

РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ И ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ В ОБЛАСТИ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И ЕДИНИЦЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ

**Л.А. Коннова, доктор медицинских наук, профессор,
заслуженный деятель науки Российской Федерации.
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**

Статья посвящена современным величинам и единицам их измерения, применяемым в области радиационной безопасности. Дана краткая история формирования современной системы дозиметрических величин. Рассмотрены такие понятия, как базовые, нормируемые и операционные величины в области дозиметрии ионизирующих излучений и единицы их измерений по СИ. Показан переход от экспозиционной дозы к поглощенной дозе излучения. Обсуждается практическое значение унификации единиц измерения как важного фактора обеспечения радиационной безопасности и защиты населения и территорий в условиях чрезвычайной ситуации радиационного характера.

Ключевые слова: радиационная безопасность, активность, доза излучения, экспозиционная доза, поглощенная доза, эквивалентная доза, мощность дозы, линейная передача энергии, взвешенный коэффициент, флюенс, керма

RADIOMETRIC AND DOSIMETRIC QUANTITIES IN RADIATION SAFETY AND UNITS OF MEASUREMENT

L.A. Konnova. Saint-Peterburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

We consider the quantities and units in radiation safety. A brief history of the formation of modern system of dosimetric quantities. We consider the basic, normalized operating and quantities in dosimetry. We discuss the practical importance of unification of units of measurement in radiation safety.

Keywords: radiation safety, activity, radiation dose, exposure dose, absorbed dose, equivalent dose, radiation dose rate, linear energy transfer, radiation weighting factor, fluence, kerma

Временной фактор, как известно, играет ведущую роль в минимизации тяжести последствий чрезвычайных ситуаций (ЧС) радиационного характера. При поступлении информации о радиационной обстановке (в том числе и из соседнего региона или из пограничной страны) специалист по радиационной безопасности должен быстро принять соответствующее решение и не терять время на перевод единиц. Особенно важно это в условиях радиационной аварии, последствия которой не имеют границ, о чем свидетельствуют трагические события, имевшие место до Чернобыля, в Чернобыле (1986 г.) и позднее в Японии на АЭС «Фукусима» (2011 г.). [1, 2]. Многофакторность единиц измерения в области радиационной безопасности ведет к отсутствию единства в понимании, определении и обозначении физических величин, что усложняет обмен информацией, затягивает принятие решений о мерах противодействия опасности и ведет к увеличению риска переоблучения населения.

В 1960 г. на XI Генеральной конференции по мерам и весам (ГКМВ) была принята единая международная система единиц – СИ (SI). В каждой стране термины и единицы физических величин, в том числе в области дозиметрии и радиационной безопасности, определены государственными стандартами (ГОСТ). В Российской Федерации с 1 сентября 2003 г. действует ГОСТ 8.417-2002 «ГСИ. Единицы величин», с 2008 г. введен Федеральный закон Российской Федерации от 26 июня 2008 г. «Об обеспечении единства измерений» [3].

ГОСТы учтены при создании федеральных регламентирующих документов – норм радиационной безопасности НРБ99/2009 и основных санитарных правил – ОСПОРБ/2010 [4, 5]. Все ранее использовавшиеся в области радиологии и радиационной защиты внесистемные единицы активности и доз излучения из обращения изъяты, за исключением внесистемной единицы измерения энергии электронвольт (эВ) и ее десятичных кратных единиц, таких, как кэВ, МэВ, ГэВ. В то же время остались учебники, методические пособия, задачки, справочники, которые были построены на старых, внесистемных единицах измерения. Это объясняет актуальность темы статьи, предназначенной для изучающих основы радиационной безопасности и защиты в непрофильных учебных заведениях.

Современные величины, которые используют в области радиационной безопасности и защиты для определения потенциальной опасности от радиационных воздействий, разделяют на:

а) радиометрические величины, предназначенные для описания поля излучения (по названию частиц или излучений);

б) дозиметрические величины, которые отражают эффекты, вызываемые дозой излучения.

Обеспечением взаимосвязанности этих величин, разработкой определений и коэффициентов перевода для их использования в радиационной защите занимается специальная организация, созданная при ООН и известная как Международная комиссия по радиологическим единицам и измерениям (МКРЕ).

