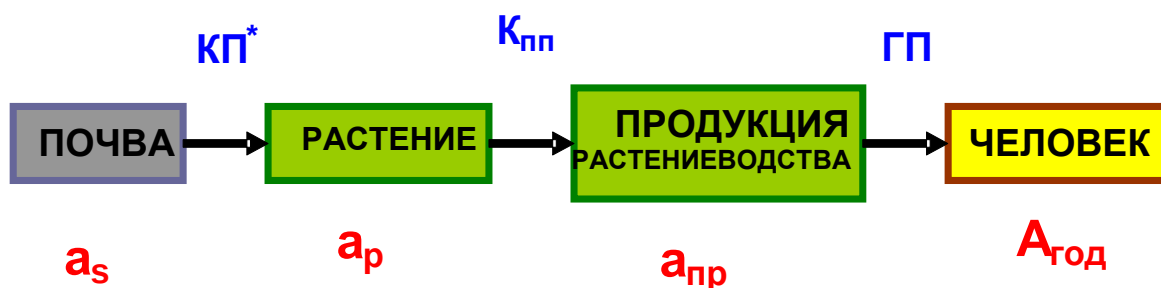


Рис. 5.1. Пищевая цепочка поступления радионуклидов в организм человека:
 a_s – плотность поверхностного загрязнения почвы (Ки/км²);
 a_p – ожидаемое содержание радионуклида в хозяйственной части урожая (Бк/кг);
 $a_{пр}$ – содержание радионуклида в продукции растениеводства (Бк/кг);
 $A_{год}$ – суммарная активность радионуклида, поступающего в организм человека за год (Бк/год); $KП$ – коэффициент перехода ($KП = a_p / a_s$);
 $K_{пп}$ – коэффициент потерь радионуклида в процессе переработки растительной продукции ($K_{пп} = a_{пр} / a_p$); $ГП$ – годовое потребление продукта.

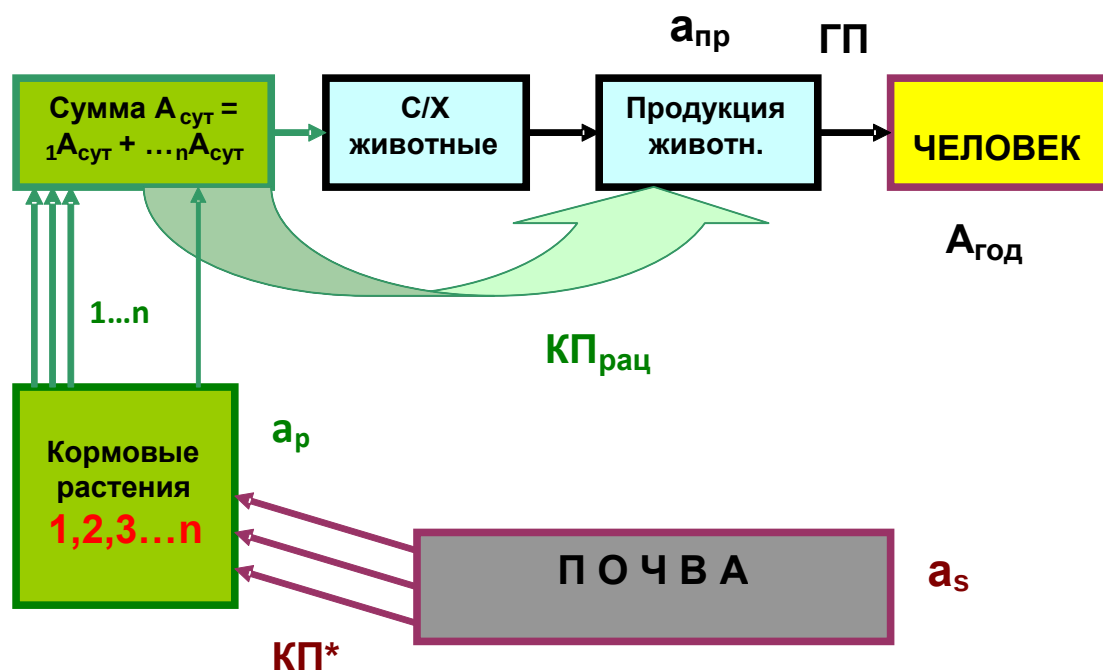


Рис. 5.2. Схема поступления радионуклидов в организм человека с продукцией животноводства: $A_{сут}$ – ожидаемое содержание радионуклида в отдельных кормах, потребляемое животными за сутки, Бк/сутки; сумма $A_{сут}$ – ожидаемое содержание радионуклида во всем рационе кормов, потребляемое за сутки; $a_{пр}$ – содержание радионуклида в продукции животноводства (Бк/кг); $A_{год}$ – суммарная активность радионуклида, поступающего в организм человека за год, Бк/год

На последнем этапе прогнозной оценки суммируются дозы внешнего и внутреннего облучения человека от разных радионуклидов и продуктов питания, и эта величина - суммарная годовая доза облучения человека - сравнивается с основным дозовым пределом для населения, составляющим 1 мЗв/год.

