

## Определение контрольных уровней ионизирующего излучения в интервенционной радиологии

Сорокин В.Г.<sup>1,2</sup>, Рыжов С.А.<sup>1</sup>, Омельченко А.В.<sup>1</sup>, Громов Д.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», Москва;

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России, Москва

В настоящее время в России значительно увеличилось количество проводимых интервенционных диагностических и лечебных вмешательств. Особенностью данного типа исследований является тот факт, что все они проводятся пункционным доступом с последующим длительным обязательным рентгеноскопическим контролем. Недавние исследования в интервенционной кардиологии выявили ряд существенных недостатков при проведении эндоваскулярных исследований, особое место среди которых занимают необоснованные уровни облучения и ненадлежащее использование критериев к показаниям для проведения ангиографических исследований сердца. В связи с этим нами была проведена работа по сбору и оценке доз, полученных пациентами при выполнении некоторых типов рентгенэндоваскулярных процедур в трёх медицинских учреждениях Москвы. После проведения статистического анализа полученных данных были установлены контрольные уровни для таких показателей как произведение дозы на площадь пучка рентгеновского излучения, кумулятивная доза, время рентгеноскопии и количество сохранённых серий рентгенографических изображений для диагностической аортоартериографии, церебральной ангиографии, коронароангиографии, транслюминальной баллонной ангиопластики артерий нижних конечностей и чрескожного коронарного вмешательства. Рекомендованные значения не могут использоваться для строгого ограничения доз и не могут применяться для оптимизации защиты от детерминированных эффектов излучения. Они являются критерием, показывающим превышен ли тот уровень облучения пациента, который в типичных случаях используется для получения необходимой диагностической информации или для выполнения стандартной лечебной процедуры.

**Ключевые слова:** радиационная безопасность, ионизирующее излучение, интервенционная радиология, визуализация, референтные диагностические уровни, контрольные уровни, коронароангиография.

### Введение

Количество рентгенэндоваскулярных вмешательств в России с каждым годом прогрессивно увеличивается. Так, в Москве в 2018 г. было проведено 127817 лечебных и диагностических эндоваскулярных вмешательств, что на 7,4% больше, чем в 2017 г. (119007) [1]. Общеизвестно, что ангиографические процедуры характеризуются наибольшей лучевой нагрузкой среди диагностических вмешательств и одной из самых больших лучевых нагрузок в лечебном процессе. В связи с увеличивающейся распространённостью, возможным некорректным использованием, отсутствием соблюдения контроля качества и потенциального риска возникновения как стохастических, так и, в ряде случаев, детерминированных эффектов, связанного с воздействием ионизирующего излучения, данный тип исследований должен находиться под повышенным вниманием со стороны специалистов по радиационной безопасности [2]. Недавние исследования в интервенционной кардиологии выявили ряд существенных недостатков при проведении эндоваскулярных исследований, особое место среди которых занимают необоснованные уровни облучения и ненадлежащее использование критериев к показаниям для проведения ангиографических исследований сердца [3-6]. Эти проблемы вызывают обеспокоенность

Сорокин В.Г. – врач-рентгенолог, ассистент кафедры ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России; Рыжов С.А.\* – руководитель центра по радиационной безопасности и медицинской физике; Омельченко А.В. – эксперт, к.б.н.; Громов Д.Г. – зав. кафедрой, д.м.н., профессор ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова. ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ».

\*Контакты: 125124, Москва, ул. Пасковой, 16/26, стр.1. Тел.: +7(926)526-56-52; e-mail: s.ryzhov@nrcmr.ru.

в отношении того, в какой степени существующие техники проведения интервенционных вмешательств соответствуют принципам радиационной безопасности, ориентированным на пациента. Всё вышесказанное требует от профессионального сообщества и регулирующих органов выработки особого отношения к подобным нарушениям при назначении и проведении исследований.

Управление дозами должно осуществляться с использованием грамотного применения основных принципов радиационной безопасности: принципа обоснования и принципа оптимизации [7].

