

# Критерии реабилитации объектов и территорий, загрязненных радионуклидами в результате прошлой деятельности: Часть 1. Выбор показателей для обоснования критериев реабилитации

И.К. Романович<sup>1</sup>, И.П. Стамат<sup>1</sup>, Н.И. Санжарова<sup>2</sup>, А.В. Панов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Федеральное агентство научных организаций, Обнинск, Калужская область, Россия

*В статье рассматриваются вопросы реабилитации объектов и территорий, загрязненных техногенными и природными радионуклидами в результате прошлой деятельности предприятий ядерной и неядерных отраслей промышленности. На основе анализа требований действующих нормативных правовых документов в области радиационной безопасности населения с учетом рекомендаций международных организаций обоснованы дозовые величины и производные показатели, используемые при установлении критериев, которым должны соответствовать реабилитированные объекты и территории, загрязненные радионуклидами в результате прошлой деятельности предприятий. Показано, что критерии реабилитации объектов и территорий, загрязненных техногенными радионуклидами в результате прошлой деятельности, должны быть одинаковыми независимо от того, произошло загрязнение в результате плановой деятельности предприятия или несанкционированной деятельности. Для этих ситуаций критерии реабилитации должны быть основаны на дозовых величинах и производных показателях, характеризующих остаточное загрязнение среды обитания после окончания реабилитационных мероприятий. При загрязнении объектов и территорий природными радионуклидами практически во всех случаях для обоснования критериев их реабилитации могут быть использованы только показатели радиационной безопасности объектов среды обитания. В статье показано, что такие подходы применимы не только к объектам среды обитания, загрязнение которых произошло в результате прошлой деятельности предприятий традиционных неядерных отраслей промышленности, но и предприятий по добыче урановых и ториевых руд. С позиций современной классификации производственных отходов с повышенным содержанием природных радионуклидов характеристики этих отходов по их потенциальной радиационной опасности для населения и окружающей среды идентичны.*

**Ключевые слова:** природные радионуклиды, техногенные радионуклиды, предприятия ядерной отрасли, неядерные отрасли промышленности, радиоактивное загрязнение, прошлая деятельность, критерии реабилитации, радиоактивные отходы.

## Введение

В Российской Федерации в 2015 г. принята новая Федеральная целевая программа «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 гг. и на период до 2030 года» (ФЦП ЯРБ-2), которая в значительной мере посвящена ликвидации ядерного наследия страны [Постановление правительства Российской Федерации от 19 ноября 2015 г. № 1248 «О федеральной целевой программе «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года»]. В рамках программы

ФЦП ЯРБ-2 запланированы мероприятия по реабилитации значительного числа ядерно и радиационно опасных объектов. На решение проблем ядерного наследия запланировано напрямую направить 59 % от общего бюджета программы и еще 13% – на создание объектов инфраструктуры обращения с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) и радиоактивными отходами (РАО) [1]. В новой Программе предусмотрена реабилитация радиоактивно загрязненных территорий площадью примерно в 3 раза больше, чем в предыдущей.

## Романович Иван Константинович

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева. Адрес для переписки: 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; Тел.: (812)233-53-63. E-mail: I.Romanovich@niirg.ru

Анализ опыта проведения работ по реабилитации объектов и территорий, загрязненных радионуклидами в результате прошлой деятельности, показал, что для повышения эффективности выполнения этих работ необходимо современное нормативно-правовое и методологическое обеспечение. В частности, требуют разработки и научного обоснования новые современные подходы, учитывающие возможные направления использования зданий, сооружений и территорий после окончания реабилитационных мероприятий. Для решения данной проблемы необходимо обосновать:

- систему дозовых величин и показателей радиационной безопасности для оценки реабилитированных объектов и территорий;

- наиболее приемлемые направления использования реабилитированных объектов и территорий, при которых будет обеспечен максимальный положительный результат при минимальных расходах на его достижение;

- систему радиологических критериев для оценки реабилитированных объектов и территорий с учетом конкретных направлений их использования в хозяйственной деятельности.

В настоящей публикации нами рассматривается решение только первой задачи – обоснование системы дозовых величин и показателей радиационной безопасности для оценки реабилитированных объектов и территорий.

Под термином «реабилитация» (участка территории, здания) понимается комплекс организационных, инженерно-строительных и иных мероприятий, которые могут осуществляться как в отношении источника излучения, так и сооружением барьеров на путях поступления радионуклидов в объекты окружающей среды и среды обитания людей. Основной целью осуществления этих мероприятий является приведение объектов и территорий, загрязненных радионуклидами в результате прошлой деятельности предприятий, в радиационно безопасное для населения и окружающей среды состояние, пригодное для ведения определенного вида хозяйственной деятельности. Мероприятия по реабилитации не предусматривают полного удаления радиоактивного загрязнения объектов и территорий, что практически невозможно обосновать с точки зрения необходимых для этого затрат и получаемой выгоды за счет снижения облучения населения. Таких же подходов придерживается МАГАТЭ [2].

Объекты и территории могут быть реабилитированы в полном объеме или частично. Наиболее приемлемым вариантом является полная реабилитация, когда объекты и территории целиком возвращаются в хозяйственную деятельность без ограничений по радиационному фактору. Однако для целого ряда случаев полная реабилитация не всегда возможна технически или не целесообразна по экономическим или другим показателям. В таких случаях в результате реабилитационных мероприятий часть объекта или территории приводится в радиационно безопасное состояние для населения и окружающей среды (например, подвергаются консервации), а остальная их часть дезактивируется до приемлемого уровня и передается в хозяйственное пользование. Примером частичной реабилитации объектов и территорий являются мероприятия в отношении объектов, образованных с использованием ядерно-взрывных технологий. Целью реабилита-

ционных мероприятий в отношении таких объектов является приведение их в состояние, при котором воздействие на проживающее вблизи населения будет ниже установленных дозовых квот, а загрязнение объектов окружающей среды снижено до минимально возможного уровня [3, 4] [Обеспечение радиационной безопасности населения, проживающего в районах проведения (1965–1988 гг.) ядерных взрывов в мирных целях. СанПиН 2.6.1.2819-10: рег. № 20383 от 1 апреля 2010 г. М.: 2011. 15 с.]

