

ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

УДК 614 876:502:613:621.039

ОСОБЕННОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО
ИЗЛУЧЕНИЯ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ЕГО
РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ НА ЯДЕРНЫХ ОБЪЕКТАХ
(АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР)

© 2020 К. Орумо, А.П. Елохин, А.И. Ксенофонов

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В работе приводится краткий аналитический обзор радиационных эффектов, связанных с воздействием ионизирующего излучения на биологические объекты. Рассматриваются достаточно сложные процессы воздействия ионизирующего излучения на молекулы дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК), возникающие в организме на клеточном уровне при его поглощении. Показано, что в широком диапазоне мощностей доз, создаваемых ионизирующим излучением при воздействии последнего на биологические объекты и, в частности, на человека, наиболее опасными являются генетические последствия, играющие значительную роль для населения стран, активно использующих ионизирующее излучение в промышленности, медицине, особых видах производств, а также при производстве электроэнергии на атомных электростанциях. Особое внимание в работе уделяется воздействию ионизирующего излучения на детей, требуя повышенного внимания при диагностике заболеваний при постъядерных авариях, а также во время диагностики или лечения радиацией. В качестве мер прогнозирования радиоактивного загрязнения окружающей среды и дозовых нагрузок на человека в статье приводится краткое представление автоматизированной системы радиационного контроля окружающей среды с её целями, задачами и методами радиационного контроля, позволяющими минимизировать последствия радиационных аварий и оценить дозовые нагрузки на персонал АЭС и население.

Ключевые слова: ионизирующее излучение, радиационное повреждение, дезоксирибонуклеиновая кислота ДНК, радиочувствительность, автоматизированная система радиационного контроля окружающей среды (АСКРО), доза и мощность дозы ионизирующего излучения.

Поступила в редакцию 24.03.2020

После доработки 02.06.2020

Принята к публикации 08.06.2020

Введение

При прохождении ионизирующего излучения (ИИ) через какую-либо биологическую среду или ткань какого-либо биологического объекта прежде всего необходимо учитывать вид ИИ (α , β , γ , n_0 , p и пр.), поскольку его поглощенная доза существенно зависит от качества излучения, т.е. свойств ионизирующих частиц, зависящих от их ионизирующей способности, которые, в свою очередь зависят от массы частицы ее заряда и энергии, равно как от заряда и плотности вещества, в котором распространяется ИИ. Величина поглощенной дозы – энергия ионизирующего излучения, поглощенная в объеме вещества, отнесенная к массе объема этого вещества, единица измерения которой является грей ($1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$).

Экспозиционная доза X пропорциональна энергии фотонного излучения, затраченной на ионизацию молекул воздуха и равна отношению средней величины суммарного заряда всех ионов одного знака, созданных в воздухе, когда все электроны и позитроны, освобожденные фотонами в элементарном объеме dm , полностью

потеряли свою энергию, к массе этого объема dm . Единица измерения экспозиционной дозы – Кл/кг (внесистемной – рентген (Р)). Характеристикой косвенно ионизирующего излучения является керма – отношение суммы первоначальных кинетических энергий всех заряженных частиц, образованных под действием излучения в элементарном объеме вещества, к массе в этом объеме. В качестве вещества рассматривается воздух, единица измерения – грей.

Для оценки биологического действия при хроническом облучении человека в малых дозах служит величина эквивалентной дозы. Доза эквивалентная $H_{T,R}$ – поглощенная доза в органе или ткани, умноженная на соответствующий взвешивающий коэффициент (коэффициент качества) для данного вида излучения, вычисляется по формуле (1), [1, 2, 3], единицей измерения которой служит зиверт⁵ (Зв).

$$H_{T,R} = W_R \times D_{T,R}, \quad (1)$$

где $D_{T,R}$ – средняя поглощенная доза в органе или ткани T ;

W_R – взвешивающий коэффициент для излучения R , значения которого для различных видов ИИ приведены в таблице 1. При воздействии различных видов излучения с различными взвешивающими коэффициентами эквивалентная доза определяется как сумма эквивалентных доз для этих видов излучения.

Таблица 1 – Взвешивающие коэффициенты W_R для отдельных видов излучения [1] [Weighting factors W_R for individual types of radiation]

Вид ионизирующего излучения	Взвешивающий коэффициент W_R
Фотоны любых энергий	1
Электроны и мюоны любых энергий	1
Нейтроны с энергией:	
менее 10 кэВ	5
от 10 до 100 кэВ	10
от 100 кэВ до 2 МэВ	20
от 2 до 20 МэВ	10
более 20 МэВ	5
Протоны с энергией более 2 МэВ, кроме протонов отдачи	5
Альфа-частицы, осколки деления, тяжелые ядра	20
Примечание. Все значения относятся к излучению, падающему на тело, а в случае внутреннего облучения – испускаемому при ядерном превращении.	

При воздействии ИИ на какой-либо биологический объект находят *эффективную эквивалентную дозу* (H_E), величина которой используется как мера риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов и тканей с учетом их радиочувствительности [2]. Она представляет сумму произведений эквивалентной дозы в органах и тканях на соответствующие взвешивающие коэффициенты (2):

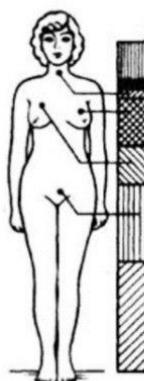
$$H_E = \sum_T W_T \cdot H_T, \quad (2)$$

где H_T – эквивалентная доза в T -м органе или ткани;

W_T – взвешивающий коэффициент для органа или ткани T (см. табл. 1, рис. 1), представляющий собой отношение стохастического риска смерти в результате облучения T -го органа или ткани к риску смерти от равномерного облучения тела при одинаковых эквивалентных дозах (рис. 1), величина $W_T = 0,30$, отведенная на все

⁵ Рольф Зиверт (нем. Rolf Maximilian Sievert; 06.05.1896 года — 03.10.1966 года) – известный шведский ученый, внесший большой вклад в различные области радиационной безопасности, в исследования естественного γ -излучения.

другие органы, распределяется поровну между пятью оставшимися органами и тканями, не указанными на рисунке 1, которые получили самую высокую эквивалентную дозу. Таким образом, W_T определяет весовой вклад данного органа или ткани в риск неблагоприятных последствий для организма, при равномерном облучении: $\sum_T W_T = 1$.



Орган или ткань	R_T , $10^{-2} 1/(\text{чел-Зв})$	$w_T = R_T / \sum_T R_T$
Красный костный мозг	0,20	0,12
Костная ткань	0,05	0,03
Щитовидная железа	0,05	0,03
Молочная железа	0,25	0,15
Легкие	0,20	0,12
Гонады	0,40	0,25
Все другие органы, из них на каждый орган	0,50	0,30
	0,10	0,06
Организм в целом	1,65	1,00

Рисунок 1 – Взвешивающие факторы W_T и риск смерти R_T от злокачественных опухолей и наследственных дефектов (у первых двух поколений облученных лиц) в результате облучения на 1 человека при эквивалентной дозе 1 Зв для задач радиационной защиты [2] [Weighing factors W_T and R_T death risk from malignant tumors and hereditary defects (in the first two generations of exposed individuals) as a result of exposure to 1 person at an equivalent dose of 1 Sv for radiation protection tasks]

Оценкой последствий облучения группы лиц для целей оптимизации радиационной защиты вводится величина – коллективная эффективная доза, единица измерений которой является человеко-зиверт (чел-Зв).

Нормируемые величины (основные дозовые пределы) непосредственно измерить невозможно. Для оценки нормируемых величин при радиационном контроле предназначены операционные величины, которые являются непосредственно определяемыми в измерениях величинами. Эти величины максимально приближены к соответствующим нормируемым величинам в стандартных условиях облучения и предназначены для консервативной оценки нормируемых величин.

При индивидуальном дозиметрическом контроле за значение эффективной дозы внешнего облучения принимается индивидуальный эквивалент дозы $H_p(d)$, равный эквиваленту дозы в мягкой биологической ткани на глубине d (мм) под рассматриваемой точкой на теле взрослого человека.

При контроле радиационной обстановки в качестве операционной величины внешнего облучения принят амбиентный эквивалент дозы (амбиентная доза) $H^*(d)$.

Параметр d определяет соотношение операционной и нормируемой величин:

- при $d = 10$ мм величины $H^*(10)$ и $H_p(10)$ соответствуют эффективной дозе внешнего облучения;
- при $d = 3$ мм величины $H^*(3)$ и $H_p(3)$ соответствуют эквивалентной дозе внешнего облучения хрусталика глаза;
- при $d = 0,07$ мм величины $H^*(0,07)$ и $H_p(0,07)$ соответствуют эквивалентной дозе внешнего облучения кожи.

Таким образом, операционные величины должны позволять оценивать два типа доз облучения: для сильно проникающего излучения – эффективную дозу, для слабо проникающего излучения – локальную дозу для кожи или дозу для хрусталика глаза.

Для оценки эффективной дозы при внутреннем облучении вводится величина ожидаемой эффективной дозы (committed dose). Она используется как мера риска возникновения отдаленных последствий внутреннего облучения всего тела человека и

отдельных его органов и тканей с учетом их радиочувствительности (стохастические эффекты) и представляет сумму произведений ожидаемой эквивалентной дозы в органах и тканях на соответствующие взвешивающие коэффициенты. Единица ожидаемой эффективной дозы – зиверт (Зв). Оценкой детерминированного эффекта в результате внешнего облучения органа является ОБЭ-взвешенная доза, которая определяется как произведение дозы в органе на коэффициент ОБЭ излучения. Единицей измерения служит грэй-эквивалент (Гр-Экв). ОБЭ-взвешенная доза является новой дозиметрической величиной, предназначенной для характеристики аварийного облучения и ее введения в практику, является результатом анализа уроков реагирования на радиационные аварии.

В современную систему дозиметрических величин введено понятие эквидозиметрических величин, которые служат для оценки воздействия ионизирующего излучения конкретно на человека. По своему назначению они разделены на три группы:

- величины для оценки рисков возникновения и развития эффектов от излучения (поглощенная доза в органе или ткани, эквивалентная доза в органе или ткани и ОБЭ-взвешенная доза);
- величины для установления требований к состоянию радиационной безопасности о вероятном возникновении эффектов (эффективная доза);
- величины для соответствия требованиям к радиационной безопасности (эквивалент дозы, амбиентный и индивидуальный эквиваленты дозы и ожидаемая эффективная доза внутреннего облучения).

Наряду с экспериментальными данными, относящимися к особенностям воздействия ИИ на различные органы человека, значительный интерес представляют собой данные, характеризующие особенности воздействия излучения на клеточный материал биомассы. Знание этих особенностей и механизмов их происхождения дает возможность понять, почему одни представители животного мира более чувствительны к воздействию ИИ, другие – менее (табл. 2), с одной стороны, а с другой – сформировать защитный механизм, позволяющий выдерживать значительные дозовые нагрузки без летального исхода.

Таблица 2 – Летальные дозы облучения для различных видов животных [4] (по литературным данным) и человека [5] [Lethal radiation doses for various animal species (according to published data) and humans]

Вид животного или человек	Минимальная смертельная доза в Зв	Доза 50 % выживаемости в Зв	Минимальная абсолютная смертельная доза в Зв
Улитки	-	2000	-
Амебы (простейшие)	1000 - 3000	1000	-
Насекомые	10 - 100	-	-
Дрозофилы	-	8	-
Птицы, рыбы	8 - 20	-	-
Кролики	8	8,5 - 11	14
Хомяки	-	7 - 8,8	-
Крысы	2,5 - 3,0	4,5 - 6	6,5 - 8
Обезьяны	-	5 - 6	-
Мыши	2	3,5 - 4	5,5 - 8
Собаки	2,75	3,25 - 4	6
Морские свинки	-	2 - 4	4
Козы	-	3,5	-
Свиньи	-	4 - 5	-
Человек	6	3 - 5	6 - 7

При этом следует отметить, что в литературе, освещающей проблемы радиационной безопасности, этим вопросам уделяется значительно меньше внимания возможно по той причине, что они скорее относятся к области биологии, нежели к техническим проблемам.