В основе принципа обоснования в радиационной безопасности находится понимание и ответственность лечащего врача, назначающего лучевое исследование, и врача, выполняющего интервенционную процедуру, в том, что клинические результаты превысят ожидаемые процедурные риски, включая радиационный риск. Важно отметить, что отказ от предоставления услуг, польза от которых маловероятна, является ключевым элементом качественного здравоохранения. Последнее ставит на первый план проблему безопасности пациентов и предотвращения ненужного потенциального вреда для пациентов в результате гипердиагностики и злоупотребления назначения лучевых исследований.

Принцип оптимизации заключается в грамотных действиях врача в ходе проведения интервенционных процедур, при которых все дозы, вызванные медицинским воздействием, настолько низкие, насколько это возможно, при сохранении качества выполнения вмешательства.

Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ) утверждает, что показатели предельных доз, важность которых неоспорима для профессионального облучения и облучения населения, не являются критерием радиационной защиты при облучении пациентов в медицинских целях. При этом, МКРЗ подчёркивает, что «необходимо ограничить воздействие ионизирующего излучения в лучевой диагностике», и рекомендует использовать референтные диагностические уровни, которые должны устанавливаться локальными профессиональными сообществами и специализированными учреждениями с учётом технической экспертизы, на основании отчётов дозиметрических организаций, с учётом международных рекомендаций и других общенациональных ресурсов [8]. При этом МКРЗ признаёт, что в отношении интервенционных процедур с флюороскопическим контролем трудно реализовать референтные диагностические уровни (РДУ) из-за очень широкого распределения доз, полученных пациентами даже для одних и тех же процедур, выполняемых в одном и том же учреждении, так как на количество радиации, используемое в эндоваскулярных процедурах, сильно влияют анатомические особенности пациента, характеристика поражения и тяжесть заболевания [9].

В настоящее время в России основные принципы и правила защиты пациентов от медицинского облучения регулируются многими отечественными нормативными документами [10-12]. Однако, до сих пор существуют проблемы с установлением референтных диагностических уровней в интервенционной радиологии. Это связано с отсутствием на текущий момент клинических и профессиональных стандартов по рентгенэндоваскулярной диагностике и лечению и отсутствию типовых протоколов проведения рентгенохирургических процедур [10].

Для управления дозами пациентов с целью уменьшения стохастических радиационных рисков и предотвращения детерминированных эффектов при проведении интервенционных процедур могут быть использованы контрольные уровни. Европейская комиссия по радиационной защите для определения среднего значения дозы ионизирующего излучения при различ-

ных рентгенологических исследованиях в конкретном учреждении рекомендует изучить значения дозы, по меньшей мере, десяти произвольно выбранных пациентов (например, значения дозы от десяти последовательных диагностических исследований) для конкретного типа исследования и каждого рентгеновского устройства [9]. Важно, чтобы полученные средние значения дозы пациента при определённом типе исследования на конкретной рентгеновской установке не превышали установленный в организации контрольный уровень. Если полученные дозиметрические показатели выше рекомендуемых (контрольных), то следует предупредить пациента о возможном появлении у него детерминированных кожных поражений в зоне максимального поглощения прямого излучения и провести анализ причин повышенной рентгеновской нагрузки, начиная с оценки работы оборудования, затем анализ качества протоколов процедуры и, в заключение, выполнить оценку техники оператора. В Российской Федерации установление контрольного уровня, как правило, связано с облучением персонала и используется как мера достигнутого уровня радиационной безопасности, однако в ряде случаев контрольный уровень применяется для характеристики радиационных выбросов и сбросов [13, 14] или оценки содержания радионуклидов в окружающей среде [15]. Вместе с тем использование термина «контрольный уровень» в применении к медицинскому облучению вполне допустимо и не противоречит действующему законодательству.

Цель работы – определить контрольные уровни ионизирующего излучения для некоторых типов рентгенэндоваскулярных вмешательств.