Современная система дозиметрических величин сформировалась в результате развития радиобиологии, дозиметрии и радиационной безопасности. В связи с тем, что критерии безопасности в значительной степени определяет общество, в разных странах сформировались неоднозначные системы дозиметрических величин. В унификации единиц измерения важная роль принадлежит независимой организации – Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ, ICRP) [6, 7]. Комиссия объединяет экспертов в области биологического действия ионизирующего излучения, дозиметрии и радиационной безопасности и постоянно публикует Рекомендации МКРЗ. Под влиянием Рекомендаций МКРЗ сформировалась существующая сегодня система дозиметрических величин. Она включает: базовые физические величины, нормируемые величины, операционные величины.

К базовым физическим величинам относятся: активность; флюенс (частиц или квантов); плотность потока частиц (флюенс за единицу времени); экспозиционная доза (X); поглощенная доза (D); керма (K); энергия излучения; линейная передача энергии (ЛПЭ).

Активность A – число ядер радиоактивного элемента (радионуклида, РН), претерпевших спонтанные (без воздействия извне) ядерные превращения в единицу времени, пропорционально полному числу ядер N этого элемента. Единицей измерения в СИ является Беккерель (Бк), названной в честь Анри Беккереля – французского физика, который через год после открытия В.К. Рентгеном X-лучей открыл естественную радиоактивность урана. В источнике с активностью 1 Бк происходит 1 спонтанное ядерное превращение в 1 с ($1\text{Бк}=1\text{расп/с}$). Традиционной единицей измерения Активности (A) является Кюри. Это большая величина, $1\text{Ки}=3,7 \cdot 10^{10}$ Бк, названа в честь Марии Кюри. В 1898 г. Пьер и Мария Кюри открыли радий и полоний, и М. Кюри ввела термин «радиоактивность». В конце 30-х гг. прошлого века их дочь и зять Ирен и Жолио Кюри впервые получили искусственные радиоактивные элементы. Портреты первооткрывателей приведены ниже, все они стали эпонимами – людьми, именем которых названы единицы измерения. Мария Кюри остается единственной женщиной-эпонимом, ее именем была названа единица активности радиоактивных элементов. Рентген В.К. в истории науки является единственным ученым, чьим именем названа целая наука – рентгенология.



В.К. Рентген

А. Беккерель

П. и М. Кюри

И. и Ж. Кюри

Итак, Активность (А) является мерой радиоактивности какого-либо количества радионуклида.

Любой тип излучения создает поле излучения, которое может быть описано величиной, называемой флюенс (F). Это количество частиц (или фотонов), проходящих через единицу площади. Измеряется в частицах на квадратный метр (m^2) и обозначается символом F. Плотность потока частиц – это количество частиц, проходящих через единицу площади в единицу времени. Она обычно измеряется в частицах на квадратный метр в секунду ($m^2 \cdot c^{-1}$).

В случае обозначения энергии ионизирующего излучения допускается применение внесистемной единицы измерения – электронвольт (эВ), несмотря на тот факт, что в СИ принята единица измерения энергии джоуль (Дж). Это связано с тем, что Дж большая величина, которую неудобно использовать в области радиационной защиты. Электрон вольт – это количество энергии, приобретенное электроном при ускорении разностью потенциалов в один вольт, маленькая величина даже в масштабах атома – $1 \text{ эВ} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Дж}$. Поэтому на практике энергию излучения приводят в кило-электронвольтах (кэВ) или мега-электронвольтах (МэВ).

Еще одна величина – экспозиционная доза (X). Исторически сложилось так, что первоначально было открыто ионизирующее излучение, полученное искусственным путем на аппарате выдающимся немецким инженером-физиком В.К. Рентгеном в 1895 г. и обозначенное им как X-лучи (в последствие в его честь названо рентгеновским излучением). Для количественного измерения открытого излучения Рентген использовал способность излучения ионизировать воздух и ввел единицу, названную впоследствии его именем – рентген. При дозе рентгеновского или гамма-излучения, равной 1 Р, в 1 см^3 воздуха образуется $2,082 \cdot 10^9$ пар ионов. «Рентген» в качестве единицы дозы рентгеновского излучения был введен в 1928 г. II Международным конгрессом радиологов в честь В.К. Рентгена. Долгое время рентгеновское и гамма-излучение количественно определялись степенью ионизации, которую они производят в воздухе, то есть экспозиционной дозой (символ X), единицей измерения которой был рентген (Р). Сегодня единицей экспозиционной дозы в системе СИ является кулон на килограмм (Кл/кг), а связь с рентгеном и системной единицей следующая: $1 \text{ Р} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ Кл/кг}$ в воздухе. Рентген больше не используется в радиационной защите, но существует много приборов, которые дают показания в рентгенах (Р) или рентгенах в час (Р/ч). В Докладах МКРЕ 39, 43 и 47 приведены коэффициенты для перевода экспозиционной дозы, измеренной в рентгенах, в единицы дозы системы СИ, если известна энергия рентгеновского или гамма-излучения.

