

МИНИСТЕРСТВО ЗДРАВООХРАНЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКОЕ АГЕНТСТВО (ФМБА РОССИИ)

---

**МЕДИЦИНСКАЯ  
РАДИОЛОГИЯ  
И  
РАДИАЦИОННАЯ  
БЕЗОПАСНОСТЬ**

---

---

**MEDICAL RADIOLOGY  
AND  
RADIATION SAFETY**

---

*Meditsinskaia Radiologiia i Radiatsionnaia Bezopasnost*

---

**2013**

**Том 58**

**№ 1**

Периодический научный журнал. Издается с сентября 1956 года

Журнал включен в перечень ВАК ведущих рецензируемых научных журналов,  
рекомендованных для опубликования результатов диссертационных исследований

Москва

**Медицинская радиология и радиационная безопасность**  
**Medical Radiology and Radiation Safety**

Научный журнал

Scientific Journal

---

**Издатель:**

ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации –  
Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна»  
Федерального медико-биологического агентства

**Главный редактор В.В. УЙБА**

**Заместители главного редактора:**  
**К.В. Котенко (оперативное руководство)**

**А.Ф. Цыб (общие вопросы)**

**Редакционная коллегия (по рубрикам журнала):**

**Радиационная биология:** А.А. Вайнсон, П.К. Казымбет, А.Н. Котеров

**Радиационная безопасность:** Р.М. Алексахин, С.С. Алексанин, Л.А. Ильин

**Радиационная медицина:** А.Ю. Бушманов, А.К. Гуськова, С.И. Иванов

**Лучевая терапия:** А.В. Бойко, С.И. Ткачев

**Лучевая диагностика:** И.Е. Тюрин

**Ядерная медицина:** Б.Я. Наркевич (научный редактор)

**Радиационная эпидемиология:** А.П. Бирюков, В.Ф. Демин, В.К. Иванов, Н.К. Шандала

**Радиационная физика, техника и дозиметрия:** Н.М. Борисов, И.А. Гусев, С.М. Шинкарев

**Зарубежные связи:** М.Ф. Киселев, В.В. Романов

**Обзоры, краткие сообщения, письма в редакцию, дискуссии, хроника, юбилеи:** ответственные по соответствующим рубрикам

**Помощь практическому врачу:** А.Ю. Бушманов

Все статьи в журнале печатаются бесплатно.

Заведующий редакцией Э.С. Зубенкова

Компьютерная верстка В.В. Колесниченко

**Адрес редакции журнала:**

115478 Москва, М-478, Каширское ш., 24

Телефон: (499) 612-79-45

**Address of Editorial Board:**

24, Kashirskoye sh., 115478 Moscow, Russia

Phone: +7 (499) 612-79-45

E-mail: [medradiol@fromru.com](mailto:medradiol@fromru.com)

<http://fmbcfmba.org> далее раздел Публикации

Правила для авторов: [Instructions for authors:](#)

[http://fmbcfmba.org/RadioJournal/prav\\_ofo.pdf](http://fmbcfmba.org/RadioJournal/prav_ofo.pdf)

---

Подписано в печать 11.02.2013. Формат 60×88/8  
Печать офсетная. 11.0 усл. печ. л. Тираж 1000 экз. Заказ №

Отпечатано в типографии ФМБЦ им. А.И.Бурназяна  
123098, Москва, Живописная ул., 46

## СОДЕРЖАНИЕ № 1 – 2013

РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ	5	<b>Анализ неопределенностей в дозиметрической системе реки Теча</b> <i>Б.А. Напье, М.О. Дегтева, Н.Б. Шагина, Л.Р. Анспо</i>
	29	<b>Верификация уровней внешнего облучения в верховье реки Течи (Метлино) измерениями люминесценции</b> <i>В.А. Тараненко, М.И. Воробьева, М.О. Дегтева, Н.Г. Бугров, Е.И. Черепанова, Э.С. Куропатенко</i>
РАДИАЦИОННАЯ МЕДИЦИНА	36	<b>Анализ медицинских последствий радиационных инцидентов на территории бывшего СССР (по материалам регистра ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России)</b> <i>В.Ю. Соловьев, А.В. Барабанова, А.Ю. Бушманов, А.К. Гуськова, Л.А. Ильин</i>
ЛУЧЕВАЯ ТЕРАПИЯ	43	<b>Методические аспекты конформной дистанционной лучевой терапии у молодых женщин с транспозицией яичников при раке шейки матки</b> <i>Е.А. Дунаева, Э.А. Кадиева, Л.В. Демидова, А.В. Бойко, С.А. Кожевникова, Т.А. Телеус, О.Б. Дубовецкая, Р.Н. Плавник, Е.С. Цветаева, Н.И. Храмова</i>
ЯДЕРНАЯ МЕДИЦИНА	50	<b>Применение перфузионной сцинтиграфии легких у больных с легочной гипертензией различной этиологии</b> <i>О.А. Архипова, Т.В. Мартынюк, Л.Е. Самойленко, В.Б. Сергиенко, И.Е. Чазова</i>
ОБЗОР	59	<b>Современная организация медицинского сопровождения лиц, подвергающихся воздействию ионизирующего излучения</b> <i>А.К. Гуськова</i>
ХРОНИКА	68	<b>Информация о Российской конференции «Острые проблемы разработки противолучевых средств: консерватизм или модернизация»</b> <i>Л. М. Рождественский</i>
В ПОМОЩЬ ПРАКТИЧЕСКОМУ ВРАЧУ	71	<b>Экстраабдоминальная форма десмоидной опухоли молочной железы</b> <i>Н.И. Рожкова, Т.В. Шерстнева, О.Н. Авилов, М.А. Шершнева, О.Б. Тарарухина</i>
ЮБИЛЕЙ	78	<b>К 85-летию Л.А. Ильина</b>
БИБЛИОГРАФИЯ	81	<b>Правила оформления статей для опубликования в журнале «Медицинская радиология и радиационная безопасность» (на русском языке)</b>
	86	<b>Правила оформления статей для опубликования в журнале «Медицинская радиология и радиационная безопасность» (на английском языке)</b>