### Материалы и методы

В рамках проведения работ по повышению безопасности пациентов и предотвращению радиационных поражений при проведении лучевых методов исследования нами была собрана и проанализирована информация о дозах, полученных пациентами при выполнении следующих типов рентгенэндоваскулярных процедур: аортоартериография (ААГ), коронароангиография (КАГ), транслюминальная баллонная ангиопластика артерий нижних конечностей (ТБА НК), церебральная ангиография (ЦАГ), чрескожное коронарное вмешательство (ЧКВ). Перед началом исследования в медицинские учреждения, в составе которых имелись отделения по рентгенохирургическим методам диагностики и лечения, были направлены формы для сбора данных для всех пациентов, которые будут подвергаться рентгенэндоваскулярным вмешательствам в течение последующего 3-месячного периода. По результатам исследования был проведён статистический анализ следующих показателей: возраст, DAP (Dose area product – произведение дозы на площадь пучка рентгеновского излучения), кумулятивная доза, время излучения и количество серий изображений (кинопетель) при различных типах рентгенэндоваскулярных вмешательств в этих учреждениях. В работе использованы методы статистического анализа – вычисления проводились с использованием языка программирования R в среде RStudio (R version 3.6.3 (2020-02-29) – "Holding the Windssock") [16]. Описательная статистика, тестирование статистических гипотез, линейное моделирование и дисперсионный анализ осуществлялись при помощи базового набора функций R. Статистическое моделирование осуществлялось с помощью пакетов "nortest", "pastecs", "vcd", "MASS", "fitdistrplus". В качестве критерия нормальности распределения значений применялся тест Шапиро-Вилкса. Для сравнительного анализа средних значений в случае нормального распределения использовался тест Стьюдента, а в случае несоответствия сравниваемых значений нормальному закону распределения и не выполнению

условий гомоскедастичности дисперсий – тест Вилкоксона. В качестве апостериорного теста при дисперсионном анализе был выбран тест Тьюки.

### Результаты и обсуждение

В ходе работы были получены и проанализированы данные о 873 исследованиях, выполненных в трёх медицинских учреждениях в период с 15 сентября по 15 декабря 2019 г. Больница № 1 – 153 пациента, Больница № 2 – 284 пациента, Больница № 3 – 436 пациентов. Необходимо отметить, что во всех трёх учреждениях установлены ангиографические комплексы со сходными техническими характеристиками: Toshiba Vfi infinix-i (iNFX-8000V, 2B308-126RU), GE Innova 3100 и Toshiba VCI infinix-i (iNFX-8000V, 2B308-126RU).

Из результатов сравнительного анализа следует, что распределение пациентов в указанных медицинских организациях по такому показателю как возраст статистически значимо не отличаются друг от друга. Опыт операторов (количество проводимых ими вмешательств за указанный период) также не имели статистически значимых различий.

В табл. 1 представлены средние значения исследуемых параметров.

Таблица 1

#### Результаты дозиметрических измерений при определённых типах интервенционных исследований

Тип процедуры	Средние значения				
	DAР, сГр·см <sup>2</sup>	кумулятивная доза, мГр	возраст, лет	время рентгено-скопии, мин	кол-во серий изображений, шт.
ААГ	3201,0	576,4	64,8	6,9	6
КАГ	5647,5	895,6	65,1	20,2	11
ТБА НК	3135,0	894,2	67,3	17,1	20
ЦАГ	7957,1	1279,3	57,2	16,4	16
ЧКВ	10391,9	1914,4	64,2	6,9	28

DAР – dose area product (произведение дозы на площадь пучка); ААГ – аортоартериография; КАГ – коронароангиография; ТБА НК – транслюминальная баллонная ангиопластика артерий нижних конечностей; ЦАГ – церебральная ангиография; ЧКВ – чрескожное коронарное вмешательство.

Контрольный уровень для всех показателей определялся нами на основании 75 процента распределения. Оценки контрольных уровней доз ионизирующего излучения, а также времени проведения вмешательства и количества серий кинопетель (серий рентгенографических изображений) при проведении рентгенохирургических исследований представлены в табл. 2.

