

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

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

Политехнический институт

**РАСЧЕТ РИСКА УГРОЗЫ ЗДОРОВЬЮ ЧЕЛОВЕКА
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РАДИАЦИИ. ЧАСТОСТЬ
ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО РИСКА. МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ
РИСКА, ИСПОЛЬЗУЮЩАЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
ВЕЙБУЛЛЫ – ГНЕДЕНКО**

Методические указания

к выполнению практических работ
по дисциплине «Техногенные системы и оценка риска»

для студентов направления 20.03.01

«Техносферная безопасность»

очной и заочной форм обучения

Севастополь

СевГУ

2019

УДК 504.054+504.75.05

Рецензент:

С.М. Братан – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой
«Технологии машиностроения».

Составители: Г.А. Сигора, Т.Ю. Хоменко

Расчет риска угрозы здоровью человека при воздействии радиации. Частость дополнительного риска. Модель оценки риска, использующая распределение Вейбуллы – Гнеденко: метод. указания к выполнению практических работ для студентов направлений «Техносферная безопасность» по дисциплине «Техногенные системы и оценка риска» / Сост. Г.А. Сигора, Т.Ю. Хоменко. – Севастополь: СевГУ, 2019 г. – 31 с.

Предназначены для оказания помощи студентам при выполнении практических работ по дисциплине «Техногенные системы и оценка риска». Рассматривается методика расчета радиационного канцерогенного риска, связанного с внутренним и внешним облучением, расчет оценки частости дополнительного риска, вызванного вредным веществом и расчет риска, с использованием распределения Вейбуллы – Гнеденко.

Приводятся краткие справочные и статистические данные, необходимые для расчетов. Для студентов приведен ряд поясняющих примеров и задания для самостоятельного выполнения.

УДК 504.054+504.75.05

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры «Техносферная безопасность», протокол № 6 от 30 января 2019 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Практическая работа № 1	4
Практическая работа № 2	21
Библиографический список	31

ВВЕДЕНИЕ

В 1978 г. эксперты ВОЗ определили риск как «концепцию, отражающую ожидаемую тяжесть и/или частоту неблагоприятных реакций на данную экспозицию».

Потенциальный риск – риск возникновения неблагоприятного для человека эффекта, определяемый как вероятность возникновения этого эффекта при заданных условиях. Выражается в долях единицы (или в процентах). Расчёт потенциального риска может быть использован для оценки качества окружающей среды.

Анализ риска – процесс получения информации, необходимый для предупреждения негативных последствий для здоровья населения, состоящий из трёх компонентов: оценка риска, управление риском, информирование о риске [1].

В соответствии с Руководством по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду «*риск для здоровья* – вероятность развития угрозы жизни или здоровья человека либо угрозы жизни или здоровью будущих поколений, обусловленных воздействием факторов среды обитания»[1].

Оценка риска (risk assessment) – процесс, имеющий целью рассчитать или оценить риск для данной системы в результате воздействия данного вещества с учётом характеристик, присущих как веществу, так и самой системе. Процесс оценки риска включает четыре этапа: выявление опасности, оценку взаимосвязи «доза – эффект», оценку экспозиции, вычисление риска.

Закон «Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний» (1998) даёт следующее определение профессионального риска: «*профессиональный риск* есть вероятность повреждения (утраты) здоровья или смерти застрахованного, связанная с исполнением им обязанностей по трудовому договору (контракту)» [2].

Назначение математической модели — отражать основные закономерности соотношения между дозой и откликом (реакцией) на нее, установленные в процессе предварительных исследований.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1

ОЦЕНКА РИСКА УГРОЗЫ ЗДОРОВЬЮ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РАДИАЦИИ

Цель работы: научиться проводить расчет радиационного канцерогенного риска, связанного с внутренним облучением, и расчет радиационного риска, вызванного внешним облучением.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Уровень радиации в конкретном месте создается естественными и техногенными источниками. Естественная радиация — это, во-первых, природный фон. Если на открытой местности дозиметр показывает уровень фона в 10 мкР/ч, то примерно 3 мкР/ч будет приходиться на космические лучи, которые достигают поверхности земли, а около 7 мкР/ч — на присутствующие в земле радиоактивные элементы (калий, уран и торий).

При уровне фона в 10 мкР/ч человек получает за год дозу облучения в 0,8 мЗв. С помощью этих цифр можно рассчитать и другие фоновые дозы: при фоне в 20 мкР/ч годовая доза составит 1,6 мЗв, при 25 мкР/ч — 2 мЗв.

К естественной радиации также относится радон — радиоактивный газ, который поступает из земной коры. Радон тяжелее воздуха, поэтому он накапливается в подвалах и на первых этажах зданий. Радон вносит основной вклад в дозу облучения жителей планеты, который оценивается в среднем в 1,6 мЗв за год. Но это именно в среднем. Индивидуальная доза от радона может составлять от 1 до 100 мЗв, что зависит от местности, типа зданий, строительных материалов, а также способов изоляции и вентиляции помещений.

Природные строительные материалы — еще один источник облучения. Они могут создавать фон, как в помещениях, так и на улице. Скажем, если в Москве или Санкт-Петербурге дозиметр показывает 16 мкР/ч, то Вы, скорее всего, стоите у облицованного гранитом здания или на мостовой. Добавка в 6 мкР/ч над средним фоном — это вклад гранита.

100 лет назад в фоне не было одной составляющей, которая есть сегодня. Это — глобальные выпадения от испытаний ядерного оружия, то есть техногенная составляющая. Она мала — всего 0,1 мкР/ч. Но где бы сегодня не измерялся фон и сколько бы он не составлял (в нашем примере — 10 мкР/ч), в нем всегда будут присутствовать эти постоянные 0,1 мкР/ч. Кроме этого, уровень фона может быть повышен на конкретных территориях, загрязненных в результате аварий.

Другие, отличные от природных, источники радиации — это в основном медицинские процедуры. В России их вклад в общую дозу облучения, получаемую за год, оценивается в 30%. Это усредненные данные: тот, кто не делал таких процедур, не получал никакой дозы.

Такие техногенные источники, как АЭС, дают вклад в общую дозу менее 0,1%. Это — для населения. Для персонала АЭС, как и работников ряда других профессий, такой вклад будет больше.

Природный фон (0,8 мЗв) + радон (1,6 мЗв) + медицина (1 мЗв) + другие техногенные источники (0,1 мЗв) = средняя доза за год (3,5 мЗв) [3].

Таблица 1.1 – Влияние дозы облучения на организм человека [3]

Доза	Эффект
Более 3 000 мЗв	Доза, угрожающая жизни
Более 1 000 мЗв	Доза, вызывающая лучевую болезнь
Более 200 мЗв	Доза, увеличивающая риск различных заболеваний, включая раковые (риск растет с увеличением дозы)
Более 100 мЗв	Доза облучения плода, при которой возможны пороки развития
1-100 мЗв	Доза, при которой положительные или отрицательные изменения здоровья не регистрируются

Наиболее чувствителен к радиации ребенок, находящийся в утробе матери: его организм формируется в несколько стадий. Поэтому уже при дозе облучения в 100 мЗв возможны отклонения в развитии того органа или системы, которые закладывались в момент облучения.

Человеку в обычной жизни невозможно получить дозы облучения, намного превышающие фоновые.

Например, чтобы получить дозу в 100 мЗв нужно полгода находиться в условиях радиационного фона в 2 500 мкР/ч — это выше значений фона в 250 раз (при обычном фоне в 10 мкР/ч дозу в 100 мЗв придется получать в течение 120 лет).

Таблица 1.2 – Годовые дозы облучения [3]

Годовая доза от просмотра телевизора по 3 часа в день	0,001 мЗв
Годовая доза от курения по одной сигарете в день	2,7 мЗв
Годовая доза от проживания рядом с АЭС	0,01 мЗв
Флюорография	0,6 мЗв
Полет на самолете из Москвы в Нью-Йорк	0,3 мЗв

Дозы облучения от техногенных источников намного меньше, чем от природных. Исключение составляет радиотерапия, используемая для лечения рака, где дозы могут достигать 5 грей и более. Если бы облучению в такой дозе подверглось все тело, человек мог бы умереть. Но в радиотерапии облучается отдельный орган, вернее даже, его часть. Такие дозы человек переносит тяжело, но это дает шанс спасти его жизнь.

При воздействии радиации различают два вида эффектов. Одни наступают сразу, но только при высоких дозах (1 Зв и выше). К таким немедлен-

ным эффектам относится, например, лучевая болезнь. Для нее существует дозовый порог: при дозах до 1 Зв лучевая болезнь не возникает вообще, а при дозах выше 2 Зв возникает у всех.

