

УДК 61:53(075.9)

<http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2022-13-4-16-26>

МЕТОДЫ ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ В РАДИОНУКЛИДНОЙ ТЕРАПИИ. ЧАСТЬ 2: УРОВНИ ПЛАНИРОВАНИЯ

¹А. А. Станжевский¹, ¹Д. Н. Майстренко¹, ¹Д. А. Важенина¹, ¹Д. С. Сысоев¹, ^{2,3}А. В. Водоватов¹,
^{1,2,4}Л. А. Чипига¹, ^{5,6,7}С. А. Рыжов¹, ^{2,8}А. В. Петрякова¹*

¹Российский научный центр радиологии и хирургических технологий имени академика А. М. Гранова, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П. В. Рамзаева, Санкт-Петербург, Россия

³Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

⁴Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова, Санкт-Петербург, Россия

⁵Ассоциация медицинских физиков России, Москва, Россия

⁶Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий, Москва, Россия

⁷Национальный медицинский исследовательский центр детской гематологии, онкологии и иммунологии имени Дмитрия Рогачева, Москва, Россия

⁸Городская больница № 40 Курортного района, Санкт-Петербург, Россия

На текущий момент для планирования курса радионуклидной терапии используются три наиболее простых подхода: введение фиксированной активности радионуклида в радиофармацевтическом лекарственном препарате либо введение активности, нормированной на единицу массы тела пациента или площади поверхности тела пациента. Это может приводить к значительным расхождениям между оцененными и реальными поглощенными дозами в здоровых тканях и очагах. Данные расхождения связаны с различиями в биораспределении и фармакокинетике радиофармацевтического лекарственного препарата, обусловленными индивидуальными особенностями каждого отдельного пациента, что не позволяет составить индивидуальный план лечения, поскольку информация о накопленной активности в анатомической зоне или органе, подлежащих облучению, и в критических органах ограничена, а ее достоверность не соответствует требованиям для расчета поглощенной дозы. Повышение достоверности оценки поглощенных доз при радионуклидной терапии может быть достигнуто за счет применения технических возможностей современных методов медицинской визуализации (главным образом, радионуклидной диагностики) для количественного определения накопленной активности радионуклидов в очагах и критических органах и распределения радиофармацевтического лекарственного препарата в здоровых тканях. Планирование радионуклидной терапии должно включать в себя персонализированные подходы для расчета поглощенных доз, которые будут использоваться при принятии решений, направленных на повышение эффективности терапии. В настоящем исследовании были проанализированы предложенные в Отчете Международной комиссии по радиационным единицам и измерениям № 96 «Проведение радионуклидной терапии под дозиметрическим контролем» подходы к уровням дозиметрического планирования при проведении радионуклидной терапии, дифференцированные в зависимости от аппаратного парка отделений ядерной медицины. Представлены примеры уровней планирования для наиболее распространенных радиофармацевтических лекарственных препаратов. Результаты анализа показали, что оптимальным для отечественной практики является переход на обязательное соответствие требованиям Уровня 1 по Отчету Международной комиссии по радиационным единицам и измерениям № 96, т.е. определять и регистрировать вводимую активность с учетом как минимум массы тела пациента, вида и стадии заболевания, а также необходимой терапевтической задачи. Требования Уровня 2 на практике реализовать пока не представляется возможным, за исключением отдельных крупных научно-исследовательских центров ядерной медицины. Параллельно с внедрением в практику требований Уровня 1 необходимо сосредоточиться на отработке отдельных требований Уровня 2, в частности, методик определения поглощенной дозы в крупных оконтуриваемых органах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: радионуклидная терапия, радиофармпрепарат, поглощенная доза, планирование терапии

*Для корреспонденции: Петрякова Анастасия Валерьевна, e-mail: nastya.petryakova@gmail.com

Для цитирования: Станжевский А.А., Майстренко Д.Н., Важенина Д.А., Сысоев Д.С., Водоватов А.В., Чипига Л.А., Рыжов С.А., Петрякова А.В. Методы дозиметрического планирования в радионуклидной терапии. Часть 2: уровни планирования // *Лучевая диагностика и терапия*. 2022. Т. 13, № 4. С. 16–26, DOI: <http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2022-13-4-16-26>.

© Авторы, 2022. Издательство ООО «Балтийский медицинский образовательный центр». Данная статья распространяется на условиях «открытого доступа», в соответствии с лицензией CCBY-NC-SA 4.0 («Attribution-NonCommercial-ShareAlike») / «Атрибуция-Некоммерчески-Сохранение Условий» 4.0), которая разрешает неограниченное некоммерческое использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии указания автора и источника. Чтобы ознакомиться с полными условиями данной лицензии на русском языке, посетите сайт: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.ru>

METHODS OF DOSIMETRY-BASED TREATMENT PLANNING IN RADIOPHARMACEUTICAL THERAPY. PART 2: PLANNING LEVELS

¹Andrei A. Stanzhevskii¹, ¹Dmitriy N. Maistrenko¹, ¹Daria A. Vazhenina¹, ¹Dmitriy S. Sysoev¹,
^{2,3}Aleksandr V. Vodovatov^{2,3}, ^{1,2,4}Larisa A. Chipiga^{1,2,4}, ^{5,6,7}Sergey A. Ryzhov^{5,6,7}, ^{2,8}Anastasia V. Petryakova^{2,8*}

¹Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies, St. Petersburg, Russia

²St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P. V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, St. Petersburg, Russia

³St. Petersburg State Pediatric Medical University, St. Petersburg, Russia

⁴Almazov National Medical Research Centre, St. Petersburg, Russia

⁵Association of Medical Physicists of Russia, Moscow, Russia

⁶Research and Practical Clinical Centre of Diagnostics and Telemedicine Technologies, Moscow, Russia

⁷Dmitry Rogachev National Medical Research Center of Pediatric Hematology, Oncology and Immunology, Moscow, Russia

⁸The City Hospital No. 40 of the Kurortny District, St. Petersburg, Russia

At the present time three most common approaches are used for the planning of the radionuclide therapy: administration of the fixed activity of radionuclide in radiopharmaceutical, or administration of activity normalized per unit of body mass or body surface. That may lead to significant deviations between the prescribed and real absorbed doses in healthy organs and tissues. These deviations are associated with differences in biodistribution and pharmacokinetics of radiopharmaceutical between models and real patients. That does not allow individual planning of the treatment course for each patient since data on the accumulated activity in source regions and organs at risk is limited and uncertainty is too high for the calculation of absorbed doses. Improvements in the reliability of the absorbed dose calculation can be achieved through the use of different imaging modalities (diagnostic nuclear medicine) for the quantitative assessment of accumulated activity of radionuclides in organs and tissues and distribution of radiopharmaceutical in healthy tissues. Planning of radionuclide therapy should be personalized. The current study was aimed at the analysis of the approaches the dosimetry-based planning of radionuclide therapy presented in the Report of International Commission on Radiation Units and Measurements 96 «Dosimetry-guided radiopharmaceutical therapy», differentiated based on the possibilities of the nuclear medicine departments, including examples of levels of planning for most common radiopharmaceuticals. The results of analysis indicated that most optimal approach for Russian clinical practice is to transit to the requirements of planning level 1: to calculate and report administered activity considering patient body mass, type and stage of disease was well as prescribed clinical task. Requirements of planning level 2 are currently impossible to implement nation-wide, except for several nuclear medicine research facilities. Additionally, it is necessary to focus on the development of the methods of estimation of absorbed doses in major delineable organs.