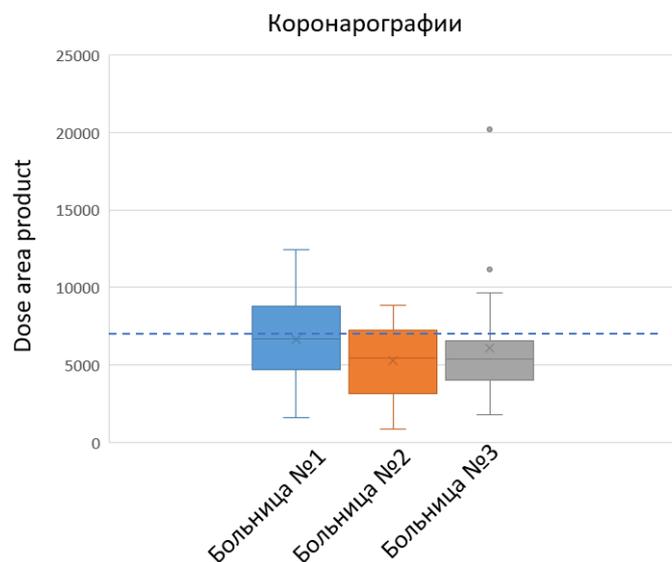
Таблица 2

#### Контрольные уровни при определённых типах интервенционных исследований

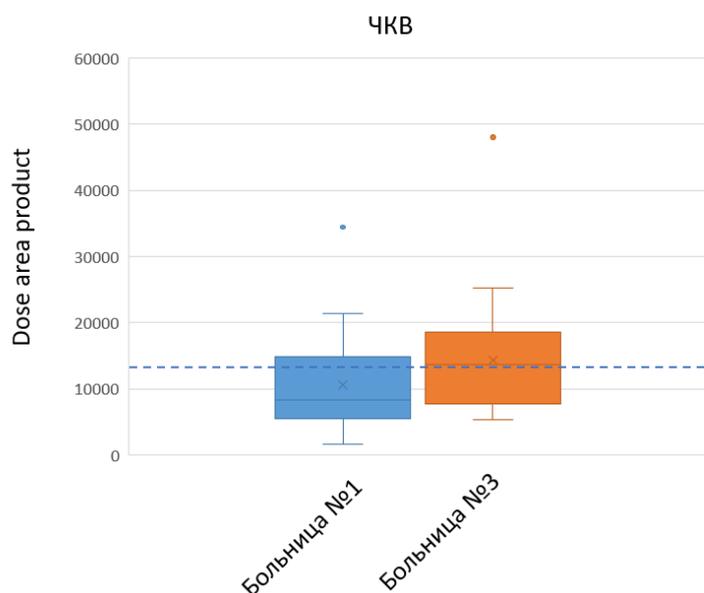
Тип процедуры	Контрольные уровни			
	DAР, сГр·см <sup>2</sup>	кумулятивная доза, мГр	время рентгено-скопии, мин	кол-во серий изображений, шт.
ААГ	3939,5	1050,0	6,7	8
КАГ	7342,3	1006,3	8,3	13
ТБА НК	3415,5	966,1	26,0	24
ЦАГ	10684,5	1676,4	22,6	17
ЧКВ	12420,1	2343,3	20,8	33

DAР – dose area product (произведение дозы на площадь пучка); ААГ – аортоартериография; КАГ – коронароангиография; ТБА НК – транслюминальная баллонная ангиопластика артерий нижних конечностей; ЦАГ – церебральная ангиография; ЧКВ – чрескожное коронарное вмешательство.

Следует отметить, что DAP и кумулятивная доза во всех больницах и для всех видов процедур статистически значимо не превысили заявленный в табл. 2 контрольный уровень за исключением нескольких случаев, которые в обязательном порядке требуют проведения внутреннего анализа причин повышенной рентгеновской нагрузки и проведения дополнительной беседы с пациентом о возможном появлении у него детерминированных кожных поражений в зоне максимального поглощения прямого излучения. На рис. 1 и 2 дисперсионный анализ произведения дозы на площадь для наиболее часто выполняемых процедур: чрескожных коронарных вмешательств и коронарографий.