Тем не менее, дальнейшее наше внимание будет уделено более детальному анализу биологических эффектов при воздействии ИИ на организм человека. Это обусловлено тем, что результаты воздействия ИИ на человека и окружающую среду в рамках решения военных конфликтов путем применения ядерной бомбардировки, впервые в истории человечества, сначала в Хиросиме, а вскоре после этого и в Нагасаки [6], предоставили доказательства того, что интенсивное воздействие ИИ приводит к возникновению онкологических заболеваний. Это проявлялось у выживших после атомной бомбардировки женщин, у которых наблюдалось значительное увеличение заболеваний крови, рака молочных желез и других заболеваний.

Дальнейшие результаты [6] также показали, что воздействие ионизирующего излучения в детском возрасте может привести к увеличению избыточного риска развития рака у детей по сравнению с взрослыми, что указывает на их более высокую чувствительность к воздействию радиации и образованию опухолей. Это показали и результаты исследований, проведенные в Чернобыле группой авторов указанной работы, в которой рассматривался вопрос онкологических заболеваний щитовидной железы у детей и взрослых, которые подвергались воздействию высоких доз облучения щитовидной железы (более 1 Гр). Рассмотрим более детально процессы, сопровождающие прохождение ионизирующего излучения в биологической среде.

Биологические эффекты воздействия ионизирующих излучений на окружающую среду и организм человека

Доза ионизирующего излучения, поглощенная в биологической среде, инициирует сложный процесс различных событий. Во-первых, это физическая активность с передачей энергии от ионизирующих частиц к атомам и молекулам окружающих тканей, процесс, который занимает около 10^{-13} с. Далее следуют физико-химические методы, такие как передача внутримолекулярной энергии, возбуждение и ионизация атомов с длительностью около 10^{-10} с. Затем химические процессы и в этот момент первичное повреждение биологических структур начинается на продолжительности около 10^{-6} с. Далее следуют биологические процессы. На этом этапе поврежденные органические структуры могут быть восстановлены или необратимо повреждены. Наблюдаемое повреждение может привести к гибели клеток, которая может происходить в течение периодов от нескольких секунд до нескольких лет. Все эти процессы приводят к окончательному радиобиологическому воздействию радиации на организм человека [7].

Биологическое действие ионизирующих излучений

Вскоре после открытия биологического действия ионизирующих излучений было установлено, что любой живой объект при определенной дозе облучения погибает. Поглощенные дозы фотонного излучения D , приводящие к гибели разных объектов в облученной популяции, различаются в очень широких пределах. Для человека доза фотонного излучения, вызывающая 50 %-ю вероятность гибели, равна 4,5 Гр (450 Р, см. табл. 2).

Каждому биологическому виду свойственна своя радиочувствительность. Степень радиочувствительности сильно варьируется в пределах одного вида, а для определенного индивидуума зависит также от возраста и пола, даже в одном организме различные органы сильно различаются по радиочувствительности, как это следует из рисунка 1.

На рисунке 2 приведены клетки человека и животного. Составляющие компоненты клетки человека и животных различаются незначительно. Большинство

клеток млекопитающих имеют типичные размеры 10-30 мкм. Клетка в основном состоит из клеточной или цитоплазматической мембраны, представляющей собой тонкую пленку, покрывающую всю клетку, через которую осуществляется обмен веществ; ядра, в котором находится ДНК – генетический материал клетки, объединенный с большим количеством белка в структуры, называемыми хромосомами; цитоплазмы – среды, содержащей воду, различные соли, органические соединения, а также ряд органелл, представляющих собой рабочие части клетки [8]. В каждой клетке многие тысячи молекул ферментов управляют взаимодействием химических соединений. Все процессы в клетке строго функционально структурированы. В ядре клетки, как уже отмечалось, сосредоточены гигантские биополимерные молекулы дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК), которые, по крайней мере, в период деления, представляют собой две спиралевидные нити. В строго определенной последовательности две нити связаны чередующимися молекулами четырех типов оснований. Хромосомы (от греч. Chroma – цвет, окраска; soma – тело) – структурные элементы ядра клетки, содержащие ДНК, в которой заключена наследственная информация организма. В хромосомах в линейном порядке расположены гены (от греч. genos – род, происхождение) – единицы наследственного материала, отвечающие за формирование какого-либо элементарного признака. Совокупность генов, содержащихся в одинарном наборе хромосом данного организма, называется геномом.



Рисунок 2 – Основные компоненты клетки животного (а) и человека (б)
[The main cell components of the animal (a) and human (b)]

Клетки – это единицы живого, мельчайшие структуры, выполняющие функции, которые и определяют состояние, именуемое жизнью [8]. К таким функциям относятся: поглощение веществ и энергии, использование энергии для построения сложных структур из более простых веществ, рост и размножение. В среднем в организме человека насчитывается $5 \cdot 10^{13}$ клеток, из которых до 20 % клеток организма интенсивно делятся. Высокая скорость деления клеток присуща костному мозгу, кишечнику, коже, роговице глаза, половым железам. Однако большая часть органов состоит из редко делящихся клеток (печень, легкие, сердце, сосуды, кости, эндокринные железы). Клетки нервной системы практически не делятся. Такие органы называют стационарными системами [8].

Воздействие ионизирующего излучения на клетку может происходить непосредственно, например, путем взаимодействия γ - или β -излучения с атомами или молекулами хромосом, или опосредованно при радиоллизе воды или других химических веществ, содержащейся в цитоплазме клетки. В первом случае, при невысокой плотности ИИ, ДНК может восстановиться, если разрыв связи произошел только на одной нити, если же эффект разрыва связи произошел на двух нитях ДНК, то она не подлежит восстановлению (рис. 3), но в дальнейшем может принимать участие в создании неполноценных молекул, создавая, таким образом, очаг поражения, который

может привести в дальнейшем к негативным последствиям. На рисунках 3, 4 приведены результаты воздействия ионизирующего излучения на ДНК. После прохождения излучения связи могут быть восстановлены, но неправильно (рис. 4).

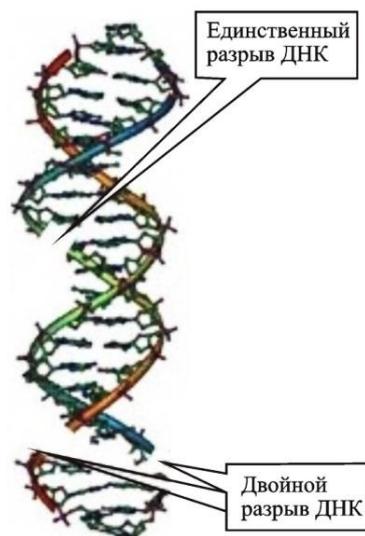


Рисунок 3 – Виды разрывов ДНК при воздействии ионизирующего излучения [8] [Types of DNA breaks when exposed to ionizing radiation]

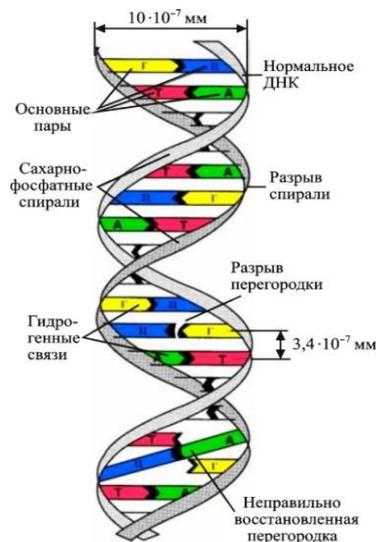


Рисунок 4 – Результат воздействия ионизирующего излучения на ДНК [8] [The result of ionizing radiation on DNA]

В процессе деления происходит расхождение нитей ДНК и синтез на каждой нити, как на матрице еще по одной нити с сохранением последовательности оснований. В отличие от ядра, содержащего уникальные молекулы ДНК, в цитоплазме содержатся многочисленные дублирующие структуры, отвечающие за энергетику клетки, синтез белка, транспорт питательных веществ и т.д.

В активно делящихся клетках период между двумя клеточными делениями занимает от 12 до 48 ч. При этом на сам процесс деления приходится не более часа. Пока клетка не делится, ее системы не воспринимают факт нарушений, который возник от действия ионизирующих излучений (или от некоторых химических соединений). Однако в процессе деления в месте поврежденной ДНК образуется разрыв хромосомы и образуются фрагменты, обрывки хромосом. Новообразованная клетка, лишенная части ДНК, утрачивает способность к синтезу жизненно важных веществ и может быть обречена на гибель. Поэтому интенсивно делящиеся клетки в большей степени подвержены действию ионизирующих излучений. Вместе с тем в организме действует механизм репараций, который может «залечивать» некоторые повреждения. Это относится, прежде всего, к одноразрывным дефектам в нитях хромосом. Например, если провести облучение большой дозой в два этапа с интервалом между ними около четырех часов, то число выживших клеток млекопитающих возрастает в 2-3 раза по сравнению с непрерывным облучением той же дозой. Двуразрывные нарушения молекул ДНК характерны для частиц, создающих на пробеге высокую плотность ионизации, или при очень больших мощностях доз. Такие разрывы почти не «залечиваются». Примеры одно- и двуразрывных связей ДНК приведены на рисунке 3. На рисунке 5 приведены примеры непосредственного и опосредованного воздействия ИИ на ДНК клетки.

Механизм биологического действия ионизирующего излучения на биологическую ткань можно определить несколькими актами. В первом (физическом акте) энергия ионизирующего излучения при прохождении через биологическую ткань передается атомам и молекулам. Это приводит к образованию ионов и возбужденных молекул. Следующий акт определяется химическим этапом поражения клетки.

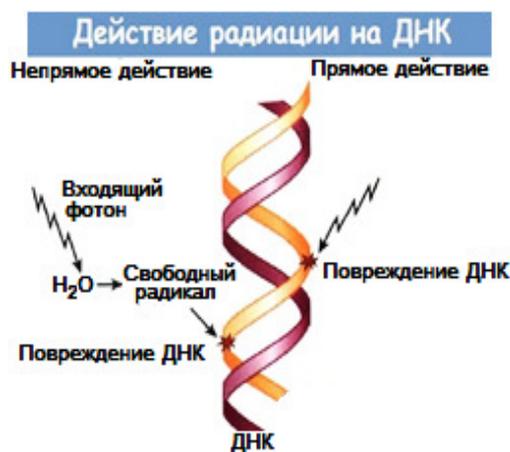
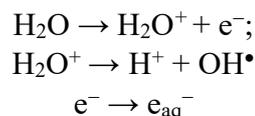


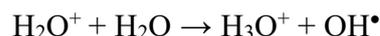
Рисунок 5 – Результат непосредственного и опосредованного воздействия ионизирующего излучения на ДНК [The result of direct and indirect effects of ionizing radiation on DNA]

В основе первичных радиационно-химических изменений молекул могут лежать два механизма: 1) прямое действие, когда данная молекула испытывает изменения за счет ионизации или возбуждения непосредственно при взаимодействии с излучением; 2) косвенное действие, когда молекула непосредственно не поглощает энергию ионизирующего излучения, а получает ее путем передачи от другой молекулы.