Другие эффекты возникают через весьма длительное время после облучения (5-20 лет). Это рак и некоторые другие заболевания. Чем выше полученная доза, тем выше риск— это утверждение доказано для доз более 200 мЗв. Для меньших доз подтвердить или опровергнуть наличие риска не удастся: их воздействие не выявляется на фоне других, более значимых факторов, влияющих на здоровье. Однако в целях защиты человека предполагается, что как бы ни была мала доза, риск не равен нулю. Из этого исходит радиационное нормирование и законодательство.

При дозе в 1 Зв вероятность смерти от рака, вызванного облучением, составит 5%. Пример: рак является причиной смерти 15 россиян из 100, т.е. вероятность умереть по этой причине составляет 15%. Если все 100 человек получат дозу облучения в 1 Зв, то для этих людей вероятность смерти от рака возрастет и будет уже не 15%, а 20%.

Спустя 50 лет жива половина из 86 тыс. японцев, переживших ядерную бомбардировку в Хиросиме и Нагасаки. Среди тех, кто умер, обнаружено 440 случаев рака, вызванного радиацией (это 1% от всех причин смерти среди этих людей).

Получить дозу в 1 Зв практически нереально. Для профессионалов, работающих, например, в атомной промышленности, предел дозы за год составляет 20 мЗв. За последние 25 лет в России произошел только один случай, когда в результате поломки оборудования на закрытом предприятии человек получил смертельную дозу радиации.

Зиверт (обозначение: Зв, Sv) — единица измерения СИ эффективной и эквивалентной доз ионизирующего излучения (используется с 1979 г.). 1 зиверт — это количество энергии, поглощенное килограммом биологической ткани, равное по воздействию поглощенной дозе 1 Гр (1 Грей) [4].

Беккерель — единица измерения активности радиоактивного источника в Международной системе единиц (СИ). Один беккерель определяется как активность источника, в котором за одну секунду происходит в среднем один радиоактивный распад.

Беккерель — производная единица, имеющая специальные наименования и обозначения, через основные единицы СИ выражается следующим образом: $\text{Бк} = \text{с}^{-1}$ [4].

2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА

2.1. Методика расчет радиационного канцерогенного риска, связанного с внутренним облучением

Если a – удельная активность некоторого радионуклида, присутствующего в воздухе, в питьевой воде или в продуктах питания. Это полная активность этого радионуклида (A), попавшего в организм человека за время t (количество лет) будет равно:

$$A = a \cdot M \cdot t, (\text{Бк}) \quad (1.1)$$

где M - масса воздуха, воды или пищевого продукта, поступившего за один год. Единица измерения полной активности-Беккерель(Бк).

Выванная этой активностью эффективная доза внутреннего облучения (H) составит:

$$H = A \cdot \varepsilon, (\text{Зв}) \quad (1.2)$$

где ε – дозовой коэффициент рассматриваемого радионуклида.

Единица измерения эффективной дозы облучения – Зиверт (Зв). Смысл этого коэффициента в том, что с его помощью активностью радионуклида, попавшего в организм человека, пересчитывается в соответствующую этой активности дозу внутреннего облучения [5].

Значение дозовых коэффициентов ε (Зв/Бк) для радионуклидов, с которыми чаще всего приходится иметь дело на практике, при их поступлении в организм человека с воздухом, водой и пищей приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Дозовый коэффициент радионуклидов [6]

Радионуклиды	Период полураспада, годы	Поступление с воздухом, Зв/Бк	Поступление с водой и пищей, Зв/Бк
Тритий ^3H	12,3	$2,7 \cdot 10^{-10}$	$4,8 \cdot 10^{-11}$
Углерод ^{14}C	5730	$2,5 \cdot 10^{-9}$	$1,6 \cdot 10^{-9}$
Калий ^{40}K	$1,28 \cdot 10^9$	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$4,2 \cdot 10^{-8}$
Кобальт ^{60}Co	5,27	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$2,7 \cdot 10^{-8}$
Стронций ^{90}Sr	29,1	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$8,0 \cdot 10^{-8}$
Цезий ^{137}Cs	30,0	$4,6 \cdot 10^{-9}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$
Радий ^{226}Ra	1600	$4,5 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$
Уран ^{238}U	$4,47 \cdot 10^9$	$7,4 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$
Торий ^{232}Th	$1,4 \cdot 10^{10}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^{-7}$
Плутоний ^{239}Pu	$2,41 \cdot 10^4$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$4,2 \cdot 10^{-7}$
Америций ^{241}Am	432	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$3,7 \cdot 10^{-7}$

После вычисления величины дозы внутреннего облучения H можно рассчитать значение индивидуального радиационного риска r . Для этого используется формула (1.3):

$$r = H \cdot r_E, \quad (1.3)$$

где r_E – коэффициент индивидуального радиационного риска.

Этот коэффициент характеризует сокращение длительности периода полноценной жизни в среднем на $\beta = 15$ лет за один стохастический (вероятностный) случай смертельного заболевания (главным образом – раком). В соответствии с НРБ – 99 значение этого коэффициента равны:

$r_E = 5,6 \cdot 10^{-2}$ (чел⁻¹·Зв⁻¹) - для производственного облучения (т.е. для персонала, работающего с ионизирующим излучением);

$r_E = 7,3 \cdot 10^{-2}$ (чел⁻¹·Зв⁻¹) - для населения.

Таблица 1.4 - Стандарты объема воздуха и массы воды, поступающие в организм взрослого человека, принятые в РФ [5]

Контингент	Воздух	Вода
Население	7,3·106 л/год = 20 м ³ /сут	730 л/год = 2 л/сут
Персонал	2,5·106 л/год = 10 м ³ /день (если в году 250 рабочих дней)	0

Согласно НРБ-99 [7] индивидуальный радиационный риск считается пренебрежимым, если величина r не превосходит $1,0 \cdot 10^{-6}$ (чел⁻¹·год⁻¹). В этом же нормативном документе приведено значение верхней границы допустимого индивидуального радиационного риска, она составляет $5,0 \cdot 10^{-5}$ (чел⁻¹·год⁻¹). Значение r , превышающее $5,0 \cdot 10^{-5}$ (чел⁻¹·год⁻¹), следует считать недопустимыми.

Чтобы рассчитать коллективный радиационный риск, сначала надлежит определить величину коллективной дозы внутреннего облучения. Она равна произведению индивидуальной дозы H на численность коллектива N , подвергшегося такому облучению, соответственно формуле (1.4):

$$K = N \cdot H. \quad (1.4)$$

Коллективная доза выражается в человеко-зивертах.

Коллективный радиационный риск R равен произведению коллективной дозы K на величину коэффициента радиационного риска r_E , соответственно формуле (1.5):

$$R = r_E \cdot K. \quad (1.5)$$

Коллективный радиационный риск R показывает количество случаев появления стохастических эффектов, каждый из которых характеризуется со-

кращением длительности периода полноценной жизни в среднем на $\beta = 15$ лет. Перемножая R и β , получим потерю коллективной продолжительности жизни, которая рассчитывается по формуле (1.6):

$$\Delta = R \cdot \beta, \quad (1.6)$$

Если считать, что средняя продолжительность жизни человека равна 70 годам, то ожидаемая коллективная продолжительность жизни рассматриваемого коллектива численностью N рассчитывается по формуле (1.7):

$$T_k = 70 \cdot N, \text{ (лет)} \quad (1.7)$$

Относительная потеря коллективной продолжительности жизни δ будет равна, соответственно формуле (1.8):

$$\delta = \Delta / T_k = \Delta / 70 \cdot N. \quad (1.8)$$

Для одного человека среднее сокращение продолжительности жизни составляет $70 \cdot \delta$ (лет). Эта величина, как и значение r , так же характеризует индивидуальный радиационный риск [5].

2.2. Методика расчета радиационного канцерогенного риска, связанного с внешним облучением

При расчете радиационного риска, связанного с внешним облучением, используется те же соотношения, что для вычисления риска, обусловленного внутренним облучением. Здесь не нужно вычислять активность радионуклида. Требуется знать дозу (или мощность дозы) внешнего облучения, которому подвергается человек, соответственно формуле (1.9) [5]:

$$H = H' \cdot t, \quad (1.9)$$

При решении некоторых задач следует использовать положение НРБ-99, согласно которому облучение коллективной дозой в 1 чел·Зв приводит к потенциальному ущербу, равному 1 чел·году жизни населения [7].

3. ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

3.1. Расчет радиационного канцерогенного риска, связанного с внутренним облучением

Задача 1. Вода в одном из колодцев региона, пострадавшего в результате Чернобыльской катастрофы, характеризуется удельной активностью радиоцезия, равной 20 Бк/л. Это значение превышает величину уровня вмешательства, которая согласно НРБ-99 принята равной 11 Бк/л. Рассчитать индивидуальный радиационный риск в случае, если человек будет пить воду из этого колодца в течение 5 лет. Считать, что человек выпивает 2 л в день, причем вест радиоцезий остается в его организме. Дозовый коэффициент ^{137}Cs равен $1,3 \cdot 10^{-8}$ Зв/Бк. Коэффициент индивидуального радиационного риска равен $7,3 \cdot 10^{-2}$ (чел $^{-1}$ ·Зв $^{-1}$). Сравнить полученное значение с величиной предельно допустимого риска, равной $5,0 \cdot 10^{-5}$ (чел $^{-1}$ ·год $^{-1}$).

Ответ: индивидуальный радиационный риск для одного года равен $1,4 \cdot 10^{-5}$ (чел $^{-1}$ ·год $^{-1}$), который не превышает величину предельно допустимого риска.

Задача 2. Согласно санитарным нормам и правилам СанПиН 2.3.2.560-96 допустимые уровни содержания радионуклидов в сушеных грибах составляет: ^{90}Sr – 250 Бк/кг, ^{137}Cs – 2500 Бк/кг. Рассчитать соответствующие этим уровням значения коллективного и индивидуального рисков, если в течение одного года каждый житель некоторой местности использует в пищу в среднем 2 г сушеных грибов с указанными уровнями содержаний радионуклидов. Численность населения в местности равна 1000 чел. Дозовые коэффициенты (при поступлении с продуктами питания) равны: для ^{90}Sr – $8,0 \cdot 10^{-8}$ Зв/Бк, для ^{137}Cs – $1,3 \cdot 10^{-8}$ Зв/Бк. Коэффициент радиационного риска равен $7,3 \cdot 10^{-2}$ (чел $^{-1}$ ·Зв $^{-1}$).

Ответ: для одного человека среднее сокращение продолжительности жизни составит 0,96 часа.

Задача 3. В результате разгерметизации оболочки радиоактивного источника, прошедшей в некоторой лаборатории, в воздух попал радиоактивный кобальт, объемная активность которого составила 55 Бк/м 3 . В течение 2 рабочих дней один сотрудник этой лаборатории дышал загрязненным воздухом. Оценить индивидуальный радиационный риск в виде сокращения ожидаемой продолжительности жизни. Считать, что весь поступивший радионуклид остается в организме человека. Согласно НРБ-99 количество воздуха, вдыхаемого за один рабочий день, равно примерно 10 м 3 . Коэффициент радиационного риска для персонала равен $5,6 \cdot 10^{-2}$ (чел $^{-1}$ ·Зв $^{-1}$). Дозовый коэффициент для радиокобальта при поступлении его с воздухом равен $1,2 \cdot 10^{-8}$ Зв/Бк.

Ответ: ожидаемое сокращение продолжительности жизни составит 0,1 часа.

Задача 4. 6 августа 1945 года на японский город Хиросиму была сброшена атомная бомба «Little Boy». Бомба содержала чрезвычайно обогащенный до высокой степени уран. Количество населения – 306545 человек. Рассчитать значения индивидуального и коллективного риска для жителей города Хиросимы, если каждый житель выдыхает в среднем $7,3 \cdot 10^6$ л/год. Допустимый уровень содержания урана – 238 в воздухе $4 \cdot 10^{-2}$ Бк/м³, а дозовый коэффициент радиации – $3,6 \cdot 10^{-6}$ Зв/Бк. $r_3 = 7,3 \cdot 10^{-2}$ чел⁻¹·Зв⁻², $\beta = 15$.

Ответ: индивидуальный и коллективный риски равны $7,67 \cdot 10^{-2}$ и 23523,35 соответственно.

Задача 5. Вероника, Саша и Настя очень любят мед. Допустимый уровень содержания цезия 137 в меде составляет 3700 Бк/кг. Рассчитать значения коллективного, индивидуального рисков и сокращение продолжительности жизни для 3 студентов, с учетом того, что каждый студент съедает в среднем за год 10 л меда. Дозовый коэффициент цезия-137 – $1,3 \cdot 10^{-8}$ Зв/Бк.

Ответ: $r = 3,65 \cdot 10^{-5} < 5 \cdot 10^{-5}$ - индивидуальный риск считается допустимым, $R = 1,1 \cdot 10^{-4}$ – количество случаев, сокращение продолжительности жизни для одного студента составит 4,8 часа.

Задача 6. Допустимый уровень содержания стронция – 90 в картофеле составляет 40 Бк/кг. Рассчитать значения коллективного и индивидуального риска для жителей города Севастополь с населением 428699 человек, с учетом того, что каждый житель города съедает 80 килограмм картофеля в год. Дозовый коэффициент стронция – 90 составляет $2,8 \cdot 10^{-8}$.

Ответ: $R = 2,8$; $r = 6,5 \cdot 10^{-6}$. Для 1 человека среднее сокращение продолжительности жизни составляет $70 \cdot \delta = 9,8 \cdot 10^{-5}$ (лет).

Задача 7. Из-за боевых действий уровень содержания радиации в воде реки составляет 65 Бк/кг. Рассчитать значение коллективного и индивидуального риска для жителей северо-западной части Сирии, с населением тем 5,7 млн человек, с учетом того что каждый житель выпивает в среднем за год 1095 л воды. Дозовый коэффициент радио-цезия $1,3 \cdot 10^{-8}$.

Ответ: $r = 6,71 \cdot 10^{-5}$; $R = 503,7$.

Задача 8. Известно, что житель с. Фрунзе с населением 3000 человек съедает в среднем в год 15 кг грибов рыжиков. Удельная активность радионуклидов цезия-137 равна 40 Бк/кг. Рассчитать значение индивидуального и коллективного риска для населения села Фрунзе.

Дозовый коэффициент равен $1,3 \cdot 10^{-8}$ (Зв/Бк).

Ответ: $r = 5,7 \cdot 10^{-6}$.

Задача 10. В городе Севастополь в Гагаринском районе обнаружили йодид-натрия в питьевой бутилированной воде. Было известно, что эту воду пили

в течение года в объеме 2000 л. Какую предельно удельную активность йодид-натрия может содержать, чтобы не был превышен уровень пренебрежимого индивидуального риска, который составляет $0,2 \cdot 10^{-6}$ чел⁻¹·год⁻¹. Доза-эффект йодид-натрия = $5,1 \cdot 10^{-8}$ Зв/Бк.

Ответ: $a = 0,265$ Бк/Зв.

Задача 11. С 1958 г. по 1965 г. на ТЭЦ г. Симферополя поступал радиоактивный уголь с Казахстана. Рассчитать приведенные к 1 году коллективные и индивидуальные риски обусловленные комбинированным действием 2х радионуклидов содержащихся в воздухе после сжигания угля. Население 200 000 человек, дозовый коэффициент:

$^{90}\text{Sr} = 0,7 \cdot 10^{-7}$, Бк/м³; $E = 0,35 \cdot 10^{-6}$, Зв/Бк;

$^{241}\text{Pu} = 2,9 \cdot 10^{-7}$, Бк/м³; $E = 0,13 \cdot 10^{-6}$, Зв/Бк.

Коэффициент индивидуального радиационного риска = $5,4 \cdot 10^{-2}$ чел⁻¹Зв⁻¹. В год в легкие человека поступает в среднем $8 \cdot 10^3$ м³ воздуха.

Ответ: $8,3 \cdot 10^{-10}$ лет/Бк.

Задача 12. Допустим, что уровень содержания тория в минеральной воде составляет 40 Бк/л. Рассчитать значение коллективного и индивидуального риска для группы людей в 500 человек, каждый из которых за год употребил бы 75 л этой воды. $E = 4,5 \cdot 10^{-7}$, $r_e = 7,3 \cdot 10^{-2}$ чел⁻¹ Зв⁻¹.

Ответ: $r = 9,85 \cdot 10^{-6}$ – риск допустимый; $R = 0,05$.

Задача 13. Ионизирующая косметика. Жил да был в Париже доктор Альфред Кюри. Никаким родственником ни Пьеру Кюри, ни его жене Марии этот предприимчивый господин не приходился. Однако фамилия продавала сама себя, как сказали бы маркетологи, поэтому в 1933 году вместе с фармацевтом Алексисом Муссали доктор «Кюри-да-не-тот» сколотил предприятие по созданию фирменной «кюриной» линейки радиоактивных продуктов для наведения марафета.