**Рис. 1.** Дисперсионный анализ проведения дозы на площадь пучка рентгеновского излучения (DAP) для процедуры коронарографии. Синей пунктирной линией показано значение контрольного уровня для исследуемого параметра.



**Рис. 2.** Дисперсионный анализ проведения дозы на площадь пучка рентгеновского излучения (DAP) для процедуры ЧКВ. Синей пунктирной линией показано значение контрольного уровня для исследуемого параметра.

При частом превышении данных контрольных уровней в учреждении мы рекомендуем провести системный анализ причин превышения, оптимизировать протокол проведения процедуры, рассмотреть возможность уменьшения лучевой нагрузки с помощью изменения характеристик предустановленных настроек программного обеспечения ангиографического комплекса, провести обучение персонала по вопросам радиационной безопасности в интервенционной радиологии. Также следует предупредить пациента о возможном появлении у него детерминированных кожных поражений в зоне максимального поглощения прямого излучения.

### **Выводы**

Наблюдаемые в интервенционной радиологии распределения дозовых нагрузок пациентов являются очень широкими даже для одного определённого типа вмешательства. Это связано с тем, что продолжительность и сложность каждой процедуры в большой степени зависит от индивидуальных особенностей пациента и конкретной клинической ситуации. Проблемы с установлением референтных диагностических уровней в рентгенохирургии вынуждают к поиску других способов контроля и оптимизации радиационной защиты в интервенционной радиологии. Установленные нами контрольные уровни для определённых типов процедур являются рекомендательными, не связаны с пределами или ограничениями доз и не применяются для оптимизации защиты от детерминированных эффектов излучения. Они являются критерием, показывающим превышен ли тот уровень облучения пациента, который в типичных случаях используется для получения необходимой диагностической информации или для выполнения стандартной лечебной процедуры.

Вместе с тем, мы считаем возможным и необходимым дальнейший анализ доз облучения пациентов для установления референтных диагностических уровней при проведении различных типов процедур. По всей видимости, для этого потребуется применение технологий анализа больших данных и внедрения в повседневную повсеместную практику систем автоматического учёта доз, а также перехода к определению максимального значения входной кожной дозы, тем не менее, это позволит сделать проводимые интервенционные рентгенодиагностические исследования существенно безопаснее и свести к минимуму случаи необоснованных исследований и вероятность развития неконтролируемых детерминированных эффектов.