Линейная передача энергии (ЛПЭ) – это, по сути, путь, пройденный заряженной частицей в веществе. Является характеристикой ионизирующего излучения (ИИ), показывает, как ИИ передает свою энергию облучаемому веществу. Наибольшей ЛПЭ, например, обладает альфа-излучение, поэтому при попадании внутрь организма наиболее опасно для человека. Информация о базовых физических величинах в области радиационной безопасности и защиты обобщена в таблице № 1.

В настоящее время термин «доза» является общим термином, который применяется к величине энергии, поглощенной при прохождении излучения через вещество. Он часто

используется не очень четко и в зависимости от контекста может означать поглощенную дозу, эквивалентную дозу, эффективную дозу или даже экспозиционную дозу.

Эквивалентная доза (биологически значимая) облученного органа или ткани, эффективная доза, коллективная эффективная доза относятся к группе нормируемых величин. Нормируемые величины выражают основные пределы доз, которые непосредственно измерить невозможно.

Эффективная доза (E) является величиной, которая используется как мера риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов и тканей с учетом их радиочувствительности. Она представляет сумму произведений эквивалентной дозы в органах и тканях на соответствующие взвешивающие коэффициенты. Чувствительность органов тела человека к действию радиации неодинакова – одни органы и ткани более чувствительны, чем другие. Например, при одинаковой эквивалентной дозе возникновение рака в легких более вероятно, чем в щитовидной железе, а облучение половых желез особенно опасно из-за риска генетических повреждений. Поэтому дозы облучения разных органов и тканей следует учитывать с разным коэффициентом, который называется коэффициентом радиационного риска. Умножив значение эквивалентной дозы на соответствующий коэффициент радиационного риска и просуммировав по всем тканям и органам, получим эффективную дозу, отражающую суммарный эффект для организма.

Использование эффективной дозы позволяет перейти от характеристик поля ионизирующего излучения к последствиям излучения. Для оценки нормируемых величин при радиационном контроле используют операционные величины, которые непосредственно определяются измерениями.

Система операционных величин внешнего облучения была создана в результате совместной работы МКРЕ и МКРЗ более 40 лет назад. По мере изменения нормируемых величин развивались и операционные от максимального эквивалента дозы к величинам амбиентного и индивидуального эквивалента дозы.

Итак, в области радиационной безопасности применяют термин «доза излучения», который сокращенно для краткости обозначают как «доза». В отличие от «дозы вещества», под которой в медицине понимают количество лекарственного препарата, «доза излучения» является собирательным термином, имеющим варианты с разным физическим смыслом. На сегодняшний день различают три основные разновидности дозы излучения: экспозиционная доза, поглощенная доза и эквивалентная доза.

Экспозиционная доза, по сути, является дозой в воздухе, или «падающей дозой». Долгое время для количественного измерения рентгеновского и гамма-излучения использовали ионизационный подход, и единицей измерения был рентген. По мере накопления знаний о природе радиоактивности и видах ионизирующего излучения стало понятно, что необходим более универсальный подход к измерению различных ионизирующих излучений, в том числе и смешанных. В результате долгих обсуждений и дискуссий в области метрологии ионизирующих излучений в начале 60-х гг. прошлого века МКРЕ ввела универсальную физическую величину – поглощенную дозу (absorbed dose) и ее внесистемную единицу рад (rad-radiation absorbed dose). Поглощенную дозу обозначили как D, она является величиной энергетической – это энергия излучения, поглощенная в единице массы вещества и применимая к любому виду ионизирующего излучения с любой энергией. Системной единицей измерения поглощенной дозы (СИ) является Грей (Гр), название дано в честь английского физика Л. Грея, определившего поглощенную дозу (работал в области радиобиологии). 1 Гр соответствует поглощению в 1 кг вещества энергии 1 джоуль (Дж/кг). При этом 1 Гр=100 рад.