## CONTENTS № 1 – 2013

RADIATION SAFETY	5	<b>Uncertainty Analysis for the Techa River Dosimetry System</b> <i>B.A. Napier, M.O. Degteva, N.B. Shagina, A.L.R. Anspaugh</i>
	29	<b>Verification of the External Exposure Levels in the Upper Streams of Techa River (Metlino) by Luminescence Measurements</b> <i>V.A. Taranenko, M.I. Vorobiova, M.O. Degteva, N.G. Bougrov, E.I. Cherepanova, E.S. Kuropatenko</i>
RADIATION MEDICINE	36	<b>Review of the Medical Consequences of Radiation Accidents in the Former USSR Territory (Burnasyan FMBC of FMBA of Russia Register Data)</b> <i>V.Yu. Soloviev, A.V. Barabanova, A.Yu. Bushmanov, A.K. Guskova, L.A. Il'in</i>
RADIATION THERAPY	43	<b>Methodic of Conformal Radiation Therapy of Cervical Cancer with Ovarian Transposition</b> <i>E.A. Dunaeva, E.A. Kadieva, L.V. Demidova, A.V. Boyko, S.A. Kozhevnikova, T.A. Teleous, O.B. Dubovetskaya, R.N. Plavnik, E.S. Tsvetaeva, N.I. Khramitsova</i>
NUCLEAR MEDICINE	50	<b>Application of Perfusion Lung Scintigraphy in Patients with Pulmonary Hypertension of Various Etiologies</b> <i>O.A. Arkhipova, T.V. Martynyuk, L.E. Samoilenko, V.B. Sergienko, I.E. Chazova</i>
REVIEW	59	<b>Present Organization of Medical Support of Radiation Exposed Persons</b> <i>A.K. Guskova</i>
CHRONICLE	68	<b>Information on the Russian Conference “Critical Problems of Ionizing Radiation Countermeans Elaboration: Conservatism or Modernisation”</b> <i>L.M. Rozhdestvensky</i>
MEDICAL PRACTICE ISSUE	71	<b>Extraabdominal Fibromatosis of Desmoid Breast Tumor</b> <i>N.I. Rozhkova, T.V. Sherstneva, O.N. Avilov, M.A. Shershneva, O.B. Tararuchina</i>
JUBILEE	78	<b>In Honor of the Academician L.A. Il'in's 85<sup>th</sup> Birthday</b>
BIBLIOGRAPHY	81	<b>Rules for Authors of Papers to be Published in Journal of Medical Radiology and Radiation Safety (In Russian)</b>
	86	<b>Rules for Authors of Papers to be Published in Journal of Medical Radiology and Radiation Safety (in English)</b>

**Б.А. Напье<sup>1</sup>, М.О. Дегтева<sup>2</sup>, Н.Б. Шагина<sup>2</sup>, Л.Р. Анспа<sup>3</sup>**

**АНАЛИЗ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ В ДОЗИМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ РЕКИ ТЕЧА\***

**B.A. Napier<sup>1</sup>, M.O. Degteva<sup>2</sup>, N.B. Shagina<sup>2</sup>, L.R. Anspaugh<sup>3</sup>**  
**Uncertainty Analysis for the Techa River Dosimetry System**

РЕФЕРАТ

**Цель:** Оценить неопределенность расчетных значений доз облучения людей из «Когорты реки Течи» (КРТ) двумерным методом Монте-Карло.

**Материал и методы:** Для надежной оценки индивидуальных доз облучения людей из КРТ (и, следовательно, более точной оценки радиационного риска) используется дозиметрическая система реки Течи (TRDS). Детерминированная версия дозиметрической системы TRDS-2009D была закончена в апреле 2009 года. Современные исследования в области оценивания радиационного риска с учетом неопределенности доз подчеркнули необходимость рассмотрения различных типов неопределенности при оценке индивидуальных доз облучения. В связи с этим был выполнен анализ параметров TRDS-2009D, используемых для расчета доз. Параметры дозиметрической системы, которые характеризуются неопределенностью, могут быть общими (shared) (для отдельной группы людей или для всей когорты) или индивидуальными (unshared) (для каждого человека, для которого оценивается доза). По своей природе неопределенности могут быть алеаторными (aleatory) (стохастическая изменчивость истинных величин) или эпистемическими (epistemic) (в случаях отсутствия полного знания об истинной величине). Наконец, необходимо установить, относится ли структура ошибок к измерению (отклонение оценки от истинного значения на величину, которая статистически не зависит от истинного значения; часто называется классической неопределенностью) или к способу обобщения (истинное значение отличается от оценки на случайную величину, которая не зависит от оценки; часто называется неопределенностью Берксона).

**Результаты:** Разработан подход для определения природы неопределенности входных параметров и расчетных методов, используемых в дозиметрической системе реки Течи (на основе TRDS-2009D). Создана стохастическая версия дозиметрической системы (TRDS-2009MC) для оценки неопределенностей расчетных доз. Рассмотрены концепции анализа неопределенности, уравнения и входные параметры и природа их неопределенности в интерпретации авторов.

**Выводы:** Показано, что выбранный подход к использованию стохастической версии дозиметрической системы TRDS-2009MC дает полезную информацию о неопределенности расчетных значений доз.

**Ключевые слова:** анализ неопределенности, дозиметрия, река Теча

ABSTRACT

**Purpose:** Estimation of uncertainties in the doses for the members of the Techa River Cohort (TRC) with a two-dimensional Monte Carlo approach.

**Material and methods:** In order to provide more accurate and precise estimates of individual dose (and thus more precise estimates of radiation risk) for the members of the TRC, the Techa River Dosimetry System used. The deterministic version of the improved dosimetry system TRDS-2009D was basically completed in April 2009. Recent developments in evaluation of dose-response models in light of uncertain dose have highlighted the importance of different types of uncertainties in the development of individual dose estimates. Thus, the TRDS-2009 parameters were analyzed accordingly. These include uncertain parameters that may be either shared (common to some or all individuals) or unshared (a unique value for each person whose dose is to be estimated) within the dosimetric cohort. The nature of the type of uncertainty may be aleatory (random variability of true values due to stochastic processes) or epistemic (due to lack of complete knowledge about a unique quantity). Finally, there is a need to identify whether the structure of the errors is either related to measurement (the estimate differs from the true value by an error that is stochastically independent of the true value; frequently called classical uncertainty) or related to grouping (the true value varies from the estimate by an error that is random and is independent of the estimate; frequently called Berkson uncertainty).

**Results:** An approach has been developed that identifies the nature of the various input parameters and calculational methods incorporated in the Techa River Dosimetry System (based on the TRDS-2009D implementation), and a stochastic calculation model has been prepared to estimate the uncertainties in the dose estimates. This article reviews the concepts of uncertainty analysis, the equations, and input parameters, and then identifies the authors' interpretations of their general nature.

**Conclusions:** It presents the approach selected so that the stochastic, Monte-Carlo, implementation of the dosimetry system – TRDS-2009MC – provides useful information regarding the uncertainties of the doses.

**Key words:** uncertainty analysis, radiation dosimetry, Techa River

\* Перевод статьи Napier B.A., Degteva M.O., Shagina N.B., Anspaugh L.R. "Uncertainty analysis for the Techa River Dosimetry System" выполнен Н.Б. Шагиной<sup>2</sup> в научной редакции Е.А. Шишкиной<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Тихоокеанская северо-западная национальная лаборатория, Ричленд, США  
<sup>2</sup> Уральский научно-практический центр радиационной медицины, Челябинск, Россия. E-mail: nata@urcrn.ru  
<sup>3</sup> Университет штата Юта, Солт-Лейк-Сити, США

<sup>1</sup> Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA, USA  
<sup>2</sup> Urals Research Center for Radiation Medicine, Chelyabinsk, Russia. E-mail: nata@urcrn.ru  
<sup>3</sup> University of Utah, Salt Lake City, UT, USA

## Введение

В середине XX столетия население Уральского региона подверглось радиационному воздействию в результате загрязнения окружающей среды, произошедшего из-за несовершенства технологии обращения с радиоактивными отходами на производственном объединении (ПО) «Маяк» – первом в России предприятии по наработке оружейного плутония. Основным источником загрязнения окружающей среды явился сброс порядка  $10^{17}$  Бк жидких радиоактивных отходов в реку Течу в период с 1949 по 1956 гг. Жители населенных пунктов (НП), расположенных ниже по течению реки, подверглись внутреннему облучению, главным образом, за счет потребления речной воды для питья, а также внешнему облучению от загрязненной береговой полосы.