KEYWORDS: radionuclide therapy, radiopharmaceutical, absorbed dose, treatment planning

*For correspondence: Anastasia V. Petryakova, e-mail: nastya.petryakova@gmail.com

For citation: Stanzhevskii A.A., Maistrenko D.N., Vazhenina D.A., Sysoev D.S., Vodovatov A.V., Chipiga L.A., Ryzhov S.A., Petryakova A.V. Methods of dosimetry-based treatment planning in radiopharmaceutical therapy. Part 2: Planning levels // *Diagnostic radiology and radiotherapy*. 2022. Vol. 13, No. 4. P. 16–26, DOI: <http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2022-13-4-16-26>.

Введение. Радионуклидная терапия (РНТ) имеет системный характер и дает возможность воздействовать сразу на несколько патологических очагов. Помимо этого, облучению подвергаются органы выведения радионуклидов. РНТ имеет свои особенности с точки зрения подведения определенной дозы в патологические очаги и оценки дозы в КО¹, которые связаны с фармакокинетикой радиофармацевтического лекарственного препарата (РФЛП), активностью радионуклида, накапливаемой в очагах, а также в КО. Все эти вопросы решаются на этапе планирования РНТ при определении активности, вводимой пациенту [1, с. 17].

На текущий момент для планирования курса РНТ используются три наиболее простых подхода: введение фиксированной активности РФЛП либо введение активности РФЛП, нормированной на единицу массы тела пациента или площади поверхности тела пациента. Это может приводить к значительным расхождениям между оцененными и реальными поглощенными дозами в КО и патологических очагах. Данные расхождения связаны с различиями в биораспределении и фармакокинетике РФЛП, обусловленными индивидуальными особенностями каждого отдельного пациента. Это не позволяет составить индивидуальный план лечения, поскольку информация о накопленной

¹ КО, критические органы и ткани (Region at risk, RAR) — здоровые органы и ткани, облучение которых в ходе РНТ может привести к развитию неблагоприятных эффектов, осложнениям, или функциональной недостаточности, и для которых определяются массы и соответствующие поглощенные дозы в органах.

активности в анатомической зоне или органе, подлежащих облучению, и в КО ограничена, а ее достоверность не соответствует требованиям для расчета поглощенной дозы. Существующие подходы применимы только для ограниченной активности радионуклида в РФЛП, например $^{131}\text{I-NaI}$, используемого для лечения рака щитовидной железы, с помощью которого можно получить очень высокое терапевтическое соотношение поглощенной дозы в щитовидной железе к поглощенной дозе в КО. Следует отметить, что отечественные нормативно-методические документы в принципе не предписывают вести контроль поглощенных доз у пациентов; напротив, в действующих санитарных правилах по обеспечению радиационной безопасности при проведении лучевой терапии с помощью открытых радионуклидных источников (СанПиН 2.6.1.2368-08) вместо оценки поглощенных доз в органах и тканях, подлежащих облучению, требуется оценивать эффективную дозу, что противоречит всем общепринятым подходам [2, с. 10; 3, с. 127; 4, с. 2; 5, с. 11].

Повышение достоверности оценки поглощенных доз при РНТ может быть достигнуто за счет применения технических возможностей современных методов медицинской визуализации (главным образом, позитронной эмиссионной томографии, совмещенной с компьютерной томографией — ПЭТ/КТ или однофотонной эмиссионной компьютерной томографией, совмещенной с КТ — ОФЭКТ/КТ) для оценки распределения РФЛП в КО и количественного определения накопленной активности радионуклидов в патологических очагах и КО. Планирование РНТ должно включать в себя персонализированные подходы для расчета поглощенных доз, которые будут использоваться при принятии решений, направленных на повышение эффективности РНТ. Информация о поглощенных дозах в органах и тканях пациентов также должна использоваться для оценки соотношения пользы и возможного вреда при планировании последующих курсов лечения, для ретроспективных оценок уровней облучения пациентов [6, с. 2457; 7, с. 2–3; 8, с. 857; 9, с. 1127; 10, с. 1239; 11, с. 193] и для планирования РНТ, совмещенной с дистанционной лучевой терапией [12, с. 2]. Согласно подходу, предложенному Международной комиссией по радиационным единицам и измерениям (МКРЕ) [1, с. 19], дозиметрическое планирование РНТ не должно отличаться от дистанционной лучевой терапии и брахитерапии [13, с. 7; 14, с. 2]. Необходимо оценивать дозу в патологических очагах, а также в КО.

Подходы к выбору необходимой поглощенной дозы. В зависимости от нозологии онкологического

заболевания и предполагаемой схемы лечения предписанная поглощенная доза — это поглощенная доза в ЗИ¹ или КО, которая позволит обеспечить достижение поставленной клинической цели. Клиническая цель может заключаться в продлении продолжительности жизни, повышении онкоспецифической выживаемости, выздоровлении пациента или контроле над опухолью, в зависимости от состояния пациента и плана лечения. Так как в большинстве случаев РНТ используется для лечения диссеминированных форм злокачественных новообразований, оценка поглощенной дозы во всех очагах по данным количественного определения активности с помощью методов медицинской визуализации практически невозможна либо потребует существенных затрат времени и ресурсов без существенного значения для тактики лечения и прогноза лечения заболевания для пациента. Также возможно получение количественной информации о накоплении РФЛП по результатам биопсии, или косвенных измерений (например, по определению активности радионуклида в крови пациента). Однако в дальнейшем возможно выявление ситуаций, при которых определение поглощенной дозы во множестве очагов будет иметь существенное прогностическое значение и влиять на дальнейшую тактику лечения пациента.

Определение предписанной поглощенной дозы основано на вероятности того, что в некоторых анатомически и функционально определяемых тканях (органах) или других анатомических зонах находятся раковые клетки. Эти клетки следует облучить в необходимой поглощенной дозе для того, чтобы снизить риск рецидива или более позднего обнаружения опухоли в субклинической (бессимптомной) стадии при отсутствии адекватного лечения. Лечение может быть радикальным, направленным на излечение, с достижением контроля над опухолью для продления жизни пациента и паллиативным, чтобы улучшить качество жизни пациента.

Предписанная поглощенная доза является фундаментальной частью проведения РНТ, включающей в себя инструкции для достижения запланированной поглощенной дозы в ЗОДК² и КО, а также методику проведения лечения. Ответственный за проведение РНТ врач вместе с медицинским физиком определяют набор ЗОДК и КО, а также предписанные в них поглощенные дозы. Их значения являются основой для планирования лечения медицинским физиком. Выбор данных показателей основывается на обследовании пациента и данных предварительных диагностических и, в ряде случаев, лабораторных исследований. При РНТ распределение поглощенной дозы в органе будет неоднородным из-за различий

¹ ЗИ, зоны-источники (Source regions, SR) — органы и ткани, в которых возможно количественно определить накопленный РФЛП и рассчитать временной интеграл активности.

² ЗОДК, зона облучения под дозиметрическим контролем (Dosimetric treatment region, DTR) — подлежащие облучению органы и ткани (или анатомические области), в которых расположены очаги, которые подвергнутся лечению с помощью РНТ и для которых определяются массы органов, накопленные активности и соответствующие поглощенные дозы.

в поступлении РФЛП к опухолевым клеткам, кровоснабжения и экспрессии тех или иных рецепторов на поверхности клеток и т.д. В связи с неоднородностью распределения поглощенной дозы на клеточном уровне средняя поглощенная доза в патологическом очаге, необходимая для эффективного лечения, может быть существенно выше по сравнению с дистанционной лучевой терапией. Предписанная поглощенная доза может интерпретироваться как максимальная допустимая поглощенная доза в КО. В таком случае максимальная вводимая активность радионуклида в РФЛП должна оцениваться на основе предварительной дозиметрии с точностью, соответствующей выбранному уровню планирования. Схема подготовки к проведению курса РНТ представлена на рисунке.