Поскольку 60-70 % массы биологической ткани составляет вода, рассмотрим различие между прямым и косвенным действием излучения на примере облучения воды [8]. Начальные процессы радиолиза, приводящие к образованию радикалов H^\bullet и OH^\bullet , представлены на схеме:



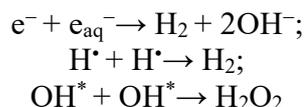
Ионизированная молекула воды реагирует с другой нейтральной молекулой воды, в результате чего образуется высокореактивный радикал гидроксила OH^\bullet :



Вырванный электрон также очень быстро передает энергию окружающим молекулам воды, в результате чего возникает сильно возбужденная молекула воды H_2O^* , которая диссоциирует с образованием двух радикалов H^\bullet и OH^\bullet :

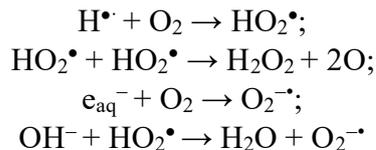


Свободные радикалы содержат неспаренные электроны и отличаются чрезвычайно высокой реакционной способностью. Время их жизни в воде не более 10^{-5} с. За это время они либо рекомбинируют друг с другом, либо реагируют с субстратом:



В присутствии растворенного в воде кислорода образуются и другие продукты радиолиза: свободный радикал гидроперекиси HO_2^\bullet , перекись водорода H_2O_2 ,

атомарный кислород и радикал кислорода $O_2^{\cdot-}$, который называется супероксидным радикалом:



Супероксидный и гидропероксидный радикалы могут наносить очень серьезные повреждения биологически важным молекулам.

В клетке организма ситуация значительно более сложная, чем при облучении воды, особенно если поглощающим веществом являются крупные и многокомпонентные биологические молекулы. В этом случае образуются органические радикалы D^* , отличающиеся также крайне высокой реакционной способностью. Располагая большим количеством энергии, они легко могут привести к разрыву химических связей. Именно этот процесс и происходит чаще всего в промежутке между образованием ионных пар и формированием конечных химических продуктов.

Кроме того, биологическое действие усиливается за счет кислородного эффекта. Образующийся в результате взаимодействия свободного радикала с кислородом высокорекреакционный продукт приводит к образованию новых молекул в облучаемой системе. Получающиеся в процессе радиолиза воды свободные радикалы и окислители, обладая высокой химической активностью, вступают в химические реакции с молекулами белка, ферментов и других структурных элементов биологической ткани, что приводит к изменению биохимических процессов в организме. В результате нарушаются обменные процессы, подавляется активность ферментных систем, замедляется и прекращается рост тканей, возникают новые химические соединения, не свойственные организму, – токсины. Это приводит к нарушению жизнедеятельности отдельных систем или организма в целом.

Индукцированные свободными радикалами химические реакции вовлекают в этот процесс многие сотни и тысячи молекул, не затронутых излучением. В этом состоит специфика действия ионизирующего излучения на биологические объекты. Никакой другой вид энергии (тепловой, электрической и др.), поглощенной биологическим объектом в том же количестве, не приводит к таким изменениям, какие вызывает ионизирующее излучение. Например, смертельная доза фотонного излучения для млекопитающих равна 10 Гр, что соответствует поглощенной энергии 10 Дж/кг. Если эту энергию подвести в виде тепла, то она нагрела бы организм человека лишь на 0,002 °С.

Таким образом, как видно из результатов исследований воздействия ИИ на клетку, за ионизацией часто следует образование свободных радикалов, которые весьма эффективно взаимодействуют с биологическими молекулами, включая очень восприимчивый генетический материал. Этими уязвимыми участками в ядре являются хромосомы, представляющие собой двуспиральные структуры, состоящие из ДНК и белка, количество которых варьируется у разных организмов, вызывая наибольшее повреждение в делящихся клетках. Из последнего следует, что негативный результат от косвенного воздействия ИИ оказывается более распространенным, чем от его непосредственного воздействия, главным образом для излучения с низкой удельной ионизацией [9].

Формы поражения организма при воздействии ионизирующего излучения

Из приведенного выше обзора следует, что эффект воздействия ИИ на человека обусловлен ионизационными процессами, протекающими в его организме, мерой

* Радикал – атом или группа атомов, обладающих свободной валентностью.

измерения которых является поглощенная доза, определяемая единицей Грей (Гр)** (Дж/кг). Для оценки эффективности воздействия того или иного вида ИИ вводят, как указывалось ранее, величину эквивалентной дозы, вычисляемой по формуле (1), единицей которой служит Зиверт. При оценке отдаленных последствий воздействия ИИ на человека находят *эффективную эквивалентную дозу* (H_E), определяемую формулой (2), величина которой используется как мера риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов и тканей с учетом их радиочувствительности, представленной в таблице на рисунке 2. Во всем мире радиационное воздействие на человека в среднем составляет от двух до трех мЗв. Эта сумма может варьироваться в широких пределах, главным образом потому, что основным источником облучения, который является естественным фоновым излучением, является диапазон от 1 до 100 мГр в год в зависимости от географического положения человека. На рисунке 6 представлена классификация различных биологических эффектов, обусловленных воздействием ионизирующего излучения.

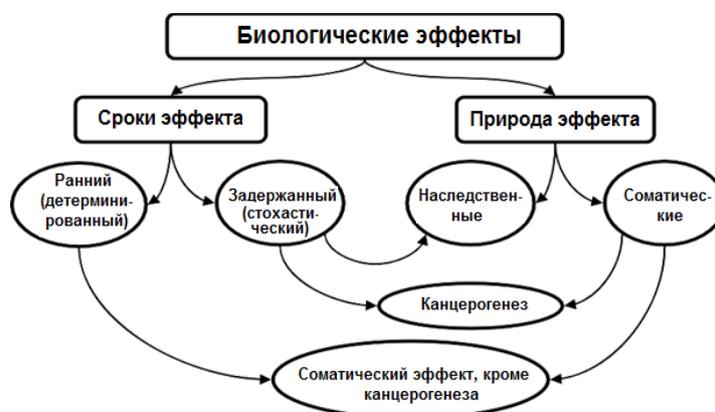


Рисунок 6 – Классификация биологических эффектов, обусловленных воздействием ионизирующего излучения [9] [Classification of biological effects due to exposure to ionizing radiation]

Результаты классифицируются как ранние или детерминированные, которые имеют порог, задержанный или стохастический, без ограничений. Результаты далее делятся на соматические и наследственные. Соматические включают ранние и отсроченные эффекты (рак).

Внешнее и внутреннее воздействие

Внешнее излучение – это излучение, обусловленное работой рентгеновских аппаратов в медицинских учреждениях при диагностике пациентов, на судостроительных заводах, заводах тяжелого машиностроения, где эти аппараты используют для проверки на наличие каверн (газовых полостей) в сварочных швах; излучение случайно выброшенных контейнеров с радиоактивными материалами; излучение радиоактивной примеси, распространяющейся в атмосфере в результате радиационной аварии и т.д. При воздействии внешнего облучения, помимо рентгеновского и γ -излучения, обуславливающего общую дозу, которую может получить субъект, оказавшийся в поле ИИ, он может получить еще и дозу, обусловленную воздействием α - и β -частиц, вызывающих кожный ожог, а при вдыхании загрязненного воздуха – ожог верхних дыхательных путей, так называемый β -лорингит – характерное заболевание горла, имевшее место у ликвидаторов в Чернобыле в первые месяцы после аварии на ЧАЭС.

Опасность внутреннего радиационного облучения возникает из-за микрочастиц радиоактивных материалов, которые попадают в организм через дыхание или пищу, или, когда они проходят через кожу. Эти частицы, попадая в организм, производят

** Единица названа в честь британского учёного Льюиса Грэя в 1975 году.

радиационное облучение в течение всего времени до тех пор, пока они естественным или искусственным образом не будут удалены из организма. В этом случае наибольший вред на организм оказывают α -частицы, поскольку обладают высокой ионизационной способностью, имея малый пробег в биологической среде, создавая, таким образом, области, в которых увеличивается вероятность гибели клеток за счет рассмотренных выше механизмов воздействия ИИ на биологическую ткань.

Хроническая доза (долгосрочная доза низкого уровня)

Хроническое облучение – это относительно небольшая доза радиации, полученная в течение длительного времени при воздействии радиации. За тысячелетия развития человечества организм человека приспособился выдерживать хроническую дозу, величина которой существенно различается в зависимости от региона обитания человека. Эта доза складывается за счет космического излучения, величина которого увеличивается с ростом высоты* (на равнине ~ 0,01-0,015 мкЗв/ч, в горах больше: 0,020-0,025 мкЗв/ч) и специфике области обитания человека, определяемой, например, выходом на поверхность земли руд, содержащих радиоактивные изотопы. Местное население такие места называет «нехорошим местом» и предпочитает там не селиться. Особенность подобной адаптации населения к повышенному радиационному фону в горах, по-видимому, связана с возможностью восстановления повреждений в биологическом материале, подверженном воздействию ИИ, о чем сообщалось ранее. Однако при длительном времени воздействия радиации на работников горнодобывающей промышленности, радиологов или научных работников, работающих с радиацией или радиоактивными материалами, такая возможность у организма заметно уменьшается, что может привести к сокращению продолжительности жизни в зависимости от количества полученной дозы радиации.

Биологические воздействия высоких уровней радиационного воздействия ~ 4 Гр достаточно хорошо известны**, однако эффекты низких уровней радиации сложно обнаружить, поскольку детерминированные эффекты не возникают на этих уровнях. Исследования на людях, получивших высокие дозовые нагрузки, определенным образом показали на связь между дозой облучения и некоторыми отсроченными эффектами. К этим эффектам можно отнести рак различных органов и некоторые генетические эффекты. В этих оценках наблюдается определенная взаимосвязь между заболеваемостью при высоких дозах облучения и вероятностью заболевания при низких дозах. Поскольку вероятность заболевания возрастает с ростом дозовых нагрузок, то предполагается, что подобная зависимость будет иметь место и при малых дозах, т.е. эффект возможных лучевых заболеваний при низких дозах будет носить не пороговый, а линейный характер.

Соматическое воздействие радиации развивается у людей с повышенной чувствительностью к ИИ и состоит в изменениях в клетках организма, которые не передаются будущим поколениям. Эти эффекты могут быть быстрыми или отсроченными, в зависимости от величины мощности дозы и промежутка времени, в течение которого субъект набирает эту дозу. Так, например, в Индии жители Кералы становятся в 5-10 раз более восприимчивыми к радиации по сравнению с жителями других областей, поскольку почва в Керале содержит минерал монацит, в котором находят радиоактивный элемент торий, присутствие которого значительно увеличивает

*Мощность космического излучения неоднородна. Ближе к поверхности земли она уменьшается за счет экранирующего атмосферного слоя. И, наоборот, в горах она сильнее, поскольку защитный экран атмосферы слабее. Например, в самолете, который летит в небе на высоте 10 000 метров, уровень радиации превышает приземную радиацию почти в 10 раз.

**В течение острой лучевой болезни различают четыре периода. В первом периоде, или периоде «начальных реакций», признаки лучевого поражения появляются обычно через несколько часов после облучения. Пораженный начинает испытывать своеобразное состояние, напоминающее опьянение или оглушение. Появляются головные боли, головокружение, эйфория, гиперемия лица, нескоординированные движения, тошнота и рвота, боли в животе. Температура тела – субфебрильная (повышение температуры тела на протяжении длительного времени в пределах 37,1 – 38,0 °С). В тяжелых случаях рвота принимает неукротимый характер, появляется понос с кровью. При облучении большими дозами пораженный впадает в бессознательное состояние, развиваются общие судороги, и наступает летальный исход – смерть.

фоновую радиацию. При таких условиях воздействия ИИ в результате накопления радионуклидов в органах тела, отсроченные соматические эффекты, выражающиеся в виде раковых заболеваний или врожденных отклонений, довольно очевидны.