## Литература

1. **Алекян Б.Г.** Эндovasкулярная хирургия. Специальный выпуск. 2019. Т. 6, № 2. 240 с.
2. **Einstein A.J., Berman D.S., Min J.K., Hendel R.C., Gerber T.C., Carr J.J., Cerqueira M.D., Cullom S.J., DeKemp R., Dickert N.W., Dorbala S., Fazel R., Garcia E.V., Gibbons R.J., Halliburton S.S, Hausleiter J., Heller G.V., Jerome J., Lesser J.R., Raff G.L., Tilkemeier P., Williams K.A., Shaw L.J.** Patient-centered imaging: shared decision making for cardiac imaging procedures with exposure to ionizing radiation //J. Am. Coll. Cardiol. 2014. V. 63, N 15. P. 1480-1489. DOI:10.1001/jamainternmed.2013.483.
3. **Einstein A.J., Tilkemeier P., Fazel R., Rakotoarivelo H., Shaw L.J.** Radiation safety in nuclear cardiology – current knowledge and practice: results from the 2011 American Society of Nuclear Cardiology member survey //JAMA Intern. Med. 2013. V. 173, N 11. P. 1021-1023. DOI: 10.1001/jamainternmed.2013.483.
4. **Raff G.L., Chinnaiyan K.M., Share D.A., Goraya T.Y., Kazerooni E.A., Moscucci M., Gentry R.E., Abidov A., Advanced Cardiovascular Imaging Consortium Co-Investigators.** Radiation dose from cardiac computed tomography before and after implementation of radiation dose-reduction techniques //JAMA. 2009. V. 301, N 22. P. 2340-2348. DOI: 10.1001/jama.2009.814.
5. **Chinnaiyan K.M., Peyser P., Goraya T., Ananthasubramaniam K., Gallagher M., Depetris A, Boura J.A., Kazerooni E., Poopat C., Al-Mallah M., Souheil S., Patel S., Girard S., Song T., Share D., Raff G.** Impact of a continuous quality improvement initiative on appropriate use of coronary computed tomography angiography. Results from a multicenter, statewide registry, the Advanced Cardiovascular Imaging Consortium //J. Am. Coll. Cardiol. 2012. V. 60, N 13. P. 1185-1191. DOI: 10.1016/j.jacc.2012.06.008.
6. **Chinnaiyan K.M., Raff G.L., Goraya T., Ananthasubramaniam K., Gallagher M.J., Abidov A., Boura J.A., Share D., Peyser P.A.** Coronary computed tomography angiography after stress testing: results from a multicenter, statewide registry, ACIC (Advanced Cardiovascular Imaging Consortium) //J. Am. Coll. Cardiol. 2012. V. 59, N 7. P. 688-695. DOI:10.1016/j.jacc.2011.10886.
7. Crossing the quality chasm: a new health system for the 21st century. Committee on Quality of Health Care in America, Institute of Medicine. Washington, D.C.: National Academies Press, 2001. 360 p.
8. ICRP, 2007. Radiation protection in medicine. ICRP Publication 105 //Ann. ICRP. 2007. V. 37, N 6. P. 1-63.
9. ICRP, 2017. Diagnostic reference levels in medical imaging. ICRP Publication 135 //Ann. ICRP. 2017. V. 46, N 1. P. 1-71.
10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). СП 2.6.1.2612-10: зарегистрирован 11 августа 2010 г. Регистрационный № 18115. М.: Минюст России, 2010. 82 с.
11. Оптимизация радиационной защиты пациентов в интервенционной радиологии. Методические рекомендации МР 2.6.1.0097. М.: Роспотребнадзор, 2012. 16 с.
12. Применение референтных диагностических уровней для оптимизации радиационной защиты пациента в рентгенологических исследованиях общего назначения. Методические рекомендации МР 2.6.1.0066-12. М.: Роспотребнадзор, 2012. 28 с.
13. Об утверждении руководства по безопасности при использовании атомной энергии «Рекомендации по методам и средствам контроля за выбросами радиоактивных веществ в атмосферный воздух». Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 30 августа 2017 г. № 347. [Электронный ресурс]. URL: <http://ivo.garant.ru/#/document/71765614> (дата обращения 16.04.2020).
14. Об утверждении руководства по безопасности при использовании атомной энергии «Рекомендуемые методы расчёта параметров, необходимых для разработки нормативов допустимых сбросов радиоактивных веществ в водные объекты». Приказ Федеральной службы по экологическому, технологи-

- скому и атомному надзору от 25 июля 2017 г. № 281. [Электронный ресурс]. URL: <http://ivo.garant.ru/#/document/71733128> (дата обращения 16.04.2020).
15. Порядок расчёта контрольных уровней содержания радионуклидов в объектах природной среды. Приказ Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды от 8 сентября 2016 г. № 415 «О введении в действие сборника рекомендаций». [Электронный ресурс]. URL: <http://ivo.garant.ru/#/document/71491352> (дата обращения 16.04.2020).
16. R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. [Электронный ресурс]. URL <https://www.R-project.org> (дата обращения 16.04.2020).