- используемые инструкции по проведению РНТ, выбранному РФЛП для достижения запланированного распределения поглощенной дозы в очагах;
- число фракций облучения (введений РФЛП), введенная активность радионуклида в РФЛП за фракцию и временной интервал между фракциями;
- перечень ЗОДК и КО. В частности:
 - анатомическая область, в которой преимущественно будет накапливаться РФЛП (например, малый таз, брюшная полость и пр.);
 - перечень ЗОДК и поглощенные в них дозы;
 - перечень КО и поглощенные в них дозы;
 - предписанные поглощенные дозы в соответствии с целью лечения;

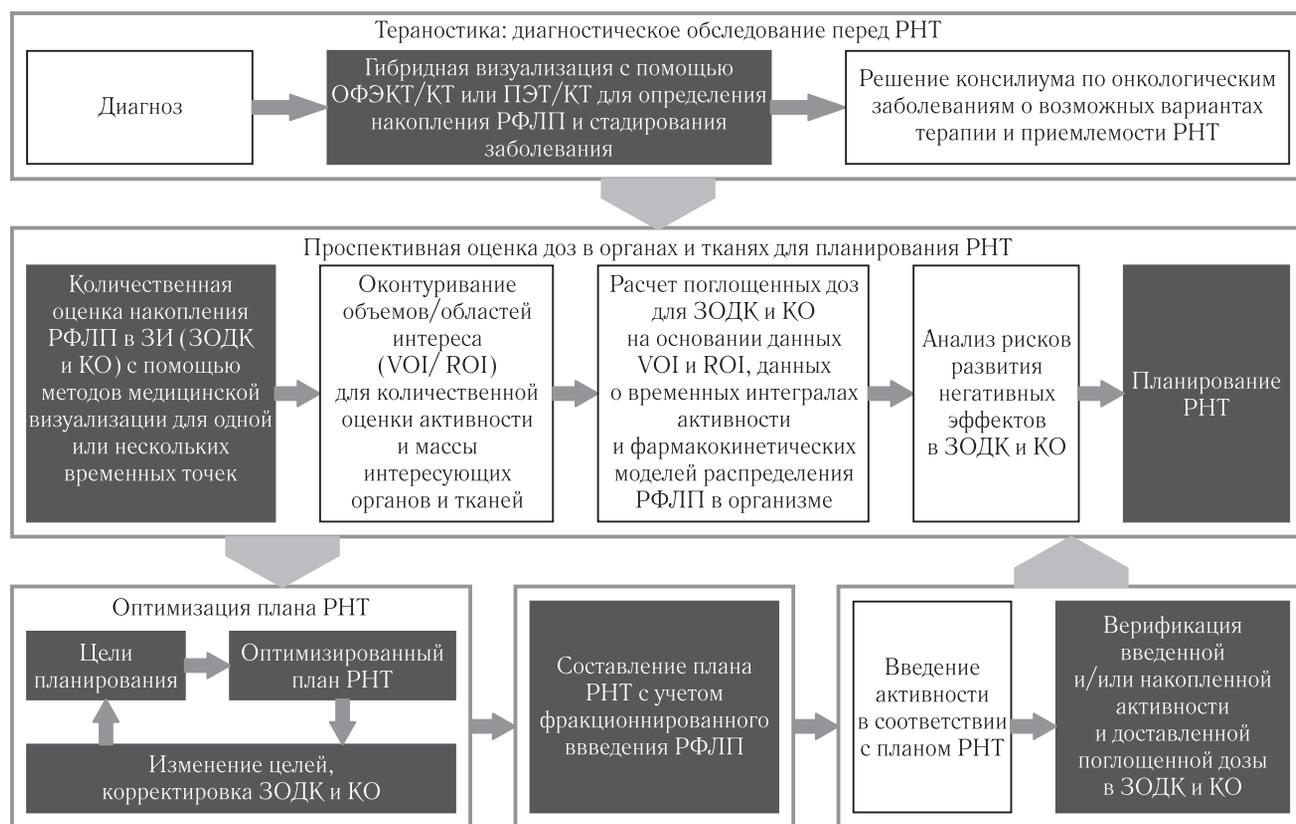


Рисунок. Общая схема комплексного планирования РНТ. Адаптировано из Отчета МКРЕ 96 [1, с. 152]

Figure. Overall scheme for comprehensive treatment planning applied to radiopharmaceutical treatment.

Adapted from ICRU 96 [1, p. 152]

Требования к документированию дозиметрических расчетов в РНТ. Распределение поглощенной дозы в органах и тканях определяется несколькими показателями. Набор показателей будет определяться видом РФЛП и его способом введения. Ниже представлен набор данных, который необходимо определять и регистрировать для обеспечения надлежащего ведения плана лечения и ретроспективной оценки взаимосвязи доза-эффект:

- имя пациента, идентификационный код с указанием даты рождения — данные, которые необходимо проверить перед введением РФЛП;
- сведения о примененных ранее методах лучевой или радионуклидной терапии;

- перечень исходных данных, необходимых для расчета поглощенной дозы:

- номенклатура используемых диагностических РФЛП для дозиметрии;
- методы визуализации для дозиметрии:
 - РФЛП для терапии;
 - методы визуализации для контроля дозиметрии:
 - вводимые активности РФЛП;
 - число введений РФЛП;
 - временной интервал между фракциями;
 - перечень органов и тканей, для которых будут определяться временные интегралы активности радионуклида в РФЛП (ЗИ);

- биологические и эффективные периоды полураспада радионуклидов в ЗИ;
- данные о накопленной активности в ЗИ;
- алгоритм расчета поглощенной дозы и использованное для этого программное обеспечение;
- предписанная вводимая активность радионуклида и/или рассчитанная вводимая активность радионуклида для доставки предписанной поглощенной дозы.

Уровни дозиметрического планирования в соответствии с Отчетом МКРЕ 96. В соответствии с предыдущими отчетами МКРЕ (например, [15, с. 196]), определяют три уровня дозиметрического планирования для РНТ. Отнесение к тому или иному уровню планирования определяется РФЛП и клиническими показаниями, а также реальными возможностями медицинской организации, в которой проводится РНТ.

– *Уровень 1* — минимальные стандарты дозиметрического планирования для назначения и проведения РНТ. Ни один вид РНТ не должен проводиться без выполнения требований этих стандартов.

– *Уровень 2* применяется для планирования и проведения РНТ с использованием современных методов персонализированного прогнозирования в соответствии с заранее установленным критерием неопределенности оценки поглощенных доз. Требования к точности оценки поглощенных доз определяются программами обеспечения качества (ПОК), разрабатываемыми в медицинских организациях. На втором уровне обязательны расчет поглощенных доз в ЗОДК и КО, а также корректировки вводимых активностей РФЛП в зависимости от результатов оценки поглощенных доз.

– *Уровень 3* применяется для научно-исследовательской работы и клинических испытаний. Он используется для усовершенствования новых процедур и методик РНТ, для которых критерии дозиметрического планирования еще не стандартизированы МКРЕ [16, с. 13]. Задачей рекомендаций третьего уровня является сбор информации для разработки и внедрения в клиническую практику новых методик, которые могут быть реализованы и усовершенствованы в клинических исследованиях, для их дальнейшего применения на Уровне 2.

Вне зависимости от уровня планирования документация в отделении РНТ должна включать все необходимые данные для расчетов предписанной поглощенной дозы или вводимой активности.