Радиационный ущерб

Радиационный ущерб начинается на клеточном уровне. Это может повлиять на различные критические объекты в клетке, наиболее важной из которых является ДНК. Результаты исследований, приведенные выше, указывают на то, что повреждение ДНК является причиной гибели, мутации и канцерогенеза клеток [9].

Поскольку радиационное воздействие на людей оказывается различным, невозможно предсказать, какая доза может привести к летальному исходу. Эксперты считают, что 50 процентов людей умрут в течение тридцати дней после лечения всего тела от 3500 до 5000 мГр в течение нескольких минут или часов (см. табл. 2). Несмотря на это, результаты в отношении здоровья будут различаться в зависимости от того, насколько человек здоров до заражения и какую медицинскую помощь он получает. Если воздействие ИИ ограничено только частями тела, например, руками, тогда такие эффекты, скорее всего, будут более локализованными, что приведет к ожогам кожи.

Радиационный ущерб репродуктивным клеткам

Этот эффект может происходить в результате летальных и не летальных мутаций.

Летальные мутации, как известно, приводят к гибели клетки, тогда как не летальные могут вызывать рак или нерегулярный рост клеток. Острые дозы радиации, воздействуя на репродуктивные органы, приводят к возникновению гамет*, содержащих вредные генные мутации, которые передаются не рожденному потомству. Радиоактивное загрязнение окружающей среды, таким образом, является причиной разрушения или распада молекулярных структур внутри гамет, вследствие чего нарушается генетический механизм хромосом. Рассматривая детали этого процесса, заметим, что воздействие ионизирующего излучения вызывает аномалии в растущих клетках, заканчивая, тем самым, их способность делиться и расти. Иногда эти клетки продолжают расти до тех пор, пока не станут гигантскими и, в конечном итоге, погибнут. Это происходит потому, что они становятся неэффективными из-за своего нерегулярного размера, а неодинаковые генетические эффекты могут привести к гибели эмбрионов, младенцев или могут вызвать уродства у детей. Как видно из выживших в Хиросиме и Нагасаки, даже спустя более шести десятилетий генетическое воздействие радиации наблюдается у их детей и внуков.

Внутриутробное облучение и его влияние на не рожденного ребенка

Как объясняется в бюллетене МАГАТЭ [10]: воздействие радиации на плод, находящийся в утробе матери, называется воздействием на эмбрион. Это воздействие может возникать на всех стадиях эмбрионального развития, от зиготы до плода, и может включать летальные эффекты, пороки развития, умственную отсталость и провоцирование рака. Первые три могут быть возможным результатом детерминированных эффектов во время эмбрионального развития, особенно в период формирования органов. Соответственно, доказательства воздействия на рост и развитие мозга появились после того, как у некоторых детей, подвергшихся воздействию внутриутробного развития в Хиросиме и Нагасаки, наблюдалась тяжелая умственная отсталость. Кроме того, согласно результатам обследований, проведенных в ряде деревень Раджастхана, расположенных вблизи атомной электростанции в Кота, было зарегистрировано рождение значительного числа детей, с физическими дефектами. Причем в деревнях, расположенных на значительном удалении от указанной АЭС количество рожденных детей с физическими дефектами было в разы меньше.

* Гаметы, или половые клетки – репродуктивные клетки, имеющие гаплоидный (одинарный) набор хромосом и участвующие, в частности, в половом размножении. При слиянии двух гамет в половом процессе результате оплодотворения (слияния яйцеклетки и сперматозоида) образуется зигота – диплоидная клетка, содержащая полный (двойной набор хромосом).

Исследования подтвердили, что это связано с выбросом радиоактивных веществ с электростанции [11].

Генетическое воздействие в поколениях, как правило, может быть более серьезным. Это наблюдается у потомков жертв атомной бомбардировки, выживших в Хиросиме и Нагасаки, которые до сих пор страдают от генетических дефектов из-за радиации. Комиссия по причинно-следственной связи атомной бомбардировки сообщила о психическом сбое, медленном физическом росте и более высоком уровне лейкемии у детей, подвергшихся воздействию ионизирующего излучения в матке во время взрыва ядерной бомбы. Эмбрион или плод подвергаются воздействию радиоактивного излучения материала, передаваемого матерью через пищу и питье (внутреннее облучение) или непосредственно через внешнее облучение. Поскольку у плода есть защита в матке, его доза облучения имеет тенденцию быть ниже, чем доза для матери в большинстве случаев облучения. Тем не менее, эмбрион и плод особенно чувствительны к радиации, и последствия воздействия на здоровье могут быть серьезными, даже при дозах облучения, меньших, чем те, которые непосредственно влияют на мать. Такие эффекты могут включать задержку роста, пороки развития, нарушение функции мозга и рак [9]. На рисунке 7 приведены основные пути дозового облучения эмбриона.

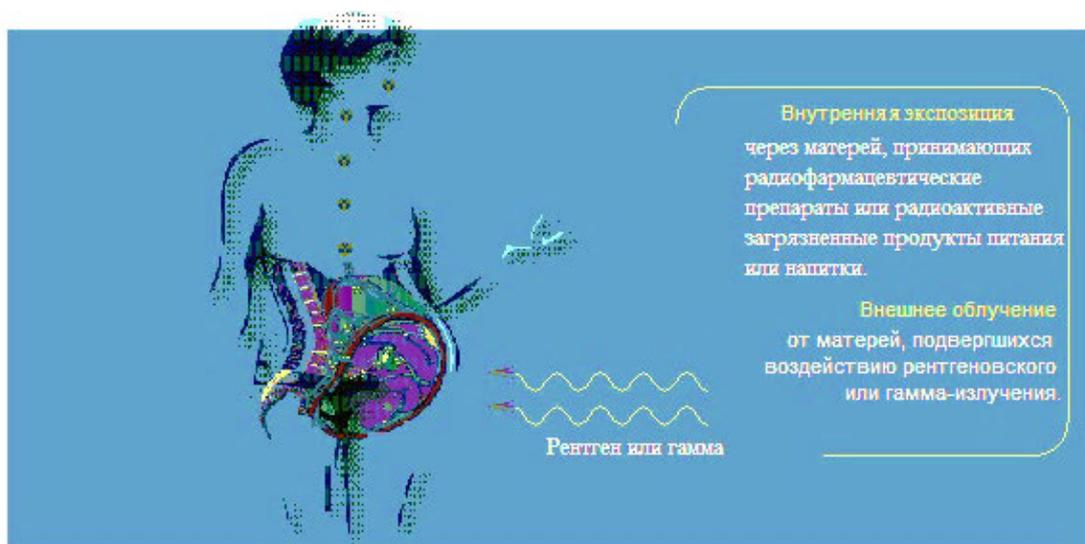


Рисунок 7 – Пути радиационного облучения эмбрионов [9] [Ways of radiation exposure of embryos]

Развитие млекопитающих в утробе матери происходит примерно в три этапа. Как известно, радиация может убить эмбрион в матке на первом этапе, который длится от зачатия до момента, когда он оседает на стенке матки и охватывает первые две недели беременности у женщин. Трудно изучить, что происходит на этом этапе; однако информация в основном из экспериментов на животных подтверждает фатальное влияние на ранний эмбрион доз облучения выше определенных порогов.

На следующем этапе, который длится у человека со второй по восьмую неделю, опасность в том, что радиация приведет к деформации растущих органов, а это может привести к смерти, например, во время рождения. Наиболее значительное повреждение, по-видимому, происходит в центральной нервной системе после восьмой недели, когда начинается третья и последняя стадия беременности. Значительный прогресс достигнут в понимании воздействия радиационного облучения на мозг неродившихся детей. Например, 30 детей, выживших в результате атомных бомбардировок из примерно 1 600, подвергшихся до рождения дозе в 1 Гр, имели крайнюю интеллектуальную инвалидность. Различные этапы и возможные эффекты приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Различные этапы и возможные негативные эффекты воздействия ИИ зародыша беременных женщин [Different stages and possible negative effects of the ionizing radiation of pregnant women embryo]

Стадия беременности (дни)	Возможные последствия
1 – 9	Смерть зародыша, скорее всего, с небольшой вероятностью порока развития
10 – 12	Снижение летального эффекта с небольшой вероятностью порока развития
13 – 56	Производство врожденных пороков развития и задержки роста
57 – 112	Экстремальная умственная отсталость (время наиболее серьезного воздействия на ЦНС)
113– 175	Менее частое влияние на ЦНС
После 175	Очень низкая частота эффектов ЦНС (ни один из зарегистрированных случаев тяжелой задержки)

Кроме того, воздействие может непосредственно повредить эмбрион или плод, уже развивающийся в утробе матери. Поэтому важно различать радиационное облучение, как взрослых, детей, эмбрионов, так и плодов. Учитывая актуальность этих проблем UNSCEAR* в этих группах провел всесторонние исследования воздействия ИИ как на здоровье матерей, так и на наследственные эффекты эмбрионов [9]. Воздействие на здоровье человека зависит от многих физических факторов, и из-за их анатомических и физиологических различий воздействие радиационного облучения на детей и взрослых различно. Кроме того, поскольку у детей более мелкие тела, и они менее защищены экранирующими тканями, доза для их внутренних органов будет выше, чем для взрослых при одинаковом внешнем воздействии. Кроме того, дети меньше взрослых, поэтому они могут получить более высокую дозовую нагрузку от радионуклидов, осевших на подстилающую поверхность [9]. Что же касается внутреннего облучения, то из-за меньшего роста и объема детей, когда их органы расположены ближе друг к другу, концентрация радионуклидов в одном органе воздействует и на другие органы в большей степени, чем это имело бы место для взрослых.

При дыхательном пути поступления йода-131 в организм человека величина дозы ИИ, создаваемой этим радионуклидом на щитовидную железу у детей, примерно в девять раз выше, чем у взрослых [9]. Исследования аварии на Чернобыльской АЭС подтвердили связь между раком щитовидной железы и йодом-131, который концентрируется в основном на этом органе. Эпидемиологические исследования также показали, что у молодых людей в возрасте до 20 лет вероятность развития лейкемии после такого же облучения примерно в два раза выше, чем у взрослых. Кроме того, дети в возрасте до десяти лет особенно восприимчивы к воздействию ИИ. Некоторые другие исследования показывают, что дети в несколько раз чаще умирают от лейкемии, чем взрослые. Другие исследования показали, что у девочек в возрасте до 20 лет вероятность развития рака молочной железы примерно в два раза выше, чем у взрослых женщин (рис. 8). В докладе UNSCEAR был рассмотрен научный материал, указывающий на то, что онкологические заболевания у детей имеют более широкий спектр, чем у взрослых, и зависят от типа опухоли, а также от возраста и пола ребенка [9]. Радиочувствительность человека, играющая значительную роль в онкологических заболеваниях, существенно отличается у разных людей и является тем спусковым механизмом, который приводит к возникновению тех или иных опухолей, вызванных облучением. Исследования различий в радиочувствительности у взрослых и детей показали, что дети более чувствительны к развитию рака щитовидной железы, мозга, кожи и молочной железы, а также лейкемии. Из приведенного выше анализа (рис. 8) становится ясно, что генетическое воздействие и онкологические заболевания являются основными проблемами для здоровья при воздействии ИИ.

* [United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation]. Научный комитет ООН по последствиям атомной радиации.