Торговая марка радиоактивных товаров назвалась «Tho-Radia», потому что в состав кремов, лосьонов, пудры, румян и помады входили хлористый торий и бромистый радий — вещества на то время очень дорогие. Добавлять их в состав дамских товаров приходилось в очень малых дозах, но это не делало кремы и прочую «То-Радию» общедоступным товаром. Только состоятельные парижанки могли позволить себе радиоактивное мыло по 3 франка за 100 грамм, пудру по 12 франков за 50 граммов или крем по пятнадцать за баночку.

После войны мода на радиоактивную косметику для элиты во Франции не исчезла и косметика марки «Tho-Radia» продавалась вплоть до 1960-х годов.

Как и многие товары того времени, косметика рекламировалась слоганом о «научном подходе к вопросу красоты».

Девушкам обещали, что их лица будут сиять от счастья, радия и тория. якобы радиация стимулирует жизненные процессы в клетках, укрепляет кожу,

останавливает развитие пор, лечит покраснения, пятнышки и прыщики, разглаживает морщины.

Рассчитать относительную потерю коллективной продолжительности жизни, обусловленную комбинированным действием 2х радионуклеидов, содержащихся в косметике, для группы женщин в 750 человек, которые пользовались косметикой данной марки в течение года. Всего было продано и использовано около 450 кг косметики.

Содержание радия – $3,6 \cdot 10^{-6}$ Бк/кг, тория – $4,3 \cdot 10^{-6}$ Бк/кг

Дозовые коэффициенты радионуклеотидов: $E_{Ra}=4,5 \cdot 10^{-6}$ Зв/Бк, $E_{Th}=2,5 \cdot 10^{-5}$ Зв/Бк.

Коэффициент индивидуального радиационного риска $r_e=7,3 \cdot 10^{-2}$ чел⁻¹ Зв⁻¹.

Ответ: $\delta = 0,6 \cdot 10^{-10}$.

Задача 14. Доктор Ватсон отправился в отпуск в Эденбург. Рядом с отелем Ватсон располагалась река Дансли, но владельцы сразу предупредили что воду пить запрещено из за того, что рядом находится завод. Ватсон решил разобратся существует ли индивидуальный рациональный риск, если человек будет пить воду из реки в течении 1го года, выпивая при этом 1 л/сут. В ряде наблюдений Ватсон обнаружил в реке радиоцезий с удельной активностью равной 30 Бк/л. Это значит превышает величину уровня вмешательства, которая согласно НРВ-99 принято равной 11 Бк/л. Дозовый коэффициент радиоцезия – $1,3 \cdot 10^{-8}$ Зв/Бк.

Ответ: индивидуальный радиационный риск равен $1 \cdot 10^{-5}$.

Задача 15. Сталкер Слепой живет в Зоне 4 года, при этом употребляет воду местного производства, которая недостаточно очищается и обеззараживается. Поэтому в воде присутствует Zn-65 с удельной активностью 35 Бк/л. Рассчитать индивидуальный радиационный риск, если Слепой пьет по 2 л/день в течение 4 лет. Сравнить с предельно допустимым уровнем $r_d=5 \cdot 10^{-5}$.

Дозовый коэффициент Zn-65 – $3,9 \cdot 10^{-6}$, индивидуальный радиационный риск $r_E=7,3 \cdot 10^{-2}$.

Ответ: радиационный риск чрезвычайно высок- $7,3 \cdot 10^{-3}$.

Задача 16. В окрестностях города Пиза, где расположено большое количество виноградников, произошло падение метеорита, в результате чего доза радионуклеотидов цезия и стронция резко увеличилось. Известно, что 1263 человека употребляют облученный виноград в течении 1 года. Один житель города съедает в среднем за год 85 кг винограда. Допустимый уровень содержания Цезия в винограде составляет 120 Бк/кг, Стронция 20 Бк/кг. Дозовый коэффициент цезия – $1,3 \cdot 10^{-8}$ Зв/Бк, стронция – $8,0 \cdot 10^{-8}$ Зв/Бк.

Ответ: сокращение продолжительности жизни для одного человека составляет 1,43 (ч).

Задача 17. В лесу прошли кислотные дожди, после которых, в грибах обнаружено повышенное содержание цезия и урана. Известно, что 500 человек собирают и употребляют облученные грибы в течение 1 года. Один человек съедает в среднем за год 3 кг грибов. Допустимый уровень содержания цезия в грибах составляет 90 Бк/кг, стронция – 60 Бк/кг.

Дозовый коэффициент цезия $1,3 \cdot 10^{-8}$ Зв/Бк, а урана $1,2 \cdot 10^{-7}$ Зв/Бк.

Ответ: Для одного человека сокращение продолжительности жизни составит 0,23 часа.

Задача 18. Рабочие австралийской урановой шахты находятся под воздействием пыли ^{238}U и ^{14}C , удельная активность которых $9,8 \cdot 10^{-6}$ и $2,5 \cdot 10^{-7}$ соответственно. Рассчитать риски и относительную коллективную потерю продолжительности жизни для 250 человек при воздействии вышеупомянутых факторов на протяжении 3х лет. $M = 500$ кг.

Ответ: Для одного человека потеря продолжительности жизни составит 4.2 года.

Задача 19. В подвале жилого дома хранились продукты в течении года, где скопилось значительное количество Радона - 222 с активностью $3,4 \cdot 10^{-8}$. Владелец продуктов живет на первом этаже и периодически употребляет продукты, принося их с подвала. Количество жильцов в пятиэтажном доме составило 75 человек. Рассчитать индивидуальный и коллективный риск.

Ответ: для одного человека среднее сокращение продолжительности жизни составит 0,58 сек.

Задача 20. После аварии на реакторе Фукусима радиоактивный мусор попал в Тихий океан, в результате чего доза радионуклеотидов Радия и Урана в рыбе резко увеличилась. Известно, что 9564 человека употребляют облученную рыбу в течение 1 года. Один житель города съедает в среднем за год 70 кг рыбы. Допустимый уровень содержания Радия в рыбе составляет 14,8Бк/кг, Урана – 44 Бк/кг. Дозовый коэффициент Радия – $1,5 \cdot 10^{-6}$ Зв/Бк, Урана – $1,2 \cdot 10^{-7}$ Зв/Бк.

Ответ: сокращение продолжительности жизни для одного человека составляет 50,88 часов.

Задача 21. В 1986 году на окраине села Людминовка, Иванофранковского района, находился продуктовый рынок, где жители села могли приобрести продукцию сельского хозяйства. Одна из самых популярных точек рынка, являлась мясная лавка «Мясница», в которой всегда были свежие продукты убоя скота, привезенные из ближнего города Чернобыль. После случившейся аварии на Чернобыльской АЭС, фермер не прекратил свою поставку продуктов для «Мясницы», а лишь убавил цену, не сказав ни слова о том, что животные получили облучение цезием и плутонием в связи с аварией.

Рассчитать относительную потерю коллективной продолжительности жизни, обусловленную комбинированным действием 2-х радионуклеидов, содержащихся в пищевых продуктах, для группы населения в 500 человек, которые покупали мясо в данной лавке в течение года. Всего было продано и использовано около 800 кг мяса.

Содержание цезия – $2,5 \cdot 10^{-6}$ Бк/кг, плутония – $4,8 \cdot 10^{-6}$ Бк/кг
Дозовые коэффициенты радионуклеотидов: $ECs=1,3 \cdot 10^{-8}$ Зв/Бк, $EPu=4,2 \cdot 10^{-7}$ Зв/Бк. Коэффициент индивидуального радиационного риска $ge=7,3 \cdot 10^{-2}$ чел⁻¹ Зв⁻¹.

Ответ: Сокращение продолжительности жизни составит 2 сек.

3.2. Расчет радиационного канцерогенного риска, связанного с внешним облучением

Задача 1. Мощность дозы природного гамма-излучения в районах высокогорий может достигать 8 мЗв в год (влияние космического излучения). Рассчитать относительную потерю коллективной продолжительности жизни для одного миллиона жителей этих районов. Коэффициент индивидуального риска равен $7,3 \cdot 10^{-2}$ (чел⁻¹·Зв⁻¹).

Ответ: относительная потеря коллективной продолжительности жизни составит 0,88%.

Задача 2. Средняя мощность дозы природного гамма-излучения на высоте полета пассажирских авиалайнеров составляет 50 мЗв в год (из-за влияния космического излучения). Рассчитать индивидуальный радиационный риск для человека, прошедшего в самолете 100 часов за 3 года. Коэффициент индивидуального радиационного риска равен $7,3 \cdot 10^{-2}$ (чел⁻¹·Зв⁻¹).

Ответ: индивидуальный риск отнесенный к одному году составит $1,4 \cdot 10^{-5}$ (чел⁻¹·год⁻¹).