Как известно, в Уральском регионе существовали также и дополнительные источники облучения населения. Наиболее значимым из них явился взрыв емкости с высокоактивными отходами в 1957 г. (так называемая Кыштымская авария) с выбросом в атмосферу  $7,4 \times 10^{16}$  Бк суммарной активности, в результате которого образовался Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС). Поступление радионуклидов в окружающую среду привело к значительным уровням облучения населения, проживающего в прибрежных НП реки Теча, что могло отразиться на состоянии их здоровья. Для изучения медицинских последствий радиационного воздействия была создана так называемая «Когорта реки Теча» (КРТ), которая насчитывает 30 тыс. человек, проживавших ниже места сбросов радиоактивных отходов в реку. Дополнительным источником облучения для некоторых людей из КРТ являлось медицинское облучение при проведении специализированных рентгенодиагностических обследований. В этой когорте было обнаружено увеличение риска лейкозов и солидных опухолей с дозой облучения [1–3].

Серия радиоактивных выбросов и сбросов, произошедших в разные годы в одном и том же регионе, а также интенсивная миграция населения в пределах загрязненных территорий явились отличительными особенностями Уральской ситуации, которые определили следующий эпидемиологический подход к наблюдению за облучившимся населением: выбор фиксированной когорты и отслеживание всех мест и сроков проживания каждого человека с момента начала радиоактивного загрязнения. КРТ представляет собой сельское население и состоит из двух различных этнических групп. Люди из КРТ подверглись хроническому облучению в широком диапазоне доз с малой и средней мощностью дозы.

Дозы облучения, необходимые для анализа канцерогенного риска, были оценены с использованием версии «Дозиметрической системы реки Течи», созданной в 2000 г. (TRDS-2000) [4–6]. Для более точной и надежной оценки индивидуальных доз облучения для людей из КРТ (и, следовательно, более точной оценки радиационного риска в когорте) в 2009 г.

## Introduction

Population radiation exposure in the Urals region in the middle of the 20th century occurred as a result of failures in the technological processes in the Mayak Production Association (MPA), which was the first site in Russia for the production of plutonium for nuclear weapons. A major source of environmental contamination was the discharge of about  $10^{17}$  Bq of liquid wastes into the Techa River in 1949–1956. Residents of many villages downstream from the site of release were exposed via a variety of pathways; the more significant included drinking of water from the river and external gamma exposure due to proximity to bottom sediments and the shoreline. There are known to be additional sources of exposure for the Urals population, most important of which was an explosion in the radioactive waste-storage facility in 1957 (the so-called Kyshtym accident) that formed the East Urals Radioactive Trace (EURT) due to dispersion of  $7.4 \times 10^{16}$  Bq into the atmosphere. These releases led to substantial doses to the residents of the Techa riverside communities, and, subsequently, to health effects. (An additional source of radiation dose to some members of the cohort is medical X-rays obtained during health examinations specifically for this cohort.) Increases of leukemia and of solid cancers with radiation dose were noted in the population of about 30,000 people who lived downstream of the site of radioactive releases [1–3].

The series of radioactive releases that occurred in the same region in different years and the intensive migration of the population within the contaminated area are specific features of the Urals situation. This determined the approach to follow-up: selecting a fixed cohort and tracing all places of residence for each subject in the cohort since the beginning of radioactive contamination. The Techa River Cohort (TRC) includes approximately 30,000 members and represents an unselected population consisting of two distinct ethnic groups. The members of the TRC were exposed to chronic radiation over a wide range of doses, but at low-to-moderate-dose rates.

The doses for the analysis of carcinogenic risks were initially estimated by means of the Techa River Dosimetry System (TRDS)-2000 [4–6]. In order to provide more accurate and precise estimates of individual dose (and thus more precise estimates of radiation risk) for the members of the Techa River cohort, a new dosimetric calculation system, the Techa River Dosimetry System-2009 (TRDS-

была разработана усовершенствованная версия системы TRDS-2009. Детерминированная версия дозиметрической системы TRDS-2009D была закончена в апреле 2009 г. [7, 8].

Современные исследования в области оценки радиационного риска с учетом неопределенности доз [9, 10] подчеркнули необходимость рассмотрения различных типов неопределенности при оценке индивидуальных доз облучения. С этой целью необходимо выделить те параметры дозиметрической системы, значения которых характеризуются неопределенностью. Параметры дозиметрической системы могут быть общими (shared) или индивидуальными (unshared) для рассматриваемой когорты. Кроме этого, следует учесть природу неопределенности значений параметров, которая может быть случайной (aleatory) или понятийной (epistemic) и также может быть связана с измерениями (классическая ошибка) или принятыми обобщениями (ошибка Берксона). Разработан подход к определению природы неопределенности значений входных параметров и расчетных методов дозиметрической системы реки Теча (на основе TRDS-2009D) и создана стохастическая модель для оценки неопределенности расчетных значений доз. В статье рассмотрены концепции анализа неопределенности, уравнения и входные параметры и затем приводится авторская интерпретация природы их неопределенностей. Показано, что выбранный авторами подход к использованию стохастической версии дозиметрической системы TRDS-2009MC дает полезную информацию о неопределенности расчетных значений доз.

### **Характеристика неопределенностей в реконструкции доз облучения**

Дозы облучения населения не могут быть измерены непосредственно, но должны быть оценены на основе доступной информации [11]. Информация для расчета доз может быть самой разнообразной в зависимости от сценария облучения и измерений (если таковые имеются), которые прямо или косвенно отражают дозу облучения. Поэтому для реконструкции доз применяются математические модели, которые позволяют перейти от имеющейся информации к дозам облучения.

Совершенно очевидно, что значения доз облучения, оцененные с помощью моделей, в некоторой степени отличаются от истинных значений доз облучения, и степень различий между оцененной и истинной дозой неизвестна. Чтобы понять точность оценки дозы, необходимо дать характеристику или оценить насколько может быть велика или мала степень различий между оцененной и истинной дозой. Это равносильно характеристике соответствия возможным значениям истинной дозы. Естественно, что некоторые возможные значения истинной дозы могут быть более правдоподобны, чем другие. Например, дозы, близкие к оцененному значению, возможно более правдоподобны, чем дозы, значительно

2009) has been prepared. The deterministic version of the improved dosimetry system TRDS-2009D was basically completed in April 2009 [7, 8].

Recent developments in evaluation of dose-response models in light of uncertain dose data [9, 10] have highlighted the importance of different types of uncertainties in the development of individual dose estimates. These include uncertain parameters that may be either shared or unshared within the dosimetric cohort, and also the nature of the type of uncertainty as aleatory or epistemic and either related to measurement error (classical uncertainties) or related to grouping considerations (Berkson uncertainties). An approach has been developed that identifies the nature of the various input parameters and calculational methods incorporated in the Techa River Dosimetry System (based on the TRDS-2009D implementation), and a stochastic calculation model has been prepared to estimate the uncertainties in the dose estimates. This article reviews concepts of uncertainty analysis, the equations, and input parameters, and then identifies the authors' interpretations of their general nature. It presents the approach selected so that the stochastic, Monte-Carlo, implementation of the dosimetry system – TRDS-2009MC – provides useful information regarding the uncertainties of the doses.

### **Characterization of Uncertainty in Dose Reconstruction**

Radiation doses cannot be measured directly. They must necessarily be estimated from other information [11]. The kinds of information used to estimate doses vary widely, depending on the exposure scenario and the measurements, if any, that were made of quantities that influence or reflect the radiation dose received. Dose reconstruction therefore requires the use of mathematical models that express the doses of interest as functions of the available information.