На основании полученных данных дается оценка возможности ведения сельскохозяйственного производства на данной территории и разрабатывается система мероприятий, направленных на снижение загрязнения продукции и уменьшение воздействия радиации на организм человека.

5.5.2. Пример прогнозного расчета содержания радионуклидов в продукции растениеводства и животноводства

Продукция растениеводства

Исходными данными для расчета являются уровни содержания радионуклидов в почве. Их можно получить или путем прямого анализа, или по имеющимся картографическим данным. В первом случае результат анализа бывает выражен в единицах удельной активности, например в нКи/кг или Бк/кг. Умножая его значение на коэффициент накопления в растениях, получают непосредственно оценку ожидаемого содержания активности в растениях в тех же единицах, только уже не на массу почвы, а на растительную массу.

Картографические данные выражены обычно в плотностях поверхностного загрязнения, т.е. в единицах (Ки/км²) или (Бк/м²).

Для определения ожидаемого накопления радионуклидов в растениях (по коэффициентам накопления) потребуется либо предварительно пересчитать поверхностную плотность загрязнения в единицы удельной активности, либо использовать модифицированные значения коэффициента накопления или перехода (КП), в скрытой форме включающие такой пересчет.

Пересчет загрязнения почвы из a_s (единиц поверхностной плотности в Ки/км²) в единицы a_p (удельной активности в нКи/кг или Бк/кг) производится с учетом массы почвы, приходящейся на 1 км² в слое 0 - 20 см (для пахотных почв) или в слое 0 - 10 см (для целинных земель, учитывая меньшую глубину распределения радионуклидов).

Определение массы загрязненного слоя на площади в 1 км². Принимая среднюю плотность почв за 1,5 г/см³, массу 20-см слоя определяют равной $3 \cdot 10^8$ кг (или $1,5 \cdot 10^8$ кг в 10-см слое).

Объем пахотной почвы: $1 \text{ км}^2 (10^{10} \text{ см}^2) \cdot 20 \text{ см} = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^3$.

Масса почвы: $1,5 \text{ г/см}^3 \cdot 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^3 = 3 \cdot 10^8 \text{ кг}$ - на 1 км².

Следовательно, пересчет от единиц (Ки/км²) к единицам (нКи/кг) потребует деления a_s на коэффициент 0,3 в случае почвы пахотной или 0,15 – непахотной:

$$1 \text{ Ки/км}^2 = 10^9 \text{ нКи/км}^2;$$

для пахотной почвы $a_p = (a_s \cdot 10^9 \text{ нКи/км}^2) / (3 \cdot 10^8 \text{ кг/км}^2) = 10 / 3$ (нКи/кг) $\sim a_s / 0,3$ (нКи/кг)}.

При пересчете от (Ки/км²) к (Бк/кг) следует умножать на коэффициенты 123 (пахотная почва) или 246 (непахотная почва).

$$1 \text{ Бк} = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ Ки} \text{ или } 1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}.$$

Поскольку $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$, а массу пахотного слоя почвы на площади 1 км^2 выше подсчитали равной $3 \cdot 10^8 \text{ кг}$, можно найти пересчетный коэффициент для перехода от одной единицы измерения к другой:

$1 \text{ Ки/км}^2 = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк} / 3 \cdot 10^8 \text{ кг (на } 1 \text{ км}^2) = 123 \text{ Бк/кг}$ - для пахотной почвы.

Для прогностического расчета радионуклидного загрязнения пищевой продукции единственной исходной информацией являются значения a_p или a_s . Остальные показатели и характеристики относятся к природно-хозяйственным условиям данной территории.

Пример 1.

Условия: почва - чернозем выщелоченный, плотность поверхностного загрязнения (a_s) составляет 10 Ки/км^2 по ^{137}Cs и 1 Ки/км^2 по ^{90}Sr .

Картофель.

По справочным данным находим величины КП для данной культуры, выращенной на черноземе выщелоченном, которые равны 2 и 6 соответственно для ^{137}Cs и ^{90}Sr .