### Виды радиационных объектов, подлежащих реабилитации

В результате прошлой деятельности предприятий ядерной и неядерных отраслей промышленности в настоящее время существует большое количество объектов (здания, сооружения) и территорий, которые подверглись радиоактивному загрязнению техногенными или природными радионуклидами.

Под термином «предприятия ядерной отрасли» в данной статье понимаются радиационные объекты согласно определению НРБ-99/2009, а именно – организации, где осуществляется обращение с техногенными источниками ионизирующего излучения. В результате их деятельности происходит загрязнение техногенными радионуклидами. К предприятиям ядерной отрасли относится также добыча и переработка урановых и ториевых руд. Однако загрязнение объектов и территорий, которое происходит при добыче руд на их месторождениях, следует относить к загрязнению природными радионуклидами. Это вполне соответствует современной классификации производственных отходов с повышенным содержанием природных радионуклидов [Постановление Правительства Российской Федерации от 19 октября 2012 г. № 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов»]

Загрязнение объектов и территорий техногенными радионуклидами может происходить не только на предприятиях ядерной отрасли. В результате радиационных инцидентов и аварий радиоактивному загрязнению подверглось и значительное число промышленных предприятий и участков территорий, на которых не использовались техногенные источники ионизирующего излучения. К примеру, здания и территории металлургических заводов, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате расплавления вместе с металлоломом радионуклидных источников большой активности [5] [Консультационно-радиологическое сопровождение работ по реабилитации территории площадок рафинировочного отделения и шлакоотвала № 1-5 ОАО «Подольский завод цветных металлов» // Отчет по 6-му этапу Договора № Ц-ГИ/ИФ03-1047-103/14 от 25.12.2014 г. СПб, 2015. 33 с.].

Под термином «предприятия неядерных отраслей» в данной работе имеются в виду предприятия, добывающие или использующие сырье и материалы с повышенным содержанием природных радионуклидов и в результате деятельности которых образуются производственные отходы с повышенным содержанием природных радионуклидов или происходит загрязнение окружающей среды природными радионуклидами. К ним относятся предпри-

ятия нефтегазовой отрасли (цикл добычи и первичной подготовки нефти и газа) и промышленного применения подземных природных вод (извлечение йода, брома и т.д.), организации централизованного питьевого водоснабжения населения с использованием подземных природных вод. Образование отходов с повышенным содержанием природных радионуклидов может происходить на некоторых предприятиях горнодобывающей и перерабатывающей отраслей, при использовании в различных технологиях минерального сырья с повышенным содержанием природных радионуклидов и др.

Следовательно, реабилитации могут подвергаться объекты и территории, загрязненные:

- техногенными радионуклидами в результате прошлой деятельности предприятий ядерной отрасли, а также обычные предприятия в результате аварий и инцидентов с источниками ионизирующего излучения на их территории;

- природными радионуклидами в результате прошлой деятельности как предприятий ядерной отрасли, так и предприятий неядерных отраслей.

В соответствии с НРБ-99/2009 и ОСПОРБ-99/2010 нормирование радиационной безопасности населения при облучении техногенными и природными источниками ионизирующего излучения осуществляется отдельно. В современной классификации радиоактивных отходов, введенной Постановлением правительства Российской Федерации от 19 октября 2012 г. № 1069, отходы производства, содержащие только природные радионуклиды, не различаются по источникам их образования. В определении этих РАО нет указания на то, в результате деятельности каких технологий (ядерных или неядерных предприятий) они образовались. Это и понятно, поскольку потенциальная радиационная опасность для населения и окружающей среды в данном случае определяется не источником образования отходов, а их радиологическими характеристиками и объемами.

При таком определении и идентификации объектов реабилитации отпадает необходимость в каждом случае рассматривать, в результате деятельности предприятий какой отрасли промышленности произошло загрязнение территории и расположенных на ней зданий и сооружений. Тогда для обоснования критериев реабилитации объектов и территорий нужно иметь сведения о характере их загрязнения – обусловлено оно природными или техногенными радионуклидами. При этом, поскольку подходы к обеспечению радиационной безопасности населения при воздействии природных и техногенных источников излучения являются разными, то и выбор показателей для обоснования критериев реабилитации этих объектов исследований должен быть разным.

Таким образом, с точки зрения реабилитации объектов и территорий, не важно, в результате прошлой деятельности предприятий какой отрасли промышленности произошло загрязнение, принципиальным является только то, техногенными или природными радионуклидами загрязнены объект или территория.

#### **Обоснование дозовых величин и показателей радиационной безопасности**

При загрязнении объектов и территорий техногенными радионуклидами после окончания мероприятий по их

реабилитации облучение населения будет определяться техногенными источниками излучения. Следовательно, и выбор показателей для оценки реабилитированных объектов и территорий должен быть основан на требованиях нормативных документов, установленных для защиты населения от техногенных источников излучения.

Защита населения от воздействия техногенных источников излучения в нормальных условиях эксплуатации основана на установлении дозовых пределов, а при одновременном воздействии нескольких источников – квот от пределов доз. При этом для контроля не превышения дозовых пределов устанавливаются предельные значения параметров радиационной обстановки, при монофакторном воздействии каждого из которых дозовые пределы не будут превышены. Эти показатели радиационной безопасности среды обитания являются производными величинами от дозовых пределов. Причем такой подход является одинаковым при нормировании радиационной безопасности как персонала, так и населения.