Estimates of radiation doses are almost certain to differ to some degree from the doses actually received, and the differences between the estimated and true doses are of course unknown. To understand the accuracy of the estimated dose, it is important to be able to characterize how large or small the differences might be. This is equivalent to characterizing the plausibility of possible values of the true dose. Ordinarily, some possible true doses are more plausible than others; for example, doses near the

отличающиеся от оцененного значения. В связи с этим для наиболее корректного представления правдоподобности оцененных доз необходимо приписать степень доверия различным оценкам дозы или набору доз. Шкала для измерения доверия является относительной и может быть выбрана таким образом, что суммарная достоверность, т.е. интеграл по всему диапазону возможных значений истинной дозы, была равна 1. Нормированная соответствующим образом «функция доверия» используется как распределение вероятностей, а вариабельность, описываемая таким распределением, характеризует неопределенность оцененного значения дозы. Такое распределение идентифицируется как распределение неопределенности оценки дозы.

Неопределенность оценок доз возникает в результате неопределенности величин, которые определяют истинную, но ненаблюдаемую дозу облучения. Для характеристики неопределенности этих величин также используются распределения неопределенности. Распределения неопределенности характеризуют уровень нашего знания о дозах или величинах.

Для величин, которые могут быть измерены либо оценены по результатам наблюдений, распределение неопределенности может быть получено или выведено из статистического анализа результатов наблюдений. Распределение неопределенности, оцененное на основе таких данных, иногда называют объективным. Оно противоположно субъективному распределению неопределенности, которое существенно, если не полностью, базируется на уровне знаний аналитика, занимающегося реконструкцией доз, или других экспертов, об относительной правдоподобности возможных значений параметра (величины). Многие, или практически все, распределения неопределенности оцениваются путем комбинации эмпирических данных и субъективных суждений. В случаях, если эмпирические данные являются ограниченными с точки зрения их доступности или пригодности, распределение неопределенности будет в основном субъективным. В случаях, если конечный результат связан с оценением вариабельности истинных значений доз внутри группы или когорты людей, такой как КРТ, то неопределенности, представляющие рассеяние истинной дозы, должны быть отделены от неопределенностей, связанных с отсутствием знаний о параметрах, являющихся единственно истинными величинами. Целью такого оценивания является расчет частотного распределения истинных значений доз в когорте, состоящей из  $n$  человек; уровень нашего знания об индивидуальной вариабельности истинных доз может быть представлен путем многократных альтернативных реализаций индивидуальных векторов для  $n$  доз. Прежде чем описывать основные подходы к оценке неопределенности доз, необходимо представить некоторые основные понятия, относящиеся к природе неопределенностей.

estimated dose may be much more plausible than doses which differ by a large amount from the estimate. Therefore, the most useful representation of the plausibility of various estimated doses assigns levels of plausibility to different doses or sets of doses. The scale upon which plausibility is measured is arbitrary, and may therefore be chosen so that the total plausibility, integrated over all possible true dose values, is 1.0. The appropriately scaled “plausibility function” is, in effect, a probability distribution, and the variability represented by this distribution characterizes the uncertainty in the dose estimate. This distribution is referred to as the “uncertainty distribution” of the estimated dose.

The uncertainty in dose estimates arises from uncertainty about the quantities that determine the true but unobservable dose. Uncertainty distributions are also used to represent the uncertainty about those quantities. Uncertainty distributions can be said to represent the “state of knowledge” about the values of their corresponding doses or quantities.

For quantities that can be observed or estimated from observations, uncertainty distributions can be derived or deduced from statistical analyses of the observations. An uncertainty distribution estimated from data is sometimes described as “objective.” This is in contrast to a “subjective” uncertainty distribution, which relies heavily, if not exclusively, on the state of knowledge of the dose reconstruction analyst or other individuals, possibly experts, about the relative likelihoods of possible values of the parameter. Many if not most uncertainty distributions are derived from some combination of empirical data and subjective judgment: when empirical data are limited in terms of availability or applicability, the uncertainty distribution will be largely subjective. When the assessment endpoint involves estimation of the inter-individual variability of true doses within a group or cohort of individuals, such as the TRC, uncertainties representing random variability of true dose must be separated from uncertainties representing lack of knowledge about parameters that are single true quantities. The assessment objective is the estimate of a frequency distribution of true doses in a cohort of  $n$  individuals; the state of knowledge about inter-individual variability of true dose may be represented by numerous alternative realizations of unique vectors of  $n$  doses.

Before describing the general approach to estimating dose uncertainties, some basic concepts regarding the nature of uncertainties are introduced.

### **Независимые и коррелированные неопределенности**

Для корректного оценивания и интерпретации распределений неопределенности расчетных значений доз необходимо дать характеристику, как и в какой степени неопределенности значений доз взаимосвязаны с неопределенностями значений входных параметров. Две неопределенные величины являются независимыми, если знание о значении одной величины не дает какой-либо информации о значении другой величины. Корреляционная взаимосвязь зависимых величин может быть положительной или отрицательной. В аддитивной или мультипликативной модели наличие положительной корреляции между параметрами приведет к увеличению неопределенности значений доз, а наличие отрицательной корреляции — к снижению неопределенности. Например, между оценками загрязнения окружающей среды в различных географических регионах может возникать отрицательная корреляция благодаря сохранению баланса массы. В моделях, в которых используются отношения или пропорции, может возникать положительная корреляция. В целом, только при наличии сильной корреляционной связи между значениями параметров, которые вносят значимый вклад в неопределенность дозы, будет наблюдаться заметный эффект корреляции. При реконструкции доз облучения для эпидемиологического анализа радиационного риска очень важно учесть корреляционную связь вариабельности доз и их неопределенности между конкретными людьми в когорте. Если существует корреляция между параметрами модели, влияющими на неопределенность доз для группы индивидов, это может не влиять на индивидуальные неопределенности, однако корреляции могут оказать влияние на последующие вычисления, выполненные на основе этих индивидуальных оценок доз.

Корреляции существуют не только между индивидами, но и внутри компонент, используемых для расчета доз для одного индивида. Например, если расчет доз выполняется для каждого календарного года, то параметры биокинетической модели, используемые для конкретного индивида, как правило, значительно не изменяются от года к году. Аналогичным образом, рацион питания и режим поведения на загрязненной территории для конкретного человека значительно не изменяется от года к году в предположении, если он постоянно проживает на одной и той же территории и занят одной и той же профессиональной деятельностью. Такой тип корреляций носит название автокорреляций.

Концепция коррелированных неопределенностей во многом пересекается с концепцией общей и индивидуальной неопределенностей, обсуждаемых далее.

### **Independent versus Correlated Uncertainties**

In order to properly estimate and interpret uncertainty distributions of dose estimates, it is necessary to characterize how and to what extent uncertainties of doses and of input parameters are interrelated. Two uncertain quantities are said to be independent if knowledge about one quantity does not provide any information about the value of the other. Correlations can be either positive or negative. In an additive or multiplicative chain of terms, positive correlations will tend to increase uncertainty in the dose estimate. Negative correlations will tend to decrease uncertainties in the dose estimate. For example, mass balancing may induce negative correlation between estimates of environmental contamination in different geographical locations. The opposite is true for terms of a quotient or ratio. In general, only strong correlations among parameters that are important contributors to the uncertainty in dose will have a noticeable effect on the uncertainty in the dose estimate. For dose reconstructions supporting an epidemiological analysis, it is important to account for correlations of dose variability and dose uncertainty among individual members of the cohort. If there is correlation between the parameters in a model affecting the uncertainty of more than one individual, the individual uncertainties may not be affected, but the correlations may impact later calculations that use the individual doses.