Рекомендации планирования на Уровне 1. Дозиметрическое планирование РНТ на Уровне 1 осуществляется обычно на основе вводимой активности радионуклида в РФЛП. На данном уровне требуется, чтобы предписанная активность радионуклида контролировалась с использованием оборудования (дозкалибраторов), откалиброванного в соответствии с требованиями национального законодательства. Погрешность измерения (неопределенность) вводимой активности не должна превышать $\pm 10\%$. Тем не

менее в некоторых случаях (т.е. для отдельных РФЛП и сценариев облучения) расчеты поглощенной дозы требуются даже для Уровня 1.

Стратегия Уровня 1 — методика, рекомендуемая только в тех случаях, когда ЗОДК или КО не могут быть четко определены (например, при диссеминированном распространении опухолевого процесса), или используются РФЛП с относительно стандартным распределением в теле пациента. Предписанная поглощенная доза должна быть основана на доступных диагностических изображениях или на доступных показателях (индекс массы тела (ИМТ), площадь поверхности тела (ППТ)) для снижения риска возникновения побочных эффектов в КО.

Рекомендации планирования на Уровне 2. Планирование РНТ на Уровне 2 следует проводить таким образом, чтобы суммарная погрешность расчета (одно стандартное отклонение) поглощенных доз в ЗОДК и КО находилась в рамках установленного допустимого предела $U(D)$, определяющегося видом РФЛП и клинической картины (в настоящее время количественно не определен). Если задачей РНТ является предотвращение развития токсических эффектов, то следует сравнить расчетную поглощенную дозу в КО с соответствующими пределами доз. Если задачей является контроль над опухолью, то поглощенная доза в ЗОДК должна быть необходимой для достижения клинической задачи. В зависимости от конкретных клинических обстоятельств и РФЛП, может потребоваться трехмерная визуализация ЗОДК для конкретного пациента с целью расчета поглощенной дозы в ЗОДК. Для расчетов необходимо выбрать те органы и ткани, которые с наибольшей вероятностью позволяют прогнозировать результат лечения с точки зрения безопасности и эффективности. С этой целью для выбранных органов строят кривые «время-активность», определяют временной интеграл активности и, как следствие, поглощенную дозу. Ключевое отличие между Уровнем 1 и Уровнем 2 заключается в проведении расчетов для индивидуальных пациентов (с учетом реальных размеров органов и пр.) с более жесткими требованиями к погрешностям при оценке поглощенных доз.

Стратегия Уровня 2 — персонализированное планирование лечения для каждого пациента. На Уровне 2 должны фиксироваться поглощенные дозы в ЗОДК и КО. Степень их влияния будет зависеть от РФЛП и клинической ситуации. К примеру, корректировки вводимой активности радионуклида на основе поглощенной дозы в КО являются решающим фактором для педиатрических пациентов или для РФЛП с узким терапевтическим окном. Так как поглощенная доза в КО практически не учитывается при проведении РНТ в настоящее время, есть опасения, что пациенты недополучают лечение (поглощенная доза в ЗОДК ниже необходимой).

Рекомендации планирования на Уровне 3. Уровень 3 подходит для проведения научно-исследовательских работ (клинических испытаний), при которых

основная задача заключается в разработке методик дозиметрии пациентов с моделированием биологических эффектов и/или биомаркеров с учетом предыдущей истории лечения. Моделирование биоэффекта, например, будет включать в себя оценку интенсивности поглощенной дозы, а также оценку погрешности в ее определении исходя из ограничений в разрешающей способности оборудования для медицинской визуализации. Также для оценки эффектов в облученных тканях могут использоваться результаты биопсии.

Планирование на Уровне 3 должна включать в себя изображения, полученные с помощью КТ или методов радионуклидной диагностики, с наложением на контуры органов соответствующей гистограммы доза-объем и таких показателей, как поглощенная доза в конкретной точке или поглощенная доза в 95% объема ЗОДК или КО. Гистограммы доза-объем в КО могут быть представлены в виде контуров изодозных кривых.

Стратегия Уровня 3 направлена на сбор результатов от применения передовых (перспективных) методик РНТ для оценки их потенциального клинического воздействия с целью определения, какие именно параметры могут быть рекомендованы в качестве требований Уровня 2 для данного РФЛП.

Примеры представления отчетных данных, соответствующие рекомендациям 2021 года по оценке доз в РНТ для различных уровней планирования и различных РФЛП:

— ^{131}I -NaI при доброкачественном поражении щитовидной железы (одноочаговое поражение), вводимая активность: 190 МБк — маленькие железы, 380 МБк — железы среднего размера, 570 МБк — крупные железы¹.

Уровень 1:

Доза: вводимая активность согласно листку-вкладышу².

Уровень 2:

Доза: терапия под дозиметрическим контролем. 300–400 Гр на ЗОДК в соответствии с клиническими рекомендациями.

Перспективная и верификационная дозиметрия: измерение накопленной активности ^{131}I -NaI с помощью гамма-тиреоидометра (^{131}I -NaI probe) (оценка массы щитовидной железы осуществляется с помощью визуализации с $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -пертехнетатом или ^{123}I -NaI, или ультразвукового исследования).

Объем облучаемых органов (КО и ЗОДК): ЗОДК = щитовидная железа.

Уровень 3:

Доза: подбор баланса между контролем над опухолью и вероятностью развития осложнений в КО.

Перспективная и верификационная дозиметрия:

- количественная визуализация с ^{131}I -NaI;
- измерение накопленной активности ^{131}I -NaI с помощью детекторов, расположенных в воротнике (оценка массы щитовидной железы осуществляется с помощью визуализации с $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -пертехнетатом или ^{123}I -NaI или ультразвукового исследования);
- ПЭТ/КТ с ^{124}I -NaI.

Объем облучаемых органов (КО и ЗОДК): КО = слюнные железы.

— ^{131}I -NaI при доброкачественном поражении щитовидной железы (многоочаговое поражение), вводимая активность: 190 МБк — маленькие железы, 380 МБк — железы среднего размера, 570 МБк — крупные железы.

Уровень 1:

Доза: вводимая активность согласно листку-вкладышу.

Уровень 2:

Доза: терапия под дозиметрическим контролем. 150–200 Гр на ЗОДК, следуя соответствующим рекомендациям.

Перспективная и верификационная дозиметрия: измерение накопленной активности ^{131}I -NaI с помощью гамма-тиреоидометра (^{131}I -NaI probe) (оценка массы щитовидной железы осуществляется с помощью визуализации с $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -пертехнетатом или ^{123}I -NaI, или ультразвукового исследования).

Объем облучаемых органов (КО и ЗОДК): ЗОДК = щитовидная железа.

Уровень 3:

Доза: подбор баланса между контролем над опухолью и вероятностью развития осложнений в КО.

Перспективная и верификационная дозиметрия:

- количественная визуализация с ^{131}I -NaI;
- измерение накопленной активности ^{131}I -NaI с помощью детекторов, расположенных в воротнике (оценка массы щитовидной железы осуществляется с помощью визуализации с $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -пертехнетатом или ^{123}I -NaI или ультразвукового исследования);
- ПЭТ/КТ с ^{124}I -NaI.

Объем облучаемых органов (КО и ЗОДК): КО = слюнные железы.

— ^{131}I -NaI при доброкачественном поражении щитовидной железы (болезнь Грейвса), вводимая активность: 190 МБк — маленькие железы, 380 МБк — железы среднего размера, 570 МБк — крупные железы.

Уровень 1:

Доза: вводимая активность согласно листку-вкладышу.

¹ Инструкция по применению натрия йодида, ^{131}I , капсулы [Электронный ресурс] — URL: https://icpr.ru/our-activities/production-radiopharmaceuticals/production-radiopharmaceuticals-4_11.html (дата последнего обращения 18.10.2022). [Package insert/prescribing information for ^{131}I -NaI. Available at: https://icpr.ru/our-activities/production-radiopharmaceuticals/production-radiopharmaceuticals-4_11.html (accessed 18 October 2022)].