Поскольку активность получаемой “сырой” продукции (удельная активность) $a_p = a_s \cdot \text{КП}$, то прогнозируемое содержание ^{137}Cs в картофеле составит 20 Бк/кг , и ^{90}Sr - 6 Бк/кг . Сравниваем эти величины с нормативами СанПиН-01.

Эти величины существенно ниже действующих нормативов СанПиН-01, составляющим 120 Бк/кг для ^{137}Cs и 40 Бк/кг для ^{90}Sr .

Животноводческая продукция

Пример 2.

Условия: почва - чернозем выщелоченный, плотность поверхностного загрязнения (a_s) составляет 10 Ки/км^2 по ^{137}Cs и 1 Ки/км^2 по ^{90}Sr (те же, что и для картофеля), рацион кормления животных соответствует стойловому содержанию (табл. 5.5).

Таблица 5.5 – Суточный рацион (СР) кормления животных при стойловом содержании, кг/сутки

Корма	Количество кг/сутки
Сено многолетних трав	4
Кукуруза на силос	20
Концентраты (зерно ячменя)	2

Произведем расчет загрязнения молока и мяса с учетом рациона стойлового периода, данные сведем в табл. 5.6.

Таблица 5.6 – Пример прогнозного расчета загрязнения радионуклидами продукции животноводства

Радионуклид	Суточный рацион животных СР	СР, кг	КП	$a_p = a_s$, Бк/кг	$A_{сут} = a_p \cdot СР$, Бк	Общее суточное поступление $\Sigma A_{сут}$, Бк	КП _{рац}		A _{пр}	
							Молоко	Мясо	Молоко	Мясо
^{137}Cs	Сено много-летних трав	4	40	400	1600	1840	0,01	0,04	18,4	73,6
	Силос куку-рузный	20	1	10	200					
	Концентра-ты	2	2	20	40					
^{90}Sr	Силос мно-голетних трав	4	100	100	400	1640	0,003	0,006	4,92	9,84
	Силос куку-рузный	20	60	60	1200					
	Концентра-ты	2	29	20	40					

Для расчета необходимо знание коэффициентов КП в растительную продукцию из почвы для рациона животных, и коэффициенты перехода радионуклидов КП_{рац} радионуклидов из суточного рациона в продукцию животноводства.

Суммарное количество радионуклида, поступающего с пищей, определяется с учетом усредненного суточного рациона животных (СР), основу концентрированных кормов составляет зерно ячменя.

Результат расчета суммируется по всем компонентам рациона и всем радионуклидам, представляющим интерес (обычно это ^{137}Cs и ^{90}Sr табл. 5.6).

5.6. Прогнозная оценка дозовой нагрузки на население за счет внешнего и внутреннего облучения

5.6.1. Прогноз дозы внешнего облучения

Существует несколько известных соотношений для расчета дозы внешнего облучения.

В основе одного из них лежит использование эмпирической оценочной формулы 5.12, связывающей мощность экспозиционной дозы с плотностью поверхностного загрязнения территории. В ней учитывается тот факт, что единственным источником внешнего облучения является гамма-излучение ^{137}Cs , при этом радионуклид равномерно распределен в слое почвы толщиной 20 см (учтено также ослабление потока излучения при прохождении этого слоя):

$$P = 0,01 \cdot a_s, \quad (5.1)$$

где P [мР/ч] - мощность экспозиционной дозы гамма-излучения ^{137}Cs на высоте 1 м над загрязненной поверхностью; a_s [Ки/км²] - плотность поверхностного загрязнения (активность ^{137}Cs , равномерно распределенного в слое 20 см на площади в 1 км²).

Используя предложенную формулу, можно рассчитать дозу облучения человека за год. Однако для этого необходимо знать время его пребывания на открытой территории, а также наличие защитных сооружений. Например, нахождение человека в кирпичном здании снижает дозу облучения примерно в 10 раз, а нахождение в деревянном здании только в 3 раза. Если человек будет находиться на загрязненной территории без какой-либо защиты круглые сутки и течение года, то он получит максимально возможную дозу облучения (5.2):

$$D_{\text{внешн}} = P \cdot t \cdot a_s \cdot 24 \text{ч/сут.} \cdot 365 \text{сут./год} \approx 0,9 \cdot a_s \text{ (мЗв/год)}, \quad (5.2)$$

где 0,01 - коэффициент перехода от мР к мЗв, поскольку 1 мЗв = 100 мР.