Задача 3. Средняя мощность дозы-излучения вблизи АЭС, за пределами санитарно-защитной зоны, составляет 0,9 мкЗВ. Рядом с АЭС расположен поселок городского типа с численностью населения 7000 человек. Рассчитать индивидуальный риск проживания в таком поселке, если человек находится 24 часа в сутки, 365 дней в году, с учетом того, что поселок образован 12 лет назад. Рассчитать коллективный риск для всех жителей этого поселка.

Ответ: коллективный риск равен 0,0055 (количество случаев), индивидуальный риск равен $0,12 \cdot 10^{-4}$ (лет).

Задача 4. В самолете уровень γ -излучения достигает 1,5 мкЗв/час (13140 мкЗв/год). Рассчитать коллективный и индивидуальный риск для людей, которые ежедневно пользуются услугами авиатранспорта в течение 5 лет, если их количество составляет 550 человек. $\gamma_3=7,3 \cdot 10^{-2}$ чел⁻¹·Зв⁻², $\beta=15$.

Ответ: $r = 4,8$; $R = 2637,86$ - иски считаются неприемлемыми.

Задача 5. Вероника, Настя и Саша живут в высокогорном районе, а с ними еще 157 человек, в котором мощность дозы природного гамма-излучения может достигать 8 мЗв в год (влияние космического излучения). Рассчитать относительную потерю коллективной продолжительности жизни населения этого района, если они проживают в нем на протяжении 15 лет. Коэффициент индивидуального риска равен $7,3 \cdot 10^{-2}$ (чел⁻¹ · Зв⁻¹).

Ответ: относительная потеря коллективной продолжительности жизни составит 0,17% (для одного человека – 43 дня).

Задача 6. Доза проникающей способности рентгеновских лучей при прохождении через мягкие ткани и кости составляет 5,3 м Зв/год. Рассчитать коллективный и индивидуальный радиационный риск для населения поселка Орлиное, в котором проживает 3200 чел в течение 8 лет.

Ответ: $r = 308,06 \cdot 10^{-5}$; $R = 9,93$.

Задача 7. Наиболее дозозатратным (то есть приводящим к получению наибольших доз за один рейс) считается трансатлантический полет из Соединенных Штатов Америки в Европу, который сопровождается дополнительным воздействием на организм космического излучения в дозе приблизительно 0,05 мЗв. При подъеме на высоту около 10,5 км экранирующий эффект земной атмосферы частично исчезает, и в результате пассажиры авиалайнера и члены его экипажа получают небольшие дополнительные дозы радиации. Допустим, что стюардесса совершает четыре перелета через Атлантику в год, общая доза гамма излучения составляет 0,4 мЗв.

Рассчитать индивидуальный и коллективный радиационный риск для членов экипажа авиалайнера Travel-Pug. В состав экипажа входит 8 человек в течение 10 лет.

Ответ: $r = 0,224$; $R = 1,72$.

Задача 8. Живя в Лондоне, Шерлок решил рассчитать коллективный, индивидуальный радиационный риски и сокращение продолжительности жизни для одного жителя Лондона, из-за большого количества транспорта, который сжигает топливо. Мощность дозы гамма-излучения за счет выбросов естественных радионуклидов в атмосферу составляет в среднем 0,5 мЗв в год. В данный момент в Лондоне проживает 30000 чел в течении 25 лет. Коэффициент индивидуального радиационного риска равен $7,3 \cdot 10^{-2}$ (чел⁻¹ · Зв⁻¹).

Ответ: сокращением продолжительности жизни одного человека составляет $1,35 \cdot 10^{-3}$ (года).

Задача 9. Согласно правительственному эксперименту Убежищ, Убежище 12 было снабжено незакрывающейся шлюзовой дверью-шестеренкой, с

целью исследования воздействия радиации на людей во время ядерной войны. 2000 человек облучались U-235 с активностью 12 мЗв/год через воздух. Рассчитать коллективный радиационный риск для жителей убежища.

Ответ: коллективный радиационный риск – 122,64.

Задача 10. При прохождении металлорамки в университете студент получает дозу гамма излучения 8640 мкЗв/год. Рассчитать коллективный и индивидуальный риск для людей, которые проходят через металлорамку ежедневно в течение 4 лет их количество составляет 10 748 человек.

Ответ: индивидуальный радиационный риск = $1.9 \cdot 10^{-3}$, коллективный радиационный риск = 21.

Задача 11. Человек, пользуясь СВЧ дома, получает дозу гамма излучения 9540 мкЗв/год. Рассчитать коллективный и индивидуальный риск для людей, которые пользуются микроволновкой ежедневно в течении 3 лет, и их количество составляет 15680 человек.

Ответ: индивидуальный радиационный риск = $1.6 \cdot 10^{-3}$, коллективный радиационный риск = 26.

Задача 12. В отделе качества сталелитейного завода работает 115 человек. Основной метод обнаружения дефектов в отлитых деталях – гамма-дефектоскопия. Излучение, которому подвергаются рабочие цеха, составляет 25000 мкЗв/год. Рассчитать коллективные и индивидуальный риск, для людей при ежедневной работе на протяжении 7 лет.

Ответ: Уровень индивидуального риска неприемлем – $9,8 \cdot 10^{-3}$, коллективный радиационный риск – один случай в год.

Задача 13. Во время работы на предприятии произошла разгерметизации оболочки гамма-дефектоскопа в воздух попал радионуклид кобальт-60 с мощностью дозы 24000 мкЗв/ в год. На протяжении 1 года, 250 работников пребывали в зоне загрязнения (не проведен вовремя мониторинг). Необходимо оценить индивидуальный риск (r) и коллективную дозу (R), полученную работниками во время выполнения работ.

Ответ: индивидуальный радиационный риск = $1,34 \cdot 10^{-3}$, коллективный радиационный риск = 0,34.

Задача 14. На расстоянии 4 км от Смоленской АЭС есть жилая застройка, уровень внешнего облучения на данном удалении оставляет 0,82 мЗв/год. Рассчитать коллективный и индивидуальный риск для 300 человек, которые живут в этих домах на протяжении 7 лет.

Ответ: индивидуальный радиационный риск - $4,161 \cdot 10^{-7}$ (чел⁻¹ · год⁻¹), коллективный - $1,25 \cdot 10^{-4}$ случаев сокращения жизни.

4. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ

4.1. Пример выполнения расчета радиационного канцерогенного риска, связанного с внутренним облучением

Пример 1. Допустимый уровень содержания радиоцезия в молоке составляет 40 Бк/кг. Рассчитать значения коллективного, индивидуального рисков и сокращение продолжительности жизни для одного жителя поселка Черноречье, с населением 7000 чел, с учетом того, что каждый житель поселка выпивает в среднем за год 50 л молока. Дозовый коэффициент радиоцезия – $1,3 \cdot 10^{-8}$ Зв/Бк.

Дано: $a = 40$ Бк/Зв,
 $E = 1,3 \cdot 10^{-8}$ Зв/Бк,
 $M = 50$ л,
 $t = 1$ год,
 $N = 7\,000$,
 $r_E = 7,3 \cdot 10^{-2}$ (чел $^{-1} \cdot$ Зв $^{-1}$).

Решение:

Активность радионуклида, попавшего в организм человека за время t равна соответственно формуле (1.1):

$$A = a \cdot M \cdot t, \quad (1.1)$$

$$A = 40 \cdot 50 \cdot 1 = 2000 \text{ (Бк)}.$$

Эффективная доза внутреннего облучения рассчитывается по формуле (1.2):

$$H = A \cdot \varepsilon, \quad (1.2)$$

$$H = 2000 \cdot 1,3 \cdot 10^{-8} = 0,26 \cdot 10^{-4} \text{ (Зв)}.$$

Индивидуальный радиационный риск рассчитывается по формуле (1.3):

$$r = H \cdot r_E, \quad (1.3)$$

$r = 0,26 \cdot 10^{-4} \cdot 7,3 \cdot 10^{-2} = 1,9 \cdot 10^{-6}$ – риск превышает значение $1,0 \cdot 10^{-6}$ (чел $^{-1} \cdot$ год $^{-1}$), но меньше верхней границы допустимого индивидуального радиационного риска ($5,0 \cdot 10^{-5}$ (чел $^{-1} \cdot$ год $^{-1}$)).