² Листок-вкладыш — инструкции по медицинскому применению лекарственного препарата.

Уровень 2:

Доза: терапия под дозиметрическим контролем. 200 Гр на ЗОДК, следуя соответствующим рекомендациям.

Перспективная и верификационная дозиметрия: измерение накопленной активности $^{131}\text{I-NaI}$ с помощью гамма-тиреоидометра ($^{131}\text{I-NaI}$ probe) (оценка массы щитовидной железы осуществляется с помощью визуализации с $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -пертехнетатом или $^{123}\text{I-NaI}$, или ультразвукового исследования).

Объем облучаемых органов (КО и ЗОДК): ЗОДК = щитовидная железа.

Уровень 3:

Доза: подбор баланса между контролем над опухолью и вероятностью развития осложнений в КО.

Перспективная и верификационная дозиметрия:

- количественная визуализация с $^{131}\text{I-NaI}$;
- измерение накопленной активности $^{131}\text{I-NaI}$ с помощью детекторов, расположенных в воротнике (оценка массы щитовидной железы осуществляется с помощью визуализации с $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -пертехнетатом или $^{123}\text{I-NaI}$ или ультразвукового исследования);
- ПЭТ/КТ с $^{124}\text{I-NaI}$.

Объем облучаемых органов (КО и ЗОДК): КО = слюнные железы.

— $^{131}\text{I-NaI}$ при абляции дифференцированного рака щитовидной железы, вводимая активность: 3,7–7,4 МБк¹.

Уровень 1:

Доза: вводимая активность согласно листку-вкладышу, 1,11–7,4 ГБк.

Перспективная дозиметрия: количественная визуализация с $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -пертехнетатом или $^{123}\text{I-NaI}$.

Верификационная дозиметрия: количественная планарная визуализация или ОФЭКТ/КТ.

Уровень 2:

Перспективная дозиметрия: количественная визуализация $^{131}\text{I-NaI}$ и оценка концентрации активности в крови.

Верификационная дозиметрия: сцинтиграфия всего тела и забор крови в нескольких временных точках.

Объем облучаемых органов (КО и ЗОДК): ЗОДК = щитовидная железа.

Уровень 3:

Перспективная дозиметрия: оценка поглощенной дозы в очагах и легких с помощью ПЭТ/КТ с $^{124}\text{I-NaI}$.

Объем облучаемых органов (КО и ЗОДК): КО = легкие, костный мозг, слюнные железы.

— $^{131}\text{I-NaI}$ при метастатическом рецидиве дифференцированного рака щитовидной железы, вводимая активность: 1850–3700 МБк 1 раз в 3 месяца².

Уровень 1:

Доза: 3,7–11,1 ГБк. Накопленная активность в легких через 48 ч должна быть <3 ГБк.

Перспективная дозиметрия: количественная визуализация с $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -пертехнетатом или $^{123}\text{I-NaI}$.

Верификационная дозиметрия: количественная планарная визуализация или ОФЭКТ/КТ.

Уровень 2:

Доза: поглощенная доза в крови должна быть <2 Гр.

Перспективная дозиметрия: количественная визуализация $^{131}\text{I-NaI}$ и оценка концентрации активности в крови.

Верификационная дозиметрия: сцинтиграфия всего тела и забор крови в нескольких временных точках.

Объем облучаемых органов (КО и ЗОДК): ЗОДК = щитовидная железа.

Уровень 3:

Перспективная дозиметрия: оценка поглощенной дозы в поражениях и легких с помощью ПЭТ/КТ с $^{124}\text{I-NaI}$.

Объем облучаемых органов (КО и ЗОДК): КО = легкие, костный мозг, слюнные железы.

— $^{131}\text{I-MIBG}$ при неоперабельной, местнораспространенной или метастатической феохромоцитоме и параганглиоме, нейроэндокринных опухолях (возраст ≥ 12 лет), вводимая активность — масса тела >50 кг: 185–222 МБк; масса тела <50 кг: 3,7 МБк/кг³.

Уровень 1:

Доза: вводимая активность согласно листку-вкладышу при блокировании щитовидной железы.

Перспективная дозиметрия: количественная планарная визуализация всего тела с $^{131}\text{I-MIBG}$ в трех временных точках. Масса тела >50 кг: 185–222 МБк; масса тела <50 кг: 3,7 МБк/кг. Общий объем почек (правая+левая) по КТ (1,03 г/см³).

Объем облучаемых органов (КО и ЗОДК): КО = костный мозг, легкие, почки, печень, тонкий кишечник.

Уровень 2:

Доза: корректировка вводимой активности с учетом поглощенной дозы в ЗОДК (при превышении предельного значения).

Перспективная дозиметрия: для оценки поглощенной дозы в ЗОДК использовать массу органов, полученную по КТ или МРТ.

¹ Package insert/prescribing information for Sodium Iodide I-131. Available at: <https://www.drugs.com/pro/sodium-iodide-i-131.html> (accessed 18 October 2022).

² Натрия йодид $^{131}\text{I-NaI}$ — инструкция по применению [Электронный ресурс]. URL: https://medi.ru/instrukciya/natriya-yodid-na131i_21467/ (дата последнего обращения 18.10.2022). [Package insert/prescribing information for $^{131}\text{I-NaI}$. Available at: https://medi.ru/instrukciya/natriya-yodid-na131i_21467/ (accessed 18 October 2022)].

³ Highlights of Prescribing Information for Azedra (iobenguane I-131). Available at: https://www.accessdata.fda.gov/drugsatfda_docs/label/2018/209607s000lbl.pdf (accessed 18 October 2022).

Уровень 3:

Доза: подбор баланса между контролем над опухолью и вероятностью развития осложнений в КО.

Перспективная дозиметрия: количественная визуализация ЗОДК с помощью ОФЭКТ/КТ или ПЭТ/КТ (с $^{124}\text{I-NaI}$).

Объем облучаемых органов (КО и ЗОДК): ЗОДК = опухоли.

— ^{131}I -МИБГ при нейроblastоме (дети и подростки), вводимая активность: 444 МБк/кг [17, с. 2].

Уровень 1:

Доза: вводимая активность согласно листку-вкладышу из расчета на массу тела при блокировании щитовидной железы.

Уровень 2:

Доза: вводимая активность согласно листку-вкладышу из расчета на массу тела при блокировании щитовидной железы.

Перспективная дозиметрия: оценка поглощения ^{131}I -МИБГ или ^{123}I -МИБГ.

Верификационная дозиметрия: сцинтиграфия всего тела для оценки дозы на все тело.

Объем облучаемых органов (КО и ЗОДК): КО = костный мозг, легкие, почки, печень, тонкий кишечник.

Уровень 3:

Доза: оценка поглощенной дозы в опухоли.

Перспективная дозиметрия: визуализация с ^{124}I -МИБГ.

Верификационная дозиметрия: планарная визуализация всего тела или ОФЭКТ/КТ.

Объем облучаемых органов (КО и ЗОДК): ЗОДК = опухоли.

— ^{177}Lu -ДОТАТАТЕ при нейроэндокринных опухолях, вводимая активность: $4 \times 7,4$ ГБк с 8-недельным интервалом¹.

Уровень 1:

Доза: вводимая активность и аминокислоты согласно листку-вкладышу.

Уровень 2:

Доза: оценка дозы в поражениях и КО.

Перспективная дозиметрия: количественная визуализация фракций лечения ^{177}Lu -ДОТАТАТЕ после первого введения, для общей оценки может быть использован ^{68}Ga -ДОТАТАТЕ.