Correlations exist both between individuals and within components of one individual's calculations. For instance, if doses are calculated annually, the biokinetic parameters used for a specific individual should not vary widely from year to year. Similarly, a single person's dietary and exposure habits should not vary widely from year to year, assuming his residence and job type are constant. These types of correlation are known as autocorrelations.

There is a good deal of overlap in the concepts of correlated uncertainties and shared/unshared uncertainties, discussed below.

### Модели неопределенности измерения (классическая модель) и обобщения (модель Берксона)

При рассмотрении неопределенности физических величин, таких как доза облучения, или параметров, используемых в модели расчета доз, важно принимать во внимание вероятностную природу погрешности или «ошибки» (т.е. разности между оцененным и неизвестным истинным значением величины). Во многих ситуациях оцененное значение отличается от истинного на величину ошибки, которая является статистически не зависящей от истинного значения, т.е.:

$$\text{оцененное значение} =$$

$$= \text{истинное значение} \pm \text{ошибка измерения},$$

где *ошибка измерения* представляет собой случайную переменную со средним арифметическим значением равным нулю и статистически не зависящую от истинного значения. Это классическая модель ошибки измерения, которая неизбежно возникает при индивидуальных наблюдениях за конкретной величиной, а каждое наблюдение связано со случайными отклонениями в результате неточности приборов или погрешностей регистрации. Важно понимать, что при наличии классической ошибки измерения наблюдаемая вариабельность индивидуальных оценок доз будет больше, чем индивидуальная вариабельность истинных доз. Увеличение индивидуальной вариабельности при дальнейшем использовании доз в эпидемиологических исследованиях приведет к смещению функции «доза–эффект» к нулевому значению (т.е. значение оцененного угла наклона функции «доза–эффект» будет ниже истинного). Напротив, в модели ошибки Берксона истинное значение величины отличается от ее оцененного значения на величину, которая является случайной и не зависящей от оцененного значения, т.е.:

$$\text{истинное значение} =$$

$$= \text{оцененное значение} + \text{индивидуальная поправка},$$

где *индивидуальная поправка* представляет собой случайную переменную со средним арифметическим значением, равным нулю, и статистически не зависящую от оцененного значения. Модель ошибки Берксона возникает в том случае, если, например, единственная несмещенная оценка среднего значения дозы облучения в группе людей присваивается в качестве истинного значения дозы каждому человеку из группы. Предположим, например, что измерение мощности экспозиционной дозы (МЭД) было выполнено только в одном месте на территории населенного пункта (НП) и это измерение может рассматриваться в качестве несмещенной оценки мощности экспозиционной дозы для всей территории данного НП. Обобщение результата единственного измерения МЭД, выполненного в одном месте, на всю территорию является источником ошибки обобщения (ошибки Берксона). В этом случае неопреде-

### Measurement (Classical) versus Grouping (Berkson) Uncertainty Models

When considering uncertainty in an estimate of quantity, such as a dose or a parameter in a dose calculation model, it is important to consider the probabilistic nature of the “error,” (i.e., of the difference between that estimate and the unknown true value of the quantity). In many settings the estimate differs from the true value by an error that is stochastically independent of the true value, that is:

$$\text{estimate} = \text{true value} + \text{measurement error},$$

where *measurement error* is a random variable with mean zero and is independent of *true value*. This is the classical measurement error model, which arises naturally in settings where observations are made on the individual units for which the quantities are defined, and each observation is subject to random perturbation due to such factors as instrument imprecision and recording errors. It is important to recognize that classical measurement error leads to an observed variability of individual dose estimates that will be larger than the variability of true dose among individuals. Inflation of the inter-individual variability of true dose caused by classical measurement error will bias the epidemiological dose-response function towards the null (i.e., the value of the slope of the dose-response will be smaller than if the dose-response were analyzed based on true values of dose). In contrast, the Berkson error model, in which the true value varies from the estimate by an error that is random and is independent of the estimate, can be written:

$$\text{true value} = \text{estimate} + \text{individual peculiarity},$$

where *individual peculiarity* is a random variable with mean zero and is independent of *estimate*. The Berkson model arises, for example, when a single estimate that is unbiased with respect to the mean dose for a group of individuals is applied as a surrogate for the true dose to each individual belonging to that group. For example, suppose only one location in a village exposed to external dose was measured, and that this dose rate reading can be considered to be an unbiased representation of the dose received by all other locations in the village. Using this single dose rate measurement to indicate the dose rate to all other locations in the village is a form of grouping (Berkson) error. Uncertainty is the difference between the individual’s true dose and the assigned dose. The assigned dose is assumed to be unbiased with respect to the true mean dose for the residents of the village. In this case, it is assumed that the single dose rate measurement would not

ленность представляет собой разность между истинным и присвоенным значением индивидуальной дозы. Предполагается, что присвоенное значение дозы является несмещенной оценкой по отношению к истинному среднему значению дозы для жителей НП. В нашем примере принимается допущение о том, что измерение МЭД, выполненное в одном месте, не будет являться смещенным по отношению к истинному среднему значению мощности дозы, полученному путем усреднения истинных значений МЭД для всех участков в пределах НП.

Следует отметить, что модели ошибки измерений и обобщений касаются разности между истинным и оцененным значением (для строго положительной величины с мультипликативной неопределенностью обе модели могут быть применены к логарифму как истинного, так и расчетного значений). В контексте реконструкции доз различия между классической и Берксоновской ошибками должны быть главным образом приняты во внимание при статистическом анализе взаимосвязи между дозой облучения и биологическим эффектом, например, заболеваемостью. Это можно проиллюстрировать на примере простой линейной регрессионной модели  $Y = \alpha + \beta Z + \varepsilon$ , где истинное значение независимой переменной  $Z$  неизвестно, а известна лишь оценка переменной  $Z$  с присущей ей неопределенностью, назовем ее  $X$ . Тогда зависимость  $Y$  от переменной  $X$  будет зависеть от природы неопределенности переменной  $X$ . Если  $X$  описывается классической моделью ошибки, тогда оценка угла наклона линейной регрессии будет снижаться (т.е. смещаться к нулю относительно истинного значения угла наклона  $\beta$ ). Однако, если  $X$  описывается ошибкой Берксона, тогда зависимость  $Y$  от  $X$  будет характеризоваться несмещенной оценкой  $\beta$ , но при этом дисперсия оценки  $\beta$  будет выше из-за ошибки обобщения в значениях  $X$  [10, 9, 12, 13].

Несмотря на то, что различие между ошибкой измерения и обобщения является первостепенным для анализа «доза–эффект», также важно рассматривать такое различие при оценивании распределений неопределенности значений входных параметров, используемых в модели реконструкции доз. Это даст уверенность в том, что неопределенности или наш уровень знаний о значениях используемых параметров тщательно образом приняты во внимание при оценке неопределенностей расчетных значений доз. Часто «параметры загрязнения окружающей среды» (обычно те, которые являются общими для всех людей, которые рассматриваются в конкретном расчете доз) характеризуются неопределенностью Берксона, а параметры, которые являются специфичными для человека (если таковые известны), характеризуются классической неопределенностью. Однако при отсутствии информации для конкретного человека очень часто используются обобщенные модели и допущения (например, коэффициенты перехода от поступления радионуклида в организм человека к дозе

be biased with respect to the true mean rate dose received by averaging true dose rates among all locations in the village.