## Determination of reference levels of ionizing radiation in interventional radiology

Sorokin V.G.<sup>1,2</sup>, Ryzhov S.A.<sup>1</sup>, Omelchenko A.V.<sup>1</sup>, Gromov D.G.<sup>2</sup>

- <sup>1</sup> State Budget-Funded Health Care Institution of the City of Moscow "Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of Moscow Health Care Department", Moscow;  
<sup>2</sup> Pirogov Russian National Research Medical University (RNRMU), Moscow

Advances in technology broaden the range of conditions that can be treated avoiding surgery. Application of minimally invasive diagnostic and therapeutic interventional radiologic procedures performed under medical imaging guidance, including X-ray fluoroscopy, is continuing to expand. However, radiation dose to patients undergoing invasive coronary angiography is relatively high. Recent study in interventional cardiology detected some problems related to improper usage of criteria for selection of cardiac angiography as method of choice and unjustified levels of radiation dose delivered to a patient. To investigate the problem in details we have collected and analyzed data on radiation doses delivered to patients underwent x-ray endovascular procedures in Moscow hospitals. Statistical treatment of collected data allowed us to estimate reference levels for dose area product, cumulative dose, duration of radiography procedure and the number of x-ray images to be saved for further diagnostic aortic angiography, coronary angiography, transluminal angioplasty of lower extremities and percutaneous coronary intervention. The evaluated reference levels cannot be used to limit a delivered dose and it is impossible to use them to prevent deterministic effects. The reference levels can be used for comparison with the dose delivered to a patient.

**Key words:** radiation safety, ionizing radiation, interventional radiology, imaging, diagnostic reference levels, control levels, coronarography.

## References

1. Alekyan B.G. *Endovaskulyarnaya khirurgiya, spetsial'nyy vypusk – Endovascular Surgery Special Edition*, 2019, vol. 6, no. 2, 240 p.
2. Einstein A.J., Berman D.S., Min J.K., Hendel R.C., Gerber T.C., Carr J.J., Cerqueira M.D., Cullom S.J., DeKemp R., Dickert N.W., Dorbala S., Fazel R., Garcia E.V., Gibbons R.J., Halliburton S.S., Hausleiter J., Heller G.V., Jerome J., Lesser J.R., Raff G.L., Tilkemeier P., Williams K.A., Shaw L.J. Patient-centered imaging: shared decision making for cardiac imaging procedures with exposure to ionizing radiation. *J. Am. Coll. Cardiol.*, 2014, vol. 63, no. 15, pp.1480-1489. DOI:10.1001/jamainternmed.2013.483.
3. Einstein A.J., Tilkemeier P., Fazel R., Rakotoarivelo H., Shaw L.J. Radiation safety in nuclear cardiology – current knowledge and practice: results from the 2011 American Society of Nuclear Cardiology member survey. *JAMA Intern. Med.*, 2013, vol. 173, no. 11, pp. 1021-1023. DOI: 10.1001/jamainternmed.2013.483.

Sorokin V.G. – Radiologist, Assistant Dep. Pirogov Russian National Research Medical University; Ryzhov S.A.\* – Head of the Center for radiation safety and medical physics; Omelchenko A.V. – Expert of the information-analytical department, C. Sc., Biol.; Gromov D.G. – Head of Dep., MD, Prof. of Pirogov Russian National Research Medical University. Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies.

\*Contacts: bld. 1, 16/26, Raskova str., Moscow, 125124, Russia. Tel.: +7(926)526-56-52; e-mail: s.ryzhov@nrcmr.ru.