Таблица 1. Физические базовые величины

Обозначение величины	Международный символ	Единица измерения СИ	Соотношение единиц измерения
Активность (число ядер, претерпевших	A $A=dN/dt=\lambda N$	Беккерель Бк, 1 расп/с	Традиционная ед. Кюри

спонтанные превращения в единицу времени)	Λ – постоянная радиоактивного распада		1 Ки=3,7*10 ¹⁰ Бк
Энергия	E_R	Джоуль, Дж Допускается внесистем. ед. изм. электронвольт (эВ), КэВ, МэВ	1эВ=1,6x10 ⁻¹⁹ Дж
Флюенс	F	Частицы на кв метр в сек.	–
Экспозиционная доза	X	Кулоны на кг Кл/кг	Внесистем. ед. Р (рентген) 1Р=2,58x10 ⁻⁴ Кл/кг
Линейная передача энергии (ЛПЭ)	L=E/L – путь, пройденный в веществе	Джоуль на метр Дж/м	1кэВ/мкм=62Дж/м
Поглощенная доза – основная физическая величина	Энергия ИИ, поглощенная веществом	Грей, Гр 1Гр=Дж/кг	Внесистем. ед. рад 1 рад=0,01 Гр

Поглощенная доза представляет собой адекватную физическую меру биологического действия ионизирующего излучения на тело человека в реальных условиях облучения. Первоначально ее стали использовать в медицинской практике в области лучевой терапии, определяя расчетным путем – вносили поправки, учитывая взаимодействие фотонного излучения с воздухом и мягкими тканями (водой). В 80-х гг. прошлого века были созданы эталоны мощности поглощенной дозы и метрологические методики ее передачи средствам измерения. Это позволило отказаться от измерения в рентгенах. Тогда же ввели понятие – «экспозиционная доза» (exposure dose) с условным обозначением X. Физическая суть этой величины, ее определение и внесистемная единица рентген остались прежними. В СИ единицей измерения экспозиционной дозы является кулон на килограмм (Кл/кг), при этом 1Кл/кг=3 880 Р. В области радиационной безопасности вместо экспозиционной дозы ввели термин «эквивалентная доза» (equivalent dose), обозначена как Н. Так же как поглощенная доза, она величина энергетическая, единицей измерения является Дж/кг, названа единица зиверт (Зв) в честь шведского радиофизика, который работал в области радиобиологии. Портреты ученых, именем которых названы единицы измерения, приведены ниже. Следует отметить (не вдаваясь в подробности), что эквивалентная доза дополнительно учитывает вид и энергетический спектр ионизирующего излучения и по определению $H=kD$, где k является коэффициентом качества излучения, который в настоящее время называют взвешивающим коэффициентом, или весовым множителем излучения (табл. 2) и обозначают как WR. Для гамма-, бета- и рентгеновского излучения 1 Зв=1 Гр. Внесистемной единицей эквивалентной дозы является бэр – биологический эквивалент рада. 1 Зв=100 бэр.



Л.Х. Грей



Р. Зиверт

Таким образом, в настоящее время существуют три основных вида доз: поглощенная, эквивалентная и экспозиционная. Экспозиционная доза, по сути, является количеством излучения, падающим на облучаемое тело (доза в воздухе, определяется по ионизационному принципу). Применяется для описания поля излучения в воздухе (рис.). Поглощенная доза определяется по энергетическому принципу, по количеству энергии, поглощенной облучаемым веществом. В области радиационной безопасности используют эквивалентную дозу и производные от нее.

Нагляднее всего переход от экспозиционной дозы к поглощенной представлен на рисунке в статье М. Вайнберга [8].

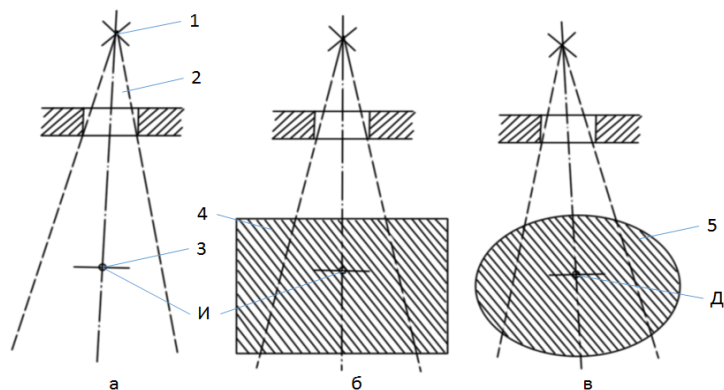


Рис. Переход от экспозиционной дозы X к поглощенной D [8]