Коллективная доза внутреннего облучения рассчитывается по формуле (1.4):

$$K = N \cdot H, \quad (1.4)$$

$$K = 7000 \cdot 0,26 \cdot 10^{-4} = 0,182 \text{ (чел} \cdot \text{Зв)}.$$

Коллективный радиационный риск рассчитывается по формуле (1.5):

$$R = r_E \cdot K, \quad (1.5)$$

$$R = 7,3 \cdot 10^{-2} \cdot 0,182 = 0,013 \text{ – случаев сокращения жизни.}$$

Потеря коллективной продолжительности жизни рассчитывается по формуле (1.6):

$$\Delta = R \cdot \beta, \quad (1.6)$$

$$\Delta = 0,013 \cdot 15 = 0,195.$$

Ожидаемая коллективная продолжительность жизни рассчитывается по формуле (1.7):

$$T_K = 70 \cdot N, \quad (1.7)$$

$$T_K = 70 \cdot 7000 = 490000 \text{ (лет)}.$$

Относительная потеря коллективной продолжительности жизни рассчитывается по формуле (1.8):

$$\delta = \Delta / T_K = \Delta / 70 \cdot N. \quad (1.8)$$

$$\delta = 0,195 / 490000 = 3,98 \cdot 10^{-7}.$$

Для одного человека сокращение продолжительности жизни:

$$70 \cdot \delta = 70 \cdot 3,98 \cdot 10^{-7} = 2,79 \cdot 10^{-5} \text{ (лет)}.$$

Ответ: сокращение продолжительности жизни для одного человека составляет $2,79 \cdot 10^{-5}$ (лет).

4.2. Пример выполнения расчета радиационного канцерогенного риска, связанного с внешним облучением

Пример 2. Мощность дозы гамма-излучения за счет выбросов естественных радионуклидов (продуктов сгорания при сжигании топлива) в атмосферу составляет в среднем 0,03 мЗв в год. Рассчитать коллективный, индивидуальный радиационный риски и сокращение продолжительности жизни для одного жителя поселка Черноречье, в котором проживает 15000 человек в течение 20 лет. Коэффициент индивидуального радиационного риска равен $7,3 \cdot 10^{-2}$ (чел⁻¹·Зв⁻¹).

Дано: $H = 0,03 \text{ мЗв/год}$

$T = 20 \text{ лет}$

$r_E = 7,3 \cdot 10^{-2}$ (чел⁻¹·Зв⁻¹)

$N = 15\,000 \text{ чел}$

Решение:

Индивидуальная доза внешнего облучения за 20 лет рассчитывается по формуле (1.9):

$$H = H' \cdot t, \quad (1.9)$$

$$H = 0,03 \cdot 10^{-3} (36^{-1} \cdot 2000^{-1}) \cdot 20 (\text{лет}) = 6 \cdot 10^{-4} (36).$$

Величина коллективной дозы облучения за 20 лет рассчитывается по формуле (1.4):

$$K = N \cdot H, \quad (1.4)$$

$$K = 15000 \cdot 6 \cdot 10^{-4} = 9 (\text{чел} \cdot 36).$$

Коллективный риск радиационный R равен произведению коэффициента индивидуального риска r_E и величины коллективной эффективной дозы K рассчитывается по формуле (1.5):

$$R = r_E \cdot K, \quad (1.5)$$

$$R = 7,3 \cdot 10^{-2} \cdot 9 = 0,65 - \text{случаев сокращения жизни.}$$

Следовательно, в качестве последствий внешнего облучения следует ожидать появление неблагоприятных эффектов в 0,65 случаях. Каждый такой случай сопровождается сокращением длительности жизни β , равной 15 годам. Потеря коллективной продолжительности жизни рассчитывается по формуле (1.6):

$$\Delta = R \cdot \beta, \quad (1.6)$$

$$\Delta = 0,65 \cdot 15 = 9,75 (\text{лет}).$$

Ожидаемая коллективная продолжительность жизни рассчитывается по формуле (1.7):

$$T_K = 70 \cdot N, \quad (1.7)$$

$$T_K = 70 \cdot 15000 = 1050000 (\text{лет}).$$

Относительная потеря коллективной продолжительности жизни рассчитывается по формуле (1.8):

$$\delta = \Delta / T_K = \Delta / 70 \cdot N. \quad (1.8)$$

$$\delta = 9,75 / 1050000 = 4,7 \cdot 10^{-6} = 0,00093\%.$$

Индивидуальный радиационный риск выражается средним сокращением продолжительности жизни одного человека:

$$70 \cdot \delta = 70 \cdot 4,7 \cdot 10^{-6} = 3,3 \cdot 10^{-4} \text{ (года)} = 0,12 \text{ (дней)} = 2,9 \text{ (часа)}.$$

Ответ: сокращением продолжительности жизни одного человека составляет $3,3 \cdot 10^{-4}$ (лет).

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА О ВЫПОЛНЕНИИ ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

- 4.1. Название и цель работы.
- 4.2. Краткие теоретические сведения.
- 4.3. Выполненные индивидуальные задания.
- 4.4. Выводы.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие источники радиации вы знаете?
2. Сколько составляет средняя доза облучения за год?
3. Какие виды эффектов различают при воздействии радиации ?
4. В чем заключается различия между единицами измерения Зиверт и Беккерель?
5. Единица измерения эффективной дозы облучения?
6. Как рассчитать значение индивидуального радиационного риска r ?
7. Что характеризует коэффициент индивидуального радиационного риска?
8. Чему равен коэффициент индивидуального радиационного риска для персонала, работающего с ионизирующим излучением, и для населения?
9. В каком случае индивидуальный радиационный риск считается пренебрежимым?
10. Как рассчитать коллективный радиационный риск?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2

ЧАСТОСТЬ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО РИСКА. МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ РИСКА, ИСПОЛЬЗУЮЩАЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЙБУЛЛА – ГНЕДЕНКО

Цель работы: освоить методику расчета оценки частоты дополнительного риска, вызванного вредным веществом и научиться рассчитывать риск, используя распределение Вейбулла–Гнеденко.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Оценка риска строится на анализе конкретной ситуации и состоит в определении вероятности вредного действия изучаемого фактора. Частным случаем является количественная оценка вероятности ущерба здоровью человека, связанного с действием определенных агентов, например, химических веществ, находящихся в окружающей среде или на рабочем месте.

В количественных оценках экологического риска, связанного с загрязнителями компонентов окружающей среды, важное место принадлежит величине, называемой *частотой* дополнительного риска.

Дополнительный риск, обусловленный присутствием в окружающей среде вредного вещества, зависит от его дозы, поступившей в организм человека. Иными словами, частота дополнительного риска является функцией дозы: $q_e = f(D)$.

Исследование негативных воздействий токсикантов (канцерогенов) показывает, что точно такие же воздействия могут наблюдаться (как правило, в значительно меньших масштабах) и там, где рассматриваемый загрязнитель отсутствует, т.е. в контрольных группах, которые используются для сравнения. Так, случаи заболевания раком легких, вызываемые типичным представителем полиароматических углеводородов — бензо(а)пиреном, приходится выявлять на фоне случаев рака легких, обусловленных совсем другими причинами. Следовательно, надо учитывать, что связанный с данным веществом риск обычно накладывается на уже существующий риск, поэтому его называют дополнительным.

Механизмы формирования негативных эффектов, обусловленные уже существующим и дополнительным рисками, могут быть как весьма близкими, так и существенно различными [8].

2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА

2.1. Методика расчета оценки частоты дополнительного риска, вызванного вредным веществом

Чтобы установить частоту риска, связанного с действием только данного загрязнителя, следует внести такую поправку в данные по исследуемой группе (группе риска), которая учитывала бы появление аналогичных эффектов в контрольной группе. Это предусматривает следующая формула (2.1):

$$q_e = (q_t - q_c)/(1 - a \cdot q_c), \quad (2.1)$$

где q_e — частота вредных воздействий, обусловленных только рассматриваемым веществом (частота дополнительного риска);

q_t и q_c — частоты появления таких же негативных эффектов в группе риска и в контрольной группе соответственно;

a — коэффициент, характеризующий долю проявленных в контрольной группе изучаемых эффектов, связанных с независимыми механизмами их формирования.

Частоты появления негативных эффектов в группе риска рассчитывается по формуле (2.2):

$$q_t = E_t/N_t, \quad (2.2)$$

где E_t - количества негативных эффектов в группе риска;

N_t - численность группы риска.

Частоты появления негативных эффектов в контрольной группе рассчитывается по формуле (2.3):

$$q_c = E_c/N_c, \quad (2.3)$$

где E_c - количества негативных эффектов в контрольной группе;

N_c – численность контрольной группы.

Коэффициент a может меняться от 0 до 1. Если механизмы формирования вредных воздействий в исследуемой и контрольной группах одинаковы, то $a = 0$ и формула (2.1) упрощается:

$$q_e = q_t - q_c.$$

Если же эти механизмы различны, то $a = 1$ и формула (2.1) принимает вид:

$$q_e = (q_t - q_c)/(1 - q_c), \quad (2.4)$$

Точное значение коэффициента a установить очень трудно, поэтому обычно полагают $a = 1$. Это приводит к несколько завышенным оценкам дополнительного риска, т.е. по сравнению с формулой (2.1) соотношение (2.4) является более консервативным [6].

