

# ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ ЗАЩИТНЫХ ВЕЛИЧИН В РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

## PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF THE SYSTEM OF PROTECTION QUANTITIES IN RADIATION SAFETY

**Н. Н. Тушин, О. М. Хаджинова**

**N. N. Tushin, O. M. Khajynava**

*Учреждение образования «Международный государственный экологический институт имени А.Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, (МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ),*

*г. Минск, Республика Беларусь*

*nteco@tut.by, omiga@mail.ru*

*International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, ISEI BSU*

*Minsk, Republic of Belarus*

Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ) совместно с Международной комиссией по радиационным единицам и измерениям (МКРЕ) выпустила отчет относительно операционных величин для контроля внешнего облучения [1], который существенно меняет концепцию использования операционных величин. В недавно представленной публикации МКРЗ 147 [2] также даны предложения по внесению изменений в систему защитных величин в радиационной безопасности. В перспективе на основании этих предложений планируется изменение действующих рекомендаций МКРЗ №103 [3]. В работе показаны основные направления совершенствования системы дозиметрических величин, применяемых в радиационной защите.

The International Commission on Radiological Protection (ICRP), together with the International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU), has released a report on operational quantities for external radiation exposure [1], which significantly changes the concept of using operational quantities. The recently presented ICRP Publication 147 [2] also provides proposals for changes to the system of protection quantities in radiation safety. In the future, based on these proposals, they are going to change the current recommendations of the ICRP No. 103 [3]. The paper shows the main directions for improving the system of dose quantities used in the field of radiation safety.

*Ключевые слова:* радиационная защита, МКРЗ, защитные величины, эффективная доза, эквивалентная доза, поглощенная доза, операционные величины.

*Keywords:* radiation protection, ICRP, protection quantities, effective dose, equivalent dose, absorbed dose, operational quantities.

В 2021 г. Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ, ICRP) инициировала пересмотр общих рекомендаций МКРЗ 2007 года [3] относительно системы радиационной защиты человека. В недавно представленной публикации ICRP 147 [2] и отчете ICRP/ICRP [1] описаны масштабы предполагаемых изменений. При этом приводятся рекомендации по внесению существенных изменений в систему используемых в радиационной защите величин.

Согласно текущим рекомендациям МКРЗ [3] для установления пределов доз используются защитные величины эффективная доза и эквивалентная дозы. Возникающие в коже и хрусталике глаза эффекты облучения относятся к тканевым реакциям (детерминированным эффектам). Исходя из того, что поглощенная доза является наиболее подходящей величиной для описания тканевых реакций, а понятие эквивалентной дозы в органе или ткани основано на взвешивающем коэффициенте излучения ( $w_R$ ), который связан со стохастическими эффектами, МКРЗ считает необходимым для предотвращения тканевых реакций в качестве защитной величины ввести поглощенную дозу. Это изменение проведет четкое различие между пределами, применимыми к тканевым реакциям, установленными в поглощенной дозе (Гр), и ограничениями, применимыми к стохастическим эффектам, установленными в эффективной дозе (Зв). Взвешивающие коэффициенты излучения ( $w_R$ ), применяемые к поглощенным дозам при расчете эквивалентной дозы, относятся скорее к стохастическим эффектам при низких уровнях облучения, чем к тканевым реакциям. При этом эквивалентная доза будет промежуточной величиной при расчете эффективной дозы. Поэтому МКРЗ полагает, что использование эквивалентной дозы для установления пределов доз на органы и ткани для предотвращения

тканевых реакций должно быть прекращено, а существующие пределы доз могут применяться до тех пор, пока не будут выпущены новые рекомендации. Комиссия рассчитывает внести данное изменение в своих следующих общих рекомендациях.

Что касается эффективной дозы, то МКРЗ исходит из того, что в настоящее время и в будущем на международном уровне эффективную дозу следует использовать в качестве основной величины радиологической защиты. Данная величина является мерой общей дозы облучения организма человека от внешних и внутренних источников и обеспечивает оценку радиационного риска. Она является ценной и надежной величиной для использования при оптимизации радиационной защиты персонала и населения, установления критериев контроля (граничных доз, референтных уровней и дозовых пределов). При использовании эффективной дозы предполагается, что эффект облучения идентичен при остром и хроническом облучении при малых дозах, а также в случае внутреннего и внешнего облучения. Использование эффективной дозы предполагает линейную беспороговую зависимость доза-эффект между дозой и риском при низких дозах или низких мощностях дозы. Хотя эффективная доза чаще всего используется при дозах ниже 100 мЗв, её использование в ситуациях аварийного облучения при острых дозах в диапазоне примерно до 1 Зв является по мнению МКРЗ разумным.