(а – измерение X в свободном воздухе; б – в воздушной полости, занятой детектором излучения в водном фантоме; в – определение D в облучаемом теле;

1 – источник излучения; 2 – пучок излучения; 3 – воздушная ионизационная камера; 4 – дозиметрический фантом; 5 – облучаемое тело; И – измерительная точка; Д – точка дозирования)

Поглощенная доза (D) – это мера энергии, оставленной в веществе любым видом излучения. Системной единицей поглощенной дозы является джоуль на килограмм (Дж/кг) и она называется Грей (Гр). Однако когда говорится о поглощенной дозе, очень важно точно указать вид вещества, в котором поглощена энергия, например, 1,3 мГр поглощенной дозы в воде. Как указывалось, в качестве единицы поглощенной дозы так же используют рад (русское обозначение английской аббревиатуры термина «radiation adsorbed dose» (rad) и один Грей равен 100 рад. $1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}$, или $1 \text{ мрад} = 10 \text{ мкГр}$.

В радиационной защите иногда приходится переходить от старых (внесистемных) к новым (системным) единицам измерения дозы и мощности дозы (и наоборот). Пример 1 показывает, как это преобразование может быть произведено для поглощенной дозы.

Пример 1. Перевести мрад в Гр и мкГр/час в рад/час:

а) 0,4 мрад в Гр, б) 7,5 мкГр/ч в рад/ч.

Решение:

а) $1 \text{ мрад} = 10 \text{ мкГр}$.

Поэтому $0,4 \text{ мрад} = 0,4 \times 10 \text{ мкГр} = 4 \text{ мкГр}$.

Следовательно, $0,4 \text{ мрад}$ равно 4 мкГр или $4 \times 10^{-6} \text{ Гр}$.

б) $1 \text{ Гр/ч} = 100 \text{ рад/ч}$

или $1 \text{ мкГр/ч} = 0,1 \text{ мрад/ч}$.

Поэтому $7,5 \text{ мкГр/ч} = 7,5 \times 0,1 \text{ мрад/ч} = 7,5 \times 10^{-4} \text{ рад/ч} = 0,75 \text{ мрад/ч}$

Следовательно, $7,5 \text{ мкГр/ч}$ соответствует $0,75 \text{ мрад/ч}$ или $7,5 \times 10^{-4} \text{ рад/ч}$.

Поглощенная доза является физической величиной, эквивалентная доза относится к нормируемым величинам. Поглощенная доза показывает, сколько энергии было оставлено в поглощающем материале, но ничего не говорит о том, какой вред может быть причинен

тканям, и не указывает на уровень потенциальной опасности. Например, уровень вреда, вызываемого в ткани поглощенной дозой 0,5 Гр, будет намного больше, если энергия была оставлена альфа-излучением или нейтронами, чем если он связан с воздействием гамма-излучения. По этой причине, величина, называемая эквивалентной дозой, используется как мера биологического эффекта от воздействия определенного вида излучения на органы или ткани.

Она рассчитывается путем умножения поглощенной дозы $D_{\text{полг}}$ в органе или ткани (измеряемой в Гр) на безразмерный коэффициент, называемый весовым множителем излучения w_R . Весовые множители некоторых излучений, рекомендованные МКРЗ в Публикации 60, приведены в табл. 2.

Таблица 2. **Весовые множители ионизирующих излучений**

Вид и диапазон энергий излучения	Весовой множитель излучения (w_R)
Альфа-частицы, все энергии	20
Бета-частицы, все энергии	1
Гамма- и рентгеновское излучение, все энергии	1
Нейтроны:	
<10 кэВ	5
10 кэВ to 100 кэВ	10
> 100 кэВ to 2 МэВ	20

Единицей измерения эквивалентной дозы в системе СИ является тот же джоуль на килограмм, но ему дано специальное название Зиверт (Зв), чтобы отличать ее от поглощенной дозы. $1 \text{ Зв} = 1 \text{ Дж/кг}$.

Если учесть весовые множители рентгеновского, гамма- и бета- излучения, то понятно, что для этих видов излучения $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Зв}$.