2.2. Модель оценки риска, использующая распределение Вейбулла–Гнеденко

Распределение Вейбулла–Гнеденко описывается выражением (3.1):

$$F(x) = 1 - e^{-ax^b}, \quad (3.1)$$

где a и b — положительные параметры.

При изучении влияния токсического вещества на здоровье людей роль независимой переменной величины играет доза этого вещества D . Функция $q_e(D)$ моделирует зависимость “доза – отклик” и дает оценку частоты риска, привносимого токсикантом, формула (3.2):

$$q_e(D) = 1 - e^{-aD^b}. \quad (3.2)$$

Выражение (3.2) можно линеаризовать двойным логарифмированием, выражение (3.3):

$$\ln[-\ln(1-q_e(D))] = \ln a + b \ln D. \quad (3.3)$$

Эта зависимость может использоваться в качестве уравнения линейной регрессии. Его параметры a и b можно найти, если есть по крайней мере две пары значений, полученных при токсикологических (экспериментальных) исследованиях. Если было установлено, что значению D_1 соответствует частость $q_{e,1}$, а величине D_2 — частость $q_{e,2}$, то коэффициенты уравнения линейной регрессии вычисляются по формулам (3.4) и (3.5):

$$b = \{\ln[-\ln(1-q_{e,2})] - \ln[-\ln(1-q_{e,1})]\} / \ln(D_2/D_1), \quad (3.4)$$

$$a = -\ln(1-q_{e,1})/D_1^b \text{ или } a = -\ln(1-q_{e,2})/D_2^b. \quad (3.5)$$

Зная коэффициенты a и b , можно определить дозу токсиканта, соответствующую частоте обусловленного им риска, формула (3.6), преобразовав выражение (3.1) [6]:

$$D = \{[-\ln(1-q_e)]/a\}^{1/b}. \quad (3.6)$$

3.ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

3.1. Задачи на расчет оценки частоты дополнительного риска, вызванного вредным веществом

Задача 1. С целью оценки вредных воздействий некоторого токсического вещества проводились наблюдения за двумя группами, каждая из которых насчитывала по 100 чел. В контрольной группе выявлено 5 патологических случаев, а в группе лиц, подвергавшихся действию токсиканта, наблюдались 10 случаев такой же патологии. Найти частоту дополнительного риска, вызванного данным веществом.

Ответ: 0,053.

Задача 2. С целью оценки влияния на здоровье человека некого вирусного заболевания, проводились наблюдения за двумя группами людей: I – 93 чел., II – 70 чел. В первой группе патологические изменения были выявлены у 13 человек, во второй – 5 человек. Найти частоту дополнительного риска.

Ответ: 0,075.

Задача 3. На промышленный завод по производству красного кирпича было отправлено 2 группы рабочих (в группе по 30 человек). С целью оценки вредного воздействия пыли на органы дыхания за этими группами проводились наблюдения. В первой группе рабочих, работающих на обжиге кирпича, выявлено 10 патологических заболеваний, а во второй группе, работающих на формовке кирпича, выявлено 18 заболеваний. Найти частоту дополнительно риска, вызванного пылью.

Ответ: частота дополнительного риска составляет $0,43 < 1$.

Задача 4. При удалении окалины с металлических деталей после термической обработки, используют технические чашечные щетки (очень жесткие щетки, обладающие режущими свойствами). Этот процесс сопровождается выделением в воздух рабочей зоны аэрозоля.

Для того, чтобы оценить воздействие данного аэрозоля на органы дыхания работников такого цеха, были выбраны 2 группы людей, по 10 человек в каждой. Далее за группами проводились наблюдения.

В 1-й группе людей, работающих в непосредственной близости от процесса очистки, было выявлено 2 случая патологического заболевания дыхательных путей. Во 2-й группе людей, которые удаляли окалины с деталей – выявлено 5 случаев заболеваний различных органов.

Найти частоту.

Ответ: 0,6 – риска нет.

Задача 5. В лаборатории был поставлен опыт на крысах для того, чтобы определить, как препарат «парацетамол» воздействует на биологические системы. Наблюдения проводились за двумя группами крыс. В контрольной группе- 10 особей - было выявлено 2 патологии, а во 2-ой группе- 20 крыс, которые подверглись действию препарата наблюдалось 8 случаев той же патологии. Найти частоту дополнительного риска.

Ответ: 0,25 - частота дополнительного риска < 1 , значит ни одного.

Задача 6. После взрыва ускорителя лаборатории С.Т.А.Р. Лабс, который должен был произвести революцию в физике, астрономии, медицине, в городе S произошло необычное метеорологическое явление и появилось большое количество мета-людей, обладающих суперспособностями. С целью оценки воздействия поражающих факторов взрыва были проведены дополнительные наблюдения – искусственно воспроизведен взрыв и его действие испытано на

группе в $N_t=15$ человек. При первом взрыве из $N_c=15$ рабочих лаборатории приобрели суперспособности $E_t=6$ человек, при втором испытании – $E_c=2$ человека.

Найти частность дополнительного риска возникновения суперспособностей, вызванных взрывом.

Ответ: $q_e = 0,42 < 1$.

Задача 7. Однажды, на заводе, который находился рядом с домом Шерлока, произошла авария по утке токсикантов. С целью оценки вредного воздействия токсикантов на организм человека. Для упрощения наблюдений Шерлок решил, что стоит разбить людей на 3 группы:

1я - сварочный цех;

2я – молярно-сдаточный цех, где непосредственно произошла авария;

3я – заготовительный цех.

В каждом цеху работало по 15 человек.

В 1й группе выявлено 4 патологических заболевания.

Во 2й – 10 заболеваний.

Найти частость дополнительного риска.

Ответ: частость дополнительного риска составляет 0,54.

Задача 8. Во время перемещения между поселениями экзопланеты ϵ -6 произошла авария, в результате которой посреди песчаной пустыни вышло из строя два транспортера с колонистами. Вентиляционные системы были нарушены, в результате чего мелкодисперсная пыль от слюды, имеющая острые грани и способная вызвать механические повреждения ткани органов дыхательных путей, проникла в кабины. Средства индивидуальной защиты не были совершенны, пыль задерживалась респираторами лишь частично. Пассажиры одного из транспортеров пребывали в опасных условиях более длительное время, поскольку спасательной группе потребовалось больше времени для перемещения на другую окраину пустыни.

В результате аварии у ряда людей появились признаки острого воздействия слюдовой пыли. Дальнейшие обследования показали, что в первой группе, насчитывавшей 25 человек, которая находилась в неблагоприятных условиях менее продолжительное время выявлено 4 случая механического повреждения дыхательных путей частицами пыли. Во второй группе из 30 людей значительно пострадало 7. Необходимо найти частость дополнительного риска для дальнейшего прогнозирования и усовершенствования систем защиты в аварийных ситуациях.

Ответ: частость дополнительного риска составила 0,083.

Задача 9. В малой академии наук был поставлен опыт на кроликах, для того чтобы определить как препарат анальгин воздействует на биологические системы. Наблюдение проводилось за 2-мя видами кроликов. В контрольной

группе было 5 особей и была выявлена 1 патология. Во 2 группе было 10 особей, которые подверглись действию препарата - 4 патологии. Найти частность дополнительного риска.

Ответ: частота дополнительного риска меньше 1, соответственно, ни одного дополнительного случая риска не обнаружено.

Задача 10. С целью оценки вредных воздействий некоторого токсичного вещества, проводились наблюдения за 2 группами. Первая группа насчитывала 10 овец, вторая – 15 овец. В контрольной группе выявлено 3 патологических случаев, а в группе подвергшихся действию токсиканта наблюдалось 10 случаев такой же патологии. Найти численность дополнительного риска, вызванного данным веществом.

Ответ: частность дополнительного риска меньше 1, следовательно, дополнительный случай риска не возникнет.

Задача 11. На кроликах в лаборатории проводились исследования воздействия шампуня, на зрение, при попадании его на глаза. Контрольной группе в глаза капали простой водой. Контрольная группа состояла из 15 особей, ухудшение зрения по окончании исследования было обнаружено у 1 кролика. В исследуемой группе ухудшения было отмечено у 7 особей из 15. Найти частость дополнительного риска.

Ответ: частость дополнительного риска составляет 0,43.

Задача 12. На химическом заводе была утечка, количество работающих 100 человек. Но при обследовании выявлено 7 патологий только у 70 человек, которые непосредственно находились рядом с местом аварии. У 30 человек наблюдалось только 2 патологии, так как они находились в другом отсеке завода. Найти частость дополнительного риска.

