

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В. Л. Гурачевский

**ПОСЛЕДСТВИЯ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АВАРИИ
В БЕЛАРУСИ И ИХ ПРЕОДОЛЕНИЕ**

Минск
БГАТУ
2017

Гурачевский, В. Л. Последствия чернобыльской аварии в Беларуси и их преодоление / В. Л. Гурачевский. – Минск : БГАТУ, 2017. – 68 с. : ил. – ISBN 978-985-519-854-4.

Анализируются: чернобыльское загрязнение территории, биосферы и основных экосистем наиболее значимыми радионуклидами (йод-131, цезий-137, стронций-90, плутоний-238, -239, -240, -241 и америций-241), медицинские последствия Чернобыля, а также нанесенный аварией ущерб и мероприятия государства по его преодолению.

Для широкого круга научных и инженерно-технических работников, преподавателей, аспирантов, студентов.

Табл. 3. Ил. 13. Библиогр.: 19 назв.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом
Учреждения образования «Белорусский государственный
аграрный технический университет»
(протокол № 1 от 10.02.2017 г.)

Рецензенты:

заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности БГАТУ,
доктор технических наук, профессор *Л. В. Мисун*,
заведующий кафедрой ядерной и радиационной безопасности
МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ, кандидат технических наук *Н. Н. Тушин*,
заместитель начальника Департамента по ликвидации последствий
катастрофы на Чернобыльской АЭС МЧС Республики Беларусь,
кандидат сельскохозяйственных наук *Н. Н. Цыбулько*

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	4
1. РАДИОАКТИВНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ТЕРРИТОРИИ.....	5
1.1. Загрязнение йодом-131.....	5
1.2. Загрязнение цезием-137.....	7
1.3. Загрязнение стронцием-90.....	11
1.4. Загрязнение трансурановыми элементами.....	13
2. ФОРМИРОВАНИЕ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ.	
ЗАГРЯЗНЕНИЕ ЭКОСИСТЕМ.....	17
2.1. Пути облучения человека.....	17
2.2. Загрязнение биосферы (воздух, почва, вода).....	21
2.3. Загрязнение лесных систем.....	25
2.4. Радиоактивное загрязнение и сельское хозяйство.....	28
3. МЕДИЦИНСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ЧЕРНОБЫЛЯ.....	33
3.1. Дозы облучения и здоровье населения.....	33
3.2. Медицинские последствия.....	35
3.3. Нерациологические последствия.....	39
4. НАНЕСЕННЫЙ УЩЕРБ И ЕГО ПРЕОДОЛЕНИЕ.....	41
4.1. Экономический ущерб.....	41
4.2. Деятельность государства по преодолению последствий чернобыльской аварии.....	44
4.3. Решенные задачи.....	47
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	52
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	54
ГЛОССАРИЙ.....	55

ПРЕДИСЛОВИЕ

Даже спустя тридцать с лишним лет, минувших после чернобыльской аварии, ее негативные последствия для Республики Беларусь остаются тяжелыми и требуют значительных усилий государства для их преодоления.

По состоянию на 2016 год, в зонах радиоактивного загрязнения находилось около 13 % территории республики, где проживало свыше 1,14 млн человек. Ежегодно на преодоления последствий аварии из республиканского бюджета выделяются средства, исчисляемые 200–300 млн дол. США.

Проблемам аварии на ЧАЭС посвящено значительное количество литературы, однако большая ее часть рассчитана на специалистов в области радиоз экологии и радиационной безопасности, медиков. Как ни странно, вопросам деятельности государства по преодолению чернобыльских последствий обычно уделяется мало внимания; недостаточно системно эти вопросы отражаются и средствами массовой информации.

Автор на основе опыта подготовки национальных докладов Республики Беларусь, издававшихся к крупным международным конференциям по чернобыльской проблематике, и новых официальных данных попытался в сжатой и доступной форме систематизировать информацию по последствиям аварии, охарактеризовать нанесенный аварией ущерб и определить основные направления деятельности государства по его преодолению.

1. РАДИОАКТИВНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ТЕРРИТОРИИ

1.1. Загрязнение йодом-131

Период полураспада йода-131 (^{131}I) составляет чуть менее восьми суток, однако загрязнение этим радионуклидом привело к серьезным долговременным последствиям для населения республики. Из всех медицинских последствий, проявившихся к настоящему моменту, они представляются наиболее значимыми, что объясняется следующими факторами.

1. Йод-131 в очень большом количестве образуется в ядерном реакторе. Его доля достигает 3 % всех продуктов деления урана. С учетом малости периода полураспада ($T_{1/2}$) *активность выброшенных из реактора радионуклидов йода и, как следствие, интенсивность* испускаемого ими *излучения* оказались чрезвычайно высокими.

Чем меньше $T_{1/2}$, тем быстрее распадается радионуклид. Скорость распада характеризуется активностью. Поэтому при выпадении одинакового количества разных радионуклидов их начальные активности обратно пропорциональны периодам полураспада.

2. Обладая большой летучестью, этот радионуклид распространился на огромные расстояния от места аварии [1].

3. Йод-131 испытывает *бета-распад* с сопутствующим *гамма-излучением*.

Примерно в 7 % случаев происходит бета-распад с энергией 334 кэВ, сопровождающийся гамма-излучением энергии 637 кэВ; в 90 % случаев – бета-распад с энергией 606 кэВ и энергией сопутствующего гамма-излучения 364 кэВ. Поэтому сыграли свою негативную роль как *внешнее облучение* гамма-квантами, так и *внутреннее облучение* бета-частицами от вдыхаемого воздуха, растительной и животной пищи, особенно молока.

4. Йод-131 избирательно накапливается в щитовидной железе, обладающей небольшими размерами. В этом одна из причин того, что йод-131 относят к радионуклидам высокой токсичности. Эффекты его воздействия оказались значительно выше, чем многих других радионуклидов, более или менее равномерно облучающих организм.

Карта загрязнения Беларуси [2], построенная на основе немногочисленных имеющихся данных, представлена на рис. 1. В Брагинском, Хойникском, Наровлянском районах Гомельской области *плотность загрязнения почв йодом-131 по состоянию на 10 мая 1986 г. (спустя почти два периода полураспада) составила 37 000 кБк/м² и более.*

Условные обозначения

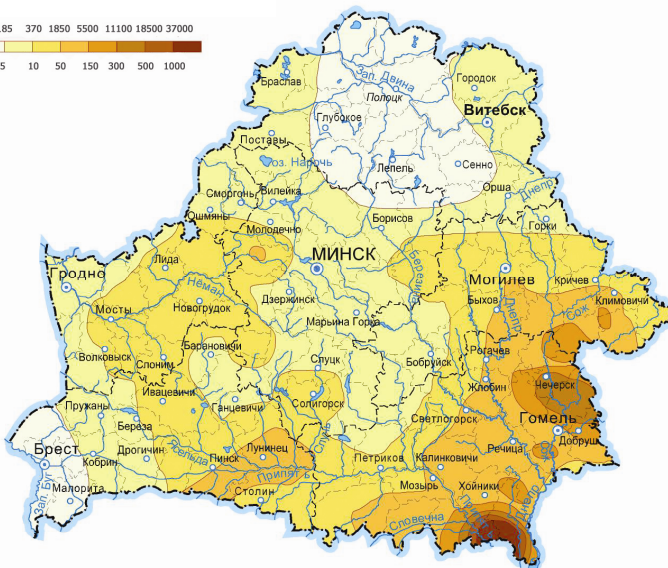


Рис. 1. Загрязнение территории Беларуси йодом-131 по состоянию на 10 мая 1986 г. (реконструкция)

В результате загрязнения почвы и воздуха практически на всей территории Беларуси регистрировалось значительное повышение *мощности дозы* гамма-излучения. В некоторых населенных пунктах она достигала 0,5 мЗв/ч, что примерно в 5 000 раз выше *естественного радиационного фона*.

Поступление йода-131 в организм как ингаляционным путем, так с пищей и водой, привело к большим *дозам облучения* щитовидной железы [3]. В результате спустя несколько лет значительно возросло число случаев ее патологии, особенно у детей (т. н. «йодный удар»). Результаты измерений 1986 г. показали, что около

30 % детей в возрасте до 2 лет получили дозы выше 1 Гр [4]. Подробнее этот вопрос будет рассмотрен в разделе 3.

По мнению специалистов [5], в результате радиационного воздействия йода-131 практически все население Беларуси, жившее на момент аварии (в том числе – дети во внутриутробном состоянии), в той или иной форме страдает патологиями щитовидной железы.

1.2. Загрязнение цезием-137

Период полураспада этого радионуклида составляет 30 лет. Он, как и йод-131, испытывает бета-распад с сопутствующим гамма-излучением.

В 5 % случаев происходит бета-распад с энергией 1,17 МэВ, в 95 % – бета-распад с энергией 512 кэВ и энергией сопутствующего гамма-излучения 662 кэВ.

Летучесть цезия-137 (^{137}Cs) меньше, чем у йода-131, но достаточно высока. Серьезному загрязнению подверглись многие страны Европы [6], причем около 35 % всех чернобыльских выпадений этого радионуклида находится в Беларуси [3].

Доаварийное загрязнение территории Беларуси цезием-137 за счет *глобальных выпадений* составляло от 1,5 до 3,7 кБк/м². После чернобыльской аварии на 66 % территории Беларуси плотность загрязнения почвы цезием-137 превышала 10 кБк/м² [2].

Согласно действующему законодательству одним из критериев отнесения территорий к *зоне радиоактивного загрязнения* является превышение плотности загрязнения цезием-137 величины 37 кБк/м² (1 Ки/км²).

Такое превышение было установлено для 23 % территории республики (рис. 2). В качестве сравнения: аналогичная доля для Украины составляет 7,0 %, для европейской части России – 1,5 %, что свидетельствует о тяжести последствий чернобыльской аварии для Беларуси.

Максимальный уровень загрязнения почвы цезием-137 составлял около 60 000 кБк/м² и наблюдался в отдельных населенных пунктах как ближней (Брагинский район Гомельской области), так и дальней зоны (Чериковский район Могилевской области).

Загрязнение носит мозаичный (неравномерный, пятнистый) характер как в большом масштабе, так и в пределах отдельно взятых населенных пунктов [7]. Это объясняется тем, что основная часть выпадений формировалась с атмосферными осадками, носящими стихийный характер.

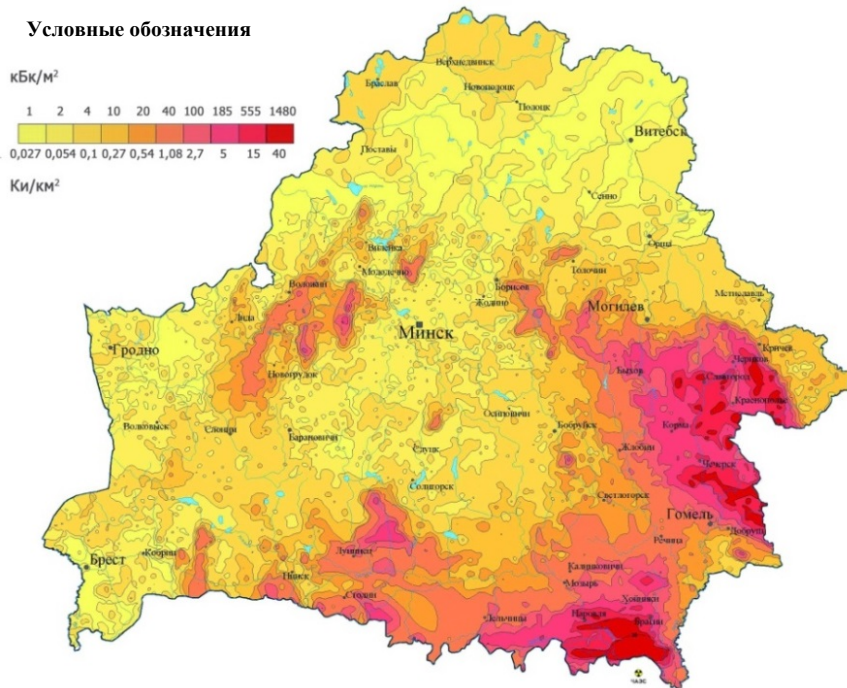


Рис. 2. Загрязнение территории Беларуси цезием-137 (1986 г.)

В результате естественного распада цезия-137 площадь радиоактивного загрязнения постепенно уменьшается. По состоянию на 2016 г. [3], она составляла 13,4 % от общей площади республики (рис. 3).

В настоящее время, согласно Перечню населенных пунктов, находящихся в зонах радиоактивного загрязнения [8], к загрязненным районам относятся: 19 районов Гомельской области, 13 – Могилевской, 4 – Брестской, 10 – Минской и 3 района Гродненской области (табл. 1).

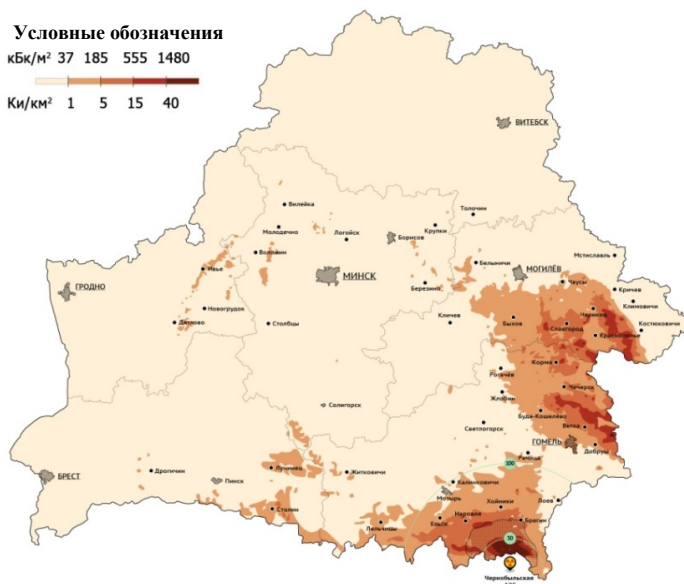


Рис. 3. Загрязнение территории Республики Беларусь цезием-137 (2016 г.)

Таблица 1

Административные районы Беларуси, которые имеют населенные пункты, относящиеся к зонам радиоактивного загрязнения (2015 г.)

Гомельская обл.	Лельчицкий	Славгородский	Борисовский
Буда-Кошелевский	Лоевский	Чаусский	Вилейский
Ветковский	Мозырьский	Бельничский	Крупский
Добрушский	Речицкий	Кировский	Логойский
Наровлянский	Рогачевский	Кличевский	Молодечненский
Хойникский	Светлогорский	Мстиславский	Слуцкий
Чериковский	Могилевская обл.	Брестская обл.	Солигорский
Ельский	Костюковичский	Столинский	Столбцовский
Брагинский	Краснопольский	Дрогичинский	Гродненская обл.
Гомельский	Чериковский	Лунинецкий	Дятловский
Житковичский	Быховский	Пинский	Ивьевский
Жлобинский	Климовичский	Минская обл.	Новогрудский
Калинковичский	Кричевский	Воложинский	
Кормянский	Могилевский	Березинский	

После распада радиоактивного йода, через 1–2 месяца после аварии, цезий-137 стал основным дозообразующим радионуклидом. Его негативное действие продолжается и в настоящий период. При этом в первые годы при формировании дозы весомую роль играло внешнее гамма-облучение человека от осевших на почву и растительность радионуклидов. Впоследствии доза формировалась в основном (по данным [4] – свыше 90 %) за счет внутреннего бета-облучения.