В соответствии с НРБ-99/2009 пределы доз техногенного облучения населения относятся к средней дозе критической группы населения и определяются как сумма доз их внешнего облучения за текущий год и ожидаемой дозы внутреннего облучения за жизнь (70 лет) вследствие поступления техногенных радионуклидов в организм за текущий год. С учетом этого основными производными величинами от дозовых пределов при облучении населения техногенными источниками излучения являются среднегодовые значения следующих производных показателей:

- мощность дозы гамма-излучения, обусловленная остаточным загрязнением техногенными радионуклидами реабилитированных объектов и территорий (принимается одинаковой для всех возрастных групп);

- среднегодовая объемная активность отдельных радионуклидов в воздухе или пределы их годового поступления в организм с вдыхаемым воздухом (принимается для критической группы облучаемого населения);

- удельная активность отдельных радионуклидов в пищевых продуктах или пределы их годового поступления в организм с пищей (принимается для критической группы облучаемого населения);

- удельная активность отдельных техногенных радионуклидов в питьевой воде, которая принимается одинаковой для всех возрастных групп облучаемого населения.

Для поверхностей с твердым покрытием, транспортных средств и пр., с которыми может контактировать население, устанавливаются также допустимые уровни снимаемого радиоактивного загрязнения альфа- и бета-активными радионуклидами.

В тех случаях, когда реабилитированная территория планируется для использования под промышленное строительство, при выборе показателей для обоснования критериев реабилитации вклад в облучение работников за счет питьевой воды и пищевых продуктов может не учитываться. Однако если реабилитированная территория находится в пределах населенных пунктов сельского типа и зон их перспективной застройки, при обосновании критериев реабилитации следует также оценивать вклад в суммарные дозы населения от поступления техногенных радионуклидов с питьевой водой и пищевыми продуктами.

В контексте рассматриваемой проблемы основными производными показателями от пределов доз техногенного облучения персонала являются только первые два из перечисленных показателей, а также допустимое снимаемое радиоактивное загрязнение поверхности рабочих помещений и находящегося в них оборудования альфа- и бета-излучающими радионуклидами. Причем значения мощности дозы гамма-излучения и среднегодовой объемной активности радионуклидов в воздухе устанавливаются для рабочих мест персонала.

Дозовые пределы при облучении населения природными источниками излучения в коммунальных условиях не устанавливаются. Обеспечение радиационной безопасности населения при воздействии природных источников излучения в таких ситуациях достигается путем установления ограничений на отдельные регулируемые природные источники излучения.

Для ситуаций, когда загрязнение обусловлено присутствием в объектах среды обитания природных радионуклидов, выбор показателей для обоснования критериев реабилитации таких объектов и территорий должен быть основан на требованиях нормативных документов, установленных для ограничения облучения населения при воздействии природных источников излучения.

Такие ограничения устанавливаются в форме гигиенических нормативов и критериев по величине:

- эффективной удельной активности природных радионуклидов ( $A_{эфф}$ ) в строительном сырье и материалах;
- мощности дозы гамма-излучения в помещениях жилых и общественных зданий и прилегающей территории;
- среднегодовому значению ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий и сооружений;
- удельной активности природных радионуклидов в воде источников питьевого водоснабжения населения.

Нормирование ограничения облучения населения при воздействии природных источников в коммунальных условиях вводится по взрослому населению, поэтому численные значения всех перечисленных показателей устанавливаются одинаковыми для всех возрастных групп населения.

Для коммунальных условий ограничения на внутреннее облучение населения за счет поступления природных радионуклидов с пищевыми продуктами не устанавливаются.

Требования к ограничению облучения населения природными источниками излучения в производственных и коммунальных условиях установлены разными. Для производственных зданий и сооружений установлены нормативы по величине  $A_{эфф}$  в строительном сырье и материалах, мощности дозы в помещениях и на прилегающей территории и среднегодовому значению ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений.

Следует также учитывать, что если на реабилитированной территории планируется строительство зданий и сооружений, то она в пределах контуров их застройки должна соответствовать гигиеническому критерию по плотности потока радона (ППР) с поверхности земли, установленному в ОСПОРБ-99/2010 (пункты 5.1.6 и 5.2.3) и СанПиН 2.6.1.2800-10 (пункты 3.2.4 и 4.2.2).

Для ситуаций облучения населения природными источниками излучения требования к загрязнению поверх-

ности помещений, оборудования и т.п. природными радионуклидами не устанавливаются.

Учитывая это, ниже рассматриваются подходы к выбору показателей для обоснования критериев реабилитации объектов и территорий, загрязненных техногенными и природными радионуклидами в результате прошлой деятельности предприятий ядерной и неядерных отраслей промышленности. Причем для объектов и территорий, загрязненных природными радионуклидами, эти подходы рассматриваются отдельно для коммунальных и производственных направлений их использования после завершения реабилитационных мероприятий.

### **Дозовые величины при облучении населения техногенными источниками ионизирующего излучения**

Очевидно, что при самом тщательном проведении мероприятий по реабилитации объектов и территорий, загрязненных техногенными радионуклидами в результате прошлой деятельности предприятий, для них будут характерны определенные уровни остаточного загрязнения среды обитания. Соответственно, за счет остаточного загрязнения объектов и территорий после окончания реабилитационных мероприятий будет формироваться определенный уровень техногенного облучения населения. Такая ситуация облучения формально может рассматриваться как существующее облучение населения за счет техногенных источников излучения.

Для обеспечения радиационной безопасности населения при облучении техногенными источниками ионизирующего излучения за счет остаточного загрязнения техногенными радионуклидами реабилитированных объектов и территорий рекомендуются к применению следующие дозовые величины:

- уровень освобождения от контроля, когда источник при любых условиях обращения с ним может создавать индивидуальную годовую эффективную дозу облучения не более 0,01 мЗв;

- уровень исследования, при котором источник излучения может создавать индивидуальную годовую эффективную дозу облучения свыше 0,01 до 0,3 мЗв включительно.

В санитарных правилах по проектированию и эксплуатации атомных станций [Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций (СП АС-03). СанПиН 2.6.1.24-03: рег. № 4593 от 26 мая 2013 г.] годовая эффективная доза облучения 0,250 мЗв принята в качестве допустимой для населения в зоне наблюдения АЭС, причем эта величина установлена граничной для формирования за счет сбросов и выбросов предприятий атомной энергетики.