Верификационная дозиметрия: количественная визуализация и дозиметрия для одной, несколь-

ких или предпочтительно всех фракций лечения ^{177}Lu -ДОТАТАТЕ.

Объем облучаемых органов (КО и ЗОДК): КОок (оконтуриваемые КО) = почки; КОнеок (неоконтуриваемые КО) = костный мозг.

Уровень 3:

Доза: подбор баланса между контролем над опухолью и вероятностью развития осложнений в КО.

Перспективная дозиметрия: Общая оценка с ^{68}Ga -ДОТАТАТЕ.

Верификационная дозиметрия: количественная визуализация и дозиметрия для всех фракций лечения ^{177}Lu -ДОТАТАТЕ.

Объем облучаемых органов (КО и ЗОДК): ЗОДК = опухоли.

— ^{90}Y -ибритумомаб тиуксетан при неходжкинской лимфоме, вводимая активность: 15 МБк/кг².

Уровень 1:

Доза: вводимая активность и аминокислоты согласно листку-вкладышу.

Перспективная дозиметрия: качественная планарная визуализация всего тела с ^{111}In -ибритумомаба тиуксетан через 48–72 часа после введения.

Объем облучаемых органов (КО и ЗОДК): интенсивное накопление в КОок = печень, селезенка или костный мозг. Повышенное поглощение в КО.

Уровень 2:

Перспективная дозиметрия: количественная планарная визуализация всего тела.

Верификационная дозиметрия: ОФЭКТ/КТ или ПЭТ/КТ.

Объем облучаемых органов (КО и ЗОДК): КОок = костный мозг.

Уровень 3:

Перспективная дозиметрия: количественная визуализация ОФЭКТ/КТ.

Объем облучаемых органов (КО и ЗОДК): ЗОДК = поражения.

— $^{89}\text{SrCl}_2$ при паллиативном лечении боли в костях, вводимая активность: 150 МБк; при недостатке или избытке массы — 2 МБк/кг³.

Уровень 1:

Доза: фиксированная вводимая активность согласно листку-вкладышу или из расчета на массу тела: 1,5–2,2 МБк/кг.

Перспективная дозиметрия: качественная планарная визуализация всего тела с $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MDP/HDP.

¹ Drug Label Information for ^{177}Lu -DOTATATE. Available at: <https://dailymed.nlm.nih.gov/dailymed/drugInfo.cfm?setid=72d1a024-00b7-418a-b36e-b2cb48f2ab55> (accessed 18 October 2022).

² Зевалин (Zevalin) инструкция по применению [Электронный ресурс]. URL: https://www.vidal.ru/drugs/zevalin__39304 (дата последнего обращения 18.10.2022). [Package insert/prescribing information for Zevalin. Available at: https://www.vidal.ru/drugs/zevalin__39304 (accessed 18 October 2022)].

³ Инструкция по применению стронция хлорида, ^{89}Sr , раствор для внутривенного введения [Электронный ресурс]. URL: https://fcpr.ru/our-activities/production-radiopharmaceuticals/production-radiopharmaceuticals-4_7.html (дата последнего обращения 18.10.2022). [Package insert/prescribing information for $^{89}\text{SrCl}_2$. Available at: https://fcpr.ru/our-activities/production-radiopharmaceuticals/production-radiopharmaceuticals-4_7.html (accessed 18 October 2022)].

— ^{153}Sm -EDTMP при паллиативном лечении боли в костях, вводимая активность: 19 МБк/кг¹.

Уровень 1:

Доза: вводимая активность согласно листку-вкладышу из расчета на массу тела.

Перспективная дозиметрия: качественная планарная визуализация всего тела с $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MDP/HDP.

Уровень 2:

Верификационная дозиметрия: планарная визуализация или ОФЭКТ/КТ.

— ^{90}Y -микросферы при первичных опухолях или метастазах печени, вводимая активность: 2,0–9,2 ГБк².

Уровень 1:

Объем облучаемых органов (КО и ЗОДК): ЗОДКок (оконтурируемые ЗОДК) = опухоли.

Уровень 2:

Доза: 80–150 Гр на всю печень.

Перспективная дозиметрия: визуализация с $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -ММА.

Объем облучаемых органов (КО и ЗОДК): КОок = легкие.

Уровень 3:

Доза: подбор баланса между контролем над опухолью и вероятностью развития осложнений в КО.

Объем облучаемых органов (КО и ЗОДК): ЗОДКок = поражения.

— $^{223}\text{RaCl}_2$ при паллиативном лечении боли в костях, вводимая активность: 6×55 кБк/кг с 4-недельным интервалом.

Уровень 1:

Доза: вводимая активность согласно листку-вкладышу из расчета на массу тела: 6×55 кБк/кг с 4-недельным интервалом.

Перспективная дозиметрия: качественная планарная визуализация всего тела с $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MDP/HDP.

Уровень 2:

Верификационная дозиметрия: планарная визуализация.

— ^{90}Y -ДОТА-ТОК при нейроэндокринных опухолях.

Уровень 1:

Доза: 1,85–3,7 ГБк/м² ППТ аминокислот.

Уровень 2:

Перспективная дозиметрия: визуализация с ^{68}Ga -ДОТА-ТОК или ^{111}In -ДТПА-октреотид.

Верификационная дозиметрия: ОФЭКТ/КТ или ПЭТ/КТ.

Объем облучаемых органов (КО и ЗОДК): КОок = почки.

Уровень 3:

Объем облучаемых органов (КО и ЗОДК): ЗОДК = опухоли.

— ^{177}Lu -ПСМА при метастатическом каstrationно-резистентном раке предстательной железы.

Уровень 1:

Доза: 4×6,0–7,4 ГБк с 8-недельным интервалом.

Уровень 2:

Перспективная дозиметрия: визуализация с ^{68}Ga -ПСМА или ^{18}F -ПСМА.

Верификационная дозиметрия: планарная визуализация всего тела или ОФЭКТ/КТ.

Объем облучаемых органов (КО и ЗОДК): ЗОДК = поражения.

— ^{225}Ac -ПСМА при метастатическом каstrationно-резистентном раке предстательной железы.

Уровень 1:

Доза: 100 кБк/кг с 8-недельным интервалом.

Уровень 2:

Перспективная дозиметрия: визуализация с ^{68}Ga -ПСМА или ^{18}F -ПСМА, или ^{177}Lu -ПСМА.

Верификационная дозиметрия: планарная визуализация.

Объем облучаемых органов (КО и ЗОДК): ЗОДК = поражения.

— ^{166}Ho -микросферы при первичных опухолях или метастазах печени.

Уровень 2:

Доза: оценка поглощенной дозы в печени (60 Гр).

Перспективная дозиметрия: визуализация с $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -ММА.

Верификационная дозиметрия: визуализация с помощью ОФЭКТ/КТ, МРТ.

Объем облучаемых органов (КО и ЗОДК): ЗОДК = КОок = печень (нецелевая область).

Уровень 3:

Доза: подбор баланса между контролем над опухолью и вероятностью развития осложнений в КО.

Объем облучаемых органов (КО и ЗОДК): ЗОДК = поражения.

— Коллоидные ^{90}Y и ^{186}Re , ^{169}Er цитрат при радиационной синовэктомии и ревматоидном артрите.

Уровень 1:

Доза: 10–40 МБк ^{169}Er (кость и запястье); 10–190 МБк ^{186}Re (бедро); 180–200 МБк ^{90}Y (колени).

Уровень 2:

Доза: 10–40 МБк ^{169}Er (кость и запястье); 10–190 МБк ^{186}Re (бедро); 180–200 МБк ^{90}Y (колени).