В таблице периодической системы цезий находится в одном столбце элементов с калием, поэтому их химические свойства во многом схожи. Подобно калию, цезий обладает высокой способностью проникать в организм посредством пищевых цепочек.

В отличие от йода-131, цезий-137 более равномерно распределяется в организме человека, поэтому его относят к радионуклидам умеренной токсичности. Около 80 % попавшего в организм цезия накапливается в мышцах. Следует учитывать, что существуют т. н. критические органы, для которых предел допустимого поступления цезия меньше, чем для других. К ним относятся печень, селезенка, легкие.

При постоянном поступлении накопление цезия в органах и тканях происходит до определенного предела, когда интенсивности поступления и выведения цезия сравниваются. После этого содержание цезия в организме остается примерно постоянным.

Выводится цезий-137 в основном через почки и кишечник. Этот процесс характеризуется периодом полувыведения – временем, за которое содержание цезия при однократном поступлении уменьшается в 2 раза. По данным Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ), период полувыведения цезия-137 из организма человека составляет 70 сут.

Полезно знать, что при равномерном распределении цезия-137 в организме человека с удельной активностью 1 Бк/кг среднегодовая эффективная доза внутреннего облучения составит 2–3 мкЗв. Законодательством установлен предел среднегодовой эффективной дозы облучения населения, составляющий 1 мЗв сверх дозы фонового облучения. Его превышение служит одним из критериев отнесения населенных пунктов к зоне радиоактивного загрязнения. Нетрудно подсчитать, что без учета внешнего облучения доза в 1 мЗв достигается при удельной активности в теле человека около 400 Бк/кг. Значение удельной активности можно измерить специальными приборами – счетчиками излучений человека (СИЧ).

В [9] утверждается, что для подавляющего большинства населения, которое постоянно проживает на территориях радиоактивного загрязнения, эффективные дозы облучения чернoбыльскими радионуклидами, накопленные за 1986–2005 гг., не превышают значений действующих гигиенических нормативов. По данным радиационно-гигиенического мониторинга, в настоящее время преимущественный вклад в формирование доз облучения населения вносят природные источники ионизирующего облучения и облучение в медицинских целях.

1.3. Загрязнение стронцием-90

Период полураспада ($T_{1/2}$) этого радионуклида составляет 29 лет.

Стронций-90 (^{90}Sr) испытывает бета-распад с энергией 546 кэВ, превращаясь в дочерний продукт – иттрий-90. Последний является короткоживущим радионуклидом ($T_{1/2} = 64$ ч) и, в свою очередь, испытывает бета-распад с энергией 2,28 МэВ, после чего образуется стабильный нуклид цирконий-90.

Реальные выпадения представляют собой равновесную смесь изотопов стронций-90 и иттрий-90. При таком значительном различии периодов полураспада суммарная активность нуклидов стронция и иттрия удваивается по сравнению с активностью стронция, так как вслед за каждым распадом стронция-90 относительно быстро происходит распад иттрия-90.

Стронций-90 обладает значительно меньшей, чем цезий-137, летучестью. Как следствие, загрязнение территории республики стронцием-90 носит более локальный характер (рис. 4) и сосредоточено преимущественно в Гомельской и Могилевской областях [2].

Законодательно установленным критерием для отнесения территории к зоне радиоактивного загрязнения по стронцию-90 служит превышение порога в $5,55 \text{ кБк/м}^2$. Сразу после аварии такие уровни загрязнения почвы были обнаружены на площади $21,1 \text{ тыс. км}^2$, что составляет 10 % территории республики.

В пределах 30-километровой зоны ЧАЭС плотность загрязнения стронцием-90 достигала величины $1\,800 \text{ кБк/м}^2$ (Хойникский район). В дальней зоне наблюдались значения 137 кБк/м^2 (на севере Гомельской области, Ветковский район) и 29 кБк/м^2 – на расстоянии 250 км от места аварии (Могилевская область, Чериковский район).

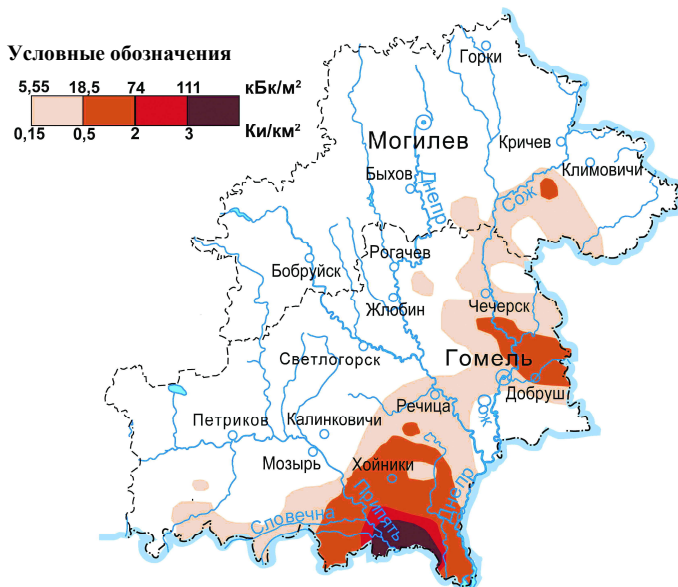


Рис. 4. Загрязнение территории Беларуси стронцием-90 по состоянию на 2005 г. (небольшие «пятна» есть и в Брестской области)

По состоянию на 2015 г., согласно [3], доля загрязненной стронцием территории Беларуси вне зоны отчуждения составляет 5,3 %. Следует учесть, что практически вся она одновременно загрязнена и цезием-137. Новая карта загрязнения стронцием-90 не опубликована. (В следующем разделе будет представлена опубликованная сводная карта загрязнения стронцием-90 и радионуклидами плутония-238, -239, -240.)

Стронций-90 относится к группе радионуклидов высокой токсичности. Находясь в одном столбце периодической системы с кальцием, стронций обладает похожими свойствами. Как следствие, при попадании радионуклидов в организм стронций-90 избирательно накапливается в костной ткани, а в мягких тканях задерживается менее 1 %. У красного костного мозга – основного органа кроветворения – дозиметрический *тканевый множитель* в 12 раз больше, чем у костной ткани. Поэтому внутреннее облучение стронцием-90 в тяжелых случаях может привести к лейкемии. Период полувыведения стронция-90 из организма составляет свыше 15 лет.

1.4. Загрязнение трансурановыми элементами

В атомном реакторе под действием потока нейтронов возникают не только осколки деления ядер урана, но и ядра более тяжелых – трансурановых (ТУ) элементов. В их числе четыре радионуклида плутония с массовыми числами 238, 239, 240 и 241.

Первые три из них испытывают альфа-распад. Плутоний-241 (^{241}Pu) испытывает бета-распад, и в первые годы после аварии его опасность представлялась низкой. Расчеты показывали, что активность плутония-241 соизмерима с активностью естественного бета-излучающего радионуклида калий-40, потому загрязнение плутонием-241 не учитывалось при отнесении территорий к зонам радиоактивного загрязнения.

Однако, испытывая бета-распад с $T_{1/2} = 14$ годам, плутоний-241 превращается в альфа-излучающий америций-241. С момента аварии прошло уже больше двух периодов полураспада. Поэтому в наши дни плутония-241 осталось менее $\frac{1}{4}$ от исходного количества, а более $\frac{3}{4}$ превратилось в америций-241 (^{241}Am). Таким образом, к числу альфа-излучающих трансурановых радионуклидов, кроме плутония-238, -239, -240, следует отнести и америций-241.

Радионуклиды плутония-238, -239, -240 (^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu) и америций-241 имеют большие и очень большие периоды полураспада, составляющие, соответственно, 87, 24 110, 6560 и 439 лет. Отметим, что энергия испускаемого ими альфа-излучения лежит в пределах 5–6 МэВ, и что все дочерние продукты их распада (уран-234, -235, -236 и нептуний-237) также являются источниками альфа-излучения.

Внешнее облучение от трансурановых радионуклидов не может нанести большого вреда вследствие очень низкой проникающей способности альфа-излучения. Однако они чрезвычайно опасны при внутреннем облучении, так как относятся к группе радионуклидов особо высокой токсичности. Накапливаются ТУ-элементы преимущественно в костной ткани, печени, почках, причем период их полувыведения из организма превышает 10 лет. Очень опасны эти радионуклиды при поступлении через легкие.

Тяжелые изотопы плутония обладают невысокой летучестью, основная их часть выпала в пределах зоны, из которой сразу после аварии было эвакуировано население. Соответствующая карта представлена на рис. 5 [4].



Рис. 5. Загрязнение территории Беларуси изотопами плутония-238, -239, -240 (2005 г.)

Эти территории находятся преимущественно в Гомельской области (Брагинский, Наровлянский, Хойникский, Речицкий, Добрушский и Лоевский районы) и в Чериковском районе Могилевской области. Наиболее высокие уровни наблюдаются в 30-километровой зоне ЧАЭС (в Хойникском районе – свыше 111 кБк/м²).

Построенная в первые годы после аварии карта не учитывала загрязнение бета-излучающим плутонием-241, а его альфа-излучающего дочернего продукта – америция-241 тогда еще не образовалось в значительном количестве.

По этой же причине при зонировании территорий, согласно действующему с 1991 г. законодательству, учитывается загрязнение только радионуклидами плутония-238, -239, -240. При этом в качестве порога при отнесении территории к зоне загрязнения была установлена величина 0,37 кБк/м² (0,01 Ки/км²). Свыше этой величины оказалось загрязнено 4 тыс. км², или почти 2 % площади республики.

По данным 2016 г. [3], площадь загрязнения этими радионуклидами составляет 1,3 % территории республики за пределами зоны эва-

куации (отчуждения). В этом же источнике представлена карта загрязнения Беларуси радионуклидами стронция-90 и плутония-238, -239, -240 (рис. 6). Отметим, что загрязнение изотопами плутония (черные точки на карте) отражено для территорий с плотностью загрязнения выше $3,7 \text{ кБк/м}^2$ ($0,1 \text{ Ки/км}^2$). В то же время согласно законодательству загрязненными считаются территории с плотностью $0,37 \text{ кБк/м}^2$ ($0,01 \text{ Ки/км}^2$).

Недоумение вызывает также отсутствие на этой карте данных по плутонию-241 и его дочернему продукту – америцию-241.

Во-первых, активность выброшенного после аварии плутония-241 была более чем в 50 раз выше, чем у остальных нуклидов плутония вместе взятых [10, 11]. Во-вторых, как уже отмечалось, $\frac{3}{4}$ выброшенного плутония-241 уже превратилось в очень опасный альфа-излучающий америций-241.

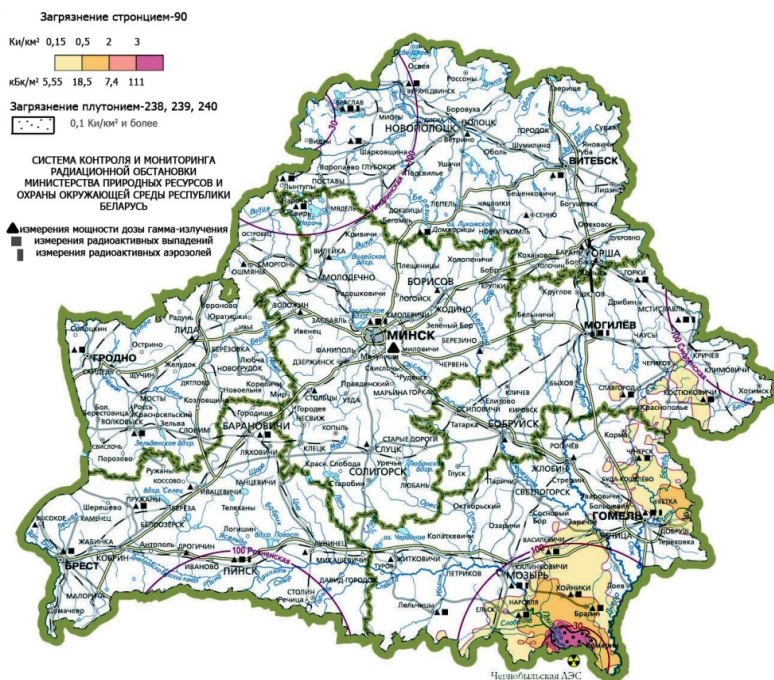


Рис. 6. Загрязнение территории Республики Беларусь радионуклидами стронция-90 и плутония-238, -239, -240 (2016 г.)

Естественно, активность образующегося америция-241 существенно меньше, чем у исходного плутония-241. Дело в том, что америций-241 распадается примерно в 30 раз медленнее, чем плутоний-241, что вытекает из соотношения их периодов полураспада. Тем не менее, уже в наши дни активность америция-241 почти в полтора раза превышает суммарную активность альфа-излучающих изотопов плутония. В связи с этим некоторые зарубежные ученые пишут о «второй волне» чернобыльского загрязнения.

Проблема америция неоднократно поднималась в национальных докладах Республики Беларусь. Так, в [2, 12] отмечалось, что, согласно прогнозам, к 2058 г. удельная активность америция превысит суммарную активность изотопов плутония в 1,8 раза. В [9] отмечалось, что почвенное содержание америция в мобильных и биологически доступных формах выше, чем плутония. Согласно [12], учет америция-241 может привести к увеличению числа населенных пунктов, относящихся к загрязненным. В последнем же официальном издании [3] новая информация по этим вопросам не представлена.

Отметим, что указанная проблема имеет место на территориях, прилегающих к зоне отчуждения. Их доля в общей площади республики мала. Соответственно, невелик и вклад америция-241 в коллективную дозу облучения жителей Беларуси. Однако, по мнению автора, жителей этих территорий необходимо постоянно предупреждать об особой опасности потребления пищевых продуктов («дары» леса, дичь), содержащих трансурановые элементы.

2. ФОРМИРОВАНИЕ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ. ЗАГРЯЗНЕНИЕ ЭКОСИСТЕМ

2.1. Пути облучения человека

До сих пор речь шла, в основном, о достаточно абстрактных радиологических параметрах чернобыльского выброса, в частности, о поверхностной плотности загрязнения территории. Наибольший же интерес представляет вопрос, как велико воздействие чернобыльских выпадений на человека.

Известно, что человек ежесекундно подвергается облучению различной природы. Космическое излучение и излучение радионуклидов, содержащихся в природных объектах, составляют *естественный радиационный фон*. Все более заметный вклад вносят излучения, возникающие вследствие человеческой деятельности – *искусственный (техногенный) радиационный фон*. Это облучение возникает при прохождении некоторых медицинских процедур, вследствие работы ядерных реакторов, испытаний ядерного оружия [13].

Радиационная авария приводит к дополнительному облучению населения. Чернобыльский выброс привел к загрязнению радионуклидами основных компонентов биосферы (среды обитания человека): воздуха, почвы и воды. В свою очередь, это привело к загрязнению важнейших экосистем: флоры, фауны, лесных и луговых систем, сельхозугодий. В результате возникло множество путей дополнительного облучения человека. Их подразделяют на внешнее и внутреннее облучение (рис. 7).

При *внешнем облучении* создающие его источники расположены вне человеческого тела. Источниками внешнего облучения могут служить радионуклиды, находящиеся в озере, на лугу или пашне, в лесу.

Внутреннее облучение происходит, когда радионуклиды с пищей, водой и воздухом попадают в человеческий организм и изнутри воздействуют на его органы или ткани.

Для оценки воздействия радиации на население вводится понятие *среднегодовой эффективной дозы облучения*. Она равна сумме эффективной дозы внешнего облучения, накопленной за календарный год, и ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения, обусловленной годовым поступлением в организм радионуклидов.