В Руководстве по безопасности МАГАТЭ № WS-G-5.1 [2] указывается, что облучение населения за счет остаточного загрязнения техногенными радионуклидами после окончания мероприятий по реабилитации объектов и территорий следует рассматривать как техногенное облучение населения в нормальных условиях. При этом в качестве граничного уровня по величине годовой эффективной дозы облучения критической группы населения рекомендуется принять 0,3 мЗв. При непревышении этого уровня допускается не вводить ограничения на использование таких объектов по радиационному фактору.

На наш взгляд, более высокие уровни облучения населения за счет остаточного загрязнения техногенными радионуклидами реабилитированных объектов и территорий рассматривать нецелесообразно, тем более что при превышении уровня техногенного облучения населения 0,3 мЗв/год (уровень вмешательства согласно п. 4.1 Приложения 5 НРБ-99/2009) обязательными становятся мероприятия по защите населения с целью ограничения облучения. Указанные дозовые величины определяются как суммарные уровни доз, создаваемых за счет всех путей облучения населения – внешнего и внутреннего облучения при ингаляционном и пероральном поступлении радионуклидов в организм.

Дозовая величина на уровне до 0,3 мЗв/год для реабилитированных объектов и территорий, загрязненных техногенными радионуклидами в результате прошлой деятельности, по-видимому, является оптимальной с точки зрения как радиационной безопасности населения, так и стоимостных характеристик реабилитационных мероприятий.

Она установлена в качестве предельной для обеспечения радиационной безопасности населения, проживающего вблизи объектов хранения газового конденсата в подземных резервуарах, созданных с применением ядерно-взрывных технологий [3], [Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности на объектах хранения газового конденсата в подземных резервуарах, образованных с применением ядерно-взрывных технологий. Санитарные правила СП 2.6.1.2622-10: рег. № 17483 от 7 июня 2010 г. М.: 2010. 18 с.]

В период эксплуатации таких объектов годовая доза облучения критической группы населения, проживающего вблизи них, не должна превышать 0,3 мЗв (п. 3.16 СП 2.6.1.2622-10), а после их консервации мощность дозы гамма-излучения за их пределами не должна превышать 0,1 мкЗв/ч над естественным гамма-фоном данной местности (п. 3.10).

Аналогичный по величине норматив по допустимой дозе облучения для обеспечения радиационной безопасности для населения, проживающего в районах проведения мирных ядерных взрывов, принят в СанПиН 2.6.1.2819-10, в п. 2.6 которого установлено, что доза дополнительного техногенного облучения критической группы населения за счет мирных ядерных взрывов не должна превышать 0,3 мЗв/год. Наконец, эта величина обычно рассматривается как квота от предела доз техногенного облучения населения при воздействии нескольких источников излучения.

Основными производными показателями от предела дозы облучения населения при использовании реабилитированных объектов и территорий для хозяйственной деятельности, являются следующие:

- удельная активность техногенных радионуклидов (в рассматриваемых ситуациях применяется в отношении почв и грунтов для территорий и ограждающих конструкций зданий и сооружений);

- мощность дозы гамма-излучения, создаваемая за счет остаточного загрязнения объектов и территории гамма-излучающими радионуклидами техногенного происхождения;

- снимаемое радиоактивное загрязнение альфа- и бета-излучающими радионуклидами (применяется в отно-

шении поверхностей с твердым покрытием, с которыми может контактировать население).

Очевидно, что остаточное загрязнение техногенными радионуклидами объектов и территорий после окончания мероприятий по их реабилитации является основной величиной, которая в конечном итоге определяет как дозы облучения населения, так и ограничения при использовании объектов и территорий для определенных видов хозяйственной деятельности. При удельной активности техногенных радионуклидов в объектах среды обитания людей не выше значений по приложению 3 к ОСПОРБ-99/2010 в редакции Изменения 1 к СП 2.6.1.2612-10 они могут использоваться для любых видов хозяйственной деятельности без ограничений по радиационному фактору. Согласно [2, 6, 7], при таких значениях удельной активности техногенных радионуклидов в объектах среды обитания индивидуальные годовые эффективные дозы облучения отдельных лиц из населения не превысят 0,01 мЗв, а при крайне маловероятных сценариях – 1,0 мЗв [7, 8].

В отношении снимаемого радиоактивного загрязнения объектов среды обитания, транспортных средств и т.п. альфа- и бета-излучающими радионуклидами в ОСПОРБ-99/2010 в редакции Изменения 1 к СП 2.6.1.2612-10 требования установлены жестко и однозначно – оно не должно превышать установленных пределов. Естественно, что эта норма может рассматриваться только в отношении ограждающих конструкций зданий и сооружений, а также транспортных средств и участков территорий с твердым покрытием. Выполнение этого требования для данных объектов может контролироваться, однако для почв, грунтов и различных сыпучих сред оно неприменимо.

Что касается мощности дозы гамма-излучения, создаваемой остаточным загрязнением объектов и территорий гамма-излучающими радионуклидами техногенного происхождения, то она должна определяться за вычетом естественного гамма-фона местности. Как правило, мероприятия по реабилитации техногенно загрязненных территорий сопровождаются выемкой грунтов и почв, в том числе и со значительных глубин, а также обратной засыпкой территории. Поэтому при осуществлении этих мероприятий необходимо учитывать, что для территорий под строительство зданий и сооружений, с целью ограничения облучения населения за счет природных источников излучения установлены радиационно-гигиенические критерии по мощности дозы гамма-излучения. При этом следует также учитывать, что в зависимости от назначения реабилитированной территории (под жилое или производственное направление или строительство дорог) для обратной засыпки территории должны применяться грунты и породы с соответствующими уровнями по эффективной удельной активности природных радионуклидов ( $A_{эфф}$ ).