В соответствии с текущими подходами [3] эффективная доза как нормируемая величина оценивается для условного человека (Reference Person) путем усреднения эффективных доз, рассчитанных для взрослого условного мужчины и условной женщины. Хотя признаны различия в риске на 1 Гр в зависимости от возраста, пола и рассматриваемой группы лиц, для осуществления системы радиационной защиты человека нет необходимости учета различий на индивидуальном уровне.

Защитные величины МКРЗ (эквивалентная и эффективная дозы) предполагают суммирование доз от внешних и внутренних источников облучения и могут применяться как к персоналу, так и к населению. Основное применение эффективной дозы заключается в планировании радиационной защиты и контроле соблюдения ее требований в различных ситуациях облучения персонала и населения. При оптимизации радиационной защиты данная величина подлежит сравнению с пределами доз, граничными дозами и референтными уровнями, которые определены для стохастических эффектов при равномерном облучения всего тела. Расчет эффективной дозы можно рассматривать как трехэтапный процесс, начинающийся с оценки средней поглощенной дозы в органе и ткани (грей (Гр), Дж/кг). Поскольку виды ионизирующих излучений различаются по своей способности вызывать биологические эффекты, вторым шагом является умножение рассчитанных значений поглощенной дозы на весовые коэффициенты излучения ( $w_R$ ), учитывающие большую эффективность плотно-ионизирующих излучений, включая альфа-частицы и нейтроны, по сравнению с редко-ионизирующими излучениями (бета-частицы и гамма-излучение). Результат называется «эквивалентной дозой» (зиверт (Зв)). Последним шагом является суммирование эквивалентных доз в отдельных органах и тканях, осуществляя умножение каждой из них на весовой коэффициент ткани ( $w_T$ ), который представляет ее вклад в общий ущерб организму от равномерного облучения всего тела. Таким образом, эффективная доза представляет собой суммирование дважды взвешенных поглощенных доз в органе или ткани. Цель при этом состоит в том, чтобы общий риск на 1 Зв был сопоставим независимо от типа и распределения облучения. Эффективная доза, выраженная в Зв, является хорошо известной эквидозиметрической величиной радиационной защиты, которую часто называют просто «доза».

Также следует отметить, что коллективная эффективная доза является ценным инструментом оптимизации защиты для персонала и населения. Ее можно использовать вместе с распределением индивидуальных доз для принятия решений об оптимальном балансе между относительно большим облучением определенной группы работников и меньшим облучением большего числа работников. Для облучения населения ее можно использовать как часть процесса оптимизации для ситуаций запланированного, существующего и аварийного облучения. Для профессионального облучения, облучения населения и медицинского облучения она используется для сравнения уровней облучения в разных странах и изменений уровней доз во времени. Ее использование для прогнозирования потенциальных последствий для здоровья может быть полезным в определенных ситуациях. Например, для информирования о необходимости последующего медицинского или эпидемиологического наблюдения. Однако следует относиться с осторожностью и оценивать в отношении фоновых показателей заболеваемости с учетом распределения доз во времени и пространстве, а также неопределенностей в оценке дозы и риска. Следует избегать подсчета числа случаев рака на основе коллективных эффективных доз, связанных с чрезвычайно низким облучением очень больших групп лиц. Из-за больших неопределенностей, связанных с такими оценками, результаты будут скорее вводить в заблуждение, чем быть информативными. Комиссия дала рекомендации по использованию коллективной дозы в качестве инструмента оптимизации защиты в Публикации 101 [4]. Коллективная эффективная доза не предназначена в качестве инструмента для оценки эпидемиологического риска, и ее нецелесообразно использовать в формальных прогнозах риска.

Для индивидуального дозиметрического контроля и контроля радиационной обстановки МКРЗ и МКРП предложено использовать операционные величины. Ввиду того, что эквидозиметрические (защитные) величины не поддаются измерению, необходимо определить рабочие параметры (операционные величины), которые можно было бы связать путем измерения с характеристиками поля излучения. Таким образом, при-

меняемые операционные величины рассматриваются как связующее звено между защитными величинами и полем излучения.