Рис. 7. Основные пути облучения человека

Рассмотрим особенности формирования дозы облучения человека в результате чернобыльского выброса. С учетом невысокой проникающей способности бета- и, особенно, альфа-излучения, основным источником внешнего облучения является гамма-излучение цезия-137.

Внутреннее облучение происходит от всех чернобыльских радионуклидов. Как уже отмечалось, бета-излучение стронция-90 опаснее, чем цезия-137, а наибольшую опасность представляет альфа-излучение трансурановых радионуклидов.

Расчет дозы облучения, даже в случае только радиоактивного цезия, сложен. Важнейшей исходной информацией служат данные о распределении на местности плотности загрязнения выпавших радионуклидов цезия.

Необходим учет множества других факторов, не все из которых известны с достаточной точностью, а многие носят случайный характер. Так, для оценки дозы внешнего облучения нужно знать, в каких местах (дом, двор, поле, лес) и какое время находился

человек. Необходимо также учитывать время года и метеорологические условия.

Аналогично, доза внутреннего облучения зависит от того, какие продукты потреблял человек, где они были выращены или собраны. Как следствие, решение задачи в общем виде чрезвычайно сложно.

Учет случайных факторов требует статистического подхода. При этом интересующие величины подвергаются усреднению. Оценивается, например, среднее время нахождения людей в помещении и вне его, усредненный рацион питания жителей и т. п. Вычисление средних значений для каждого человека нереально ввиду трудоемкости такой работы. Обычно используется усреднение по жителям конкретного населенного пункта за один год.

Согласно установленному порядку, с периодичностью 5 лет создается Каталог среднегодовых эффективных доз облучения жителей населенных пунктов Республики Беларусь, который содержит также данные по плотности загрязнения радионуклидами цезия, стронция и плутония. На основании каталога Правительством утверждается Перечень населенных пунктов, относящихся к зонам радиоактивного загрязнения [8].

Схематично процесс формирования дозы можно представить следующим образом (рис. 8).

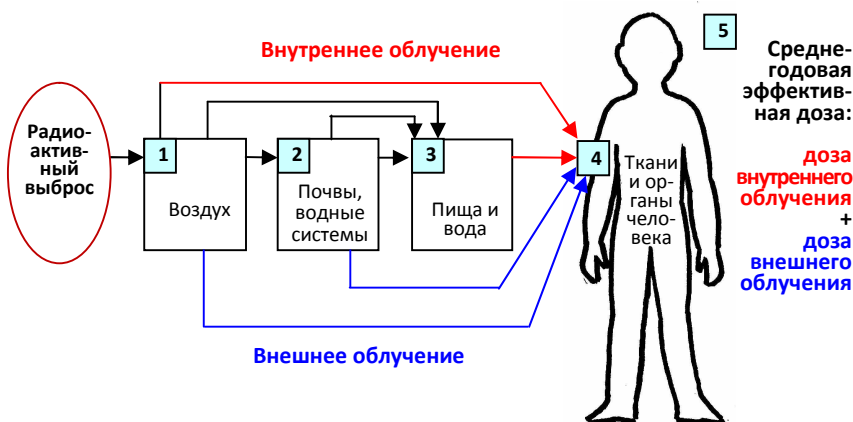


Рис. 8. Схема формирования дозы облучения

Этот процесс проходит через ряд стадий (1–5). Наиболее сложная – 3-я стадия, которая распадается на множество т. н. пищевых цепочек, по которым радионуклиды попадают в пищевые продукты. Эти цепочки могут иметь сложный вид, например: почва–растение–животное–молоко, или вода–водоросли–рыба [13].

Промежуточные стадии (1–4) описываются соответствующими значениями удельной или поверхностной активности радионуклидов. Исходя из этих значений, на последней стадии определяются вклады в дозу и суммарная доза.

На каждой промежуточной стадии, начиная со 2-й, участвует определенная доля радионуклидов от предыдущей стадии. Эта доля называется коэффициентом перехода. Коэффициенты перехода могут иметь размерность. Так, коэффициент K_{23} для одной из пищевых цепочек может представлять собой отношение удельной активности мяса дичи к поверхностной активности почвы. Реальные расчеты усложняются тем, что коэффициенты перехода могут зависеть от ряда факторов: типа почвы, ее влажности и пр. Так, известно, что для ряда районов Брестской области наблюдаются аномально высокие коэффициенты перехода из почвы в растительность.

При переходе к 5-й стадии, на которой образуется доза, также можно использовать своеобразные коэффициенты перехода. Так, K_{25} – эффективная доза внешнего облучения на единицу поверхностной активности почвы. Экспериментальное определение коэффициентов перехода – важная задача ученых.

Для оценки среднегодовых эффективных доз внешнего облучения (в мЗв) при известной поверхностной активности цезия-137 (в Ки/км²) принято использовать значения дозовых коэффициентов, равные 0,038 для жителей сельской местности и 0,022 – для горожан. Так, среднегодовую дозу внешнего облучения жителей сельского населенного пункта, расположенного на территории со средней плотностью загрязнения 185 кБк/м² (5 Ки/ км²), можно оценить значением 0,19 мЗв.

Среднегодовые эффективные дозы внутреннего облучения наиболее точно определяются с использованием т. н. счетчиков излучений человека (СИЧ), измеряющих удельную активность радионуклидов цезия-137 в организме человека. При этом обычно используют коэффициент перехода, равный 2,5 мЗв·кг/кБк.

Одним из законодательных критериев отнесения населенных пунктов к зоне радиоактивного загрязнения служит превышение среднегодовой эффективной дозы величины 1 мЗв (сверх фонового облучения). Полезно знать, что средняя для жителя Земли годовая доза фонового облучения составляет 2,8 мЗв, при этом 2,4 мЗв приходится на естественный фон, а 0,4 мЗв – на искусственный, включая медицинское облучение.

2.2. Загрязнение биосферы (воздух, почва, вода)

Загрязнение воздуха. Радиоактивный выброс в первую очередь привел к загрязнению воздушной среды. Максимальная объемная активность радионуклидов в воздухе наблюдалась в период с 30 апреля по 2 мая 1986 г. В южных районах Беларуси она превышала нормальные дозаварийные уровни в сотни тысяч раз. Даже в Березинском заповеднике, расположенном в 400 км севернее Чернобыля, объемная активность йода-131 достигала 200 Бк/м^3 [2], превышая допустимое значение примерно в 100 раз.

По мере выпадения радионуклидов воздушная среда быстро очищалась. В настоящее время загрязнение воздуха может представлять определенную опасность вблизи зоны отчуждения при проведении сельскохозяйственных работ, когда техника поднимает с поверхности земли клубы пыли, содержащей радионуклиды. При этом, по данным Института радиобиологии НАН Беларуси [7], даже в районах с относительно низкими уровнями загрязнения почв трансурановыми элементами активность плутония в воздухе может достигать опасных значений.

На радиоактивное загрязнение воздуха влияют стихийные явления: пылевые бури, лесные и торфяные пожары, что, в частности, проявилось в 1992 и 2002 гг., когда в результате засушливой погоды произошли многочисленные лесные пожары. В этих случаях существенное загрязнение воздуха возможно на расстоянии нескольких десятков километров.

Загрязнение почвы. Даже на территориях с травяными и лесными покровами в результате дождей, обработки земли и других процессов радионуклиды в значительных количествах попали

в почву. Далее начался процесс их поступления в растительность, животный мир, организм человека.

Одной из важнейших, начальных стадий формирования доз облучения является переход радионуклидов из почвы в растения. В этой связи встает ряд вопросов: что происходит с чернобыльскими радионуклидами после оседания? происходит ли их заглубление в почву или перемещение вдоль поверхности? какова связь радионуклидов с почвой?

Процессы перемещения содержащихся в почве радионуклидов в вертикальном или горизонтальном направлениях, а также перераспределения их между различными химическими состояниями принято называть *миграцией*.

В плане *вертикальной миграции* основные результаты, полученные в этой области учеными, описаны в [2–4]. Преобладающая часть нуклидов, выпавших на почву, в настоящее время находится в верхних ее слоях. Миграция цезия-137 и стронция-90 вглубь происходит очень медленно. Скорость миграции стронция-90 обычно выше, чем цезия-137, особенно в глинистых и песчано-подзолистых почвах. Темпы миграции увеличиваются с возрастанием степени увлажнения почв.

По данным Института почвоведения и агрохимии НАН Беларуси [3], в почвах с ненарушенной дерниной основное количество радионуклидов цезия и стронция содержится в слое на глубине 0–5 см от поверхности.

В дерново-подзолистых и дерново-болотистых почвах 90 % радионуклидов и более сконцентрировано в 0–15-сантиметровом слое почв.

На обрабатываемых дерново-подзолистых и дерново-болотистых почвах 70–90 % радионуклидов равномерно распределено в 25-сантиметровом пахотном горизонте.

Наибольшая интенсивность вертикальной миграции характерна для торфяных почв, где основная доля распределена на глубину до 25 см. На участках с периодическим подтоплением торфяных почв, напротив, возможен подъем растворимых форм радионуклидов к поверхности.

Горизонтальная миграция радионуклидов способна приводить к вторичному загрязнению почв и происходит с ветром, при пожарах, со стоками поверхностных вод, паводковыми и дождевыми потоками. Роль в горизонтальной миграции хозяйственной деятельности человека и перемещения животных незначительна.

Основное количество радионуклидов перемещается по горизонтали с мелкой фракцией почв (пылью) в приземном слое воздуха посредством *ветровой эрозии*, или *дефляции*. Дефляционно-опасные почвы занимают свыше 20 % пахотных угодий Беларуси [2]. Особенно активен перенос мелкозема в весенне-летний период.

Миграция вследствие водной эрозии – с дождевыми осадками и талым стоком – для некоторых элементов рельефа приводит к изменению содержания радионуклидов в пахотном горизонте почв до 1,5–3 раз. Смыв с талым стоком происходит в меньшей степени, чем с дождями.

Химические формы соединений радионуклидов существенно влияют на поступление радионуклидов в растения из почвы. Различают четыре формы: водорастворимая, обменная (растворимая в лабораторных условиях ацетатом аммония), подвижная (растворимая слабым раствором соляной кислоты), неподвижная (связанная или фиксированная). Если радионуклиды находятся в одной из первых трех указанных форм, то возможен их переход в растения [2].

Относительное количество радионуклидов в доступных для растений формах изменяется с течением времени. Оно во многом определяется типом почвы и различно для разных радионуклидов.

По данным Института почвоведения и агрохимии [3], в дерново-подзолистых суглинистых почвах за прошедший после аварии период доля доступных форм цезия-137 уменьшилась до 20 раз по сравнению с 1986 г. и не превышает 5 %. Основная доля радионуклида находится в связанной форме, в том числе – внедренной в кристаллическую решетку глинистых минералов.

Для стронция-90 доля подвижных, доступных для растений форм (преимущественно – обменной), напротив, возрастает и достигает в дерново-подзолистых почвах 70 %, в торфяных – 50 %.

Преобладающая доля изотопов плутония и америция-241 находится в верхнем 10-сантиметровом слое почвы, причем более $\frac{2}{3}$ их активности находится в прочно связанной с минеральными компонентами форме, однако преимущественно – в пылящих фракциях. В доступной растениям форме находятся 3–29 % трансурановых радионуклидов, причем доля америция выше, чем плутония [3].

Водные системы. Значительному загрязнению подверглись водные системы, особенно водосборные территории Днестра,

Припяти и их притоков. Если в начальный период основную роль играло прямое выпадение радионуклидов в воду, то в последующем – вторичное загрязнение, вызванное смывом радионуклидов с территорий водосбора.

В речных системах вне 30-километровой зоны средние концентрации цезия-137 и стронция-90 за период 2006–2014 гг. были выше доаварийных значений, но значительно ниже допустимых уровней для питьевой воды (цезий-137 – 10 Бк/л, стронций-90 – 0,37 Бк/л). При этом содержание радионуклидов в мышечной ткани рыб находилось в допустимых пределах. В реках, водосборы которых частично или полностью находятся на территории зоны отчуждения, например, в поверхностных (0–1 м) водах реки Нижняя Брагинка (д. Гдень), содержание стронция-90 превышало норму в 2–15 раз [3].

Со смывом радионуклидов в речные системы связано явление, называемое трансграничным переносом. Наиболее интенсивно смыв радионуклидов, особенно стронция-90, происходит с территории 30-километровой зоны во время паводков. В результате усиливается перенос радионуклидов Припятью, что приводит к существенному загрязнению ее поверхностных вод на территории Украины. Трансграничный перенос цезия-137 в Беларусь из России с поверхностными водами притоков реки Сож – Ипуть и Беседь – незначителен и не превышает 1 % от общих запасов цезия-137 на водосборе.

Замкнутые системы (озера, пруды, водохранилища), расположенные на сильнозагрязненных территориях Гомельской области, аккумулируют радионуклиды, смываемые с территорий водосбора. Как следствие, объемная активность цезия-137 и стронция-90 в поверхностных водах может превышать санитарно-гигиенические нормативы. Тенденция уменьшения с течением времени активности радионуклидов в таких системах незначительна.

Озера, пруды, водохранилища и мелиоративные системы на загрязненных территориях характеризуются высокими уровнями накопления цезия-137 в донных отложениях, достигающими 49 кБк/кг [3]. Организм рыб в непроточных естественных водоемах может иметь чрезвычайно высокие концентрации цезия-137, достигающие у хищных пород 70 кБк/кг. Эти концентрации прямо зависят от степени загрязнения водоемов.

Подземные водные системы практически не пострадали. В силу слабой вертикальной миграции содержание в них радионуклидов остается практически на доаварийном уровне.

2.3. Загрязнение лесных систем

В результате аварии радиоактивному загрязнению с уровнем выше 37 кБк/м^2 (1 Ки/км^2) подверглось более 2 млн га лесов (22 % всего лесного фонда). В наибольшей степени загрязнены леса Наровлянского, Хойникского, Брагинского, Чечерского, Добрушского, Ветковского, Краснопольского, Славгородского и Чериковского районов. После аварии в состав лесного фонда передали часть сельскохозяйственных земель, что было вызвано невозможностью получения на них нормативно чистой продукции. На этих землях проведено лесоустройство и последующее лесоразведение.

По данным [3], к 2015 г. площадь загрязненных лесов уменьшилась и составила около 1670 тыс. га (17,6 %). Основная их доля находится в ведении Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь (83,4 %) и Департамента по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС Министерства по чрезвычайным ситуациям (12,9 %).

Наибольшая часть загрязненного лесного фонда Минлесхоза относится к зоне с периодическим радиационным контролем (70 %) и к зоне с правом на отселение (21 %), остальная (9 %) – к зонам последующего и первоочередного отселения.

В лесных экосистемах регистрируются наиболее высокие уровни загрязнения цезием-137. Это относится как к растительному, так и животному миру лесов. Сильнее всего загрязнены грибы, ягоды и дичь. Высокий уровень их загрязнения незначительно снижается с течением времени.

В результате имеет место весомый вклад в облучение значительных групп населения от лесной среды (внешнее облучение) и лесной продукции (внутреннее облучение). По этой причине во многих лесах Гомельской, Могилевской, Брестской, Минской и Гродненской областей Министерством лесного хозяйства выделены зоны, в которых запрещены сбор ягод и грибов, заготовка лекарственного сырья.