Поскольку доза облучения населения 0,3 мЗв/год на реабилитированных территориях, загрязненных техногенными радионуклидами в результате прошлой деятельности, рассматривается как граничная, формируемая за счет всех путей облучения, то при обосновании критериев реабилитации необходимо учитывать вклад в суммарные дозы поступления радионуклидов с пищевыми продуктами и питьевой водой. В принципе, учитывая ограничен-

ные размеры объектов и территорий, подлежащих реабилитации, представляется достаточно маловероятным, чтобы эти компоненты давали заметный вклад в техногенное облучение населения за счет перехода радионуклидов из объектов окружающей среды в источники питьевого водоснабжения и продукцию растениеводства с последующим поступлением их в организм людей. Как показано в [9], в зонах локального загрязнения техногенными радионуклидами основной вклад в дозы населения вносит их внешнее облучение. Тем не менее, для общности вклад этого пути облучения населения следует оценивать по крайней мере для тех ситуаций, когда реабилитированная территория находится в пределах населенных пунктов и зон перспективной застройки и планируется для использования без ограничений по радиационному фактору.

### **Дозовые величины при облучении населения природными источниками ионизирующего излучения**

В регулировании радиационной безопасности населения при воздействии природных источников излучения также применяются дозовые величины и производные показатели объектов среды обитания, но подходы к ограничению природного облучения населения в коммунальных и производственных условиях принципиально различаются.

Учитывая это, подходы к выбору показателей для установления критериев реабилитации объектов и территорий, загрязненных природными радионуклидами в результате прошлой деятельности предприятий, также должны рассматриваться отдельно.

Строго говоря, дозовые величины для обоснования выбора критериев реабилитации объектов и территорий, загрязненных природными радионуклидами в результате прошлой деятельности предприятий неядерных отраслей промышленности, применимы с серьезными оговорками. Тем не менее, для крайне маловероятных ситуаций при обосновании критериев реабилитации таких объектов и территорий могут быть использованы дозовые величины, принятые в регулировании радиационной безопасности населения при воздействии природных источников излучения:

- уровень вмешательства, при котором годовая эффективная доза облучения населения за счет данного природного источника излучения не превышает 0,1 мЗв;
- область оптимизации – это такая область эффективных доз, в пределах которой годовая эффективная доза облучения населения за счет данного природного источника излучения находится в пределах от 0,1 до 1,0 мЗв.

Приведенные дозовые величины могут эффективно применяться, когда речь идет о нормировании отдельных природных источников излучения или установлении ограничений на облучение населения за счет конкретного пути их воздействия. Применение этих дозовых величин для обоснования критериев реабилитации объектов и территорий должно быть основано на величине дополнительной дозы облучения населения за счет остаточного (дополнительного к характерным уровням их содержания в объектах среды обитания на данной территории) загрязнения объектов среды обитания природными радионуклидами. В случае загрязнения объектов среды

обитания техногенными радионуклидами это сделать достаточно несложно, поскольку принципиально имеется возможность оценить вклад остаточного техногенного загрязнения объектов среды обитания в суммарные дозы облучения населения.

Однако при загрязнении объектов и территорий природными радионуклидами раздельная оценка исходного и привнесенного загрязнения объектов и территорий природными радионуклидами за счет прошлой деятельности предприятий неядерных отраслей промышленности во многих случаях оказывается принципиально невозможной. Это связано прежде всего с исключительно большой вариабельностью проявления природных источников излучения в пространстве.

По-видимому, единственной ситуацией необходимости использования дозовых величин при обосновании критериев реабилитации территорий, загрязненных природными радионуклидами, является реабилитация их под «зеленую лужайку». В таких случаях необходимой становится оценка вклада в суммарные дозы облучения населения за счет перехода природных радионуклидов в источники питьевого водоснабжения с последующим поступлением их в организм.

Поэтому практически во всех случаях критерии реабилитации объектов и территорий, загрязненных природными радионуклидами в результате прошлой деятельности предприятий неядерных отраслей промышленности, должны базироваться не на дозовых величинах, а на нормативных значениях параметров радиационной обстановки, установленных для объектов среды обитания человека.

С введением в ОСПОРБ-99/2010 и СанПиН 2.6.1.2800-10 требований к показателям радиационной безопасности производственных зданий перечень гигиенических нормативов и критериев для ограничения облучения населения в жилых, общественных и производственных зданиях стал одинаковым. Отличия заключаются только в численных значениях их величины.

Для ограничения облучения населения при воздействии природных источников ионизирующего излучения в производственных и коммунальных условиях в российском санитарном законодательстве введены следующие гигиенические нормативы и критерии:

- эффективная удельная активность природных радионуклидов в объектах среды обитания (в строительных конструкциях зданий и сооружений, а также в почвах, грунтах и породах на открытой территории);
- мощность дозы гамма-излучения в помещениях зданий и сооружений и на открытой местности;
- плотность потока радона с поверхности почв и грунтов и мощность дозы гамма-излучения (для территорий, на которых планируется возведение новых объектов капитального строительства);
- среднегодовое значение эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) изотопов радона в воздухе помещений.

К числу регулируемых природных источников излучения, которые нормируются для ограничения облучения населения в коммунальных условиях, относится также питьевая вода. В принципе, учитывая ограниченные размеры объектов и территорий, подлежащих реабилитации, представляется нецелесообразным рассматривать

облучение населения за счет перехода природных радионуклидов из объектов окружающей среды в источники питьевого водоснабжения с последующим поступлением их в организм с питьевой водой. Тем не менее, для общности подходов вклад этого источника природного облучения населения следует оценить для случая, когда реабилитированная территория находится в пределах населенных пунктов и зон перспективной застройки и планируется для использования без ограничений по радиационному фактору.

При установлении критериев реабилитации объектов и территорий, загрязненных природными радионуклидами, не рассматривается облучение населения в коммунальных условиях за счет перехода природных радионуклидов в продукцию растениеводства, выращенную на реабилитированных территориях. По нашим оценкам, вклад этого пути облучения населения при уровнях содержания природных радионуклидов в почвах и грунтах, допустимых для объектов среды обитания в пределах населенных пунктов и зон перспективной застройки, является достаточно низким.