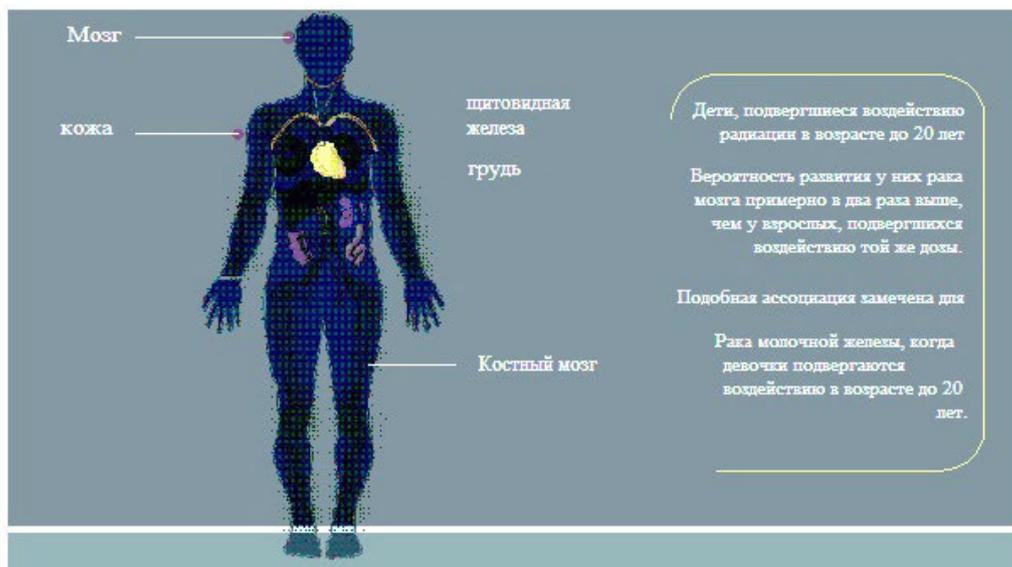


Рисунок 8 – Особенности радиочувствительных органов у детей [9]
[Features of radiosensitive organs in children]

Они могут быть более вероятным, чем генетические изменения в сформировавшемся организме. Генетические эффекты могут включать мертворождение, врожденные аномалии, снижение массы тела при рождении, младенческую и детскую смертность. Это результаты мутации в клетках людей, подвергшихся воздействию ИИ, которые передаются их потомству. Эти эффекты могут проявиться в прямой семье, если поврежденные гены являются доминирующими, или могут появиться во многих поколениях позже, если гены рецессивны.

Уменьшение степени воздействия ионизирующего излучения на детей

При разработке стандартов, позволяющих уменьшить риски развития онкологических заболеваний, связанных с воздействием ИИ низких уровней доз [12], научные консенсусные группы и другие регулирующие органы рекомендовали использовать линейную беспороговую модель.

В рекомендациях подчеркивается необходимость применения принципа ALARA относительно снижения уровней ИИ, оказывающего воздействие на детей, представляющих собой подгруппу населения, обладающего повышенной радиочувствительностью. Значение этого подхода возросло с ростом использования диагностических процедур, включающих облучение в низких дозах, особенно при компьютерной томографии (КТ), при которой создается доза в 30-90 mSv на 2-3 сканирования. Эту дозу можно сравнить с низкими дозами радиации (5-150 mSv), которым подверглись подгруппы населения Хиросимы из 25 000, выживших после атомной бомбардировки. Поэтому применяя линейную беспороговую модель, относительно возникновения онкологических заболеваний при воздействии ИИ на человека, Бреннер Д.Ж. [13] констатирует, что увеличение риска онкологических заболеваний, связанных с величинами указанных доз, также позволяет предположить, что дозовая нагрузка на органы детей, образующаяся при КТ-исследованиях, может также увеличивать риск онкологических заболеваний. На опасность стимулирования онкологических заболеваний у детей, подвергающихся воздействию ИИ при использовании диагностического оборудования отмечают также авторы работы [14].

Негативные последствия работы атомных электростанций

К негативным последствиям работы атомных электростанций, в первую очередь, следует отнести неисключающуюся возможность возникновения ряда событий на АЭС, которые могут привести к радиационным авариям, развитие которых в той или иной степени оказывает влияние на здоровья персонала АЭС и населения, проживающее вблизи станции. При всем множестве радиационных аварий, случившихся в мире за

время, в течение которого развивалась атомная промышленность и производство атомного оружия, основным фактором, по причине которого произошли радиационные аварии, является человеческий фактор. Основные черты этого фактора: халатность, невнимательность, самонадеянность, физическая или психологическая усталость и т.д. Эти черты или недостатки, по сути, характерны для каждого человека, но проявляются они могут лишь в крайних случаях по причине физической, психологической усталости или самонадеянности. Вот в результате событий, развивающихся в этом крайнем случае, и может возникнуть радиационная авария.

Вторым негативным фактором, по его значимости, определяющим негативные последствия работы АЭС, являются экологические проблемы, возникающие в результате радиационной аварии, сопровождающейся выбросом радиоактивных веществ в атмосферу, определяющие радиоактивное загрязнение окружающей среды, ликвидация которого требует вмешательства значительного количества людей, техники, финансовых средств, необходимых как для оплаты работ по ликвидации последствий радиационной аварии, так и для оплаты жилья населению при его эвакуации из загрязненного района и т.д. В работе [15] авторами показано, что ликвидация последствий Чернобыльской аварии для СССР обошлась в \$700 млрд, а затраты на ликвидацию последствий на АЭС Фукусима-1 в Японии в настоящее время составляют \$180 млрд.

Вместе с тем, радиоактивное загрязнение окружающей среды и негативное воздействие работы АЭС Кота на население, проживающее в ряде деревень Раджастхана (Индия), расположенных вблизи этой атомной электростанции, о котором отмечалось авторами ранее [11] нельзя отнести к указанным факторам. По мнению авторов настоящей статьи, на АЭС Кота необходимо произвести модернизацию систем очистки выбросов, что позволит уменьшить их величину в условиях штатной работы, но потребует дополнительного финансирования, в чем, по-видимому, не заинтересовано руководство АЭС. Однако эти проблемы относятся к области социальных и внутривластных проблем Индии, а не к особенностям воздействия ИИ на биообъекты, хотя в основе и этих проблем также лежит человеческий фактор.

Методы и средства радиационного и экологического контроля на ядерных объектах

Радиационная защита направлена на обеспечение надлежащего уровня защиты людей и окружающей среды без чрезмерного ограничения полезных действий в результате воздействия радиации. Это является частью деятельности Международной организации труда (ILO/MOT) по защите работников от болезней, травм, возникающих в связи с их работой, в соответствии с уставом Организации. Программы ИО скоординированы, что дает правительствам, организациям работодателей и работников необходимую помощь в разработке и реализации программ по улучшению условий труда и окружающей среды. Они сотрудничают с другими международными организациями, такими как МАГАТЭ и Всемирная организация здравоохранения (WHO/ВОЗ), а также с международными профессиональными организациями, такими как Международная ассоциация по радиационной защите (IRPA), Международная комиссия по радиологической защите (ICRP) и Международная комиссия по защите от неионизирующей радиации. (ICNIRP).

Повышение радиационной безопасности атомных электростанций и других предприятий атомной отрасли является одной из наиболее актуальных проблем атомной энергетики, которая включает в себя проблему контроля внешней среды, воздушных и водных бассейнов, подстилающей поверхности, определения дозовых нагрузок на население, проживающее вблизи АЭС, и другие задачи. Решение экологических проблем в регионе АЭС осуществляется путем мониторинга радиационной обстановки в районе, для чего используются системы радиационного контроля окружающей среды. Детальный анализ [16] показывает, что такие защитные

системы включают в себя автоматизированные блоки измерения данных и оборудование, которое обеспечивает их работу, получает и обрабатывает данные об контролируемых параметрах излучения в зоне контролируемого доступа к АЭС, на промышленной площадке, в санитарно-защитной зоне, и в зоне наблюдения во всех режимах эксплуатации АЭС, включая проектные и запроектные аварии, а также состояние АЭС при выводе из эксплуатации энергоблоков.

В соответствии с моделью Российской Федерации [17] радиационный контроль на АЭС осуществляется службами радиационного контроля АЭС, сертифицированными в соответствии с требованиями Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии. Организация радиационного контроля АЭС (объем, частота, контрольные точки, исполнители и учет результатов) осуществляется по соответствующим правилам, утвержденным региональной дирекцией Федерального Медико-Биологического Агентства (ФМБА) России. Также региональные управления ФМБА России осуществляют независимый, избирательный радиационный контроль объектов окружающей среды и продуктов питания местного производства. Основываясь на принципах радиационной безопасности, принятых мировым сообществом, концерн «Росэнергоатом» последовательно проводит политику по внедрению и дальнейшему развитию методологии оптимизации радиационной защиты на АЭС. Метод заключается в поддержании индивидуальных доз облучения и количества облученных лиц на минимально возможных уровнях с учетом экономических и социальных факторов, а информация о дозах облучения заносится в учетные карточки персонала для индивидуальных доз облучения и в электронные базы данных автоматизированной системы индивидуального дозиметрического контроля (АСИДК), созданного в концерне Росэнергоатом [17]. Результаты представлены в радиационно-чистых паспортах соответствующих организаций и годовых отчетах о радиационной обстановке на площадках АЭС. Данная модель радиационного контроля предназначена для подтверждения отсутствия радиационного воздействия АЭС на население и окружающую среду путем контроля и анализа изменений радиационной обстановки в санитарно-защитной зоне и зоне наблюдения на АЭС. Кроме того, для обеспечения непрерывного контроля за интенсивностью дозирования в месте расположения АЭС вокруг каждой АЭС действует автоматизированная система контроля радиационной обстановки (АСКРО) [18].

Исследования корейской модели показывают, что их радиационный мониторинг окружающей среды состоит из двух частей: общенациональной программы мониторинга и программы мониторинга ядерных установок. Национальное отслеживание осуществляется на региональных станциях мониторинга (RMS), а региональные посты мониторинга (RMP) распределены по всей стране, а также в Центральной измерительной лаборатории (CML), управляемой Корейским институтом ядерной безопасности (KINS). Мониторинг ядерных установок проводится на четырех атомных электростанциях и на двух площадках исследовательских реакторов. Все данные, собранные в RMS и RMP, а также на площадках ядерных реакторов, доступны для KINS через интегрированную сеть радиационного мониторинга окружающей среды (IERMN). Помогает в решении проблем радиационного воздействия в стране.

Кроме того, в Соединенных Штатах, до выдачи разрешения на строительство или лицензии на эксплуатацию атомной электростанции, федеральные агентства (например, USNRC) обязаны оценивать потенциальное воздействие этой установки на окружающую среду, чтобы гарантировать, что выдача разрешения или лицензия будет соответствовать национальным природоохранным целям, установленным в Законе о национальной экологической политике (NEPA) 1969 года и в Федеральном законе о контроле за загрязнением воды. Чтобы получить информацию для этой оценки, заявители должны представить отчет о потенциальном воздействии станции и связанных с ней объектов на окружающую среду. А после того, как станция начнет

функционировать, необходимо представить ежегодный экологический отчет, чтобы обеспечить постоянное соответствие требованиям, изложенным в лицензии на установку, и актам, указанным ранее [19]. Иванчук [20], постулировал: что решение практических задач обеспечения приемлемого качества окружающей среды (для здоровья и жизнедеятельности населения) над антропогенными объектами, может быть достигнуто путем создания и внедрения современных автоматизированных систем контроля радиационной обстановки окружающей среды (АСКРО).