Note that both the measurement and grouping error models concern the difference, on an additive scale, between the true and estimated values (for a strictly positive quantity with a multiplicative uncertainty, the measurement or grouping model might apply to true and estimated values of the logarithm of the quantity). In the context of dose reconstruction, the distinction between additive measurement and grouping errors is primarily of concern in statistical analyses of the relationships between uncertain doses and outcome variables such as disease incidence. This can be illustrated by the example of a simple linear regression model  $Y = \alpha + \beta Z + \varepsilon$ , where the true value of the predictor  $Z$  is unknown, and only an estimate of  $Z$  subject to uncertainty, say  $X$ , is available. Then the effect of regressing  $Y$  on  $X$  will depend on the nature of the uncertainty in  $X$ . If  $X$  is subject to classical measurement error, then the estimated slope will be attenuated (*i.e.*, biased toward zero relative to the true slope  $\beta$ ). But if  $X$  is subject to grouping (Berkson) error, then regressing  $Y$  on  $X$  will produce an unbiased estimate of  $\beta$ , although the variance of the estimate of  $\beta$  will be increased by the grouping error in  $X$  [9, 10, 12, 13].

Although the distinction between measurement and grouping errors is primarily a concern in dose-response analyses, it is also useful to consider this distinction when evaluating the uncertainty distributions of the input parameters in a dose reconstruction model. This will help ensure that the uncertainties or states of knowledge about the parameters are properly represented in the uncertainties of the calculated doses. Frequently, “environmental parameters” (generally those that are shared by all individuals across a particular dose realization) have grouping uncertainty structure, and those that are specific to the individual (if known) have a classical measurement uncertainty structure. However, generic models and assumptions are frequently used to fill in for lack of information about specific individuals (e.g., dose conversion factors); in this case, the parameter can be considered to be Berkson in nature, provided that it is unbiased with respect to the true mean for the group of individuals concerned.

Discussions of measurement and grouping error models are provided in NCRP [14, 15], Schaefer and Gilbert [10], and Carroll et al. [13].

внутреннего облучения органов). В этом случае, параметр по своей природе характеризуется моделью Берксона, при условии, что его значение является несмещенным по отношению к истинному среднему значению для рассматриваемой группы людей.

Обсуждение моделей ошибки измерений и обобщений, приводится в работах NCRP [14,15], Schaefer and Gilbert [10] и Carroll et al. [13].

### **Неопределенности типа А и типа В**

Неопределенность типа А относится к случайной изменчивости истинных величин (т.е. изменчивость в результате стохастических процессов). В области реконструкции доз облучения неопределенность типа А относится к процессам, которые влияют на случайные вариации истинной дозы среди членов определенной популяции или когорты. Это доля индивидуальной вариабельности, которая не может быть объяснена такими факторами, как места и сроки проживания на рассматриваемой территории, рацион, пол, возраст, стиль жизни, род профессиональной деятельности и др. Неопределенность типа А описывается с использованием частотных распределений, отражающих дисперсию истинных значений (например, индивидуальной дозы).

С другой стороны, неопределенность типа В представляет собой неполноту наших знаний о конкретной величине, которая имеет некоторое истинное, но неизвестное значение (как, например, при использовании среднего значения для коэффициента перехода цезия из травы в молоко). Неопределенность типа В описывается распределениями вероятности, включающими возможные истинные значения неизвестной, но единственно истинной величины. При отсутствии экспериментальных данных о повторных измерениях этой величины, распределения вероятности для типа В оцениваются субъективно; они отражают уровень современных знаний исследователя об истинной, но неизвестной величине. Неопределенность типа А относится к случайной неопределенности (aleatory uncertainty), а неопределенность по типу В относится к понятийной неопределенности (epistemic uncertainty) [16].

Часто неопределенности типов А и В присутствуют совместно. Они могут быть объединены в случаях, если доза облучения оценивается для конкретного человека, поскольку возможно только единственное истинное значение дозы для этого человека (т.е. неопределенность фактически относится к типу В). Распределение вероятностей, представляющее уровень современного знания об индивидуальной истинной дозе, состоит из альтернативных реализаций возможных истинных значений дозы для данного человека. Однако при реконструкции  $n$  истинных значений доз с учетом их индивидуальной вариабельности в определенной популяции или когорте (как, например, в КРТ), неопределенности типа А и типа В должны быть разделены. В этом слу-

### **Type-A Versus Type-B Uncertainties**

Type A uncertainty refers to random variability of true values (i.e., variability due to stochastic processes). With respect to dose reconstruction, Type A uncertainty refers to processes that affect random variability of true dose among members of a defined population or cohort. This is the amount of inter-individual variability that cannot be explained by factors such as location, residence history, diet, age, gender, lifestyle, occupation, etc. Type A uncertainty is described by frequency distributions representing the random variability of true values (e.g., of individual dose). In contrast, Type B uncertainty represents lack of complete knowledge about a unique quantity that has a true but unknown (or imperfectly known) value (e.g., the mean value of the milk transfer coefficient for cesium). Type B uncertainty is described by probability distributions composed of possibly true values for the unique unknown quantity. In the absence of experimental data composed of repeated measurements of the unique quantity, Type B probability distributions are subjectively derived; they reflect the investigator's state of knowledge about the true, unknown value. Type A uncertainty is related to aleatory uncertainty, while Type B uncertainty is related to epistemic uncertainty [16].

Often, both Type A and Type B uncertainty exist together. They can be combined when the dose reconstruction is focused on a specific individual, because there is only a single unique value of dose for that individual, (i.e., all uncertainty is effectively Type B). The probability distribution representing the state of knowledge of that individual's true dose is composed of alternative realizations of possibly true values of dose for that person. However, when the dose reconstruction is focused on estimating inter-individual variability of  $n$  true doses in a defined population or cohort (such as the Techa River cohort), Type A and Type B uncertainty must be separated. In this case, the dose reconstruction will be composed of alternative realizations of vectors of  $n$  individual doses, with the  $n$  number of individuals in the vector equal to the number of persons in the defined population. Each vector of true dose is an expression of inter-individual variability of dose due to (1) factors known to determine differences in exposure and dose, such as location, diet, residence history, gender, etc., and (2) unexplained variability due to stochastic processes (Type A uncertainty). Type B uncertainty is expressed among the entire set of  $m$

чае оценка доз будет состоять из альтернативных реализаций векторов для  $n$  индивидуальных доз, где  $n$  — число человек в рассматриваемой популяции (когорте). Каждый вектор истинной дозы есть выражение дисперсии дозы в результате: 1) факторов, детерминирующих различия в дозах облучения между индивидами в когорте, таких как места и сроки проживания на загрязненной территории, пол, возраст и др.; 2) стохастической вариабельности в результате случайных процессов (неопределенность типа А). Неопределенность типа В проявляется среди всего набора  $m$ -реализаций векторов для  $n$  доз. Наличие неопределенности типа В приведет к тому, что каждый вектор индивидуальных доз будет иметь единственное значение для каждого параметра, зафиксированного, но неизвестного. Дополнительная информация о неопределенностях типа А и типа В и методах их разделения при реконструкции доз, направленной на оценивание индивидуальной вариабельности истинных доз, обсуждаются в публикациях IAEA [16] и NCRP [11, 15, 17].