В мировой практике регулирования радиационной безопасности населения при воздействии природных источников излучения, как в нашей стране и в большинстве зарубежных стран, принято устанавливать требования к объектам строительства разными для строящихся и эксплуатируемых зданий и сооружений. В соответствии с НРБ-99/2009, ОСПОРБ-99/2010 и СанПиН 2.6.1.2800-10, к строящимся относятся здания и сооружения, сдающиеся в эксплуатацию после окончания строительства, капитального ремонта и реконструкции. С учетом этого, представляется целесообразным, чтобы реабилитированные здания и прилегающие к ним территории, загрязненные природными радионуклидами в результате прошлой деятельности предприятий, рассматривались как объекты строительства, сдающиеся в эксплуатацию после окончания строительства (капитального ремонта, реконструкции). Причем эта норма должна относиться к объектам и территориям жилищного, общественного и производственного назначения.

В отношении загрязнения объектов и территорий природными радионуклидами в результате прошлой деятельности предприятий следует указать, что наиболее удобной величиной, характеризующей потенциальную радиационную опасность остаточного радиоактивного загрязнения объектов и территорий природными радионуклидами, является эффективная удельная активность природных радионуклидов в отходах и объектах среды обитания людей, которая рассчитывается по формуле:

$$A_{эфф} = A_{Ra} + 1,3 \cdot A_{Th} + 0,09 \cdot A_K,$$

в которой  $A_{Ra}$  и  $A_{Th}$  – удельные активности урана-238 ( $^{226}\text{Ra}$ ) и тория-232 ( $^{232}\text{Th}$ ), находящихся в радиоактивном равновесии со всеми остальными членами уранового и ториевого рядов соответственно,  $A_K$  – удельная активность  $^{40}\text{K}$ .

Численное значение этой величины принято Постановлением правительства Российской Федерации от 19.10.2012 г. № 1069 в качестве основного показателя при отнесении производственных отходов с повышенным содержанием природных радионуклидов к РАО. Такое

определение радиоактивных отходов введено также пунктом 3.12.1 ОСПОРБ-99/2010 в редакции Изменения 1 к этим санитарным правилам. Твердые производственные отходы с повышенным содержанием природных радионуклидов, в которых значение  $A_{эфф}$  превышает 10 Бк/г, относятся к *очень низкоактивным радиоактивным отходам*.

Укажем, что требование радиоактивного равновесия в рядах урана-238 и тория-232 при определении величины  $A_{эфф}$  и отнесении производственных отходов к РАО является принципиально важным, поскольку для целого ряда ситуаций загрязнения объектов и территорий природными радионуклидами наблюдается нарушение радиоактивного равновесия в рядах урана и тория.

Первичное радиоактивное загрязнение природными радионуклидами технологического оборудования и объектов среды обитания и окружающей среды в результате деятельности большинства предприятий неядерных отраслей чаще всего обусловлено поступлением в них трех изотопов радия:  $^{226}\text{Ra}$  из ряда  $^{238}\text{U}$  и  $^{224}\text{Ra}$  и  $^{228}\text{Ra}$  из ряда  $^{232}\text{Th}$ . Это наблюдается для загрязнения объектов и территорий природными радионуклидами в результате деятельности предприятий нефтегазовой отрасли [10, 11], при промышленном использовании природных подземных вод [12], включая и предприятия питьевого водоснабжения населения (в цикле водоочистки) [13] и др. Радиоактивное равновесие в рядах урана и тория может быть сильно нарушено также в технологиях высокотемпературного и глубоких химических процессах передела минеральных компонент и др. [14, 15]. В отходах уранового производства в цикле добычи урана материнский изотоп ряда  $^{238}\text{U}$  практически также отсутствует. Поэтому загрязнение окружающей среды при добыче урановых и ториевых руд также следует рассматривать как загрязнение природными радионуклидами в результате прошлой деятельности, а отходы этих предприятий следует рассматривать как производственные отходы, содержащие природные радионуклиды, требования по обращению с которыми установлены в ОСПОРБ-99/2010, СанПиН 2.6.1.2800-10 и Постановлении Правительства РФ от 19 октября 2012 г. № 1069.

### Заключение

На основе анализа требований действующих в Российской Федерации гигиенических норм и требований в области обеспечения радиационной безопасности населения дана характеристика перечня показателей, которые могут быть использованы при обосновании критериев реабилитации объектов и территорий, загрязненных техногенными и природными радионуклидами в результате прошлой деятельности предприятий.

Показано, что для объектов и территорий, загрязненных техногенными радионуклидами, обоснование критериев реабилитации должно быть основано на дозовых величинах техногенного облучения населения, а также на производных показателях. Причем основными производными величинами в таких ситуациях являются остаточная удельная активность техногенных радионуклидов в почвах и грунтах на территории и ограждающих конструкциях зданий и сооружений, снимаемое радиоактивное загрязнение альфа- и бета-излучающими радионуклидами поверхностей с твердым покрытием, а также мощность дозы гамма-излучения, обусловленная остаточным

загрязнением среды обитания гамма-излучающими радионуклидами техногенного происхождения.

В отношении объектов и территорий, загрязненных природными радионуклидами, практически во всех ситуациях мероприятия по реабилитации должны опираться на показатели радиационной безопасности, установленные в нормативно-правовых документах в отношении зданий и прилегающих к ним территорий. Основными показателями для обоснования критериев реабилитации объектов и территорий, загрязненных природными радионуклидами в результате прошлой деятельности предприятий, являются мощность дозы гамма-излучения, среднегодовое значение ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений, плотность потока радона с поверхности почв и грунтов на территориях под застройку, а также эффективная удельная активность природных радионуклидов в объектах среды обитания. Для последнего показателя важным является определение его величины в объектах среды обитания с учетом радиоактивного равновесия в рядах урана и тория, поскольку для большинства ситуаций загрязнения объектов и территорий природными радионуклидами оно оказывается нарушенным.

По данным литературы, при локальном радиоактивном загрязнении территорий дозы населения формируются в основном за счет их внешнего облучения. Однако для ситуаций использования реабилитированных объектов и территорий без ограничений по радиационному фактору при обосновании критериев реабилитации необходимо учитывать также вклад в суммарные дозы населения перорального поступления техногенных радионуклидов с пищевыми продуктами и питьевой водой. При загрязнении территорий природными радионуклидами значимым может быть вклад их поступления в организм с питьевой водой.