В 28 лесхозах Гомельской, Могилевской и Брестской областей осуществляется контроль радиационной обстановки на объектах лесного хозяйства: территориях лесхозов, лесничествах, цехов, лесных питомников, лесосеменных участков, пасек. В зонах с плотностью загрязнения почв цезием-137 более 555 кБк/м^2 (15 Ки/км^2)

работники обеспечиваются спецодеждой, индивидуальными дозиметрами для контроля доз внешнего облучения.

По степени накопления цезия-137 деревьями основных лесобразующих пород можно построить следующий восходящий ряд: ель, сосна, ольха, береза, осина, дуб. Несмотря на ограничение лесопользования, около 2 % проб деловой древесины имеют превышение допустимого уровня содержания радионуклидов (1480 Бк/кг). До 30 % проб дров, отобранных в лесхозах Гомельской и Могилевской областей, имеют активность свыше 200 Бк/кг. Это говорит о недопустимости их использования в промышленных котельных установках.

Радиационная обстановка в лесах характеризуется постепенным снижением запаса цезия-137 в почве (2 % в год) и мощности дозы гамма-излучения (2,0–4,4 % в год). Запас цезия-137 в почве снижается за счет радиоактивного распада и поглощения растительностью. Снижение мощности дозы гамма-излучения определяется не только этими факторами, но и миграцией цезия-137 вглубь почвы, экранированием излучения верхними слоями почвы и подстилкой.

В результате вертикальной миграции центр запаса цезия-137 в почве находится на глубине 3–6 см, т. е. в зоне размещения основных питающих растения корней. Этим и объясняется продолжающийся переход этого радионуклида в растения. В последние годы содержание цезия в растительности превысило 10 % от общего содержания в лесных экосистемах. При этом наименьшее содержание цезия-137 обнаруживается в верхнем древесном ярусе, наибольшее – в живом напочвенном покрове.

Максимальное накопление цезия-137 в растениях напочвенного покрова отмечается в споровых растениях (папоротники, мхи) и в растениях семейств брусничных, осоковых, лилейных, первоцветных, вересковых, гвоздичных, норичниковых.

Из пищевой продукции леса наиболее загрязнены грибы и ягоды (черника, клюква, брусника). По данным ГУ «Беллесозащита» [3], ежегодно бракуются 20–45 % измеренных проб грибов и ягод, собранных в местах, разрешенных для заготовки. Содержание радионуклидов в этих пробах может превышать допустимые уровни даже на территориях с незначительной (около 37 кБк/м²) плотностью загрязнения почвы.

В 2015 г. наибольшие уровни содержания цезия-137 в дикорастущих грибах отмечены в лесхозах Гомельской (37,2 кБк/кг) и Брестской (22,8 кБк/кг) областей. Поэтому при сборе грибов

на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению, необходимо соблюдать правила лесопользования. Разрешено собирать грибы при плотности загрязнения до $7,4 \text{ кБк/м}^2$ (2 Ки/км^2) с обязательным радиометрическим контролем.

Следует помнить, что в меньшей степени накапливают радионуклиды дождевик, зонтик, опенок, лисичка, черный груздь, подберезовик, белый гриб, подосиновик. В большей – сыроежка, волнушка, моховик, масленок, польский гриб, свинушка.

К самым «чистым» лесным продуктам относится березовый сок, среднее содержание радионуклидов в котором составляет менее 14 Бк/л при норме 370 Бк/л . При контроле содержания цезия-137 в меде, заготовленном на пчелопасеках лесхозов в 2015 г., среднее значение удельной активности не превышало 50 Бк/кг при норме 3700 Бк/кг .

Для животных накопление радионуклидов в основном соответствует загрязнению территории их обитания. Наиболее высокие уровни содержания радионуклидов у представителей различных видов фауны наблюдались в 30-километровой зоне в первые годы после аварии.

В конце 80-х гг. прошлого века произошло заметное снижение этих уровней (в 5–10 раз). В последующий период темпы снижения существенно замедлились, в настоящее время наблюдается тенденция к стабилизации содержания радионуклидов в организме животных.

Оценка загрязненности мяса диких животных вследствие большого ареала их обитания имеет значительную неопределенность. Диапазон содержания цезия-137 в мясе диких животных на загрязненных территориях составляет от единиц до 50–70 тыс. Бк/кг .

Среди охотничье-промысловых видов млекопитающих наибольшая концентрация радионуклидов наблюдается у всеядных (кабан). Она во многом определяется климатическими особенностями текущего года и зависит от сезона. В 2015 г. введен запрет на проведение охоты на этот вид.

Хищные млекопитающие как конечные звенья трофической (пищевой) цепи характеризуются наиболее высокими уровнями содержания радионуклидов.

Максимальное содержание цезия-137 у птиц, являющихся объектами охоты, отмечено у серых куропаток и уток.

Исследования [2] показывают, что в ближайшие годы существенного снижения в содержании радионуклидов у диких животных

не предвидится. При этом обитание животных в загрязненных радионуклидами биогеоценозах (сообществах живых организмов в пределах одной территории) не привело к заметным радиационным эффектам на популяционном уровне.

2.4. Радиоактивное загрязнение и сельское хозяйство

Наряду с лесными продуктами сельскохозяйственная продукция, содержащая радионуклиды, является весомым источником внутреннего облучения человека. Как следствие, необходимо выполнение комплекса дорогостоящих мероприятий, направленных на снижение доз облучения населения.

Авария нанесла сельскому хозяйству и прямой урон. Как будет отмечено в следующем разделе, свыше 30 % суммарного ущерба, нанесенного Беларуси чернобыльской аварией приходится на агропромышленный комплекс.

Непосредственно после аварии площадь сельскохозяйственных территорий, находящихся в зоне радиоактивного загрязнения, составляла 1800 тыс. га, а их доля – 20,8 % [12].

С 1986 по 1991 г. на наиболее загрязненных территориях в связи с отселением людей были ликвидированы 54 сельхозпредприятия, выведены из сельскохозяйственного оборота 264 тыс. га (3 %) земель. Это привело к снижению валового сбора сельскохозяйственных культур, уменьшению поголовья скота, но значительно уменьшило объем продукции с высоким содержанием радионуклидов. Часть загрязненных территорий (18 %) так и осталась в сельскохозяйственном обороте.

Ситуация в пострадавших районах существенно зависит от принадлежности к той или иной *зоне радиоактивного загрязнения*.

Зона отчуждения – наиболее загрязненная территория площадью около 170 тысяч га, с которой в 1986 г. было эвакуировано население (24,7 тыс. чел.). Иногда ее называют 30-километровой зоной, но это достаточно условно, поскольку границы зоны имеют сложную форму. Основная часть зоны отчуждения находится в Брагинском, Хойникском и Наровлянском районах. В доаварийный период здесь работали 25 сельхозпредприятий в 92 населенных пунктах.

Эти земли вошли в состав Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (ПГРЭЗ), где действует особый правовой режим. Здесь выпало 97 % наиболее опасных трансурановых

радионуклидов, 73 % стронция-90 и 30 % цезия-137 [3], поэтому эти земли даже в отдаленной перспективе не могут быть возвращены в сельскохозяйственный оборот. В 1993 г. после уточнения радиационной обстановки площадь заповедника составила 216 тыс. га [2].

Зона первоочередного (плотность загрязнения цезием-137 – свыше 1480 кБк/м² (40 Ки/км²)) и **зона последующего отселения** (555–1480 кБк/м² (15–40 Ки/км²)). Отселение жителей и выведение земель из оборота происходили в 1986–1989 гг. Наибольшее количество земель было выведено в Брагинском, Ветковском, Хойникском, Наровлянском, Добрушском районах Гомельской области, Костюковичском, Краснопольском, Славгородском и Чериковском районах Могилевской области. На этих территориях было ликвидировано почти 20 сельхозорганизаций.

Зона с правом на отселение (плотность загрязнения – 185–555 кБк/м² (5–15 Ки/км²)). Численность проживающего здесь населения за прошедшие годы уменьшилась примерно в 3 раза и на 2015 г. составляла 112 тыс. чел. [3]. На этих территориях ведение сельского хозяйства продолжается.

Зона проживания с периодическим радиационным контролем (плотность загрязнения – 37–185 кБк/м² (1–5 Ки/км²)). В этой зоне разрешены проживание жителей (при условии непревышения среднегодовой эффективной дозы значения 1 мЗв) и ведение хозяйственной деятельности. Это наиболее обширная зона, в 2015 г. здесь проживало около 1,03 млн чел. [3].

К 2015 г., согласно [3], доля загрязненных сельскохозяйственных земель снизилась с 20,8 до 12,5 % (941 тыс. га). Это объясняется рядом причин, в первую очередь, переходом части земель в категорию незагрязненных вследствие естественного распада радионуклидов. По зонам радиоактивного загрязнения сельскохозяйственные угодья распределены следующим образом: в зоне последующего отселения находится 2,6 %, с правом на отселение – 18,6 %, с периодическим радиационным контролем – 78,7 %.

Часть ранее выведенных из оборота земель с невысокой плотностью загрязнения радионуклидами цезия-137 и стронция-90, где возможно получение нормативно чистой продукции, была возвращена в сельскохозяйственное пользование. Она составляет 17,5 тыс. га, то есть менее 7 % выведенных земель. Такой возврат осуществляется только после тщательного радиационного обследования.

До сих пор рассматривались сельскохозяйственные земли в целом. Аналогичная картина складывается по отдельности для пашни

и многолетних насаждений, а также сенокосов и пастбищ. Заметим, что из 941 тыс. га загрязненных сельскохозяйственных земель пашня и многолетние насаждения занимают 577 тыс. га, сенокосы и пастбища – 364 тыс. га.

На рис. 9 представлена общая картина радиоактивного загрязнения цезием-137 районов Беларуси, в которых ведется сельскохозяйственное производство [14]. Основные массивы загрязненных земель сосредоточены в Гомельской (46,5 % площади) и Могилевской (23,0%) областях. В Брестской, Гродненской и Минской областях доли загрязненных земель составляют 4,4 %, 1,9 и 3,1% соответственно.

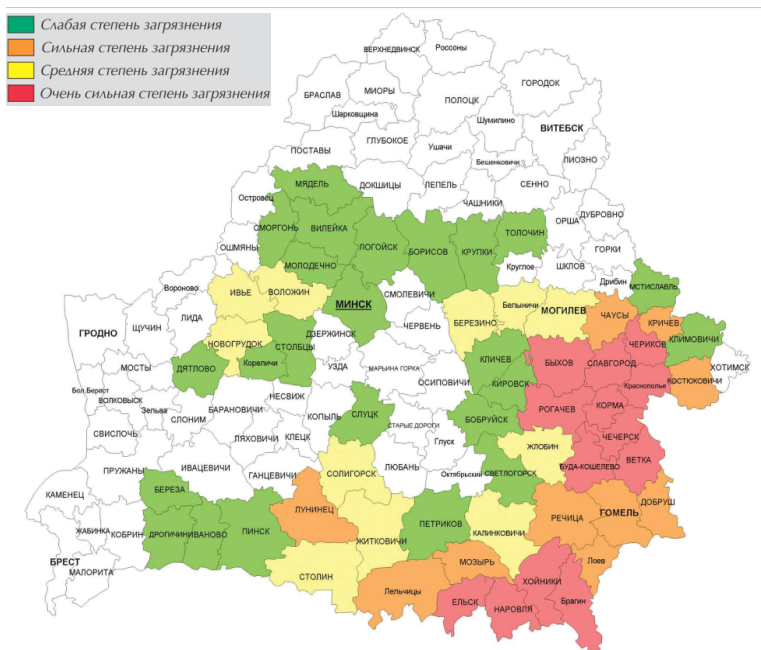


Рис. 9. Картограмма районов по степени загрязненности земель цезием-137

Выше подробно рассматривалось загрязнение сельскохозяйственных земель цезием-137 и не анализировалась ситуация на территориях, загрязненных стронцием-90 и трансурановыми элементами. На общей картине это сказывается мало, потому что такие территории, как правило, одновременно загрязнены и цезием-137.

Ситуация со стронцием-90 представлена на рис. 10.

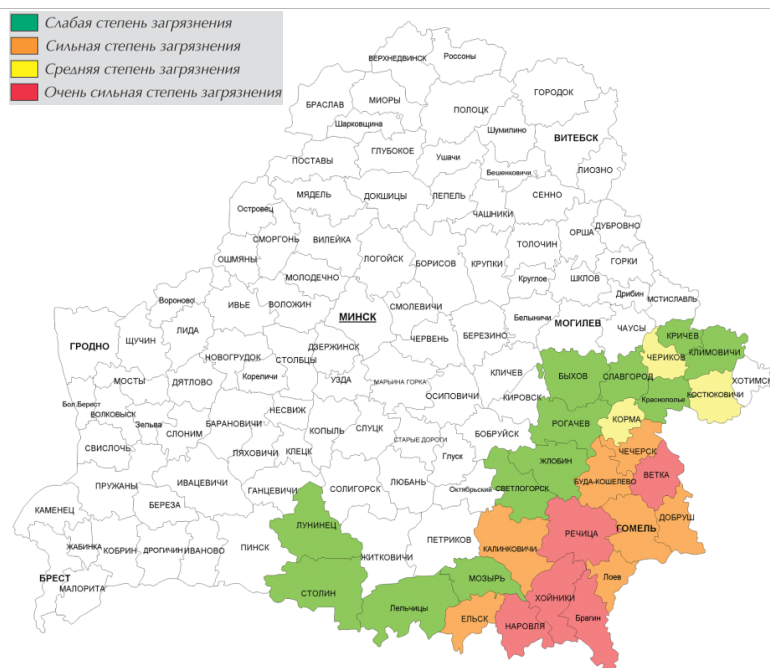


Рис. 10. Картограмма районов по степени загрязненности земель стронцием-90

Отметим, что загрязнение наиболее высокой степени наблюдается в Брагинском, Ветковском, Хойникском, Наровлянском, Речицком районах, Костюковичском, Краснопольском, Славгородском и Чериковском районах [14].

В разделе 1.4 отмечалось, что загрязнение трансурановыми элементами охватывает значительно меньшие территории. Это загрязнение, как и загрязнение стронцием, вызывает специфические проблемы. Одна из них заключается в том, что контроль содержания трансурановых радионуклидов и стронция-90 как в почве, так и в сельхозпродукции значительно сложнее, чем в случае цезия-137.

С первых дней после аварии значительные усилия специалистов и ученых были направлены на снижение перехода радионуклидов из почвы в растения и другие пищевые цепочки, получение сельскохозяйственной продукции с содержанием радионуклидов в пределах, разработанных и законодательно утвержденных допустимых

уровней. В результате сложилась достаточно полная и эффективная система защитных мер, представленная в табл. 2 [3].

Таблица 2

Система защитных мероприятий в сельскохозяйственном производстве

Мероприятия			
организационные	технологические	агрохимические	зооветеринарные
• исключение земель из пользования; • изменение отраслевой специализации хозяйств (перепрофилирование); • оптимизация землепользования, структуры посевов и севооборота на основе подбора сельхозкультур; создание культурных пастбищ и сенокосов	• первичная поверхностная очистка и промывка продукции; • предварительная технологическая обработка; • глубокая технологическая переработка	• известкование кислых почв; • внесение оптимальных доз фосфорных и калийных удобрений; • оптимизация азотного питания растений; • применение микроудобрений; • использование средств защиты растений	• использование специальных кормовых рационов для различных видов животных, с учетом возраста и хозяйственного назначения; • регулирование пастбищного содержания животных, раздельный выпас скота для производства цельного молока и молока-сырья; • применение цезийсвязывающих ферроцинсодержащих добавок к кормам

Подробную информацию об особенностях этих мероприятий с конкретными примерами можно найти в [2, 12, 14].