Внедрение новых технологий радиационно-экологического контроля окружающей среды

Как сообщается в работах [16, 17]: разработка и внедрение АСКРО позволяют значительно улучшить ситуацию с точки зрения неблагоприятного воздействия предприятия на окружающую среду в окрестностях, действующих АЭС, химических и металлургических предприятий. Эта автоматизированная система имеет набор датчиков, компьютерных программ и исполнительных механизмов, которые должны контролировать ситуацию в окружающей среде на территории предприятия в режиме реального времени, производить необходимые расчеты и представлять результаты на центральный щит управления оператора и общественности в виде простых и понятных терминах. Подобные системы в виде автоматизированных систем радиационного контроля (ARMS) были успешно внедрены и эксплуатируются на всех атомных электростанциях в России. Основные цели использования компьютеризированных систем, предназначенных для контроля за состоянием окружающей среды, состоят в следующем [16, 17, 21-24]:

- Обеспечивать раннее обнаружение повышенного или аварийного выбросов газоаэрозольных радиоактивных примесей и на основе полученных данных проводить оценки их концентраций и распространение;
- Прогнозировать возможное загрязнение окружающей среды воздушного бассейна, подстилающей поверхности и подкисление поверхностных вод района;
- Осуществлять измерение концентрации ядовитых и токсичных веществ в полевых условиях;
- Оценивать токсикологические и химические нагрузки на персонал объекта и находящееся поблизости население;
- Предоставлять рекомендации руководству предприятия, Министерству по чрезвычайным ситуациям и другим ответственным лицам для обоснования процесса принятия решений по защите окружающей среды и местного населения, и минимизации экологических последствий.

Система должна работать в режиме реального времени, что может быть достигнуто за счет автоматизации сбора радиационных, токсикологических, химических и метеорологических данных, от которых зависят расчеты прогнозирования, и использования математической модели распространения газоаэрозольных примесей в атмосфере. Причем математическая модель должна учитывать реальное географическое положение АЭС и особенности геофизического положения региона [25].

Условия размещения ARMS

Рассматриваемые в работах [16, 17, 21-24] системы АСКРО, основу которых составляют γ -детекторы, датчики метеопараметров или детекторы химического загрязнения окружающей среды и др., следует размещать на промышленной площадке и в санитарно-защитной зоне* (СЗЗ). Для оценки химического загрязнения окружающей среды достаточно разместить датчики по периметру промышленной площадки. Однако для систем АСКРО, проектируемых для АЭС, при размещении

* Санитарно-защитная зона-это территория вокруг предприятия, отделяющая промышленное предприятие от жилых кварталов или сельскохозяйственных угодий, используемых населением при осуществлении хозяйственной деятельности.

детекторов вокруг АЭС должны учитываться такие метеорологические характеристики региона, как состояние устойчивости атмосферы, определяемое по методике градиентных наблюдений [16, 22-24], требующей данных по скорости ветра, температуре и влажности в различные сезоны и различное время дня и на различных уровнях по высоте. Знание этих метеорологических характеристик позволит определить наихудшее состояние устойчивости атмосферы, для которого находят оптимальное значение количества детекторов, размещаемых вокруг АЭС. Это позволяет оптимизировать финансовые и материальные затраты при установке подобных систем. Для повышения надежности передачи информации система датчиков дублируется не только их количеством, но и по каналу передачи информации: радиосвязь, связь через кабель, оптоволоконная связь и др. В работах указывается, что при определении расстояния, определяющего границу СЗЗ от возможного источника загрязнения, используется множество факторов. Эти факторы включают в себя мощность предприятия, условия его работы, характер и количество выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду, состояние устойчивости атмосферы, образование шума, вибрации и другие вредные физических факторы, а также меры, принимаемые для снижения негативного воздействия предприятия на окружающую среду и здоровье человека. В соответствии с санитарной классификацией промышленных объектов и объектов использования атомной энергии, СЗЗ устанавливается на расстоянии 50-1000 метров (м) от потенциального источника загрязнения. Это следует российскому законодательству, согласно которому всем предприятиям в России присваивается соответствующий класс от I до V, причем каждый класс имеет свой размер СЗЗ [26].

Математическая модель переноса радиоактивной примеси в атмосфере

В работах [23, 24] авторы, основываясь на схожести географических особенностей регионов, предназначенных для строительства АЭС, в соответствии с рекомендациями работы [25], для оценки радиоактивного загрязнения окружающей среды (воздушного бассейна и подстилающей поверхности) в условиях радиационной аварии, сопровождающейся выбросом в атмосферу газоаэрозольной радиоактивной примеси, использовали модель переноса примеси, основанной на уравнении турбулентной диффузии, рассматривая перенос ее концентрации $q(x, y, z)$ Ки/м³ со следующими атмосферными метеорологическими параметрами, которые определяли, используя метод градиентных наблюдений над скоростью ветра и температурой [22, 27]:

- $u(z)$ – продольной скоростью воздушного потока м/с (поперечную скорость принимали равной нулю);
- $k(z)$ – коэффициентом турбулентной диффузии м²/с;
- $b(z)$ – энергия турбулентных пульсаций, определяемая в рамках модели приземного слоя атмосферы.

Кроме того, в статье сообщалось, что расчет атмосферного переноса примеси газ – аэрозоль, который обычно описывается трехмерным уравнением турбулентной диффузии, можно существенно упростить, предполагая, что субстанция вдоль оси Y, может быть описана по закону Гаусса. Таким образом, это позволяет нам определить объемную активность примеси, используя следующее выражение (3):

$$q(x, y, z) = \frac{S(x, z)}{\sqrt{2\pi} \sigma_y(x)} \quad (3)$$

где $\sigma_y(x)$ – стандартное отклонение; функция $S(x, z)$ определяется как (4):

$$S(x, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} q(x, y, z) dy = 2 \int_0^{+\infty} q(x, y, z) dy. \quad (4)$$

Таким образом, для объемной концентрации примеси газа или аэрозоля, получают уравнение (5):

$$u \frac{\partial S}{\partial x} - w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(z) \frac{\partial S}{\partial z} \right] - \sigma S + \varphi, \quad (5)$$

где $\varphi(x, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y, z) dy = M\delta(x)\delta(z - h_{эф})$; $f = M\delta(x)\delta(y)\delta(z - h_{эф})$ источник загрязняющего газа или аэрозольной примеси; M – мощность выброса в (Ки/с); $h_{эф}$ – эффективная высота выброса, представляющая собой сумму геометрической высоты венттрубы H_T и приращения Δh , обусловленного конвективным подъемом газоаэрозольной радиоактивной струи, выброшенной из венттрубы; σ – постоянная релаксации загрязняющего газа или аэрозольной примеси ($\sigma = \sigma_0 + \lambda$), которая складывается из суммы: константы вымывания примесей из атмосферы σ_0 с⁻¹ и постоянной ее радиоактивного распада λ . Рассматривая долгоживущую радиоактивную примесь, полагают, что период полураспада слишком велик, а потому $\lambda = 0$, так что $\sigma = \sigma_0$; w – гравитационная скорость осаждения примесей, м/с.

В рассматриваемой модели переноса величина $\sigma_y^2(x)$ представлена в виде (6):

$$\sigma_y^2(x) = \bar{b} x^2 / \bar{u}^2 \left(1 + \frac{ax\bar{b}}{\bar{k}\bar{u}} \right), \quad (6)$$

где \bar{b} , \bar{k} , \bar{u} значения $b(z)$, $k(z)$, $u(z)$, $a = 0,015$, усредненные по приземному слою высотой $H_{пр} \sim 75$ м с весом $S(x, z)$.

$$\bar{b} = \frac{\int_0^{H_{пр}} b(z) \left(\int_0^\infty S(x, z) dx \right) dz}{\int_0^{H_{пр}} \left(\int_0^\infty S(x, z) dx \right) dz}; \quad \bar{k} = \frac{\int_0^{H_{пр}} k(z) \left(\int_0^\infty S(x, z) dx \right) dz}{\int_0^{H_{пр}} \left(\int_0^\infty S(x, z) dx \right) dz}; \quad \bar{u} = \frac{\int_0^{H_{пр}} u(z) \left(\int_0^\infty S(x, z) dx \right) dz}{\int_0^{H_{пр}} \left(\int_0^\infty S(x, z) dx \right) dz}. \quad (7)$$

Граничные условия определяются выражениями (8)-(11):

$$S(x, z) |_{x=0} = 0; \quad (8)$$

$$S(x, z) |_{x \rightarrow \infty} = 0; \quad (9)$$

$$S(x, z) |_{z \rightarrow \infty} = 0; \quad (10)$$

$$k(z) \frac{\partial S}{\partial z} \Big|_{z=z_0} = (\beta - w) S_{z=z_0}, \quad (11)$$

где β – скорость сухого осаждения примесей газа и аэрозоля на подстилающей поверхности, а z_0 – параметр шероховатости подстилающей поверхности. Аналитическое решение задачи (5), (6), (8)-(11) дается формулой (12), а объемную концентрацию примеси газа и аэрозоля можно рассчитать по формуле (3), в которой $S(x, z)$ и представляет собой решение указанной задачи;

$$S(x, z) = \frac{M}{2} \exp \left(- \left[\frac{\sigma_0 x}{\bar{u}} + \frac{w^2 x}{4\bar{k}\bar{u}} + \frac{w(z-h_{эф})}{2\bar{k}} \right] \right) \left\{ \frac{\exp \left(- \frac{[z+h_{эф}]^2 \bar{u}}{4\bar{k}x} \right) + \exp \left(- \frac{[z-h_{эф}]^2 \bar{u}}{4\bar{k}x} \right)}{\sqrt{\pi \bar{k} \bar{u} x}} - \right. \\ \left. - \frac{2\beta-w}{\bar{k}\bar{u}} \exp \left[\frac{(2\beta-w)(z+h_{эф})}{2\bar{k}} + \left(\frac{2\beta-w}{2\bar{k}} \right)^2 \frac{\bar{k}x}{\bar{u}} \right] \times \operatorname{erfc} \left[\left(\frac{2\beta-w}{2\bar{k}} \right) \sqrt{\frac{\bar{k}x}{\bar{u}}} + \frac{(z+h_{эф})}{2\sqrt{\bar{k}x}} \right] \right\}. \quad (12)$$

На рисунке 9 *a*, *б* приведены результаты расчетов изолиний пространственного распределения радиоактивной примеси в приземном слое атмосферы (на высоте $z = 1,5$ м) для неустойчивого (*a*) и устойчивого (*б*) состояний атмосферы. Эти расчеты наглядно показывают, какую важную роль может играть состояние устойчивости атмосферы при оценке площади радиоактивного загрязнения, подстилающей поверхности и нанесения ущерба населенным пунктам, сельскохозяйственным угодьям и экологии окружающей среды в целом, если эти населенные пункты попадут в зону радиоактивного загрязнения.

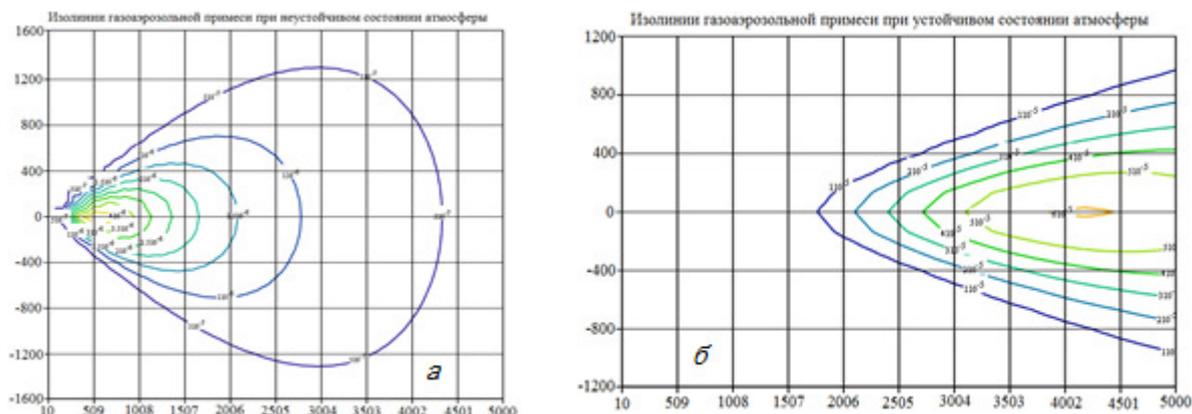


Рисунок 9 *a* – Уровни поверхностного загрязнения подстилающей поверхности а) для неустойчивого состояния атмосферы при параметре устойчивости $L = -5$, $z = 1,5$ м, $\bar{b} = 1,129$; б) для устойчивого состояния атмосферы при параметре устойчивости $L = 17$, $z = 1,5$ м, $\bar{b} = 0,041$ [24] [Levels of surface contamination of the underlying surface a) for an unstable state of the atmosphere with a stability parameter $L = -5$, $z = 1.5$ m.; b) for a stable state of the atmosphere with a stability parameter $L = 17$, $z = 1.5$ m.]