Ответ: частость дополнительного риска составляет 0,008.

Задача 13. С целью выявления негативного влияния на животный организм нового препарата «Аминофилекс», проводились опыты на кроликах. Наблюдения проводились за 2 группами животных. В контрольной группе было 20 особей и было выявлено 6 патологий, в группе риска – 20 особей и было выявлено 10 патологий. Найти частость дополнительного риска.

Ответ: частость дополнительного риска составляет 0,29.

3.2. Задачи на расчет риск, используя распределение Вейбуллы – Гнеденко

Для того, чтобы определить как разное количество токсикантов, содержащиеся в пищевых продуктах, воздействует на биологические системы, в лаборатории был поставлен опыт на кроликах. Фиксировались случаи пато-

логических изменений в двух группах кроликов, испытывавших разные дозовые нагрузки.

1 группа риска – 5 особей. Они получили вместе с пищей малую дозу токсиканта- 0,6 мг. В этой группе было отмечено 3 случая патологии, в то время как число ожидаемых случаев этой патологии – 1.

2 группа риска – 10 особей. Доза токсиканта- 4 мг. Число патологических нарушений зафиксировано в этой группе 8 против 4 ожидаемых. Определить коэффициент зависимости Вейбулла- Гнеденко и найти дозу, при которой частость дополнительного риска равен 0,1.

Ответ: $D = \{-\ln(1 - 0,1)/0,813\}^{0,313} = 0,11$ мг.

4. ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ

4.1. Пример расчета оценки частоты дополнительного риска, вызванного вредным веществом

Пример 1. При окраски изделия в окрасочной камере лакокрасочного цеха в воздух поступает значительное количество аэрозоля краски. С целью оценки вредного воздействия аэрозоля краски на органы дыхания проводились наблюдения за двумя группами работников этого цеха, каждая из которых насчитывала 20 человек. В первой группе людей, работающих в сушильной камере, выявлено 3 патологических заболевания, а в группе людей, работающих в окрасочной камере и подвергавшиеся воздействию аэрозоля краски, наблюдалось 8 случаев заболевания. Найти частость дополнительного риска, вызванного этим веществом.

Дано: $N_1 = 20$,
 $N_2 = 20$,
 $E_t = 8$ чел,
 $E_c = 3$ чел.

Решение:

Частость появления негативных эффектов в группе риска рассчитывается по формуле (2.2):

$$q_t = E_t/N_t, \quad (2.2)$$

$$q_t = 8/20 = 0,4.$$

Частость появления негативных эффектов в контрольной группе рассчитывается по формуле (2.3):

$$q_c = E_c/N_c, \quad (2.3)$$

$$q_c = 3/20 = 0,15.$$

Частость дополнительного риска рассчитывается по формуле (2.4):

$$q_e = (q_t - q_c)/(1 - q_c), \quad (2.4)$$

$$q_e = (0,4 - 0,15)/(1 - 0,15) = 0,29.$$

Ответ: Частость дополнительного риска составляет $0,29 = 0,3$.

4.2. Пример расчета риска, с использованием распределения Вейбуллы–Гнеденко

Пример 1. В процессе выявления профессионального риска, связанного с воздействием некоторого токсиканта, фиксировались случаи патологических изменений в двух группах персонала, испытывавших разные дозовые нагрузки. Первая группа риска насчитывала 100 человек, каждый из которых получил малую дозу токсиканта — 0,1 мг. В этой группе было отмечено 13 случаев патологии, в то время как число ожидавшихся случаев этой патологии предполагалось равным 8. Во второй группе риска было 120 человек, каждый из них получил дозу, равную 2,0 мг. Число патологических нарушений, зафиксированных в этой группе, составило 32 против 10 ожидавшихся. Требуется определить коэффициенты зависимости Вейбулла - Гнеденко и найти дозу, при которой частость дополнительного риска равна 0,1.

Дано: $N_{t,1} = 100$,

$$D_1 = 0,1 \text{ мг},$$

$$N_{t,2} = 120,$$

$$D_2 = 2,0 \text{ мг},$$

$$E_{t,1} = 13,$$

$$E_{c,1} = 8,$$

$$E_{t,2} = 32,$$

$$E_{c,2} = 10.$$

Решение:

Условия задачи позволяют вычислить частости дополнительного риска для каждой из исследованных групп, используя формулы (3.7) и (3.8):

$$q_{e,1} = (q_{t,1} - q_{c,1}) / (1 - q_{c,1}) = [(E_{t,1}/N_{t,1}) - (E_{c,1}/N_{t,1})] / (1 - E_{c,1}/N_{t,1}), \quad (3.7)$$

$$q_{e,1} = [(13/100) - (8/100)] / (1 - 8/100) = 0,05;$$

$$q_{e,2} = (q_{t,2} - q_{c,2}) / (1 - q_{c,2}) = [(E_{t,2}/N_{t,2}) - (E_{c,2}/N_{t,2})] / (1 - E_{c,2}/N_{t,2}), \quad (3.8)$$

$$q_{e,2} = [(32/120) - (10/120)] / (1 - 10/120) = 0,2.$$

Так как имеются две точки для линии регрессии, то коэффициенты выражения (3.2) вычисляются по формулам (3.4) и (3.5):

$$b = \{ \ln[-\ln(1 - q_{e,2})] - \ln[-\ln(1 - q_{e,1})] \} / \ln(D_2/D_1), \quad (3.4)$$

$$b = \{ \ln[-\ln(1 - 0,2)] - \ln[-\ln(1 - 0,05)] \} / \ln(2/0,1) = 0,49;$$

$$a = -\ln(1 - q_{e,1})/D_1^b \text{ или } a = -\ln(1 - q_{e,2})/D_2^b. \quad (3.5)$$

$$a = -\ln(1 - 0,05)/(0,1)^{0,49} = 0,15.$$

Таким образом, используя формулу (3.2), в рассмотренном случае зависимость между дозой токсиканта и реакцией на нее в виде избыточного риска можно представить следующим выражением:

$$q_e(D) = 1 - e^{-aD^b}, \quad (3.2)$$

$$q_e(D) = 1 - e^{-0,15D^{0,49}}.$$

Можно сказать, что в результате решения данной задачи проведено моделирование воздействия токсиканта на основе использования распределения Вейбулла-Гнеденко. Теперь, чтобы получить значение дозы при установленной величине частоты риска 0,1, надо применить формулу (3.6):

$$D = \{ [-\ln(1 - q_e)] / a \}^{1/b}. \quad (3.6)$$

$$D = \{ [-\ln(1 - 0,1)] / 0,15 \}^{1/0,49} = 0,48 \text{ мг.}$$

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какую группу называют группой риска?
2. Какую группу называют контрольной?
3. Как рассчитать частоту дополнительного риска?
4. Как рассчитать частоты появления негативных эффектов в контрольной группе?
5. Как рассчитать частоты появления негативных эффектов в группе риска?
6. Каким выражением описывается распределение Вейбулла-Гнеденко?
7. Что такое доза вещества?
8. Что моделирует функция $q_e(D)$?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду (Руководство Р 2.1.10.1920 – 04). – М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. – 143 с.)
2. Закон «Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний»/1998.
3. Абалкина И.Л. Марченко Т.А. Панченко С.В. Чернобыльская радиация в вопросах и ответах. М., 2006. - 42 с.
4. Инженерный справочник. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dpva.ru/Guide/GuideTricks/Zivert1/>
5. Ваганов П.А. Как рассчитать риск угрозы здоровью из-за загрязнения окружающей среды: Задачи с решением. - СПб., Изд-во С.- Петерб. ун-та, 2008.-129с.
6. МУК 2.6.1.1088-02 «Ионизирующее излучение, радиационная безопасность»: М. – 2002.
7. СанПиН 2.6.1.2523-09 "Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)
8. Ваганов П.А. Им М.-С. Экологические риски. СПб., 1997.
9. В методических указаниях в заданиях для самостоятельной работы использовались задачи, придуманные студентами при изучении дисциплины «Техногенные системы и оценка риска».

**РАСЧЕТ РИСКА УГРОЗЫ ЗДОРОВЬЮ ЧЕЛОВЕКА
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РАДИАЦИИ. ЧАСТОСТЬ
ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО РИСКА. МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ
РИСКА, ИСПОЛЬЗУЮЩАЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
ВЕЙБУЛЛЫ – ГНЕДЕНКО**

Методические указания

Редактор – *О.В. Дмитриева*

Составители: **Сигора** Галина Анатольевна,
Хоменко Тамара Юрьевна

В авторской редакции

Изд. № 169/19. Объем 2 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»