Используемый в настоящее время набор операционных величин был определен более 30 лет назад. Для индивидуального мониторинга рабочей величиной является индивидуальный эквивалент дозы,  $H_p(d)$ , который представляет собой эквивалент дозы в (мягких) тканях на соответствующей глубине,  $d$ , под определенной точкой на теле человека. За указанную точку обычно принимают место ношения индивидуального дозиметра. Для оценки эффективной дозы при измерении индивидуального эквивалента дозы была выбрана глубина  $d = 10$  мм и  $H_p(10)$ . Если дозиметр носится в положении тела, репрезентативном для облучения всего тела, предположили, что значение  $H_p(10)$  дает разумную оценку эффективной дозы. Для оценки дозы на кожу и конечности в качестве рабочей величины рекомендуется использовать индивидуальный эквивалент дозы  $H_p(0,07)$  с глубиной  $d=0,07$  мм. Для случая контроля дозы на хрусталик глаза была предложена глубина  $d = 3$  мм ( $H_p(3)$ ). Следуя Публикации МКРЗ 116 [5], в которой представлены обновленные дозовые коэффициенты для профессионального облучения от внешних источников с использованием эталонных фантомов для взрослых, МКРЕ пересмотрела определение операционных величин. Были выявлены следующие недостатки: опубликованные конверсионные коэффициенты были рассчитаны с использованием приближения кермы (т. е. без учета переноса энергии вторичными заряженными частицами), а операционные величины не являются достаточно хорошим приближением для эффективной и эквивалентных доз органов и тканей при низких и высоких энергиях излучения.

К недостаткам используемой сейчас системы операционных величин относят то, что фантомы, используемые для оценки используемых операционных величин, отличаются от фантомов, используемых для оценки защитных величин. Используется три фантома: антропоморфный фантом (позже за ним последовал воксельный фантом МКРЗ) для расчета эффективной дозы, физически нереализуемая сфера МКРЕ при контроле радиационной обстановки и пластинчатые, цилиндрические или стержневые фантомы для индивидуальных операционных величин. Так же надо отметить, что конверсионные коэффициенты не доступны для более высоких энергий фотонов и нейтронов. Метод расчета коэффициента преобразования, использующий приближение кермы, признан недостаточной аппроксимацией в случае высоких энергий. Значения, рассчитанные с использованием приближения кермы, предполагают завышение эффективной дозы, а значения, рассчитанные без этого учета, явно указывают на занижение эффективной дозы.

После разработки воксельного фантома МКРЗ [5] и широкой доступности вычислительных методов Монте-Карло (коды RHITS, FLUKA, MCNP, MCNP), использование операционных величин, как они определены в настоящее время, стало сомнительным. Поэтому результатом стали предложения МКРЗ и МКРЕ относительно нового подхода к определению операционных величин для индивидуального дозиметрического контроля и контроля радиационной обстановки.

Предлагаемые изменения в системе защитных величин согласно МКРЕ и МКРЗ [1] представлены в Таблице 1.

Таблица 1

### Сравнение рекомендаций относительно защитных величин

	Организм		Хрусталик глаза		Кожа	
	Эффективная доза		Эквивалентная доза на хрусталик		Эквивалентная доза на кожу	
Защитные величины	$E$		$H_{T, lens}$		$H_{T, local skin}$	
Отчет МКРЕ	МКРЕ 57	МКРЕ 95	МКРЕ 57	МКРЕ 95	МКРЕ 57	МКРЕ 95
Контроль радиационной обстановки	Эквивалент амбиентной дозы $H^*(10)$	Амбиентная доза $H^*$	Эквивалент направленной дозы $H'(3, \Omega)$	Направленная поглощенная доза на хрусталик глаза $D'_{lens}(\Omega)$	Направленный эквивалент дозы $H'(0,07, \Omega)$	Направленная поглощенная доза в коже $D'_{local skin}(\Omega)$
Индивидуальный контроль	Эквивалент индивидуальной дозы $H_p(10)$	Индивидуальная доза $H_p$	Эквивалент индивидуальной дозы $H_p(3)$	Индивидуальная поглощенная доза на хрусталик глаза $D_{p, lens}$	Индивидуальный эквивалент дозы $H_p(0,07)$	Индивидуальная поглощенная доза в коже $D_{p, local skin}$
Единицы	Зв	Зв	Зв	Гр	Зв	Гр

Амбиентная доза  $H^*$  теперь определяется как произведение плотности потока частиц в точке,  $\Phi$ , и коэффициента преобразования, связывающего плотность потока частиц с максимальным значением эффективной дозы,  $E_{max}$ , для различных условий облучения. Единицей измерения остается Зв. Направленная поглощенная доза в хрусталике глаза,  $D'_{lens}(\Omega)$ , в точке поля излучения с заданным направлением падения,  $\Omega$ , является произведением плотности потока частиц в этой точке,  $\Phi(\Omega)$ , и коэффициента преобразования, связывающий плотность потока частиц со значением поглощенной дозы в хрусталике глаза. Поскольку теперь это относится к поглощенной дозе, единицей измерения является Гр. Точно так же направленная поглощенная доза в коже теперь определяется в терминах Гр как произведение плотности потока частиц в этой точке и коэффициента преобразования, связывающего плотность потока частиц со значением поглощенной дозы в

коже. Конверсионные коэффициенты для амбиентной дозы  $H^*$  рассчитываются для облучения эталонных (воксельных) фантомов всего тела человека в расширенном и выровненном поле излучения.