Другая эмпирическая зависимость средней годовой дозы внешнего облучения человека ($D_{\text{внешн.}}$) от плотности поверхностного загрязнения территории (a_s) имеет вид (5.3):

$$D_{\text{внешн.}} \text{ (мЗв/год)} \approx 0,1 \cdot a_s \text{ (Ки/км}^2\text{)}. \quad (5.3)$$

Данная формула учитывает реальную ситуацию, т. е. ограниченное время пребывания на загрязненной территории, наличие элементарной защиты от облучения жилищ и рабочих мест, но при этом носит сугубо приближенный характер, поскольку конкретные условия жизни каждого человека имеют свои особенности: защитные свойства жилища, характер деятельности человека и времени, проводимого вне и внутри дома. Однако, несмотря на известную условность, последняя формула может быть использована для приближенной оценки дозы внешнего облучения по известной величине плотности поверхностного загрязнения. Таким образом, в случае, когда величина a_s для ^{137}Cs составляет 10 Ки/км^2 , прогнозируемая доза внешнего облучения для работника АПК составит приблизительно 1 мЗв/год , что соответствует допустимой общей дозовой нагрузке сверх естественного фона (НРБ-99/2009).

5.6.2. Прогноз дозы внутреннего облучения

Для прогноза доз внутреннего облучения, получаемых за счет продуктов питания необходима следующая дополнительная информация:

1. Годовое потребление (ГП) человеком различных продуктов питания. В табл. 5.7 приведен рацион “среднестатистического” сельского жителя России.

Таблица 5.7 - Пример прогнозного расчета доз внутреннего облучения, получаемых за счет потребления картофеля, молока и мяса

Радионуклид	Продукт питания	$a_{\text{пр}}$, Бк/кг	ГП, кг	$A_{\text{год}} = a_{\text{пр}} \cdot \text{ГП}$, Бк	$D_{\text{внутр}} = A_{\text{год}} \cdot K_D$, мкЗв/год	Сумма $D_{\text{внутр}}$ мкЗв/год
^{137}Cs	Картофель	16,0	120	1920	25	365
	Молоко	18,4	300	5520	72	
	Мясо	73,6	60	4416	57	
^{90}Sr	Картофель	4,8	120	576	46	365
	Молоко	4,9	300	1470	118	
	Мясо	9,8	60	588	47	

2. Содержание отдельных радионуклидов в продуктах питания, составляющих рацион. Данную информацию берут или из прогнозных оценок уровней загрязнения продуктов питания, или непосредственно на основании прямых измерений содержания радионуклидов в продуктах питания.

3. Значения дозовых коэффициентов K_D для радионуклидов, которыми загрязнены продукты питания. Для ^{90}Sr и ^{137}Cs при их поступлении в организм с пищей и водой значения K_D составляют соответственно 0,080 и 0,013 мкЗв/Бк. Более высокое значение дозового коэффициента для ^{90}Sr связано, прежде всего, с его более медленным выведением из организма по сравнению с ^{137}Cs . Пример прогнозного расчета доз внутреннего облучения приведен в табл. 5.7.

5.6.3. Прогноз общей дозовой нагрузки на человека

Общая дозовая нагрузка на население складывается из внешней и внутренней дозовой нагрузки. Кроме того, определенную долю в формирование дозовой нагрузки вносят источники питьевой воды. Использование для питья воды из местных естественных источников не увеличит существенно дозу внутреннего облучения, если используются грунтовые воды, которые при их глубоком залегании практически не загрязнены радионуклидами.

В примерах расчет выполнен для условий выщелоченных черноземов, т. е. лесостепной зоны, в которой, как правило, наблюдается глубокое залегание грунтовых вод.

Современные нормы содержания радионуклидов в питьевой воде достаточно жесткие и составляют для суммы β -излучателей 1 Бк/л (СанПиН-01). При годовой норме потребления питьевой воды 1000 л, даже если все загрязнение будет представлено ^{90}Sr , доза внутреннего облучения за счет воды ($D_{\text{воды}}$) не превысит 80 мкЗв/год (экспериментальные данные).