Согласно [3], наиболее эффективными являются: известкование кислых почв, внесение повышенных доз минеральных и органических удобрений, подбор культур и сортов, использование химических средств защиты растений.

Эти меры не только повышают урожайность культур и плодородие почв, но и уменьшают переход радионуклидов из почвы в растения. Значительный эффект приносит создание культурных кормовых угодий в сельскохозяйственных организациях и личных подсобных хозяйствах, использование комбикормов с цезийсвязывающими добавками.

3. МЕДИЦИНСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ЧЕРНОБЫЛЯ

3.1. Дозы облучения и здоровье населения

Вопросы доз облучения и здоровья населения, общие для России, Беларуси и Украины, подробно рассмотрены автором в [1] на основании данных авторитетных международных источников [11, 15]. Ниже представлены основные выводы [1, 11, 15], дополненные данными последних медицинских исследований, проведенных в Беларуси [3].

Анализ медицинских радиологических последствий аварии требует знания доз облучения, полученных различными группами населения. Необходимая информация [11] содержится в табл. 3.

Таблица 3

Оценки доз для основных групп населения, подвергшихся облучению в результате чернобыльской аварии

Группа населения	Размер группы (тыс. чел.)	Средняя доза на щитовидную железу, 1986 г. (мГр)	Средняя эффективная доза за 1986–2005 гг. (мЗв)
Ликвидаторы	530	Нет достоверных данных для всей группы	117 (только за счет внешнего облучения в 1986–1990 гг.)
Эвакуированные	115	490	31 (без учета дозы на щитовидную железу)
Жители загрязненных территорий Беларуси, России и Украины (плотность загрязнения выше 37 кБк/м ²)	6 400	102	9 (без учета дозы на щитовидную железу)
Жители Беларуси, Украины и 19 наиболее пострадавших регионов России	98 000	16	1,3 (без учета дозы на щитовидную железу)
Жители отдаленных стран (за исключением Беларуси, России, Украины, Турции, кавказских стран, Андорры и Сан-Марино)	500 000	1,3	0,3 (без учета дозы на щитовидную железу)
Для сравнения:		Эффективная доза для всего тела от естественного фона за 2 месяца – 0,4 мЗв	Эффективная доза для всего тела от естественного фона за 10 лет – 24 мЗв

Для лучшего понимания данных табл. 3 необходимо сделать следующие замечания.

Есть смысл отдельно рассматривать дозы облучения щитовидной железы короткоживущими радионуклидами, среди которых преобладал йод-131. Последствия этого облучения уже проявились, в то время как облучение долгоживущими радионуклидами еще продолжается. Как уже отмечалось, воздействие радионуклидов йода на население было чрезвычайно интенсивным, а эффекты облучения щитовидной железы йодом-131 оказались значительно сильнее, чем для других чернобыльских радионуклидов, относительно равномерно облучающих организм.

Эффекты облучения принято делить на *детерминированные и стохастические*. В случае детерминированных эффектов в организме гибнет значительное число клеток (острая лучевая болезнь – ОЛБ). Это происходит, когда поглощенная доза превышает пороговое значение, составляющее около $1 \text{ Гр} = 1000 \text{ мГр}$.

При меньших значениях поглощенной дозы основную роль играет не гибель, а *мутация* клеток, что влечет за собой стохастические (вероятностные) эффекты. Мутация обычных, соматических (греч. *soma* – тело) клеток может стать причиной рака, в том числе лейкоза. Мутация половых клеток проявляется в генетических, то есть передающихся по наследству, последствиях.

Для описания стохастических эффектов с учетом как внешнего, так и внутреннего облучения принято использовать *эффективную дозу*, выражаемую в зивертах (Зв). Делать достаточно точные прогнозы стохастических эффектов можно лишь в случаях, когда облучению подвергается значительное число лиц (когорта).

Отметим, что для описания облучения щитовидной железы, как и для детерминированных эффектов, принято использовать *поглощенную дозу*, выражаемую в грях (Гр). В большинстве других случаев, когда речь идет о стохастических эффектах облучения всего тела, используют эффективную дозу. При этом в большинстве случаев ее численное значение при равномерном облучении всего тела близко по величине к поглощенной дозе.

Чтобы определить, насколько велики дозы, приведенные в табл. 3, напомним, что человек постоянно подвергается воздействию естественного фона и источников, появившихся в результате деятельности человека (техногенный фон). Напомним, что средняя

годовая эффективная доза облучения жителя Земли составляет около 2,8 мЗв, из них 2,4 мЗв приходится на естественный фон, 0,4 мЗв – на техногенный.

Будем считать, что облучение радиоактивным йодом длилось около 2 месяцев – за это время распалось более 99 % его количества. Полученная за то же время эффективная доза естественного фона для всего тела составляет одну шестую от 2,4 мЗв, то есть 0,4 мЗв.

Таким образом, данные третьего столбца табл. 3 говорят о том, что дозы облучения щитовидной железы жителей Беларуси йодом-131 значительно превышали дозы от естественного облучения. Особенно велико это превышение было для эвакуированных и жителей загрязненных районов.

Чтобы сделать выводы об облучении долгоживущими радионуклидами (4-й столбец табл. 3), учтем, что за 10 лет (1986–2005 гг.) эффективная доза от естественного фона составила около 24 мЗв. Таким образом, говорить о существенном превышении фонового уровня радиации можно только для таких категорий населения, как ликвидаторы и эвакуированные.

Эти несложные рассуждения во многом предвосхищают выводы современной науки о медицинских последствиях чернобыльской аварии.

3.2. Медицинские последствия

К самым ранним медицинским последствиям чернобыльской аварии относится острая лучевая болезнь у персонала станции и аварийных работников. Она стала следствием огромных доз облучения от всех выпавших радионуклидов. Наибольшие дозы, составлявшие от 2 до 20 Гр, получили примерно 1000 человек, которые находились рядом с реактором в момент взрыва и первые дни после него [15]. Из них 237 человек прошли первоначальное обследование с целью выявления острой лучевой болезни. В последующем диагноз ОЛБ был подтвержден у 134 пациентов. Из них 28 человек скончались в 1986 г. несмотря на активное лечение, в том числе трансплантацию красного костного мозга.

Согласно [3], белорусские ликвидаторы не были облучены в дозах, способных вызвать детерминированные эффекты для здоровья.

Уже проявившимся и достоверно установленным медицинским последствием чернобыльской аварии является заболеваемость раком щитовидной железы, что явилось прямым следствием высоких доз облучения йодом-131.

Дозы облучения щитовидной железы у детей младшего возраста (до 7 лет) в Беларуси оказались в 1,5–4 раза выше, чем у детей старшего возраста и взрослых [3]. Одна из причин в том, что, осевший на пастбища, радиоактивный йод концентрировался в молоке коров, а молоко и молочные продукты составляют значительную долю в рационе питания детей и подростков. Ситуация усугублялась общим дефицитом йода в рационе питания жителей, что привело к стремительному накоплению йода-131 в щитовидной железе.

Резкий всплеск заболеваемости раком щитовидной железы начал отмечаться примерно через 5 лет после аварии (спустя так называемый латентный, или скрытый, период). Заболеваемость взрослого населения увеличилась более чем в 7 раз. К 2002 г. у взрослых было выявлено 6460 случаев рака щитовидной железы [5].

Пик заболеваемости детей (до 14 лет) отмечался в период 1995–1996 гг., когда уровень заболеваемости по отношению к 1986 г. увеличился в 40 раз. За период 1986–2004 гг. среди лиц, облученных в возрасте 0–18 лет, выявлено 2430 случаев рака щитовидной железы [2].

После этого в республике наметилась тенденция к стабилизации показателя заболеваемости, а в последние годы – и к его снижению до популяционного уровня [3].

Следует отметить работу белорусских медиков. В результате раннего обнаружения и своевременного медицинского вмешательства с использованием разработанных методов диагностики, профилактики и лечения возможные летальные исходы удалось свести к минимуму. Разработанные методы лечения снизили летальность до 0,9 % (мировые показатели около – 10 %) [2].

Йодного удара можно было избежать путем *йодной профилактики*, а также запретом на несколько недель потребления молока и листовых овощей. Одной из немногих стран, сумевших в полной мере и достаточно своевременно провести йодную профилактику, была Польша [11].

В первые недели после аварии преобладающим источником облучения был йод-131, в дальнейшем основным источником

формирования доз облучения как внешнего, так и внутреннего, стал (и остается) цезий-137. Это облучение имеет сравнительно небольшую мощность дозы, но продолжится еще несколько десятилетий. Оно может вызвать только стохастические последствия.

Эффекты облучения такого рода изучены мало. Большинство используемых моделей оценки в основном базируются на данных по жертвам атомных бомбардировок. Представители этой когорты получили высокие дозы радиации за относительно короткий период времени, в то время как воздействие радиации на население после чернобыльской аварии происходит при низких дозах, но в течение длительного времени.

Рассмотрим возможные онкологические заболевания в результате повышенных доз облучения. Ранее считалось, что в первую очередь действие ионизирующего излучения должно приводить к лейкемии (лейкозу), то есть образованию злокачественных клеток крови. Повышенный риск развития лейкемии был впервые выявлен среди людей, переживших атомные бомбардировки в Японии, в интервале от 2 до 5 лет после воздействия радиации.

Данные международного доклада [11] свидетельствуют о росте в 2 раза заболеваемости лейкемией среди ликвидаторов чернобыльской аварии, подвергшихся наибольшему облучению. Среди детского и взрослого населения загрязненных районов значимого роста не обнаружено.

Согласно данным последних медицинских исследований, проведенных в Беларуси [3], с 1978 по 2014 г. заболеваемость лейкозами увеличилась с 2,2 до 7,8 случаев на 100 тыс. населения. В отличие от заболеваемости раком щитовидной железы за этот длительный период не наблюдалось существенных всплесков в темпах прироста, что не позволяет связать наблюдающийся рост с последствиями аварии на ЧАЭС.

Более высокий показатель заболеваемости лейкозами по сравнению с популяционным уровнем отмечался в группе белорусских ликвидаторов. В последние годы риск заболеваемости лейкозами в этой когорте снижался, но остался выше популяционного и до настоящего времени (за период 2010–2014 гг. – в 1,4 раза).

У населения, эвакуированного и проживающего на территории радиоактивного загрязнения, а также среди детей (0–14 лет

на момент диагноза) за последние 30 лет риск заболеваемости лейкозами не отличался от популяционного уровня.

В [3] утверждается, что проведенными до настоящего времени исследованиями не удалось напрямую связать увеличение частоты других, помимо рака щитовидной железы, локализаций злокачественных новообразований с действием аварийного облучения. Согласно [11], даже для ликвидаторов заметной связи роста такой заболеваемости с полученной дозой не установлено.

В предыдущем разделе отмечалось, что в слабозагрязненных районах Беларуси дозы облучения жителей не превышают уровней естественного фона. Эта часть населения за 20 лет после аварии накопила дозы, эквивалентные тем, которые получают за один сеанс рентгеновской компьютерной томографии тела. Согласно [11], при таких дозах может произойти до 0,6 % случаев смерти, ожидаемых в результате других причин. Обнаружить такой прирост на фоне естественных колебаний смертности и определить, какие конкретные случаи рака были вызваны радиацией, практически невозможно.

С учетом этого в докладе экспертов Всемирной организации здравоохранения [15] утверждается, что радиологические медицинские последствия чернобыльской аварии для населения не могут быть классифицированы как значительные.

Выводы последнего доклада Научного комитета ООН по действию атомной радиации [11] еще более оптимистичны: «На сегодняшний день для когорт жителей Беларуси, Российской Федерации, Украины и других стран Европы, получивших средние эффективные дозы менее 30 мЗв в течение 20 лет, отсутствуют убедительные данные для прогнозирования их радиогенной заболеваемости и смертности с разумной определенностью».

При этом отмечается, что отсутствие заметного роста риска развития рака и других радиологических последствий, за исключением рака щитовидной железы, не является доказательством того, что такого роста не произошло. Дело в том, что обнаружить такой рост чрезвычайно трудно, поэтому эксперты сходятся во мнении, что необходимы дальнейшие эпидемиологические исследования с широким участием мирового научного сообщества.

3.3. Нерадиологические последствия

Наименее изучены медицинские последствия Чернобыля, которые не связаны напрямую с действием радиации. Очевидно, что целый ряд факторов, и в первую очередь, – переселение, не могли не сказаться на общем состоянии здоровья населения.

После аварии в Республике Беларусь было эвакуировано 138 тыс. чел. Около 200 тыс. чел. покинули места своего проживания самостоятельно [9]. Это снизило дозы облучения переселенцев, но большинству из них нанесло глубокую психологическую травму.

Подавляющая часть населения пострадавших территорий проживала в сельской местности. Для многих людей существенным источником благосостояния была продукция частных хозяйств, производимая для собственного потребления и на продажу. Повышенное содержание радионуклидов в этой продукции привело как к опасности ее потребления самими производителями, так и к трудностям реализации на рынке. Многочисленные запретительные меры были направлены на снижение доз облучения, однако они входили в серьезное противоречие со сложившимся укладом жизни.

Для многих людей переселение было сопряжено с потерей имущества. Для других, особенно людей пожилого возраста, возникли проблемы с адаптацией. Опросы показывают, что часть переселенцев хотела бы вернуться в родные места.

Миллионы людей испытали чувства беспокойства и замешательства, ощущали отсутствие физического и эмоционального благополучия. Особенно остро переживались угроза здоровью нынешнего и будущего поколений, утрата экономической стабильности, разрыв социальных связей. Стрессовая ситуация была усугублена неадекватным информированием.

В результате эвакуации и добровольной миграции демографическая ситуация в пострадавших районах оказалась нарушенной. Интенсивнее других уезжали молодежь, интеллигенция, квалифицированные специалисты.

В некоторых районах на загрязненных территориях пенсионеров стало больше, чем трудоспособного населения, в результате чего смертность превысила рождаемость. Последний факт способствует распространению убеждения об опасности проживания в загрязненных районах, что дестабилизирует ситуацию. Аналогично,

отток учителей, врачей и специалистов приводит к снижению качества инфраструктуры, а неразвитая инфраструктура делает условия жизни малопривлекательными для молодежи.

Таким образом, авария оказала глубокое воздействие на психическое здоровье и благополучие целого поколения людей. Возникающим отклонениям трудно поставить медицинский диагноз и описать их количественно. У людей, пострадавших от аварии, по сей день наблюдаются тяжелые стрессовые и тревожные состояния, а также не объяснимые с медицинской точки зрения физические симптомы.

Для части пострадавшего населения характерны: ощущение беспомощности и неспособности контролировать будущее; чрезмерная обеспокоенность в отношении своего здоровья. Для другой части, напротив, характерно вызывающе неосторожное поведение: например, злоупотребление алкоголем и табаком, сбор грибов и ягод или развлечения в зонах, где имеются предупреждающие знаки о высоких уровнях радиации, и пр. В этой связи специалисты говорят о синдроме «чернобыльской жертвы».

Следует отметить, что на состоянии здоровья людей не могли не сказаться и другие факторы. В их числе: существовавшие на пострадавших территориях проблемы общей экологии; снижение уровня жизни после распада СССР, что привело к общему увеличению смертности и сокращению продолжительности жизни. Все они, наряду с проявлениями стресса, еще больше затрудняют анализ медицинских последствий чернобыльской аварии.