В случаях, когда для оценки распределения типа А используются эмпирические данные, следует постараться исключить неопределенность, связанную с классической ошибкой измерения, чтобы частотное распределение истинных значений отражало вариабельность истинных значений [12]. Если ошибка измерения не может быть устранена, то оценка индивидуальной вариабельности доз будет несколько превышать истинную индивидуальную вариабельность доз. Как уже сказано, классическая ошибка измерений будет завышать оценку индивидуальной вариабельности истинных доз. В случаях, если целью реконструкции доз является поддержка эпидемиологических исследований, завышение индивидуальной вариабельности истинной дозы в когорте является нежелательным, т.к. это приведет к завышению статистической мощности и смещению углового наклона зависимости «доза–эффект» к нулевой гипотезе [12, 13, 10]). В работе Hofer [12] показан пример по методам для исключения классической ошибки измерений из распределения типа А, представляющий «чистую» случайную индивидуальную вариабельность истинных значений доз в когорте.

Понятия неопределенностей типа А/В во многом пересекаются с понятиями общих/индивидуальных неопределенностей, которые обсуждаются далее.

### **Общие и индивидуальные неопределенности**

При выполнении анализа неопределенностей необходимо определить, имеет ли каждый параметр модели единственное значение для каждого человека, для которого оценивается доза облучения, или значение параметра является общим для группы людей или всей когорты. Общие или совместные значения параметров характерны, например, для случаев, когда облучение нескольких человек произошло от

realizations of vectors of  $n$  doses. The presence of Type B uncertainty will result in each vector of individual doses having a unique value for each quantity that is fixed but unknown. IAEA [16], NCRP [11, 15, 17] provide additional discussion about and methods for separating Type A from Type B uncertainty when dose reconstruction is focused on the estimation of inter-individual variability of true dose.

When empirical data are used to define a Type A distribution, efforts should be made to remove uncertainty due to classical measurement error to ensure that the frequency distribution of true values reflects the variability of true values [12]. If classical measurement error is not removed, the estimated variability of individual doses will likely exceed inter-individual variability of true doses. As mentioned previously, classical measurement error will inflate the estimate of inter-individual variability of true dose. When dose reconstruction is intended to support an epidemiological investigation, inflation of the estimate of inter-individual variability of true dose is undesirable because overestimation of the variability of individual doses in a cohort will produce a misleading overestimate of statistical power and will suppress the slope of the dose-response towards the null hypothesis [10, 12, 13]). Hofer [12] gives an example of methods for removing classical measurement error from a Type-A distribution representing pure random inter-individual variability of true doses in a cohort.

There is a good deal of overlap in the concepts of Type A/Type B and shared/unshared uncertainties, discussed below.

### **Shared and Unshared Uncertainties**

It can be important to determine whether each parameter in the model has a unique value for each person whose dose is to be estimated, or whether the parameter value is common to some or all individuals. Common or “shared” parameter values can occur, for example, when several individuals are exposed to radiation from a common environmental source for which the contamination level or exposure rate is uncertain. Uncertainty about a parameter that is common to multiple individuals can induce correlations in the uncertainties of those individuals’ dose estimates.

Because each individual has only one uniquely true value of dose, uncertainties in fixed quantities shared

общего источника в окружающей среде, для которого уровень загрязнения или мощность дозы являются неопределенными. Неопределенность параметра, общего для нескольких человек, может привести к корреляции в неопределенностях оценок их доз.

Поскольку для каждого человека существует одно единственное истинное значение дозы, неопределенности фиксированных параметров, являющихся общими для какой-либо подгруппы людей из когорты, являются видом систематической ошибки или смещения. Истинное значение дозы для людей из подгруппы может быть ниже или выше центрального значения. Оно не может быть одновременно выше для одних индивидов и ниже для других индивидов в подгруппе. Присутствие систематической ошибки или смещения может иметь более выраженный эффект при анализе статистической мощности и зависимости «доза—эффект» в эпидемиологическом исследовании, чем наличие случайной ошибки, такой как инструментальная ошибка или ошибка Берксона [10, 13].

Неопределенности, которые являются общими, могут оказывать влияние на различные подгруппы в когорте в разной степени. Например, неопределенность параметров источника загрязнения (т.е. выбросов/сбросов радиоактивных отходов предприятия) будет в определенной степени оказывать влияние на всех людей из облученной популяции. Другими словами, если истинное значение сбросов в два раза ниже центральной (наилучшей) оценки, то истинные уровни облучения всех людей из популяции будут в два раза ниже, чем рассчитанные на основе центральной оценки параметров сбросов. Подобным образом, если истинное значение сбросов в два раза выше центральной оценки, то уровни облучения для всех людей из популяции будут в два раза выше, чем рассчитанные на основе центральной оценки параметров сбросов.

С другой стороны, неопределенность значений центральной оценки параметров модели, описывающей переход радионуклидов из рациона коровы в молоко, будет оказывать систематический эффект только для людей, потребляющих коровье молоко. Более того, степень неопределенности центральной оценки параметра модели может изменяться в зависимости от особенностей рациона питания; таким образом, не для всех потребителей коровьего молока систематический сдвиг в оценке дозы будет одинаковым. Для тех людей, которые употребляют незначительное количество коровьего молока, дозы облучения от других источников будут более значимыми, а влияние систематической ошибки в центральной оценке коэффициента перехода радионуклида в коровье молоко будет менее значительным по сравнению с людьми, употребляющими молоко в больших количествах. Для этой группы людей дозы облучения органов будут определяться загрязнением пищевой цепочки «воздух—пастбище—корова—молоко». Общие или систематические неопределенности наиболее вероятно возникают для фиксирован-

among individual members of cohort subgroups are a type of systematic error or bias. The true dose among members of a subgroup may be either higher or lower than the central value. It will not be both higher for some persons and lower for others of the same group at the same time. The presence of systematic errors or bias can have a more profound effect on the interpretation of the statistical power and dose-response of an epidemiological study than sources of uncertainty that are random, such as those identified as classical or Berkson errors [10, 13].

Shared uncertainties may also affect different cohort subgroups to varying degrees. For example, uncertainty in the source term (or release of radioactivity from a facility) affects nearly all members of an exposed population to the same degree. In other words, if the true release is half the central, or “best estimate,” all exposed individuals will be exposed to half of the amount calculated using the central estimate of the release. Likewise, if the true release is twice the central estimate, all exposed individuals would be exposed to twice the amount calculated using the central release estimate. On the other hand, uncertainty in the central estimate of the model parameters representing a transfer of radioactive substance from the cow’s diet to fresh milk would be a systematic uncertainty affecting only those members of the cohort who consumed fresh milk. Furthermore, the degree of uncertainty in the central value of this model parameter could vary from dairy to dairy; thus, not every consumer of fresh milk would have a dose that is systematically over- or under- estimated to the same extent. Individuals who consumed low amounts of milk and, thus, had significant doses from other exposure pathways would also be less affected by systematic errors in the central estimate of the transfer of radioactive material from a cow’s diet to fresh milk than would an individual who consumed large quantities of milk and whose total organ dose was effectively dominated by the dose from the air-pasture-cow-milk pathway. Shared or systematic uncertainties are most likely to occur in model parameters that are fixed but imperfectly known quantities. The presence of shared uncertainties resulting from systematic uncertainties in model parameters are addressed using the same framework as that used to separate Type A uncertainties from Type B uncertainties.