Пример 2 показывает, как можно определить эквивалентную дозу из поглощенной дозы.

Пример 2:

а) Переведите приведенные ниже поглощенные дозы в определенном органе или ткани в эквивалентные дозы:

1. 2 мГр от альфа-частиц.
2. 2 мГр от бета-частиц.
3. 2 мГр от гамма-излучения.

б) Какие из них вызовут наибольшее повреждение органа или ткани?

Ответ:

а) 1. перевести $D_{\text{полг}} = 2 \text{ мГр}$ от альфа-частиц в дозу эквивалентную (Н).

Из табл. 2: $w_a = 20$.

Из Формулы 1:

$$H = D_{\text{полг}} \times w_a = 2 \times 20 = 40 \text{ мЗв.}$$

Следовательно, эквивалентная доза в определенном органе или ткани за счет поглощенной дозы от альфа-частиц в 2 мГр составляет 40 мЗв.

2. $D_{\text{полг}}$ от бета-частиц = 2 мГр.

Из табл. 2: $w_b=1$.

Из Формулы 1:

$$H_b = D_b \times w_b = 2 \times 1 = 2 \text{ мЗв.}$$

Следовательно, эквивалентная доза в определенном органе или ткани за счет поглощенной дозы от бета-частиц в 2 мГр составляет 2 мЗв.

3. $D_{\text{погл } g} = 2 \text{ мГр}$

Из табл. 2: $w_g=1$

Из Формулы 1:

$$H_{Tg} = D_{Tg} \times w_g = 2 \times 1 = 2 \text{ мЗв.}$$

Следовательно, эквивалентная доза в определенном органе или ткани за счет поглощенной дозы от гамма-излучения в 2 мГр составляет 2 мЗв.

б) Как видно из пункта а альфа-частицы обуславливают большую эквивалентную дозу, поэтому они вызовут наибольшее повреждение отдельного органа или ткани.

Если имеет место смешанный вид облучения органа (больше, чем одним видом излучения), необходимо суммировать эквивалентные дозы, чтобы учесть различные виды излучения.

Существует еще одна очень важная величина в области радиационной безопасности и защиты – мощность дозы ионизирующего излучения, которая позволяет судить об уровне радиации (ИИ) (мощность эквивалентной дозы, мощность экспозиционной дозы). По сути, мощность дозы является дозой в единицу времени, или скоростью накопления дозы. Измеряется в Зв/час, мкЗв/час, бэр/час, бэр/год, рад/с., мкР/час и т.д. (то есть доза в единицу времени). Например, радиационный фон измеряют в мкЗв/час, или традиционно в мкР/час. В Санкт-Петербурге радиационный фон колеблется от 0,04 до 0,6 мкЗв/час (в среднем составляет 0,15–0,25 мкЗв/час, или 15–25 мкР/час). В России радиационный фон в среднем составляет 0,15–0,25 мкЗв/час. Шкала современных дозиметрических приборов градуирована в мкЗв/час. Определение мощности дозы позволяет оценить уровень радиации (ИИ) и выбрать адекватные меры защиты населения в определенных условиях.

Литература

1. Авария на АЭС «Фукусима-1». Организация профилактических мероприятий, направленных на сохранение здоровья населения Российской Федерации / И.К. Романович [и др.]. СПб.: НИИРГ им. проф. П.В. Рамзаева, 2012. 336 с.

2. Maqbul N. Chernobyl and Beyond: Nuclear Power Renaissance and Apprehensions- Nucl.Future, 2011. V. 7. № 6. P. 47–51.

3. Об обеспечении единства измерений: Федер. закон Рос. Федерации от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ. Доступ из справ.-правового портала «Гарант».

4. Нормы радиационной безопасности (НРБ99/2009) СанПин 2.6.1.2523-09. Доступ из справ.-правового портала «КонсультантПлюс».

5. СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010). Доступ из справ.-правового портала «КонсультантПлюс».

6. Международная комиссия по радиационной защите. Рекомендации МКРЗ 2007 г. // МКРЗ 103. М.: Алана, 2009.

7. Применение новой системы МКРЗ: аспекты регулирования и оптимизации. URL: <http://www.atomic-energy.ru/articles/2012/02/21/31159> (дата обращения: 21.12.2015).

8. Вайнберг М.Ш. Доза излучения // Мед. радиология. 1991. № 10. С. 53–55.