4. НАНЕСЕННЫЙ УЩЕРБ И ЕГО ПРЕОДОЛЕНИЕ

4.1. Экономический ущерб

Чернобыльская катастрофа оказала негативное воздействие на все сферы жизнедеятельности человека. Как уже было отмечено, в наибольшей степени пострадало сельское хозяйство, значительный урон нанесен лесному хозяйству.

Кроме того, в зонах отселения оказалось 57 месторождений минерально-сырьевых и других ресурсов. Из-за радиоактивного загрязнения были ограничены поисково-разведочные работы в южной части Припятской нефтегазоносной области (оцененный ресурс – 25,3 млн т нефти) [7].

В зоне загрязнения находилось около 340 промышленных предприятий, для которых условия функционирования существенно ухудшились. В связи с отселением жителей из наиболее пострадавших районов деятельность ряда предприятий и объектов социальной сферы была прекращена. Другие же понесли большие потери и убытки от снижения объемов производства, неполной окупаемости средств, вложенных в здания, сооружения, оборудование, мелиоративные системы.

По данным Института экономики НАН Беларуси, суммарный ущерб, нанесенный чернобыльской аварией, в расчете на 30-летний период ее преодоления, оценивается в 235 млрд дол. США, что составляет (по ценам 1985 г.) 32 бюджета Республики Беларусь [7].

В структуре общего ущерба (рис. 11) прямые и косвенные потери составляют около 13 %.

Прямые потери включают стоимость выведенной из использования составной части национального богатства республики: основные и оборотные производственные фонды, объекты социальной инфраструктуры, жилье и природные ресурсы.

К косвенным потерям отнесены: потери, обусловленные влиянием экономических и социальных факторов (условия жизни, быта, состояние здоровья населения), вызвавших нарушение или прекращение производства; снижение производительности труда; увеличение стоимости и сложности обеспечения других объектов

государственной, кооперативной и личной собственности; потери от миграции населения из загрязненных регионов.

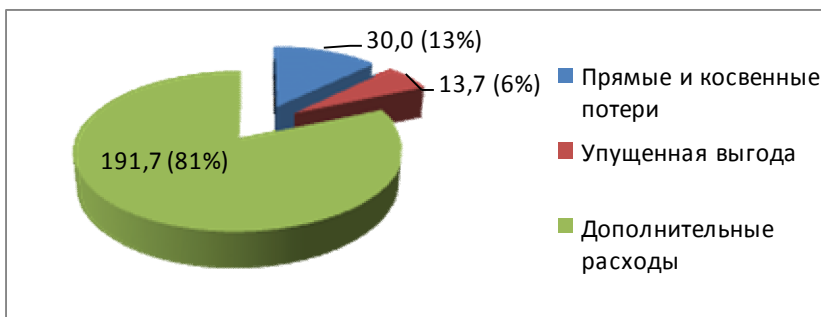


Рис. 11. Структура ущерба, нанесенного Республике Беларусь в результате чернобыльской аварии, млрд дол. США, (%)

Составляющими упущенной выгоды (6 %) являются: сокращение объемов выпуска продукции, работ и услуг на загрязненных территориях; стоимость непригодной из-за радиационного загрязнения продукции; дополнительные затраты по восполнению недополученной продукции; затраты на восстановление утраченного качества продукции; потери от расторжения контрактов, аннулирования проектов, замораживания кредитов, выплаты штрафов, пени, неустоек и др.

Наибольшую долю (81 %) занимают затраты, связанные с поддержанием функционирования производства и осуществлением защитных мер, которые составляют 191,7 млрд дол. США. Это расходы по преодолению последствий аварии и обеспечению нормального функционирования различных отраслей народного хозяйства в зонах радиоактивного загрязнения, включая создание безопасных условий жизнедеятельности населения.

К ним также относятся расходы по компенсации последствий действия негативных факторов; стоимость дополнительных ресурсов, привлекаемых для компенсации потерь и упущенной выгоды; затраты на работы по дезактивации и организации контроля за радиационной обстановкой.

Структура нанесенного ущерба по отраслям производства представлена на рис. 12 [3].



Рис. 12. Отраслевая структура социально-экономического ущерба Республики Беларусь от аварии на Чернобыльской АЭС за период 1986–2015 гг., %

Проведенная оценка ущерба не является окончательной, поскольку причинно-следственные связи, отражающие воздействие аварии на различные стороны жизнедеятельности, достаточно сложны. Наука до сих пор не располагает исчерпывающей информацией о медико-биологических и социальных последствиях чернобыльской аварии.

Таким образом, чернобыльская катастрофа поставила загрязненные территории в сложные социально-экономические условия. В таких условиях речь можно вести лишь о длительном процессе реабилитации, который подразумевает поэтапное введение в народнохозяйственную сферу утраченного потенциала по мере создания безопасных условий для проживания людей и развития тех отраслей, деятельность которых возможна без ущерба для здоровья населения.

В течение ряда лет выводы белорусских ученых и специалистов о масштабах социально-экономических последствий чернобыльской катастрофы для республики оспаривались как представителями мирового сообщества, так экспертами России и Украины. Вердикт по данному вопросу был вынесен на Международной конференции «15 лет чернобыльской катастрофы. Опыт преодоления» [16].

В совместном докладе от Украины, Беларуси и России [16] были подтверждены расчеты белорусских специалистов. Суммарный

экономический ущерб Украины оценен в 201 млрд дол. США. Представители Российской Федерации сослались на утерю данных и высказали мнение, что ущерб России не столь значителен в связи с отсутствием эвакуации населения из зоны отчуждения.

Сказанное нашло отражение в официальных выводах конференции, где зафиксировано, что «прямые потери и косвенный ущерб, понесенные вследствие аварии на ЧАЭС, составили для Беларуси, России и Украины за прошедшие 15 лет сотни миллиардов долларов США».

Было подчеркнуто, что размеры социально-экономического ущерба для Беларуси и Украины несоизмеримы с их реальными экономическими возможностями для устранения последствий аварии в ближайшие годы. Эти страны по-прежнему нуждаются в помощи международного сообщества.

4.2. Деятельность государства по преодолению последствий чернойбыльской аварии

Первоочередные мероприятия по преодолению последствий аварии в республике велись, когда она находилась в составе СССР. В эти годы были приняты и реализованы решения об эвакуации населения из зон загрязнения, организованы работы по устранению последствий аварии на самой станции, куда были привлечены сотни тысяч человек со всего бывшего СССР, в том числе из Беларуси. Йодная профилактика для части переселенцев впервые была организована 2 мая (для остальных категорий граждан не применялась) [12]. Силами инженерных войск и гражданской обороны проводилась массовая дезактивация населенных пунктов. В результате удалось достичь некоторого смягчения радиационной обстановки.

Были введены временные допустимые нормы содержания йода в питьевой воде и других продуктах питания; предельные дозы облучения для населения; допустимые уровни радиоактивного загрязнения помещений, транспортных средств, продуктов питания, которые позже неоднократно пересматривались.

Правительством БССР только за период с 5 мая по 9 декабря 1986 г. было разработано и утверждено 32 нормативных документа, направленных на проведение защитных мероприятий. В 1989 г. XI сессией Верховного Совета БССР была одобрена Государственная

программа преодоления в Белорусской ССР последствий аварии на Чернобыльской АЭС на 1990–1995 гг. и до 2000 г. На этой же сессии республика была объявлена зоной национального экологического бедствия [7].

В апреле 1990 г. Верховным Советом СССР была утверждена Государственная союзно-республиканская программа неотложных мер по ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС.

После распада Советского Союза была утверждена Государственная программа по преодолению в Республике Беларусь последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС на 1993–1995 гг. и на период до 2000 г. В настоящее время выполняется шестая по счету Государственная программа по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС на 2016–2020 г.

Все эти годы деятельность государства по преодолению последствий аварии отличал научно-обоснованный, программно-целевой подход. Другие важные черты: четкая система управления и координации деятельности, адекватное решаемым задачам финансирование.

Как разработка, так и реализация программ осуществляются в тесном взаимодействии с учеными. Самое активное участие ученые принимают на этапах разработки концепции каждой программы, а также долгосрочных прогнозов.

Сама программа представляет собой многостраничный документ, согласованный с множеством участвующих в ее исполнении органов государственного управления. В каждой программе четко определены цель и задачи, блоки мероприятий, их заказчики и исполнители, этапы и сроки выполнения, объемы финансирования, ожидаемые результаты.

Координацию всех работ осуществляет уполномоченный орган государственного управления. В разные годы эту роль исполняли: Государственный комитет по проблемам последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС (Госкомчернобыль), Министерство по чрезвычайным ситуациям и защите населения от последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС, МЧС, Комитет по проблемам последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС при МЧС (Комчернобыль), Комчернобыль при Совете Министров Республики Беларусь; в настоящее время – Департамент по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС МЧС.

На выполнение Государственных программ с 1991 г. направлены из бюджета средства, эквивалентные около 20 млрд дол. США (рис. 13) [3]. Годовое финансирование программ в начале 90-х гг. доходило до четверти бюджета страны.

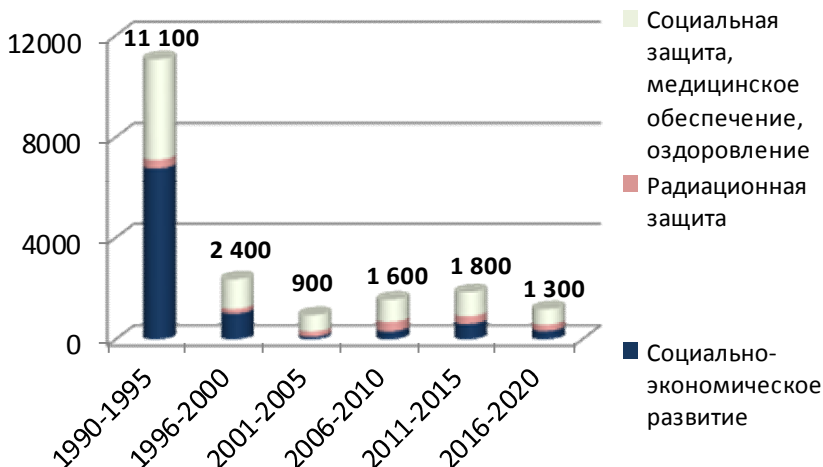


Рис. 13. Финансирование Государственных программ по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС, млн дол. США

Неизменные приоритеты всех государственных программ — социальная защита и медицинское обеспечение пострадавшего населения, радиационная защита, социально-экономическое развитие пострадавших районов. В трех первых программах значительные капитальные вложения направлялись в обустройство эвакуированных людей на «чистых» территориях.

С 1998 г. выполняются Программы совместной деятельности по преодолению последствий чернобыльской катастрофы в рамках Союза Беларуси и России. Союзные чернобыльские программы дополняют государственные программы обеих стран.

По состоянию на 2016 г. были выполнены три Союзные чернобыльские программы, исполнялась четвертая. Источник их финансирования — бюджет Союзного государства. Финансирование программы на 2013–2016 гг. осуществлялось в объеме 1 303 млн рос. руб., Республике Беларусь было выделено

521 млн рос. руб. Белорусской частью программы было запланировано выполнение почти 100 мероприятий, предусматривалась закупка около 600 единиц техники и оборудования [3].

4.3. Решенные задачи

Благодаря реализации пяти государственных и трех Союзных черновыльских программ эффективно решен ряд важнейших задач.

1. Создана нормативная правовая база по всем направлениям преодоления последствий аварии.

Приняты Законы Республики Беларусь: «О социальной защите граждан, пострадавших от катастрофы на Чернобыльской АЭС», «О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС», «О радиационной безопасности населения».

В числе других важных документов: Перечень населенных пунктов и объектов, находящихся в зонах радиоактивного загрязнения, Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов цезия и стронция в пищевых продуктах и пищевой воде (РДУ–99); Регламент лесохозяйственной деятельности на загрязненных территориях; Рекомендации по ведению агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель; Положение о контроле радиоактивного загрязнения.

2. Действует система социальной защиты всех категорий пострадавшего населения.

Ежегодно на эту статью направлялось около 50 % всех выделяемых средств. В наибольшей мере социальными льготами пользуются участники ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС, ставшие инвалидами вследствие аварии – 6278 тыс. чел. (2016 г.). Ежегодно около 60 тыс. чел., проживающих на территориях радиоактивного загрязнения, из которых 42 тыс. – дети, получают бесплатное санаторно-курортное лечение и оздоровление [3]. Значимая социальная поддержка – бесплатное питание детей, проживающих на загрязненных территориях. Его получают свыше 100 тыс. школьников и учащихся.

3. Создана система медицинского наблюдения, диспансеризации, диагностики и лечения заболеваний, что позволило не допустить

значительного роста заболеваемости ликвидаторов аварии, пострадавшего населения.

Углубленное медицинское обследование ежегодно проходит население зон радиоактивного загрязнения – около 1,5 млн чел. Обеспечен тщательный контроль состояния здоровья 72,5 тыс. участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС [3]. Созданы новые медицинские учреждения и центры, осуществляется комплекс мер по повышению уровня медицинского обслуживания.

4. Завершено переселение из наиболее загрязненных районов около 138 тыс. чел.

Переселение проводилось из 471 населенного пункта (295 – в Гомельской, 174 – Могилевской и 2 – в Брестской областях). Для переселенцев построено 68 тыс. квартир с необходимой инфраструктурой и сервисом (дороги, газо- и водопроводы, больницы, школы, детские сады) [2].

5. Защитные меры в агропромышленном комплексе и лесном хозяйстве обеспечивают производство продукции, удовлетворяющей действующим нормативам.

Основной результат проведенных работ – снижение поступления цезия-137 в сельхозпродукцию в 15–20 раз. Согласно [3], это снижение примерно в эквивалентной степени обусловлено как проведением контрмер, так и природными факторами распада и фиксации почвой радионуклидов цезия.

Ряд последних лет зерно, картофель, овощи в общественном секторе производятся с содержанием цезия-137 в 2–10 раз ниже допустимых уровней (РДУ–99). Применение метода предубойного откорма животных кормами с низким содержанием радионуклидов в рационе позволило, начиная с 2011 г., исключить возврат скота с мясокомбинатов по результатам прижизненного радиационного контроля. С 2014 г. на перерабатывающие предприятия не поступало загрязненное молоко [3].

В результате создания улучшенных сенокосов и пастбищ для личных подсобных хозяйств норматив по содержанию цезия-137 превышался лишь в отдельных населенных пунктах в единичных случаях.

Поступление стронция-90 в пищевые цепочки снижено примерно в 4 раза. Это снижение произошло в большей мере за счет защитных мер и распада радионуклида, так как подвижность стронция в почве и доступность его растениям растет.

6. Создана и эффективно функционирует система контроля радиоактивного загрязнения производимой продукции и объектов окружающей среды.

Цель этих работ – обеспечение радиационной защиты населения. Конкретно речь идет о том, чтобы не допустить превышения установленного законодательством предела среднегодовой эффективной дозы облучения (1 мЗв сверх фоновых значений).

В текущем периоде преобладающий вклад в дозу вносит внутреннее облучение, возникающее за счет потребления содержащих радионуклиды продуктов питания. С учетом этого установлены Республиканские допустимые нормы (РДУ–99) для содержания радионуклидов в продуктах питания и питьевой воде. Нормы устанавливаются таким образом, чтобы для усредненного рациона питания человека гарантированно обеспечивалось не превышение годового предела эффективной дозы.