### Литература

1. Абрамов, А.А. Концепция ФЦП «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016-2020 годы и на период до 2025 года» (ФЦП-ЯРБ-2) / А.А. Абрамов // Доклад на заседании Общественного совета Госкорпорации «Росатом» 21.11.2013 г.
2. Серия Норм МАГАТЭ по безопасности «Освобождение площадок от регулирующего контроля после завершения практической деятельности». Руководство № WS-G-5.1. – Вена, 2008. – 42 с.
3. Романович, И.К. Обоснование радиационной безопасности длительного хранения газового конденсата в подземных резервуарах, образованных с применением ядерно-взрывной технологии / И.К. Романович, С.Л. Спешиллов,

М.К. Теплов // Радиационная гигиена. – 2010. – Т.3, № 2. – С. 16–23.

4. Рамзаев, В.П. Мирные ядерные взрывы: проблемы и пути обеспечения радиационной безопасности населения / В.П. Рамзаев, В.С. Репин, Е.В. Храмов // Радиационная гигиена. – 2009. – Т. 2, № 2. – С. 27–33.
5. Романович, И.К. Некоторые уроки реагирования на радиационную аварию с расплавлением источника ионизирующего излучения при переплавке металлолома. Сообщение 1: Оценка радиационной обстановки и доз облучения / И.К. Романович // Радиационная гигиена. – 2016. – Т. 9, № 4 (в печати).
6. IAEA Safety Standards Series «Remediation of Areas Contaminated by Past Activities and Accidents» Safety Requirements No. WS-R-3. Vienna, 2003, 28 pp.
7. Серия Норм МАГАТЭ по безопасности «Применение концепций исключения, изъятия и освобождения от контроля». Руководство № RS-G-1.7. – Вена, 2006. – 31 с.
8. IAEA Safety Standards for protecting people and environment. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements. Part 3 No GSR Part 3. Vienna, 2014, 436 pp.
9. Панов, А.В. Реабилитация зон локальных радиоактивных загрязнение / А.В. Панов [и др.] // Атомная энергия. – 2006. – Т. 100, вып. 2. – С. 125–134.
10. Стамат, И.П. Основные проблемы обеспечения радиационной безопасности в нефтегазовой отрасли и пути их решения / И.П. Стамат // Топливо-энергетический комплекс России: региональные аспекты: сб. матер. 5-го междунар. форума. – СПб., 2005. – С. 119–121.
11. Стамат, И.П. Задачи обеспечения радиационной безопасности на объектах нефтегазового комплекса России / И.П. Стамат [и др.] // Здоровье Населения и Среда Обитания. – 2004. – № 4 (133). – С. 32–35.
12. Лисаченко, Э.П. Проблемы радиационной безопасности промышленного освоения глубинных вод Земли / Э.П. Лисаченко, И.П. Стамат // Вестник Российской военной медицинской академии. – 2008. – № 3 (23) (Прил. 2, часть I). – С. 221.
13. Стамат, И.П. Организация и проведение комплексного радиационно-гигиенического обследования системы водоснабжения г. Тверь / И.П. Стамат [и др.] // Отчет. – СПб, 2007. – 117 с.
14. Лисаченко, Э.П. Природные радионуклиды в производственных отходах неурановой отрасли (обзор) / Э.П. Лисаченко, И.П. Стамат // Радиационная гигиена. – 2009. – Т. 2, № 2. – С. 64–71.
15. Гращенко, С.М. Природные радионуклиды уранового и ториевого радиоактивных рядов в неядерном комплексе хозяйственной деятельности / С.М. Гращенко // Радиохимия. – 2005. – Т. 47, № 6. – С. 564–568.

Поступила: 16.11.2016 г.

**Романович Иван Константинович** – доктор медицинских наук, профессор, член-корреспондент РАН, директор Научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8. Тел.: 8 (812) 233-53-63; E-mail: I.Romanovich@niirg.ru

**Стамат Иван Павлович** – доктор биологических наук, заведующий лабораторией дозиметрии природных источников Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

**Санжарова Наталья Ивановна** – доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАН, директор Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии Федерального агентства научных организаций, Обнинск, Калужская область, Россия

**Панов Алексей Валерьевич** – доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заместитель директора Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии Федерального агентства научных организаций, Обнинск, Калужская область, Россия

**Для цитирования: Романович И.К., Стамат И.П., Санжарова Н.И., Панов А.В. Критерии реабилитации объектов и территорий, загрязненных радионуклидами в результате прошлой деятельности: Часть 1. Выбор показателей для обоснования критериев реабилитации // Радиационная гигиена. – 2016. – Т. 9, № 4. – С. 6–15. DOI: 10.21514/1998-426X-2016-9-4-6-15**

---

## Criteria for rehabilitation of facilities and territories contaminated with radionuclides as a result of past activities: Part 1. The choice of indicators for justification of the criteria for rehabilitation

Ivan K. Romanovich<sup>1</sup>, Ivan P. Stamat<sup>1</sup>, Natalya I. Sanzharova<sup>2</sup>, Aleksey V. Panov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Russian Institute of Agricultural Radiology and Agroecology, Federal Agency for Scientific Organizations, Obninsk, Kaluga region, Russia