Перспективная дозиметрия: визуализация с $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MDP/HDP и/или $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -HIG.

¹ Summary of Safety and Probable Benefit for Yttrium 90 Glass Microspheres. Available at: https://www.accessdata.fda.gov/cdrh_docs/pdf/H980006b.pdf (accessed 18 October 2022).

² Summary of Safety and Probable Benefit for Yttrium 90 Glass Microspheres [Электронный ресурс]. URL: https://www.accessdata.fda.gov/cdrh_docs/pdf/H980006b.pdf (дата последнего обращения 18.10.2022). [Summary of Safety and Probable Benefit for Yttrium 90 Glass Microspheres. Available at: https://www.accessdata.fda.gov/cdrh_docs/pdf/H980006b.pdf (accessed 18 October 2022)].

Верификационная дозиметрия: планарная визуализация, подсчет дицентрических хромосом.

Объем облучаемых органов (КО и ЗОДК): КОок = костная ткань (нецелевая область).

Заключение. Предложенный в Отчете МКРЕ 96 подход позволит обеспечить дифференцированные подходы к планированию РНТ в зависимости от оснащения отделения ядерной медицины технологиями для визуализации радионуклида в органах и тканях. Основным уровнем дозиметрического планирования является Уровень 2, т.е. оценку доз в очагах и КО следует проводить с помощью методов радионуклидной диагностики (ОФЭКТ/КТ, ПЭТ/КТ). Уровень 1 принципиально не удовлетворяет требованиям в достоверности оценки поглощенной дозы, но во многих случаях он является наиболее возможным. Дозиметрическое планирование на Уровне 1 — вынужденное. Планирование на Уровне 3 требует большого количества ресурсов (проведение биопсий, радиометрия крови пациента)

и является недоступным для большинства отделений ядерной медицины.

Оптимальным для отечественной практики является переход на обязательное соответствие требованиям Уровня 1 по Отчету МКРЕ 96, т.е. определять и регистрировать вводимую активность с учетом как минимум массы тела пациента, вида и стадии заболевания, а также необходимой терапевтической цели. Требования Уровня 2 на практике реализовать пока не представляется возможным, за исключением отдельных крупных научно-исследовательских центров ядерной медицины. Параллельно с внедрением в практику требований Уровня 1 необходимо сосредоточиться на отработке отдельных требований Уровня 2, в частности, методик определения поглощенной дозы в крупных контурируемых органах. Указанные работы будут проводиться в том числе и на базе Российского научного центра радиологии и хирургических технологий имени академика А. М. Гранова.

Сведения об авторах:

Станжевский Андрей Алексеевич — доктор медицинских наук, заместитель директора по научной работе федерального государственного бюджетного учреждения «Российский научный центр радиологии и хирургических технологий имени академика А. М. Гранова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 197758, Санкт-Петербург, пос. Песочный, Ленинградская ул., д. 70; доцент кафедры ядерной медицины и радиационных технологий «Национального медицинского исследовательского центра имени В. А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 197341, Санкт-Петербург, ул. Аккуратова, д. 2; e-mail: stanzhevsky@gmail.com; ORCID 0000-0002-1630-0564;

Майстренко Дмитрий Николаевич — доктор медицинских наук, директор федерального государственного бюджетного учреждения «Российский научный центр радиологии и хирургических технологий имени академика А. М. Гранова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 197758, Санкт-Петербург, пос. Песочный, Ленинградская ул., д. 70; доцент кафедры ядерной медицины и радиационных технологий «Национального медицинского исследовательского центра имени В. А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 197341, Санкт-Петербург, ул. Аккуратова, д. 2; e-mail: may64@inbox.ru; ORCID 0000-0001-8174-7461;

Важенина Дарья Андреевна — доктор медицинских наук, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории тераностики онкологических заболеваний федерального государственного бюджетного учреждения «Российский научный центр радиологии и хирургических технологий имени академика А. М. Гранова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 197758, Санкт-Петербург, пос. Песочный, Ленинградская ул., д. 70; доцент кафедры ядерной медицины и радиационных технологий «Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 197341, Санкт-Петербург, ул. Аккуратова, д. 2; e-mail: dariavazhenina@mail.ru; ORCID 0000-0002-6236-709X;

Сысоев Дмитрий Сергеевич — кандидат физико-математических наук, руководитель группы разработки и производства приборов для ядерной медицины федерального государственного бюджетного учреждения «Российский научный центр радиологии и хирургических технологий имени академика А. М. Гранова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 197758, Санкт-Петербург, пос. Песочный, Ленинградская ул., д. 70; доцент кафедры ядерной медицины и радиационных технологий федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 197341, Санкт-Петербург, ул. Аккуратова, д. 2; e-mail: dssysysoev@mail.ru; ORCID 0000-0003-2792-3852;

Водоватов Александр Валерьевич — кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией радиационной гигиены медицинских организаций федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П. В. Рамзаева» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; доцент кафедры общей гигиены федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет», Министерства здравоохранения Российской Федерации; 194100, Санкт-Петербург, Литовская ул., д. 2; e-mail: a.vodovатов@niirg.ru; ORCID 0000-0002-5191-7535;

Чипига Лариса Александровна — кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории радиационной гигиены медицинских организаций федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П. В. Рамзаева» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; научный сотрудник федерального государственного бюджетного учреждения «Российский научный центр радиологии и хирургических технологий имени академика А. М. Гранова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 197758, Санкт-Петербург, пос. Песочный, Ленинградская ул., д. 70; доцент кафедры ядерной медицины и радиационных технологий «Национального медицинского исследовательского центра имени В. А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 197341, Санкт-Петербург, ул. Аккуратова, д. 2; e-mail: larisa.chipiga@gmail.com; ORCID 0000-0001-9153-3061;

Рыжов Сергей Анатольевич — вице-президент Ассоциации медицинских физиков России; начальник отдела радиационной безопасности и медицинской физики федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр детской гематологии, онкологии и иммунологии имени Дмитрия Рогачева»; Министерства здравоохранения Российской Федерации; 117198, Москва, ул. Саморы Машела, д. 1; научный сотрудник государственного бюджетного учреждения здравоохранения города Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий департамента здравоохранения города Москвы»; 127051, Москва, ул. Петровка, д. 24, стр. 1; e-mail: sergey.ryzhov@fcho-moscow.ru; ORCID 0000-0002-0640-7368;

Петрякова Анастасия Валерьевна — и.о. младшего научного сотрудника лаборатории радиационной гигиены медицинских организаций федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П. В. Рамзаева» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; инженер по радиационной безопасности Санкт-Петербургского государственного бюджетного учреждения здравоохранения «Городская больница № 40» Курортного административного района; 197706, Санкт-Петербург, ул. Борисова, д. 9А; e-mail: nastya.petryakova@gmail.com; ORCID 0000-0003-2663-9091.