Соблюдение норм обеспечивается радиационным контролем продуктов питания, в основе которого лежат методы *радиометрии* и *спектрометрии*. Всего в республике функционируют около 810 подразделений радиационного контроля (515 – в Минсельхозпрод), используется более 2000 единиц радиометрического и спектрометрического оборудования [3].

Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды, сельского хозяйства и продовольствия, лесного хозяйства, здравоохранения, коммунальных ресурсов и другие органы государственного управления осуществляют непрерывный контроль (мониторинг) состояния воздушных, водных, почвенных систем, лесов, сельскохозяйственной продукции, в том числе в личных подсобных хозяйствах, питьевой воды, сточных вод и др.

7. Ведется необходимый комплекс работ по содержанию отчужденных и отселенных территорий, в том числе в наиболее загрязненной зоне, где создан Полесский государственный радиационно-экологический заповедник (ПГРЭЗ).

Основными задачами ПГРЭЗ являются: защита лесов, предотвращение пожаров, проведение научных исследований. На территориях зон отчуждения создан особый правовой режим, ведутся охранные мероприятия. Функционирует специальный орган – Администрация зон отчуждения и отселения, работающий в 13 загрязненных районах Гомельской и Могилевской областей.

8. Развернута система подготовки и повышения квалификации кадров, информирования населения по проблемам чернобыльской аварии.

Подготовку специалистов по радиоэкологии, радиобиологии, радиационной безопасности осуществляют учреждения образования «Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова» (МГЭИ) при БГУ, «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия». Повышение квалификации специалистов-радиологов ведется в Белорусском государственном аграрном техническом университете, МГЭИ, Гомельском государственном университете им. Ф. Скорины. Головная организация по информированию населения – Белорусское отделение российско-белорусского информационного центра по проблемам катастрофы на Чернобыльской АЭС (БОРБИЦ).

9. Организовано и осуществляется научное обеспечение работ по преодолению последствий чернобыльской аварии.

Головными организациями научно-исследовательских работ по чернобыльской тематике являются расположенные в Гомеле: Институт радиологии (сельское хозяйство), Институт радиобиологии (отдаленные последствия аварии), Республиканский научно-практический центр радиационной медицины и экологии человека.

10. Разработана и выпускается современная приборная база для измерения и контроля ионизирующих излучений.

Радиометры, спектрометры, дозиметры отечественных предприятий «Атомтех», «Полимастер», «Тимет» «Адани» не только составили полную линейку приборов для задач контроля радиоактивно-го загрязнения Беларуси, но и широко реализуются за рубежом.

11. Проводится значительная работа по привлечению внимания мирового сообщества к проблемам последствий аварии в Беларуси.

Эта деятельность проявляется во множестве аспектов: от подготовки международных конференций, семинаров, встреч, визитов до инициирования и продвижения резолюций Генеральной Ассамблеи ООН, других международных форумов. Сюда же входит работа во множестве международных комитетов и организаций, подготовка и реализация программ и проектов помощи Беларуси, в том числе по оздоровлению детей.

Международное сообщество высоко оценивает деятельность по преодолению последствий чернобыльской аварии в Республике Беларусь. Это нашло свое отражение во многих документах, в частности, в Докладе Всемирного банка [17], результатах работы

Чернобыльского форума [18], выводах крупнейших международных конференций [16, 19].

Более подробную информацию о деятельности государства по преодолению последствий чернобыльской аварии можно найти в [2–4, 7, 9, 12].

В заключение отметим, что одной из самых актуальных задач остается снижение доз облучения населения путем проведения защитных мероприятий, особенно в аграрной сфере. Ведение сельского хозяйства на загрязненных территориях по сей день является проблемным и будет оставаться таким еще в течение десятилетий. Резкое снижение объема защитных мероприятий, а такие локальные прецеденты имели место, неминуемо приводит к повышению содержания радионуклидов в продукции АПК.

Проведенный к настоящему времени комплекс защитных мер позволил минимизировать объемы производства сельскохозяйственного сырья и продукции, не отвечающей требованиям РДУ. Однако для гарантированного поступления на стол потребителя нормативно чистых продуктов питания необходимо поддерживать эффективное функционирование службы радиационного контроля в АПК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гурачевский, В.Л. Введение в атомную энергетику. Чернобыльская авария и ее последствия / В.Л. Гурачевский. – Минск : Институт радиологии. – 2014. – 176 с.
2. 20 лет после чернобыльской катастрофы. Последствия в Республике Беларусь и их преодоление. Национальный доклад / под ред. В.Е. Шевчука, В.Л. Гурачевского. – Минск : Беларусь, 2006. – 112 с.
3. 30 лет чернобыльской аварии: итоги и перспективы преодоления ее последствий. Национальный доклад Республики Беларусь. – Минск : Министерство по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, 2016. – 116 с.
4. Последствия Чернобыля в Беларуси: 17 лет спустя. Национальный доклад / под ред. В.Е. Шевчука, В.Л. Гурачевского. – Минск : Пропилен, 2003. – 54 с.
5. Кенигсберг, Я.Э. Облучение щитовидной железы жителей Беларуси вследствие чернобыльской аварии: дозы и эффекты / Я.Э. Кенигсберг, Ю.Е. Крюк. – Гомель : Институт радиологии, 2004. – 121 с.
6. Атлас загрязнения Европы цезием-137 после чернобыльской аварии. Люксембургское бюро для официальных изданий европейских сообществ. – Великобритания : Эдинбургское изд-во, 1998. – 71 с.
7. Чернобыльская авария: последствия и их преодоление. Национальный доклад Республики Беларусь / под ред. Е.Ф. Конопки, И.В. Ролевича. – 2 изд. – Барановичи : Укрупн. тип., 1998. – 102 с.
8. Национальный Интернет-портал Республики Беларусь [Электронный ресурс] / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2016. – URL: <http://www.government.by>. – Дата обращения: 03.03.2017.
9. Четверть века после чернобыльской катастрофы: итоги и перспективы преодоления. Национальный доклад Республики Беларусь. – Минск : Институт радиологии, 2011. – 90 с.
10. Экологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС и их преодоление: двадцатилетний опыт. Доклад экспертной группы «Экология» Чернобыльского форума. – Вена : МАГАТЭ, 2008. – 180 с.

11. Последствия облучения для здоровья человека в результате чернобыльской аварии. Научное приложение D к докладу НКДАР Генеральной Ассамблеи ООН 2008 года. – Нью-Йорк : ООН, 2012. – 173 с.

12. 15 лет после чернобыльской катастрофы: последствия в Республике Беларусь и их преодоление. Национальный доклад Республики Беларусь / под ред. В.Е. Шевчука, В.Л. Гурачевского. – Минск : Триолета, 2001. – 118 с.

13. Соколик, Г.А. Основы радиоэкологии и безопасной жизнедеятельности. Пособие для учителей / Г.А. Соколик, С.В. Овсянникова, С.Л. Лейнова [и др.]. – Минск : Тонпик, 2008. – 368 с.

14. Научные основы реабилитации сельскохозяйственных территорий, загрязненных в результате крупных радиационных аварий / под ред. Н.Н. Цыбулько. – Минск : Институт радиологии, 2012. – 439 с.

15. Медицинские последствия чернобыльской аварии и специальные программы здравоохранения. Доклад экспертной группы «Здоровье» Чернобыльского форума. – Женева : ООН, 2006. – 182 с.

16. Пятнадцать лет чернобыльской катастрофы. Опыт преодоления : материалы Междунар. конф., Киев, 18–20 апреля 2001 г. – Киев : Чернобыльинтеринформ, 2001. – С. 146–148.

17. Национальный Интернет-портал Республики Беларусь [Электронный ресурс] / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2017. – URL: <http://www.cernobyl.gov.by>. – Дата обращения: 19.02.2017.

18. Наследие Чернобыля: Медицинские, экологические и социально-экономические последствия и рекомендации правительствам Беларуси, Российской Федерации и Украины. Выводы Чернобыльского Форума ООН, 2005 г. – Austria : IAEA, 2006. – 58 с.

19. Основные выводы Международной конференции «Чернобыль 20 лет спустя. Стратегия восстановления и устойчивого развития пострадавших регионов», Минск, 19–21 апреля 2006 г. – Гомель : Институт радиологии, 2006. – 13 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Используемые единицы измерения

Величина	Обозначение (название)
Активность	Бк (беккерель), <i>внесистемная</i> – Ки (кюри) $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$
Удельная активность	Бк/кг
Объемная активность	Бк/л
Поверхностная активность (плотность загрязнения)	Бк/м ² , <i>внесистемная</i> – Ки/км ² $1 \text{ Ки/км}^2 = 37 \text{ кБк/м}^2$
Поглощенная доза	Гр (грей)
Эквивалентная доза	Зв (зиверт)
Эффективная доза	Зв (зиверт)
Мощность дозы	Зв/ч
Энергия	Дж (джоуль), <i>внесистемная</i> – эВ (электронвольт) $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$

Кратные приставки к единицам измерения

Обозначение	Название	Значение	Пример
мк	микро	$10^{-6} = 0,000\ 001$	$1 \text{ мкЗв/ч} = 10^{-6} \text{ Зв/ч}$
м	милли	$10^{-3} = 0,001$	$1 \text{ мГр} = 10^{-3} \text{ Гр}$
к	кило	$10^3 = 1000$	$1 \text{ кБк} = 10^3 \text{ Бк}$
М	мега	$10^6 = 1\ 000\ 000$	$1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ}$

ГЛОССАРИЙ

Активность А – основная величина радиометрии. Одновременно характеризует число радиоактивных распадов, происходящих в объекте за единицу времени, интенсивность испускаемого им излучения и содержание в нем радионуклидов. Измеряется в беккерелях. Внесистемная единица – кюри.

Активность объемная – активность единицы объема объекта, измеряемая в Бк/м³ и производных единицах, чаще – в Бк/л.

Активность поверхностная – активность единицы поверхности объекта, измеряемая в Бк/м² ($1 \text{ Ки/км}^2 = 37 \text{ кБк/м}^2$).

Активность удельная – активность единицы массы объекта, измеряемая в Бк/кг.

Альфа-излучение (α -излучение) – один из типов излучений радиоактивных ядер (ядерных излучений), представляющий собой поток альфа-частиц, то есть частиц, состоящих из двух протонов и двух нейтронов. Энергия альфа-частиц лежит в диапазоне 2–15 МэВ.

α -излучение обладает малой величиной пробега в веществе. Если источник излучения находится вне организма (внешнее облучение), то он практически не может причинить вреда, поскольку испускаемые частицы поглощаются одеждой и поверхностным ороговевшим слоем кожи (исключение – воздействие на глаза, слизистые оболочки и ранки).

При внутреннем облучении альфа-частицы наиболее опасны. Они интенсивно отдают свою энергию в небольшом объеме вещества, сильно ионизируя его. Имея значительную массу, альфа-частицы способны непосредственно разрушать молекулы биологических тканей, в том числе молекулы ДНК, повреждать клетки.

Альфа-распад – одна из разновидностей распада радионуклидов, когда из ядра излучается альфа-частица и образуется т. н. дочернее ядро, (которое может быть как стабильным, так и радиоактивным).

Беккерель (Бк) – системная единица измерения активности, представляющая собой активность такого объекта, в котором за 1 секунду происходит один радиоактивный распад.

Бета-излучение (β -излучение) – один из типов излучений радиоактивных ядер, представляющий собой поток электронов или позитронов высокой энергии (от 2 кэВ до 12 МэВ и выше).

β -излучение обладает большей, чем α -излучение, проникающей способностью. При внешнем облучении за счет ионизации и возбуждения атомов могут сильно пострадать поверхностные слои тела. Если же источник бета-частиц поступил в организм, ионизируются и возбуждаются атомы в близлежащих к месту поступления органах или тканях.

Бета-распад – разновидность распада радионуклидов, когда из ядра излучается электрон (или позитрон) и образуется т. н. дочернее ядро, которое может быть как стабильным, так и радиоактивным.

Взвешивающие множители излучения – коэффициенты, зависящие от типа излучения (альфа-, бета-, гамма- и др.), на которые нужно умножить величину поглощенной дозы, чтобы получить значение эквивалентной дозы. Они равны: 1 – для гамма- и бета-излучения, 20 – для альфа-излучения.

Внешнее облучение – облучение радиоактивными источниками, расположенными вне человеческого тела.

Внутреннее облучение – облучение радионуклидами, попавшими в организм человека с пищей, водой, вдыхаемым воздухом.

Гамма-излучение (γ -излучение) – один из типов излучений радиоактивных ядер, который можно рассматривать двояко: как жесткую (с высокими частотой и энергией) электромагнитную волну либо как поток частиц – гамма-квантов, не имеющих заряда и массы покоя.

γ -излучение сопутствует альфа- и бета-распаду в тех случаях, когда дочернее ядро возникает в возбужденном, то есть с избытком энергии, состоянии. Энергия гамма-кванта может лежать в диапазоне примерно от 10 кэВ до 10 МэВ.

Гамма-излучение передает свою энергию веществу, порождая в нем вторичные электроны (см. *Ионизирующие излучения*). В силу высокой проникающей способности значительная часть гамма-квантов может покинуть организм, не вызвав в нем никаких эффектов. В то же время вторичные электроны от тех гамма-квантов, которые все-таки испытали взаимодействие с веществом, могут возникать в большом объеме организма. Каждый из этих электронов, обладая высокой

энергией, ведет себя тождественно бета-частице, то есть ионизирует и возбуждает атомы на своем пути.

Глобальные выпадения радионуклидов – выпадения продуктов ядерных взрывов, попавших в стратосферу и, как следствие, распространившихся на значительные расстояния. Являются одним из источников радиационного фона.

Грей (Гр) – системная единица измерения поглощенной дозы, представляющая собой дозу такого облучения, при котором в 1 кг массы объекта поглощается энергия в 1 Дж.

Детерминированные эффекты – эффекты непосредственного воздействия облучения, при котором в организме гибнут живые клетки. Проявляются в острой лучевой болезни (ОЛБ) и в некоторых других заболеваниях (например катаракта). Наблюдаются при поглощенной дозе, превышающей определенные пороговые значения. Для ОЛБ такой порог составляет около 1 Гр, дозу порядка 10 Гр принято считать смертельной. Заболеваемость катарактой наблюдается при меньших дозах, начиная с $0,25 \text{ Гр} = 250 \text{ мГр}$.

Доза – понятие, являющееся мерой воздействия радиации на объект (облучения).

Доза, поглощенная D , – базовая дозиметрическая величина, численно равная энергии излучения, поглощенной в единице массы организма, и измеряемая в греях. Используется в основном при описании детерминированных эффектов.

Доза, эквивалентная H , – нормируемая дозиметрическая величина, используемая для нахождения риска стохастических эффектов в отдельном органе или ткани человека с учетом типа излучения (альфа-, бета-, гамма- и др.). Численно равна произведению поглощенной дозы в органе или ткани на взвешивающий множитель излучения.

Доза, эффективная E , – нормируемая дозиметрическая величина, используемая для нахождения риска стохастических эффектов в организме человека, с учетом неодинаковой чувствительности различных органов или тканей к воздействию облучения. Численно равна сумме произведений эквивалентных доз в отдельных органах и тканях на соответствующие тканевые множители.

Мощность дозы – величина, характеризующая уровень радиации. Вводится для любой из рассмотренных выше дозиметрических величин и численно равна приращению дозы в единицу времени.

Среднегодовая эффективная доза – эффективная доза, получаемая человеком за один год, равная сумме доз от внешнего и внутреннего облучения.

Дозиметр – прибор для измерения или оценки тех или иных дозиметрических величин (см. *Доза*).