Расчет мощности дозы с использованием интегрального метода

Расчеты характеристик дозы интегральным методом [16, 22-24] основаны на представлении объемного источника радиоактивного загрязнения окружающей среды совокупностью элементарных источников, координаты которых задаются функциональной зависимостью вида (1), в каждом из которых распределение загрязнителя предполагается равномерным. Расстояние r между точкой наблюдения и соответствующим элементарным источником определяется по формуле (13), а значение мощности дозы рассчитывается как интеграл от набора точечных источников по формуле (14).

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} \quad (13)$$

где x , y , z – текущие координаты; x_0 , y_0 , z_0 – координаты точки наблюдения.

$$D'(x_0, y_0, z_0) = 1,31 \cdot 10^3 \frac{E \cdot \eta \cdot \mu_a}{4\pi} \cdot \int_V B(E, r) \cdot q(x, y, z) \cdot \frac{e^{-\mu r}}{r^2} dv \text{ мЗв/ч}, \quad (14)$$

где E – энергия фотонов; η – квантовый выход; $B(E, r)$ – фактор накопления; μ_a , μ – коэффициенты линейного поглощения и ослабления γ -излучения соответственно;

V – область интегрирования.

Заключение

Биологические эффекты, которые рассматриваются в настоящей статье, могут быть вызваны различными причинами: в результате химического воздействия на человека, тяжелыми металлами, интенсивным воздействием электромагнитных волн, в результате воздействия ионизирующего излучения и т.д. Воздействие ионизирующего

излучения может повреждать клетки таким образом, что последнее может привести к онкологическим заболеваниям. Этот негативный эффект может быть обусловлен прямыми или косвенными механизмами, а также и в результате воздействия острых или замедленных эффектов. Острые эффекты возникают при воздействии радиации высокого уровня, тогда как отсроченные эффекты могут появиться через определенное время. К ним относятся онкологические, генетические эффекты, воздействие на эмбрион, а также, такие как катаракта и гипотиреоз (состояние, обусловленное длительным, стойким недостатком гормонов щитовидной железы). Основываясь на результатах анализа в работе, можно констатировать, что ни один уровень облучения не может быть охарактеризован как абсолютно безопасный, и ни один уровень не является одинаково опасным.

Радиационное загрязнение окружающей среды, анализируемое в статье, является одним из наиболее вредных загрязнений по сравнению с другими, поскольку негативные эффекты воздействия других загрязнителей обычно развиваются, как правило, не сразу, а после длительного воздействия, тогда как радиационное загрязнение может привести к непоправимым потерям даже после кратковременного воздействия. Результаты атомной бомбардировки Хиросимы и Нагасаки предоставили четкие доказательства того, что ионизирующее излучение является канцерогеном для человека. Данные исследований по Хиросиме показали, что влияние на рост мозга у детей, подвергшихся воздействию внутриутробного развития в Хиросиме, а также дефектные роды, наблюдаемые в некоторых деревнях в Раджастхане из-за радиационного воздействия, являются результатом воздействия ИИ. Разумеется, этого бы не произошло, если бы не было радиационных выбросов в окружающую среду. Следовательно, необходимы адекватные защитные меры, исключая подобные события. В исследовании также было обращено внимание на необходимость снижения доз излучения, возникающих при компьютерной томографии в особенности детей.

Цель радиационной защиты, как показано в работе, состоит в том, чтобы обеспечить стандарт защиты для людей при уменьшении негативного воздействия ИИ, возникающего при использовании радиационных технологий, т.е. речь идет об эффективном применении принципа АЛАРА при их использовании. Учитывая негативное воздействие ионизирующего излучения и невозможность его полного исключения из хозяйственной деятельности, необходимо внедрять эффективные защитные меры в качестве которых, например, на АЭС могут использоваться автоматизированные системы АСРК АЭС, работа которых позволяет не только предупредить развитие радиационной аварии на АЭС, но и минимизировать их последствия, путем использования систем экологического мониторинга и автоматизированных систему радиационного контроля окружающей среды АСКРО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нормы радиационной безопасности. НРБ-99/2009. Санитарные правила и нормативы. СанПиН 2.6.1.2523 – 09. – URL : <http://docs.cntd.ru/document/902170553>.
2. *Машкович, В. П.*, Защита от ионизирующих излучений. Справочник / В. П. Машкович, А. В. Кудрявцева. – Москва : Энергоатомиздат, 1995. – 496 с.
3. *Гусев, Н. Г.*, Защита от ионизирующих излучений. Т. 1. Физические основы защиты от излучений / Н. Г. Гусев, Л. Р. Кимель, В. П. Машкович, Б. Г. Пологих, А. П. Суворов. – Москва : Атомиздат, 1969. – 472 с.
4. Смертельные дозы облучения для различных видов животных. – URL : <http://gematologo.ru/wp-content/uploads/2016/03/табл-22.png>.
5. Допустимые и смертельные дозы радиации для человека. – URL : https://mypresentation.ru/documents_6/76cb9d8df0586ede7989587ecb06bbbee/img18.jpg.
6. Kristy r. Kutanzi, Annie Lumen, Igor Koturbash, and Isabelle R. Miousse. Pediatric Exposures to Ionizing Radiation: carcinogenic Considerations. Int J Environ Respublic Health. 2016 Nov; 13 (11): 1057.

7. *Кемп, П.* Введение в биологию / П. Кемп, К. Армс. – Москва : Мир. – 1988. – 672 с.
8. *Елохин, А. П.* Основы экологии и радиационно-экологического контроля окружающей среды / А. П. Елохин, А. И. Ксенофонтов, И. В. Пырков. – Москва : НИЯУ МИФИ, 2016. – 680 с.
9. Effects of Ionizing Radiation on DNA (Влияние ионизирующего излучения на ДНК). – URL : <https://teachnuclear.ca/all-things-nuclear/radiation/biological-effects-of-radiation/effects-of-ionizing-radiation-on-dna/>.
10. Влияние радиации на плод беременной женщины. – URL : https://meduniver.com/Medical/onkologia/radiacia_i_plod.html.
11. Гадекар Сангамитра, Гадекар Сурендра. Медицинское исследование в районе индийской атомной станции (Кота, Раджасхана, Индия). – IEER: Энергетика и Безопасность. – 2003. – № 23. – С. 97.
12. *Готфрид, К.-Л. Д.* Радиация в медицине: необходимость проведения реформы системы регулирования (1996 год) / Кейт-Луиза Д. Готфрид, Гэри Пенн. – Доклад о консенсусном исследовании. – Институт медицины. – Комитет по рассмотрению и оценке программы медицинского применения комиссии по ядерному регулированию. – 29 марта 1996 г. – 308 с.
13. Brenner D.J. and Hall E.J. Computed Tomography-an Increasing Source of Radiation Exposure. N Engl J Med. 2007; 357 (22): 2277-2284.
14. Sadetzki s. And mandelzweig l. Childhood exposure to external ionizing radiation and solid cancer risk. Br j cancer. 2019; 100(7): 1021-1025.
15. Jonathan Samet, Joann Seo, 2016, «the financial costs of the chernobyl nuclear power plant disaster: a review of the literature». – URL : http://www.greencross.ch/uploads/media/2016_chernobyl_costs_report.pdf.
16. *Бубликова, И. А.* Анализ динамики радиационных факторов региона расположения Ростовской АЭС / И. А. Бубликова, О. Ф. Цуверкалова // Глобальная ядерная безопасность. – 2019. – № 3 (32). – С. 24-32.
17. *Стародубцев, И. А.* К вопросу об использовании автоматизированных систем контроля экологической обстановки на территориях, прилегающих к предприятиям черной, цветной металлургической и атомной промышленности / И. А. Стародубцев, А. П. Елохин // Глобальная ядерная безопасность. – 2015. – № 4(17). – С. 15-34.
18. *Елохин, А. П.* Автоматизированные системы контроля радиационной обстановки окружающей среды / А. П. Елохин. – Москва : НИЯУ МИФИ. – 2012. – 316 с.
19. *Гаврилов, С. Л.* Технические проблемы аварийного реагирования / С. Л. Гаврилов. – 22 октября 2013 г.
20. Jason T Harris. Radiological releases and environmental monitoring at commercial nuclear power plants Nuclear Power-Operation, Safety and Environment. 2011.09.06.
21. Ivashchuk O. A., Ivashchuk O. D., Konstantinov I. S., Mamatov A. V. Creation of automated control system of environmental safety of an industrial complex. ARPN journal of engineering and applied sciences. vol. 9 no.11. 2014. p. 2254-2255.
22. Elokhin A. P., Starodubtcev I. A. On the ecological Situation at Theterritories Adjacent to Chemical Andmetallurgical Facilities. Environmantal Quality Management. USA. 2017. V. 26, № 2. P. 23-43.
23. *Елохин, А. П.* Методы и средства систем радиационного контроля окружающей среды : монография / А. П. Елохин. – Москва : НИЯУ МИФИ, 2014. – 520 с.
24. *Алалем Е.А.* Метеорологические характеристики района строительства АЭС в Иордании / Е. А. Алалем, А. П. Елохин, А. И. Ксенофонтов, П. И. Федоров. // Глобальная ядерная безопасность. – 2017. – № 3(24). – С. 19-34.
25. *Елохин А. П.,* Метеорологические характеристики района АЭС «БУШЕР» в Иране / А. П. Елохин, Е. А. Алалем, А. И. Ксенофонтов. – Глобальная ядерная безопасность. – 2017. – № 4(25). – С. 23-47.
26. *Елохин, А. П.* Положение о повышении точности прогностических оценок радиационных характеристик радиоактивного загрязнения окружающей среды и дозовых нагрузок на персонал и население / А. П. Елохин, М. В. Жилина (НТЦ ЯРБ), Д. Ф. Рау, Е. А. Иванов (ВНИИАЭС) // Министерство природных ресурсов и экологии российской федерации федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. РБ – 053 – 09. – Утверждено приказом федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 8 июня 2010 г. – № 465. – 79 с.
27. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов. Главный государственный санитарный врач российской федерации. Постановление. «О введении в действие новой редакции санитарно-эпидемиологических правил и нормативов САНПИН 2.2.1/2.1.1.1200-03 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов» (с изменениями на 25 апреля 2014 года). – URL : <https://base.garant.ru/12158477/>.

28. Лайхтман, Д. Л. Физика пограничного слоя атмосферы / Д. Л. Лайхтман. – Ленинград : Гидрометиздат, 1970. – 341 с.