Information about authors:

Andrei A. Stanzhevskii — Dr. of Sci. (Med.), Deputy Director for Research, A. M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies, 197758, Saint Petersburg, Pesochny settlement, Leningradskaya st. 70; e-mail: stanzhevsky@gmail.com; ORCID 0000-0002-1630-0564;

Dmitriy N. Maistrenko — Dr. of Sci. (Med.), Head of A. M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies, 197758, Saint Petersburg, Pesochny settlement, Leningradskaya st. 70; e-mail: may64@inbox.ru; ORCID 0000-0001-8174-7461;

- Daria A. Vazhenina* — Dr. of Sci. (Med.), Chief Researcher, Head of Laboratory of Theragnostic and Oncology, A. M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies, 197758, Saint Petersburg, Pesochny settlement, Leningradskaya st. 70; e-mail: dariavazhenina@mail.ru; ORCID 0000-0002-6236-709X;
- Dmitriy S. Svysoev* — Cand. of Sci. (Phys. and Math.), Head of the group for the development and production of equipment for nuclear medicine, A. M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies of the Ministry of Health of the Russian Federation, 97758, Saint Petersburg, Pesochny settlement, Leningradskaya st. 70; e-mail: dssvysoev@mail.ru; ORCID 0000-0003-2792-3852;
- Aleksandr V. Vodovatov* — Cand. of Sci. (Biol.), Head of Laboratory, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P. V. Ramzaev; docent, Saint Petersburg State Pediatric Medical University, 197101, Saint Petersburg, Mira st. 8; e-mail: a.vodovatov@niirg.ru; ORCID 0000-0001-9153-3061;
- Larisa A. Chipiga* — Cand. of Sci. (Tech.), research fellow, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P. V. Ramzaev; research fellow, A. M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies; docent, Almazov National Medical Research Centre, 197101, Saint Petersburg, Mira st. 8; e-mail: larisa.chipiga@gmail.com; ORCID 0000-0002-5191-7535;
- Sergey A. Ryzhov* — vice president, Association of Medical Physicists in Russia; research fellow, Research and Practice Center of Diagnostics and Telemedicine Technologies; head of the radiation safety and medical physics department, Dmitry Rogachev National Medical Research Center of Pediatric Hematology, Oncology and Immunology, 127051, Moscow, Petrovka st. 24, building 1; e-mail: sergey.ryzhov@fcho-moscow.ru; ORCID 0000-0002-0640-7368; State Pediatric Medical University, Saint Petersburg, Russia; ORCID 0000-0001-9153-3061;
- Anastasia V. Petryakova* — acting junior researcher, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P. V. Ramzaev; radiation safety engineer, St. Petersburg City Hospital No. 40, 197101, Saint Petersburg, Mira st. 8; e-mail: nastya.petryakova@gmail.com; ORCID 0000-0003-2663-9091.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства, согласно международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределен следующим образом: концепция и план работы — *А. В. Водоватов, Л. А. Чипига, А. А. Станжевский, Д. Н. Майстренко, Д. А. Вазенина*; анализ данных — *А. В. Водоватов, Л. А. Чипига, С. А. Рыжов, А. В. Петрякова, Д. С. Сысоев*; подготовка рукописи — *А. В. Водоватов, Л. А. Чипига, А. А. Станжевский, С. А. Рыжов, А. В. Петрякова*.

Authors' contributions. All authors met the ICMJE authorship criteria. Special contribution: *AVV, LACH, AAS, DNM, DAV* aided in the concept and plan of the study; *AVV, LACH, SAR, AVP, DSS* provided collection and mathematical analysis of data; *AVV, LACH, AAS, SAR, AVP* preparation of the manuscript.

Потенциальный конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Disclosure: The authors declare that they have no competing interests.

Соответствие принципам этики: Одобрение этического комитета не требовалось.

Adherence to ethical standards: The approval of the ethics committee was not required.

Поступила/Received: 10.11.2022.

Принята к печати/Accepted: 25.11.2022.

Опубликована/Published: 29.12.2022.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

- Sgouros G., Bolch W.E., Chiti A. et al. ICRU REPORT 96, Dosimetry-Guided Radiopharmaceutical Therapy // *Journal of the ICRU*. 2021. Vol. 21, No. 1. P. 1–212. doi: 10.1177/14736691211060117.
- Fisher D.R., Fahey F.H. Appropriate use of effective dose in radiation protection and risk assessment // *Health Physics*. 2017. Vol. 113, No. 2. P. 102–109.
- Martin C.J. Effective dose in medicine // *Annals of the ICRP*. 2020. Vol. 49, No. 1. P. 126–140. doi: 10.1177/0146645320927849.
- Vano E., Frijia G., Loose R. et al. Dosimetric quantities and effective dose in medical imaging: a summary for medical doctors // *Insights Imaging*. 2021. Vol. 12, No. 1. P. 99–108. doi: 1186/s13244-021-01041-2.
- ICRP, 2021. Use of dose quantities in radiological protection. ICRP Publication 147 // *Ann. ICRP*. Vol. 50, No. 1. doi: 10.1088/1361-6498/abe548.
- Gear J.I., Cox M.G., Gustafsson J. et al. EANM practical guidance on uncertainty analysis for molecular radiotherapy absorbed dose calculations // *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging*. 2018. Vol. 45. P. 2456–2474. doi: 10.1007/s00259-018-4136-7.
- Gear J., Chiesa C., Lassmann M. et al. EANM Dosimetry Committee series on standard operational procedures for internal dosimetry for 131I mIBG treatment of neuroendocrine tumours // *EJNMMI Phys*. 2020. Vol. 7, No. 15. doi: 10.1186/s40658-020-0282-7.
- Handkiewicz-Junak D., Poeppel T.D., Bodei L. et al. EANM guidelines for radionuclide therapy of bone metastases with beta-emitting radionuclides // *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging*. 2018. Vol. 45. P. 846–859. doi: 10.1007/s00259-018-3947-x.
- Hänscheid H., Canzi C., Eschner W. et al. EANM Dosimetry Committee Series on Standard Operational Procedures for Pre-Therapeutic Dosimetry II. Dosimetry prior to radioiodine therapy of benign thyroid diseases // *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging*. 2013. Vol. 40. P. 1126–1134. doi: 10.1007/s00259-013-2387-x.
- Hindorf C., Glatting G., Chiesa C., Linden O., and Flux G. EANM Dosimetry Committee guidelines for bone marrow and whole-body dosimetry // *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging*. 2013. Vol. 37. P. 1238–1250. doi: 10.1007/s00259-010-1422-4.
- Lassmann M., Chiesa C., Flux G., Bardies M. EANM Dosimetry Committee guidance document: Good practice of clinical dosimetry reporting // *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imag*. 2011. Vol. 38. P. 192–200. doi: 10.1007/s00259-010-1549-3.
- Hobbs R.F., McNutt T., Baechler S. et al. A treatment planning method for sequentially combining radiopharmaceutical therapy and external radiation therapy // *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys*. 2011. Vol. 80. P. 1256–1262.
- ICRU REPORT 83, Prescribing, Recording, and Reporting Photon-Beam Intensity-Modulated Radiation Therapy (IMRT) // *Journal of the ICRU*. 2010. Vol. 10, No. 1. P. 1–2.
- ICRU REPORT 72, Dosimetry of Beta Rays and Low-Energy Photons for Brachytherapy with Sealed Sources // *Journal of the ICRU*. 2004. Vol. 4, No. 3. P. 1–2.
- Wilke L., Andratschke N., Blanck O. et al. ICRU REPORT 91, On prescribing, recording, and reporting of stereotactic treatments with small photon beams: Statement from the DEGRO/DGMP working group stereotactic radiotherapy and radiosurgery // *Strahl. Onkol*. 2019. Vol. 195. P. 193–198. doi: 10.1007/s00066-018-1416-x.
- ICRU REPORT 67, Absorbed-dose specification in nuclear medicine // *J. ICRU*. 2002. Vol. 2. P. 1–110.
- Gear J., Chiesa C., Lassmann M. et al. EANM Dosimetry Committee. EANM Dosimetry Committee series on standard operational procedures for internal dosimetry for ¹³¹I mIBG treatment of neuroendocrine tumours // *EJNMMI Phys*. 2020. Vol. 7, No. 1. P. 15. doi: 10.1186/s40658-020-0282-7.