При $a_s = 10 \text{ Ки/км}^2$ по ^{137}Cs :

$$D_{\text{внутр}} = D_{\text{внутр}} + D_{\text{воды}} = 365 \text{ мкЗв/год} + 80 \text{ мкЗв/год} = 445 \text{ мкЗв/год};$$

$$D_{\text{внешн}} (\text{мЗв/год}) = 0,1 \cdot a_s (^{137}\text{Cs}, \text{ Ки/км}^2) = 0,1 \cdot 10 = 1 \text{ мЗв/год} (1000 \text{ мкЗв/год});$$

$$D_{\text{общ}} = D_{\text{внешн}} + D_{\text{внутр}} = 445 + 1000 = 1445 \text{ мкЗв/год} (\text{при норме для населения } 1000 \text{ мкЗв/год}).$$

Таким образом, из расчетных данных следует, что суммарная дозовая нагрузка с учетом внешнего облучения превышает допустимый уровень, при этом основной вклад в превышение вносит доза внешнего облучения (1 мЗв/год).

Знание структуры каждой дополнительной дозовой нагрузки, наряду с ее общей оценкой, является основой для правильного выбора и разработки системы мероприятий, направленных на уменьшение отрицательного влияния радионуклидного загрязнения территории на ее население.

Раздел 6. ОРГАНИЗАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

6.1. Общие положения

Курсовая работа (КР) является завершающим этапом изучения дисциплины «Радиационные источники». Выполнение курсовой работы базируется на приобретении знаний студентами по предшествующим дисциплинам, таким как: «Радиоэкология», «Радиобиология», «Нормирование антропогенной нагрузки» и др.

Тему теоретической части КР из перечня тем, касающихся радиоактивного загрязнения окружающей среды, определяет преподаватель.

В расчетной части производятся расчеты в соответствии с индивидуальным заданием по плотности загрязнения территории ^{90}Sr и ^{137}Cs по алгоритму расчетов, приведенных в данной методичке. Расчеты производятся на основании методических указаний по выполнению выпускной квалификационной работы для студентов специальности 05.03.06, 05.04.06 – Экология и природопользование [1].

6.2. Порядок оформления пояснительной записки

Пояснительная записка оформляется в соответствии с требованиями, изложенными в ГОСТе [1].

Пояснительная записка курсовой работы содержит:

- Титульный лист;
- Задание на курсовую работу;
- Перечень обозначений и сокращений;
- Содержание;
- Введение;
- Основная часть (Разделы теоретической части и Расчетная часть);
- Выводы;
- Библиография

К защите курсовой работы исполнитель представляет демонстрационный материал, выполненный в виде презентации в программе PowerPoint. Объем презентации – 6 - 10 слайдов.

Выполненная КР к указанному в задании сроку представляется на проверку руководителю курсовой работы. После проверки правильности проведения расчетов и выполнения требований к оформлению пояснительной записки, готовности доклада студент допускается к защите КР.

Прием защиты курсовой работы студента осуществляется комиссией в составе не менее трех преподавателей из состава кафедры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методические указания по выполнению выпускной квалификационной работы для студентов специальности 05.03.05 и 05.04.06 « Экология и природопользование». - Севастополь: СевГУ, 2016. - 42 с.ил.
2. Нормы радиационной безопасности РФ (НРБ -99). - М., 1999.
3. СанПиН 2.3.2.1078-01 «Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов».
4. Алексахин Р.М. Ядерная энергия и биосфера. - М.: Энергоиздат, 1982.
5. Коваленко Г.Д. Основы радиационной экологии: учебник / Г.Д. Коваленко, В.С. Волошин. - Мариуполь: Рената, 2009. - 297 с.
6. Экологические последствия аварии на ЧАЭС и их преодоление: двадцатилетний опыт. - Вена: МАГАТЭ, 2008. - 398 с.
7. Пономаренко П.А., Фролова М.А., Лукина Л.И. Справочник ядерно-физических и радиобиологических констант / П.А. Пономаренко, М.А. Фролова, Л.И. Лукина. - Севастополь: СКУЯЭиП, 2016. - 126 с.
8. Абрамов А.А., Бадун Г.А. Методическое руководство к курсу «Основы радиохимии и радиоэкологии». - Баку: Филиал Химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, 2011. - 138 с.
9. <http://agrohimija.ru/selskohozyaystvennaya-radiologiya /1265-prognoszagryazneniya-selskohozyaystvennoy-produkcii-chast-1.html>
10. <https://www.google.com/search?q=методики+расчета+дозовых+нагрузок+при+радионуклидном+загрязнении+продуктов+питания>

**Лукина Лидия Ивановна
Ленивенко Нина Николаевна
Щекатурина Татьяна Леонидовна**

**ОЦЕНКА РАДИОНУКЛИДНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ,
РАСЧЕТ И ПРОГНОЗ ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК НА ЧЕЛОВЕКА**

Методические указания

Редактор – О.В. Дмитриева

Изд. № 101/18. Объем 3 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