REFERENCES

- [1] Normy radiacionnoy bezopasnosti. NRB–99/2009. Sanitarnie pravila i normativy. SANPIN 2.6.1.2523 – 09. [Radiation Safety Standards. NRB – 99/2009. Sanitary Rules and Regulations. SANPIN 2.6.1.2523 – 09]. URL : <http://docs.cntd.ru/document/902170553> (in Russian).
- [2] Mashkovich V.P., Kudriavceva A.V. Zashchita ot ioniziruyuschikh izlucheniye. Spravochnik [Protection against Ionizing Radiation. Directory]. Moskva: Energoatomizdat [Moscow: Energoatomizdat], 1995. 496 p. (in Russian).
- [3] Gusev N.G., Kimel K.R., Mashkovich V.P., Poklogikh B.G., Suvorov A.P. Zashchita ot ioniziruyuschikh izlucheniye. V. 1. Phizicheskie osnovi zashchiti ot izlucheniye [Protection from Ionizing Radiation. Vol. 1. Physical Bases of Protection from Radiation]. Moskva: Atomizdat [Moscow: Atomizdat], 1969. 472 p. (in Russian).
- [4] Smertel'nyye dozy oblucheniya dlya razlichnykh vidov zhivotnykh [Lethal Doses for Various Animal Species]. URL : <http://gematolog-ro.ru/wp-content/uploads/2016/03/табл-22.png> (in Russian).
- [5] Dopustimyye i smertel'nyye dozy radiatsii dlya cheloveka [Permissible and Fatal Doses of Radiation to Humans]. URL : https://mypresentation.ru/documents_6/76cb9d8df0586ede7989587ecb06bbeec/img18.jpg (in Russian).
- [6] Kristy r. Kutanzi, Annie Lumen, Igor Koturbash, and Isabelle R. Miousse. Pediatric Exposures to Ionizing Radiation: Carcinogenic Considerations. *Int J Environ Respublic Health*. 2016 Nov; 13 (11): 1057.
- [7] Kemp P., Arms K. Vvedenie v biologiyu [Introduction to Biology]. Moskva: Mir [Moscow: Mir]. 1988. 672 p. (in Russian).
- [8] Elokhin A.P., Ksenofontov A.I., Pyrkov I.V. Osnovi ekologii i radiacionno-ekologicheskogo kontrolya okruzhayuschei sredi [Fundamentals of Ecology and Radiation-ecological Environmental Control]. Moskva: NRNU MEPhI [Moscow: NRNU MEPhI]. 2016. 680 p. (in Russian).
- [9] Effects of Ionizing Radiation on DNA (Влияние ионизирующего излучения на ДНК). – URL : <https://teachnuclear.ca/all-things-nuclear/radiation/biological-effects-of-radiation/effects-of-ionizing-radiation-on-dna/>.
- [10] Vliyaniye radiatsii na plod beremennoy zhenshchiny [The Effect of Radiation on the Fetus of Pregnant Woman]. URL : https://meduniver.com/Medical/onkologia/radiacia_i_plod.html (in Russian).
- [11] Gadekar Sangamitra, Gadekar Surendra. Medicinskoye issledovaniye v rayone indiyiskoy atomnoy stancii Kota (Radzhastkhan, Indiya) [Medical Research in the Area of the Indian Nuclear Power Plant (Kota, Rajasthan, India)]. IEER: Energetika i bezopasnost [Energy and Security]. IEER: No. 23, 2003. <https://ieer.org/ensec/no23/no23russ/sapeace.html> (in Russian).
- [12] Kate Louise D. Gottfried, Gary Pen. Radiatsiya v meditsine: neobkhodimost' provedeniya reformy sistemy regulirovaniya (1996 god) [Radiation in Medicine: the Need for Regulatory Reform (1996)]. Doklad o konsensusnom issledovanii [Consensus Study Report]. Institut meditsiny [Institute of Medicine]. Komitet po rassmotreniyu i otsenke programmy meditsinskogo primeneniya komissii po yadernomu regulirovaniyu [Committee for the Review and Evaluation of the Medical Application Program of the Nuclear Regulatory Commission]. 29 marta 1996 g. [March 29, 1996]. 308 p. (in Russian).
- [13] Brenner D.J. and Hall E.J. Computed Tomography-an Increasing Source of Radiation Exposure. *N Engl J Med*. 2007; 357 (22): 2277-2284.
- [14] Sadetzki s. And mandelzweig l. Childhood Exposure to External Ionizing Radiation and Solid Cancer Risk. *Br j cancer*. 2019; 100(7): 1021-1025.
- [15] Jonathan Samet, Joann Seo, 2016, «The Financial Costs of the Chernobyl Nuclear Power Plant Disaster: a Review of the Literature». – URL : http://www.greencross.ch/uploads/media/2016_chernobyl_costs_report.pdf.
- [16] Bublikova I. A., Tsuverkalova O. F. Analiz Dinamiki Radiacionnykh Faktorov Regiona Raspolozheniya Rostovskoy AES [[The Radiation Factors Dynamics Analysis of the Rostov NPP Location Area]. *Globalnaya yadernaya bezopasnost* [Global Nuclear Safety]. 2019. № 3(32). P.24-32 (in Russian).
- [17] Starodubtsev I.A. Elokhin A.P. K voprosu ob ispolzovanii avtomatizirovannikh system kontrolya ekologicheskoi obstanovki na territoriyakh, prilgayuschikh k predpriyatiyam chernoi, cvetnoi metallurgicheskoi i atomnoi promishlennosti [Issue of Using Automated Environmental Monitoring Systems in Territories Adjacent to Enterprises of the Ferrous, Non-Ferrous Metallurgical and

- Nuclear Industries]. *Globalnaya yadernaya bezopasnost* [Global Nuclear Safety]. 2015. № 4(17). P. 15-34 (in Russian).
- [18] Elokhin, A.P. *Avtomatizirovannyye sistemy kontrolya radiatsionnoy obstanovki okruzhayushchey sredy* [Automated Systems for Monitoring the Radiation Environment of the Environment]. Moskva: NRNU MEPhI [Moscow: NRNU MEPhI]. 2012. 316 p. (in Russian).
- [19] Gavrilov S.L. *Tekhnicheskie problemi avariynogo reagirovaniya*. 22 oktiabria 2013 g. [Technical Issues of Emergency Response. October 22, 2013] (in Russian).
- [20] Jason T Harris. *Radiological Releases and Environmental Monitoring at Commercial Nuclear Power Plants Nuclear Power-Operation, Safety and Environment*. 2011.09.06.
- [21] Ivashchuk O. A., Ivashchuk O. D., Konstantinov I. S., Mamatov A. V. *Creation of Automated Control System of Environmental Safety of industrial complex*. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. Vol. 9 No.11. 2014. p. 2254-2255.
- [22] Elokhin A. P., Starodubtcev I. A. *The Ecological Situation at The territories Adjacent to Chemical And metallurgical Facilities*. *Environment Quality Management*. USA. 2017. V. 26, № 2. P. 23-43.
- [23] Elokhin A.P. *Metodi i sredstva system radiacionnogo kontrolya okruzhayuschei sredi*. *Monografiya* [Methods and Means of Environmental Radiation Monitoring Systems. Monograph]. Moskva: NRNU MEPhI [Moscow: NRNU MEPhI]. 2014. 520 p. (in Russian).
- [24] Alalem E.A., Elokhin A.P., Ksenofontov A.I., Fedorov P.I. *Meteorologicheskiye kharakteristiki rayona stroitel'stva AES v Iordanii* [Meteorological Characteristics of the Planned Nuclear Power Plant in Jordan]. *Globalnaya yadernaya bezopasnost* [Global Nuclear Safety]. 2017. № 3(24). P. 19-34 (in Russian).
- [25] Elokhin A.P., Essa Alalem, Ksenofontov A. I. *Meteorologicheskiye kharakteristiki rayona AES Busher v IRANE* [Meteorological Characteristics of the Bushehr NPP Area in Iran]. *Globalnaya yadernaya bezopasnost* [Global Nuclear Safety]. 2017. № 4(25). P. 23-47 (in Russian).
- [26] Elokhin A.P., Zhilina M.V. (STC NRS), Rau D.F., Ivanov E.A. (VNIIAES). *Polozhenie o povishenii tochnosti prognosticheskikh ocenok radiacionnikh nagruzok na personal i naselenie* [Regulation to Improve the Accuracy of Prognostic Estimates of the Radiation Characteristics of Radioactive Pollution of the Environment and Dose Loads on Personnel and Public]. *Ministerstvo prirodnykh resursov i ekologii rossiiskoi federacii, federalnaya sluzhba po ekologicheskomu, technologicheskomu i atomnomu nadzoru*. RB – 053 – 09. *Utverzhdeno prikazom federalnoi sluzhbi po ekologicheskomu, technologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 8 iyunya 2010 g.* [Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation Federal Service for Environmental, Technological and Atomic Supervision. RB - 053 - 09. Approved by order of the Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision of June 8, 2010]. No. 465. 79 p. (in Russian).
- [27] *SANPIN 2.2.1/2.1.1.1200-03 Sanitarno-zaschitnie zoni i sanitarnaya klassifikaciya predpriyatiy, sooruzheniy i inikh obektov*. *Glavnyi gosudarstvennyi sanitarniy vrach rossiyskoyi federacii*. *Postanovlenie O vvedenii v deistvie novoi redakcii sanitarno-epidemiologicheskikh pravil i normativov SANPIN. 2.2.1/2.1.1.1200-03 Sanitarno-zaschitnie zoni i sanitarnaya klassifikaciya predpriyatii, sooruzheniy i inikh obektov (s izmemeniyami na 25 aprelya 2014 goda)*. [Sanpin 2.2.1 / 2.1.1.1200-03 Sanitary-Protection Zones and Sanitary Classification of Enterprises, Structures, and Other Facilities. Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation. Resolution “Entry into Force of the New Version of the Sanitary-Epidemiological Rules and Standards of SANPIN 2.2.1 / 2.1.1.1200-03 Sanitary Protection Zones and Sanitary Classification of Enterprises, Structures and Other Facilities (as amended on April 25, 2014)”. URL : <https://base.garant.ru/12158477/> (in Russian).
- [28] Layikhtman D.L. *Fizika pogranichnogo sloya atmosfery* [Physics of Boundary Layer of the Atmosphere]. Leningrad: *Gidrometeoizdat* [Leningrad: *Gidrometizdat*]. 1970. 341 p. (in Russian).

Features of Ionizing Radiation Effects on Biological Objects and Methods for its Radiation Monitoring at Nuclear Facilities (Analytical Review)

B.K. Orumo¹, A.P. Elokhin², A.I. Ksenofontov³

National Research Nuclear University «MEPhI», Kashirskoye shosse, 31, Moscow, Russia 115409

¹*ORCID iD: 0000-0001-6251-1736*

ResearcherID: S-9359-2019

e-mail: orumokenoll@yahoo.com

²ORCID iD: 0000-0002-7682-8504

WoS Researcher ID: G-9573-2017

e-mail: elokhin@yandex.ru

³ORCID iD: 0000-0002-6864-9805

WoS Researcher ID: H-1833-2017

e-mail: AIKsenofontov@mephi.ru

Abstract – The article provides a brief analytical review of radiation effects associated with the impact of ionizing radiation on biological objects. The processes of the action of ionizing radiation on molecules of deoxyribonucleic acid (DNA), which occur in the body at the cellular level during its absorption, are considered. It is shown that in a wide range of dose rates generated by ionizing radiation when the latter acts on biological objects and, in particular, on humans, the most dangerous are the genetic consequences, which play an essential role for the population of countries that actively use ionizing radiation in industry. Other uses include medicine, particular types of production, as well as in the production of electricity at nuclear power plants. Particular attention is paid to the effects of ionizing radiation on children, requiring increased attention in the diagnosis of diseases in post-nuclear accidents, as well as during the diagnosis or treatment of radiation. As methods of radiation monitoring of ionizing radiation, the article provides a brief presentation of an automated system of radiation monitoring of the environment with its goals, objectives, and methods to minimize the consequences of radiation accidents at existing nuclear power plants.

Keywords: ionizing radiation, radiation damage, deoxyribonucleic acid DNA, radiosensitivity, automated of environmental radiation monitoring system (ARMS), dose, and ionizing radiation dose rate.