*The article examines issues of rehabilitation of facilities and territories contaminated by the man-made and natural radionuclides as a result of past activities of enterprises of nuclear and non-nuclear industries. Rehabilitated facilities and territories contaminated with radionuclides as a result of past activities of enterprises must meet criteria based on the analysis of requirements of existing normative legislative documents in the field of radiation protection of the population taking into account the recommendations of international organizations that are justified dose quantities and derivative indicators used in criteria setting. It is shown that the criteria for rehabilitation of facilities and territories contaminated by man-made radionuclides as a result of past activities, should be the same regardless of whether the contamination occurred as a result of planned activities of the enterprise or due to unauthorized activities. For these situations, the criteria for rehabilitation should be based on dose quantities and derived indicators of the residual contamination of the environment after rehabilitation. Only indicators of radiation safety of the environment can be used in almost all cases for justification of the criteria for rehabilitation of facilities and territories contaminated by natural radionuclides. The article shows that such approaches are applicable not only to environmental media contaminated as result of past activities of enterprises of traditional non-nuclear industries but the mining of uranium and thorium ores. From the standpoint of modern classification of industrial waste with a high concentration of natural radionuclides, the characteristics of these wastes according to their potential radiation hazard to people and the environment are identical.*

**Key words:** natural radionuclides, man-made radionuclides, enterprises of nuclear industry, non-nuclear industries, radioactive waste, past activity, criteria for rehabilitation

### References

1. Abramov A.A. Conception of Federal Target Program «Ensuring nuclear and radiation safety in 2016–2020 and the period up to 2025. Report on the meeting of the Public Council of the State Atomic Energy Corporation ROSATOM» 21.11.2013 г. (In Russ.)
2. IAEA Safety Standards Series «Release of Sites from Regulatory Control on Termination of Practices». Safety Guide №. WS.G.5.1. Vienna, 2008, 42 p. (In Russ.)
3. Romanov I.K. Speshilov S.L., Teplov M.K. Radiation safety justification for the long-term storage of gas condensate in the underground reservoirs formed by the nuclear explo-

---

**Ivan K. Romanovich**

Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev.

**Address for correspondence:** Mira St., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: I.Romanovich@niirg.ru

- sion technology. *Radiatsionnaya gigiena = Radiation Hygiene*, 2010, Vol. 3, № 2, pp. 16-23. (In Russ.)
4. Ramzaev V.P., Repin B.C., Khramtsov E.V. Peaceful underground nuclear explosions: current issues on radiation safety for general public. *Radiatsionnaya gigiena = Radiation Hygiene*, 2009, Vol. 2, № 2, pp. 27 – 33. (In Russ.)
  5. Romanovich I.K. Some lessons from the response to a radiological accident with melting source of ionizing radiation during the melting of scrap metal. Message 1: Assessment of radiation situation and exposure doses. *Radiatsionnaya gigiena = Radiation Hygiene*, 2016, Vol. 9, № 4 (*в печати*). (In Russ.)
  6. IAEA Safety Standards Series «Remediation of Areas Contaminated by Past Activities and Accidents» Safety Requirements No. WS-R-3. Vienna, 2003, 28 pp.
  7. IAEA Safety Standards Series «Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance». Safety Guide №. RS-G-1.7. Vienna, 2006, 31 p. (In Russ.)
  8. IAEA Safety Standards for protecting people and environment. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements. Part 3 No GSR Part 3. Vienna, 2014, 436 pp.
  9. Panov A.V., Fesenko S.V., Sanzharova N.I., Aleksakhin R.M. Remediation of zones of local radioactive contamination. *Атомная энергия = Atomic Energy*, 2006, Vol. 100, № 2, p. 125-134. (In Russ.)
  10. Stamat I.P. The basic problems of radiation safety in the oil and gas sector and ways of their solution. The fuel and energy complex of Russia: regional aspects: proceedings of mater. 5-th Intern. forum. SPb., 2005, pp. 119-121. (In Russ.)
  11. Stamat I.P., Kormanovskaya T.A., Stupina V.V., Gorsky A.A., Perminova G.S., Gorsky G.A. Problems of provision for radiation safety in the oil and gas industry facilities of Russia. *Zdorove Naseleniya i Sreda Obitaniya = Public Health and Environment*, 2004, № 4 (133), pp. 32-35. (In Russ.)
  12. Lisachenko E.P., Stamat I.P. Radiation protection issues of industrial development in the deep waters of the Earth. *Vestnik Rossiyskoy voenno-meditsinskoy akademii = Annals of the Russian Military Medical Academy*, 2008, № 3 (23), Appendix 2, Vol. I, pp. 221. (In Russ.)
  13. Stamat I.P., Kormanovskaya T.A., Svetovidov A.V. [Et al.] Organization and implementation of complex radiation and hygienic surveys of water supply system in Tver. SPb, 2007, 117 p. (In Russ.)
  14. Lisachenko E.P., Stamat I.P. Natural radionuclides in residues from non-nuclear industries (review). *Radiatsionnaya gigiena = Radiation Hygiene*, 2009, Vol. 2, № 2, pp. 64-71. (In Russ.)
  15. Grashchenko S.M. Naturally occurring radionuclides of uranium and thorium series in nonnuclear industrial processes. *Radiokhimiya = Radiochemistry*, 2005, Vol.47, № 6, pp. 564-568. (In Russ.)

Received: November 16, 2016

**For correspondence: Ivan K. Romanovich** – Doctor of Medical Sciences, Professor, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Director of Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Mira St., 8, St. Petersburg, 197101, Russia; E-mail: I.Romanovich@niirg.ru)

**Ivan P. Stamat** – Doctor of Biological Sciences, head of natural sources dosimetry laboratory of St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

**Natalya I. Sanzharova** – Doctor of Biological Sciences, Professor, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Director, Russian Institute of Agricultural Radiology and Agroecology, Federal Agency for Scientific Organizations Kaluga region, Obninsk, Russia

**Aleksey V. Panov** – Doctor of Biological Sciences, Professor, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director, Russian Institute of Agricultural Radiology and Agroecology, Federal Agency for Scientific Organizations, Kaluga region, Obninsk, Russia

**For citation: Romanovich I.K., Stamat I.P., Sanzharova N.I., Panov A.V. Criteria for rehabilitation of facilities and territories contaminated with radionuclides as a result of past activities: Part 1. The choice of indicators for justification of the criteria for rehabilitation. *Radiatsionnaya gigiena = Radiation Hygiene*, 2016, Vol. 9, No 4, pp.6–15. (In Russ.) DOI: 10.21514/1998-426X-2016-9-4-6-15**