Фантомы для определения индивидуальной дозы идентичны фантомам для амбиентной и направленной доз. Кроме того, цилиндрический фантом для конечностей и стержневой фантом для пальца также определены для индивидуальной поглощенной дозы на кожу конечностей.

Индивидуальная доза  $H_p$  (в Зв) в какой-либо точке тела представляет собой произведение плотности потока частиц, падающих в эту точку, и конверсионного коэффициента, связывающего плотность потока частиц со значением эффективной дозы  $E$ . Индивидуальная поглощенная доза (в Гр) в хрусталике глаза является произведением плотности потока частиц, падающих в эту точку, и конверсионного коэффициента, связывающего плотность потока частиц со значением поглощенной дозы в хрусталике глаза. Индивидуальная поглощенная доза в коже (в Гр) является произведением плотности потока частиц, падающих на тело или конечности и конверсионного коэффициента, связывающего плотность потока частиц со значением поглощенной дозы в коже.

Следует отметить, что ранее коэффициенты преобразования были доступны только для фотонного, нейтронного и электронного излучений. Теперь в дополнение к ним даются также коэффициенты преобразования для позитронов, протонов, мюонов, пионов и альфа-частиц. При малых энергиях фотонов, менее 70 кэВ, как было известно ранее, происходит значительное завышение эффективной дозы. Между 70 кэВ и 3 МэВ эффективная доза завышена, так как глубина 10 мм, выбранная для  $H^*(10)$  и  $H_p(10)$  предназначалась для оценки максимального эквивалента дозы. Однако при более высоких энергиях фотонов доза на 10 мм занижает эффективную дозу. Ранее казалось, что глубина 10 мм адекватно отражает эффективную дозу. Для нейтронов глубина 10 мм также не подходит для оценки эффективной дозы. При энергиях более 40 МэВ наблюдается занижение эффективной дозы. Для электронов с энергиями  $<2$  МэВ пробег составляет  $<10$  мм, поэтому вклад в  $H^*(10)$  или  $H_p(10)$  отсутствует. При предлагаемом определении такие электроны вносят вклад в эффективную дозу. Для протонов  $H^*(10)$  завышает эффективную дозу для энергий  $<80$  МэВ и занижает для энергий  $>100$  МэВ.

МКРЗ считает, что предлагаемые изменения упрощают систему защитных и операционных величин. В полях излучения высокоэнергетических фотонов, нейтронов, электронов и других типов частиц эти изменения необходимы и обеспечат согласованность измерений. На практике потребуются изменения либо в алгоритме, либо в конструкции существующих дозиметров. Конверсионные коэффициенты теперь напрямую связаны со значениями величин защиты. Защитные величины переопределяются как произведения радиометрических (или дозиметрических) величин и коэффициентов преобразования. Теперь фантомы для расчета защитных величин и операционных величин (эффективная доза и поглощенная доза на хрусталик глаза и кожу) идентичны.

В заключение можно констатировать, что предлагаемые МКРЗ изменения определенно представляют собой смену парадигмы в практическом использовании системы защитных величин в радиационной безопасности. Однако до практической реализации выше изложенных предложений еще далеко, поскольку соответствующие нормы безопасности МАГАТЭ и документы МЭК/ИСО для практического применения предлагаемых подходов отсутствуют. В настоящее время ясно, что  $H^*(10)$  и  $H_p(10)$  завышают эффективную дозу для фотонов с энергией до 3 МэВ, при этом для низкоэнергетических фотонов это завышение возможно в 2-4 раза. В целом это отвечает интересам персонала в условиях облучения и в настоящее время может считаться целесообразным.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Operational quantities for external radiation exposure: Report 95 / International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) // Journal of the ICRU. – SAGE, 2020. – Vol. 20 (1). – 130 p.
2. Use of dose quantities in radiological protection: ICRP Publication 147 / International Commission on Radiological Protection (ICRP) // Annals of the ICRP. – SAGE, 2021. – Vol. 50 (1). – 85 p.
3. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection: ICRP Publication 103 / International Commission on Radiological Protection (ICRP) // Annals of the ICRP. – Elsevier Ltd, 2007. – Vol 37. – 334 p.
4. Assessing dose of the representative person for the purpose of radiation protection of the public: ICRP Publication 101 / International Commission on Radiological Protection (ICRP) // Annals of the ICRP. – Elsevier Ltd, 2006. – Vol 37 (3). – 116 p.
5. Conversion coefficients for radiological protection quantities for external radiation exposures: ICRP Publication 116 / International Commission on Radiological Protection (ICRP) // Annals of the ICRP. – Elsevier Ltd, 2006. – Vol 40 (2-5). – 261 p.