4. Raff G.L., Chinnaiyan K.M., Share D.A., Goraya T.Y., Kazerooni E.A., Moscucci M., Gentry R.E., Abidov A., Advanced Cardiovascular Imaging Consortium Co-Investigators. Radiation dose from cardiac computed tomography before and after implementation of radiation dose-reduction techniques. *JAMA*, 2009, vol. 301, no. 22, pp. 2340-2348. DOI: 10.1001/jama.2009.814.
5. Chinnaiyan K.M., Peyser P., Goraya T., Ananthasubramaniam K., Gallagher M., Depetris A, Boura J.A., Kazerooni E., Poopat C., Al-Mallah M., Souheil S., Patel S., Girard S., Song T., Share D., Raff G. Impact of a continuous quality improvement initiative on appropriate use of coronary computed tomography angiography. Results from a multicenter, statewide registry, the Advanced Cardiovascular Imaging Consortium. *J. Am. Coll. Cardiol.*, 2012, vol. 60, no. 13, pp. 1185-1191. DOI: 10.1016/j.jacc.2012.06.008.
6. Chinnaiyan K.M., Raff G.L., Goraya T., Ananthasubramaniam K., Gallagher M.J., Abidov A., Boura J.A., Share D., Peyser P.A. Coronary computed tomography angiography after stress testing: results from a multicenter, statewide registry, ACIC (Advanced Cardiovascular Imaging Consortium). *J. Am. Coll. Cardiol.*, 2012, vol. 59, no. 7, pp. 688-695. DOI:10.1016/j.jacc.2011.10886.
7. Crossing the quality chasm: a new health system for the 21st century. Committee on Quality of Health Care in America, Institute of Medicine. Washington, D.C., National Academies Press, 2001. 360 p.
8. ICRP, 2007. Radiation protection in medicine. ICRP Publication 105. *Ann. ICRP*, 2007, vol. 37, no. 6, pp. 1-63.
9. ICRP, 2017. Diagnostic reference levels in medical imaging. ICRP Publication 135. *Ann. ICRP*, 2017, vol. 46, no. 1, pp. 1-71.
10. SanPiN 2.6.1.2612-1. Osnovnyye sanitarnyye pravila obespecheniya radiatsionnoy bezopasnosti (OSPORB-99/2010) [Basic sanitary rules for radiation safety (OSPORB-99/2010)]. Moscow, Minyust Rossii, 2010. 82 p.
11. MR 2.6.1.0097. Optimizatsiya radiatsionnoy zashchity patsiyentov v interventsionnoy radiologii. Metodicheskiye rekomendatsii [Optimization of radiation protection of patients in interventional radiology. Guidelines]. Moscow, Rospotrebnadzor, 2012. 16 p.
12. MR 2.6.1.0066-12. Primneniye referentnykh diagnosticheskikh urovney dlya optimizatsii radiatsionnoy zashchity patsiyenta v rentgenologicheskikh issledovaniyakh obshchego naznacheniya. Metodicheskiye rekomendatsii [The use of reference diagnostic levels to optimize the radiation protection of the patient in general radiology studies. Guidelines]. Moscow, Rospotrebnadzor, 2012. 28 p.
13. Prikaz Federal'noy sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 30 avgusta 2017 g. № 347 «Ob utverzhdenii rukovodstva po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoy energii "Rekomendatsii po metodam i sredstvam kontrolya za vybrosami radioaktivnykh veshchestv v atmosferynyy vozdukh"» [Order «On approval of the safety guidelines for the use of atomic energy "Recommendations on methods and means of monitoring the selection of radioactive substances in the air"»]. Available at: <http://ivo.garant.ru/#/document/71765614> (Accessed 16.04.2020).
14. Prikaz Federal'noy sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru 25.07.2017 № 281 "Ob utverzhdenii rukovodstva po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoy energii "Rekomenduyemye metody rascheta parametrov, neobkhodimyykh dlya razrabotki normativov dopustimyykh sbrosov radioaktivnykh veshchestv v vodnyye ob'yekty" [Order «On approval of safety guidelines for the use of nuclear energy "Recommended methods for calculating the parameters for developing standards for permissible releases of radioactive substances into water bodies"»]. Available at: <http://ivo.garant.ru/#/document/71733128> (Accessed 16.04.2020).
15. Prikaz Federal'noy sluzhby po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchey sredy ot 8 sentyabrya 2016 g. № 415 "O vvedenii v deystviye sbornika rekomendatsiy "Poryadok rascheta kontrol'nykh urovney sodержaniya radionuklidov v ob'yektakh prirodnoy sredy" [Order «On the introduction of the collection of recommendations "Procedure for calculating control levels of radionuclides in environmental objects"»]. Available at: <http://ivo.garant.ru/#/document/71491352> (Accessed 16.04.2020).
16. R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Available at: <https://www.R-project.org> (Accessed 16.04.2020).