Дозиметрия – область знания, изучающая воздействие радиации (точнее, ионизирующих излучений) на различные объекты, прежде всего, – человека.

Дозовые пределы для населения и профессионалов – предельно допустимые значения среднегодовой эффективной дозы, установленные Законом Республики Беларусь «О радиационной безопасности населения». Они составляют 1 мЗв – для населения и 20 мЗв – для профессионалов, с некоторыми оговорками. В частности, не учитываются дозы за счет радиационного фона (естественного и техногенного).

Допустимые уровни содержания радионуклидов – нормативные акты, содержащие предельно допустимые значения удельной или объемной активности радионуклидов в пищевой продукции (см. *РДВ-99*), воде, сырье, продукции лесного хозяйства и др. Служат основой системы радиационного контроля.

Зиверт (Зв) – единица измерения эквивалентной и эффективной дозы облучения. 1 Зв соответствует 1 Гр в том случае, если равномерно облучаются все органы человека, причем только бета- или гамма-излучением.

Широко распространены кратные единицы: $1 \text{ мЗв} = 10^{-3} \text{ Зв}$, $1 \text{ мкЗв} = 10^{-6} \text{ Зв}$.

Зонирование территорий – отнесение территорий и населенных пунктов к одной из зон радиоактивного загрязнения. Установлено законом Республики Беларусь «О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС». (В упрощенном виде зонирование представлено в табл.)

Решение об отнесении к определенной зоне принимается в случае превышения порогового уровня хотя бы одной величиной из четырех: среднегодовая эффективная доза облучения, плотность загрязнения цезием, стронцием или изотопами плутония.

Наименование зоны	Эффективная доза, мЗв/год	Плотность загрязнения, кБк/м ² (Ки/км ²)		
		Цезий-137	Стронций-90	Плутоний-238 -239, -240
с периодическим радиационным контролем	< 1	37–185 (1–5)	5,55–18,5 (0,15–0,5)	0,37–0,74 (0,01–0,02)
с правом на отселение	1–5	185–555 (5–15)	18,5–74 (0,5–2,0)	0,74–1,85 (0,02–0,05)
последующего отселения	> 5	555–1480 (15–40)	74–111 (2–3)	1,85–3,7 (0,05–0,10)
первоочередного отселения	> 5	> 1480 (> 40)	> 111 (> 3)	> 3,7 (> 0,1)
эвакуации (отчуждения)	Территория, с которой было эвакуировано население			

Излучение – перенос энергии от некоторого объекта (источника) в окружающее пространство. Такой перенос может осуществляться двояко: потоком частиц (например, альфа- и бета-излучение) или волнами, в том числе электромагнитными (например, рентгеновское и гамма-излучение). В соответствии с этим излучения в ядерной физике делят на корпускулярные и электромагнитные. Несмотря на то, что электромагнитное излучение в современной физике также можно рассматривать и как поток частиц – фотонов (поэтому электромагнитные излучения часто называют фотонными), такое деление уместно, потому что фотоны – особые частицы: у них нет ни заряда, ни массы (покоя).

Интенсивность излучения – характеристика источника излучения, численно равная числу частиц, испускаемых в единицу времени. Часто термином интенсивность характеризуют поток излучения, при этом число частиц относят не только ко времени, но и к площади поверхности, через которую оно проходит.

Ионизация – выбивание электрона из атома вещества заряженной частицей (например, альфа- или бета-, или вторичным электроном, который возник при взаимодействии гамма-кванта с веществом) с энергией, превышающей определенное пороговое значение (в среднем – около 30 электронвольт). Ионизация часто сопровождается возбуждением атома. При этом ему передается избыточная энергия, которая вскоре высвобождается путем испускания фотона.

Ионизирующие излучения – излучения, способные к ионизации вещества. Излучения, состоящие из заряженных частиц, таких как альфа- и бета-, относятся к непосредственно ионизирующим. Излучения, состоящие из незаряженных частиц, в том числе рентгеновское и гамма-, также способны к ионизации благодаря трем эффектам их взаимодействия с веществом: фотоэффекту, Комптон-эффекту и эффекту образования пар. В результате этих эффектов образуются вторичные заряженные частицы (электроны, а иногда – позитроны) высокой энергии, которые и ионизируют вещество. Такой механизм ионизации называется косвенным.

Йодная профилактика – одна из мер, направленных на снижение аварийного поступления радиоактивного йода в щитовидную железу. Она заключается в приеме йодсодержащих препаратов (обычно – йодистого калия) до или в первые часы после радиационной аварии. При этом содержащийся в препаратах стабильный йод «насыщает» щитовидную железу, что препятствует поступлению в нее радиоактивного йода. Рекомендуемая медиками доза составляет 0,125 г для взрослых и детей старше 2 лет; 0,04 г – для детей до 2 лет. При отсутствии таблеток йодистого калия допустимо использовать другие йодсодержащие препараты: спиртовую настойку йода или раствор Люголя. Однако их применение рассматривается медиками как исключительная мера в связи с более высокой токсичностью атомарного йода, входящего в состав данных растворов.

Кюри (Ки) – внесистемная единица измерения активности, равная активности одного грамма радия. $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$.

Мутация – изменение структур (молекулы ДНК), ответственных за хранение и передачу наследственной информации в процессе деления клеток.

Мощность дозы – см. *Доза*.

Нормируемые величины – дозиметрические величины, для которых установлены нормы (пределы); в их числе – эквивалентная и эффективная дозы. Находятся расчетным путем, исходя из поглощенной дозы.

Облучение – воздействие излучения. Пусковыми механизмами, инициирующими большинство негативных процессов в организме при облучении, являются ионизация и возбуждение атомов. При этом энергия излучения передается электронам атомов, входящих в состав молекулярных соединений. Как следствие, может происходить разрыв химических связей, приводящий к распаду молекул.

Наиболее губителен этот процесс для сложных молекул (белки, ферменты, нуклеиновые кислоты, гормоны и другие, жизненно важные, вещества, являющиеся основными компонентами клетки). В результате распада и повреждений они теряют свои биологические функции. Такой механизм облучения называется прямым.

Если же излучение воздействует на атомы воды и низкомолекулярных соединений, таких как сахара, аминокислоты, имеет место косвенный механизм. Распад этих молекул (радиолиз) приводит к образованию так называемых свободных радикалов, которые обладают большой реакционной способностью и вызывают повреждения в высокомолекулярных соединениях.

Объемная активность (ОА) – см. *Активность*.

Период полураспада ($T_{1/2}$) – время, за которое распадается половина радионуклидов, содержащихся в объекте. Спустя следующий такой период распадается половина от оставшейся половины радионуклидов. Таким образом, с течением времени содержание радионуклидов и их активность изменяются по закону убывающей геометрической прогрессии, точнее, по убывающей экспоненциальной зависимости.

Поверхностная активность (плотность загрязнения) – см. *Активность*.

Поглощенная доза – см. *Доза*.

Радиоактивность – явление распада некоторых ядер (радионуклидов), сопровождающееся испусканием излучений, в том числе альфа-, бета- и гамма-излучением.

Радиационный контроль (контроль радиоактивного загрязнения) – контроль содержания радионуклидов в продукции и доз облучения на соответствие установленным допустимым уровням и дозовым пределам.

Радиационный фон – ионизирующее излучение, в условиях которого постоянно находится человек. Радиационный фон создает определенное облучение человека. Среднегодовая эффективная доза облучения жителя Земли за счет естественного и искусственного радиационного фона составляет около 2,8 мЗв.

Естественный радиационный фон (около 2,4 мЗв) – имеет две составляющие. Одна из них обусловлена космическим излучением (потoki частиц и электромагнитного излучения, испускаемые

естественными термоядерными реакторами – Солнцем, другими звездами и космическими объектами). Другая – излучением радионуклидов, содержащихся в земной коре, и как следствие, – в большинстве окружающих человека предметов.

Техногенный (искусственный) радиационный фон (около 0,4 мЗв) – составляющая фона, вызванная деятельностью человека (использование источников ионизирующего излучения, работа АЭС, испытания ядерного оружия и др.). Около 99 % техногенного фона обусловлено медицинскими процедурами.

Радияция – поток ионизирующего излучения.

Радиометр – прибор для измерения величин, зависящих от содержания радионуклидов в объекте, прежде всего активности (в том числе удельной, объемной и поверхностной).

Радиометрия – совокупность методов и средств измерения активности и некоторых других характеристик источников излучения.

Радионуклид – радиоактивное ядро. Любое вещество в природе имеет несколько разновидностей, атомы которых называют изотопами. Ядра (нуклиды) этих разновидностей отличаются только числом нейтронов, а число протонов Z и, как следствие, число электронов в атоме для всех разновидностей одинаково. Поэтому все изотопы определенного элемента одинаковы по химическим свойствам. Однако некоторые нуклиды каждого элемента могут быть радиоактивными. Это имеет место в случаях нарушения определенного баланса между числом протонов и нейтронов. В окружающем нас мире свойством радиоактивности обладает небольшая часть нуклидов каждого из не очень тяжелых элементов. Например, в природном калии ($Z = 19$) содержится лишь 0,012 % радиоактивного изотопа калий-40. В таких же объектах, как Солнце, звезды, ядерные реакторы радионуклиды различных элементов возникают в значительном количестве.

Радиоактивны все возможные нуклиды урана ($Z = 92$) и элементов тяжелее его, то есть расположенных ниже в таблице Менделеева (плутоний, нептуний, америций и т. д.).

Радионуклид, как и любое другое ядро (нуклид), характеризуется числом протонов Z (таково же число электронов в атоме соответствующего изотопа и номер элемента в периодической системе Менделеева) и массовым числом A , то есть суммарным числом протонов и нейтронов. В сокращенном обозначении нуклида пишут только

название элемента и массовое число A, например: цезий-137, или Cs-137, ^{137}Cs . Полное обозначение содержит и A и Z, например: $^{137}\text{Cs}_{55}$.

РДУ–99 – Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов в пищевых продуктах и питьевой воде:

для цезия-137

Наименование продукта	Бк/кг, Бк/л
1. Вода питьевая	10
2. Молоко и цельномолочная продукция	100
3. Молоко сгущенное и концентрированное	200
4. Творог и творожные изделия	50
5. Сыры сычужные и плавленые	50
6. Масло коровье	100
7. Мясо и мясные продукты, в том числе:	
7.1. Говядина, баранина и продукты из них	500
7.2. Свинина, птица и продукты из них	180
8. Картофель	80
9. Хлеб и хлебобулочные изделия	40
10. Мука, крупы, сахар	60
11. Жиры растительные	40
12. Жиры животные и маргарин	100
13. Овощи и корнеплоды	100
14. Фрукты	40
15. Садовые ягоды	70
16. Консервированные продукты из овощей, фруктов и ягод садовых	74
17. Дикорастущие ягоды и консервированные продукты из них	185
18. Грибы свежие	370
19. Грибы сушеные	2500
20. Специализированные продукты детского питания в готовом для употребления виде	37
21. Прочие продукты питания	370

для стронция-90

Наименование продукта	Бк/кг, Бк/л
1. Вода питьевая	0,37
2. Молоко и цельномолочная продукция	3,70
3. Хлеб и хлебобулочные изделия	3,70
4. Картофель	3,70
5. Специализированные продукты детского питания в готовом для употребления виде	1,85

Для продуктов питания, потребление которых составляет менее 5 кг/год на человека (специи, чай, мед и др.), устанавливаются допустимые уровни в 10 раз более высокие, чем величины для прочих пищевых продуктов.

К специализированным продуктам питания – детского питания – относятся продукты промышленного производства, вырабатываемые по нормативной документации на продукты детского питания и имеющие специальную маркировку, а также продукция детских молочных кухонь.

Для колбасных, мясных изделий и мясных консервов, в рецептуры которых входит конина, мясо диких животных, устанавливаются величины, как для говядины.

Для макаронных изделий устанавливаются величины, как для хлеба и хлебобулочных изделий.

Рентген (Р) – единица измерения устаревшей дозиметрической величины – экспозиционной дозы. В случаях гамма и рентгеновского излучения с некоторыми допущениями можно считать, что $1 \text{ Р} = 0,01 \text{ Зв}$ (см. *Зиверт*).

Рентгеновское излучение – излучение атомов (а при определенных условиях – свободных электронов), энергия фотонов которого лежит на шкале электромагнитных волн между ультрафиолетовым излучением и гамма-излучением (примерно от 1 до сотен кэВ).

Риск – вероятность заболевания или смерти в результате облучения.

Система радиационного контроля (контроля радиоактивного загрязнения) – совокупность нормативных, организационных, технических и иных мероприятий, направленная на непревышение законодательно установленных дозовых пределов. В систему входят подразделения радиационного контроля, контролирующие

продукцию предприятий на соответствие допустимым уровням содержания радионуклидов.

Спектр – зависимость интенсивности излучения от его энергии, то есть распределение интенсивности излучения по значениям его энергии.

Спектрометр – прибор для измерения спектров излучений.

Спектрометрия – метод количественного и качественного анализа содержания радионуклидов в объекте, основанный на измерении спектра его излучения.

Стохастические эффекты – отдаленные эффекты последствия облучения, имеющие случайный характер и проявляющиеся в мутации клеток, а в конечном итоге – заболеваниях раком или генетических последствиях. Возможны при любых значениях дозы, причем с увеличением дозы возрастает не тяжесть этих эффектов, а риск их возникновения. Заболеваемость раком проявляется спустя латентный, то есть скрытый период. Этот период может составлять от 5 до 30 лет после облучения. Для стохастических эффектов введены понятия эквивалентной и эффективной дозы облучения.

Тканевые множители – множители, зависящие от чувствительности органов или тканей к облучению и определяющие вклад того или иного органа или ткани в эффективную дозу. Наиболее высокие значения тканевых множителей для красного костного мозга, легких, желудка, толстого кишечника и молочной железы (0,12). Для половых желез соответствующее значение составляет 0,08; для мочевого пузыря, пищевода, печени и щитовидной железы – 0,04. Минимальные значения тканевых множителей имеют костная поверхность, кожа, головной мозг и слюнные железы – 0,01.

Удельная активность – см. *Активность*.

Ущерб – понятие дозиметрии, определяемое как число лет потерянной жизни, потерянных человеком вследствие болезни или преждевременной смерти в результате облучения.

Эквивалентная доза – см. *Доза*.

Электронвольт (эВ) – единица измерения энергии, равная кинетической энергии, приобретаемой электроном на участке траектории с разностью потенциалов 1 вольт. $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$. Часто используются кратные единицы: $1 \text{ кэВ} = 10^3 \text{ эВ}$, $1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ}$.

Эффективная доза – см. *Доза*.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Научное издание

Гурачевский Валерий Леонидович

ПОСЛЕДСТВИЯ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АВАРИИ В БЕЛАРУСИ И ИХ ПРЕОДОЛЕНИЕ

Ответственный за выпуск *М. А. Прищепов*

Редактор *Т. В. Каркоцкая*

Компьютерная верстка *Е. А. Хмельницкой, Т. В. Каркоцкой*

Дизайн и оформление обложки *Д. О. Бабаковой*

Подписано в печать 29.08.2017 г. Формат 60×84¹/₁₆.

Бумага офсетная. Печать на «Хегох 700 DCP».

Усл. печ. л. 3,95. Уч.-изд. л. 3,09. Тираж 100 экз. Заказ 455.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Учреждение образования

«Белорусский государственный аграрный технический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий

№ 1/359 от 09.06.2014.

№ 2/151 от 11.06.2014.

Пр-т Независимости, 99–2, 220023, Минск.