Knowledge of the existence and likely magnitude of correlations arising from shared parameters is essential to proper interpretation and use of the dose estimates,

ных параметров моделей, величина которых не известна точно. Наличие общих неопределенностей, вытекающих из систематических неопределенностей параметров модели, решается по аналогии с разделением неопределенностей типов А и В.

Для корректной интерпретации и использования оценок доз, особенно в контексте эпидемиологических исследований, важно учитывать наличие и возможную степень корреляции, возникающей при использовании общих параметров [9, 15, 18].

К счастью, методы разделения неопределенностей типа А/В и общих/индивидуальных неопределенностей являются аналогичными.

### **Численные методы**

Численное распространение неопределенности (propagation of uncertainty) обычно выполняется с использованием имитационных методов (метод Монте-Карло), в которых реализация каждого входного параметра, характеризующегося неопределенностью, генерируется на основе его предполагаемого распределения и затем используется в детерминированном уравнении для единичной реализации оценки дозы. Этот процесс повторяется многократно, и путем использования все новых реализаций значений параметров и входных данных получается набор доз. В результате эмпирическое распределение многократных реализаций дозы характеризует неопределенность оцененного значения дозы.

Часто для численного распространения неопределенностей параметров в модели используется метод латинского гиперкуба. В этом случае распределение неопределенности параметров модели разбивается на  $N$  равновероятных интервалов, где  $N$  – это число итераций (или наборов случайных значений параметров, которые используются для генерации распределения неопределенности результата моделирования), и значения в каждом из  $N$  интервалов выбираются случайным образом. В этом случае обеспечивается выбор значений параметров из всего интервала функции распределения неопределенностей. Генерация выборки методом латинского гиперкуба приводит к более устойчивому распределению неопределенности результата моделирования для заданного количества итераций, чем традиционным методом Монте-Карло, в котором значения параметров генерируются случайным образом в каждой итерации без учета результата предыдущих итераций. Это преимущество метода латинского гиперкуба особенно важно в том случае, если первостепенным для исследователя является значение верхней границы распределения неопределенности дозы, а также длительность выполнения расчетов, т.к. затраты времени для генерирования случайных значений параметров могут оказаться существенными из-за сложности модели.

especially in the context of epidemiological studies [9, 15, 18].

The methods of handling separation of Type A/Type B and shared/unshared uncertainties are, fortunately, the same.

### **Numerical Methods**

Numerical propagation of uncertainty is typically performed by simulation (Monte Carlo) techniques, in which a realization of each uncertain input parameter is generated from its assumed distribution and used in a deterministic calculation to derive a single realization of the estimated dose. This process is repeated numerous times, using new realizations of the uncertain parameters and inputs at each iteration, to produce a set of dose estimates. The empirical distribution function of the resulting dose realizations characterizes the uncertainty of the dose estimate.

A particular type of Monte Carlo sampling that is commonly used in numerical propagation of parameter uncertainties through a model is referred to as Latin hypercube sampling. In this method, uncertainty distributions of model parameters are divided into  $N$  intervals of equal probability, where  $N$  is the number of iterations (sets of random samples of parameters used to generate an uncertainty distribution of model output), and values in each of the  $N$  intervals are selected in random order. By thus assuring that the entire range of uncertainty distributions of all parameters is sampled, Latin hypercube sampling produces a more robust uncertainty distribution of model output for a given number of iterations than conventional Monte Carlo sampling in which parameter values are selected at random in each iteration without regard for previously sampled values. This advantage is especially important when an upper credibility limit of an uncertainty distribution of dose is the quantity of primary interest and the time required to perform many iterations of random sampling is long due to the complexity of a model.

## Двумерные методы Монте-Карло

Эмпирические распределения оцененных значений дозы могут быть независимо сгенерированы для отдельных людей, для которых нет общих источников неопределенности. Однако в случае, когда параметры с неопределенностью, используемые в расчетах доз, являются общими для нескольких человек (коррелированные или общие параметры) или в случаях, когда случайная и понятийная неопределенности присутствуют одновременно, следует генерировать совместные эмпирические распределения коррелированных неопределенностей. Это может быть достигнуто модернизацией процесса Монте-Карло таким образом, чтобы реализации общих параметров методом Монте-Карло могли быть сохранены для повторного использования.

На первом этапе выполняется идентификация параметров с неопределенностью, которые являются общими для группы людей или для всех людей из когорты. Далее для каждого параметра определяются субъективные распределения вероятностей, которые отражают современный уровень нашего знания об его истинном, но неизвестном значении. Из этих распределений формируется выборка альтернативных реализаций метода Монте-Карло. Эти альтернативные реализации значений общих параметров могут быть сохранены в статической базе данных.

На втором этапе метод Монте-Карло используется для получения альтернативной реализации распределений индивидуальных параметров для каждого конкретного человека. Путем комбинации их с векторами общих параметров получают совместные распределения результатов для всех людей из когорты. Для получения индивидуального доверительного интервала число альтернативных реализаций дозы должно быть достаточно большим. Такой двухэтапный процесс называют двумерным анализом Монте-Карло [15, 17].

### Расчет дозы облучения

Метод, используемый в дозиметрической системе реки Течи TRDS-2009D для расчета доз, может быть записан в виде одного уравнения (1), состоящего из трех частей [8]:

$$D_{o,y,j} = \sum_{y=y_{\min}}^{P \leq Y} \sum_L M_{y,L,j} \left[ \begin{array}{l} \left( \sum_r I_{y,r,L}^*(\tau_i) DF_{r,o,y-y}(\tau_i) \right) + A_0 D_{Riv,L,y} (T_1(\tau_i) + R_{out/Riv,L} (T_2(\tau_i) + R_{in/out} T_3(\tau_i))) + \\ G_{Sr,L} \delta_y \left\{ \sum_r E_{r,y}(\tau_i) DF_{r,o,y-y}(\tau_i) + A_0(\tau_i) D_{Sr,y} [(1 - T_3(\tau_i)) + R_{in/out} T_3(\tau_i)] \right\} \\ + \sum_{e_i} X_{o,j}(e_i, y, \tau_i) \end{array} \right] \quad (1)$$

В уравнении (1) верхняя строка во внутренних скобках представляет собой расчет дозы облучения в результате загрязнения реки Течи; средняя строка представляет собой расчет дозы облучения в резуль-

## Two-Dimensional Monte Carlo Methods

The empirical distributions of dose estimates can be generated independently for separate individuals who share no common sources of uncertainty. However, when uncertain parameters used in the calculation of estimated doses are common to more than one individual (either correlated or shared), or when epistemic and aleatory uncertainties are both present, the empirical joint distributions of the correlated uncertainties should be generated. This can be accomplished by modularizing the Monte Carlo process, so that the Monte Carlo realizations of parameters that are shared among individuals can be preserved for repeated use.

The first stage is to identify uncertain quantities that are a common to groups or all individuals in the cohort. For each of these quantities, subjective probability distributions are specified that reflect the state of knowledge about the true but unknown values. From these distributions, a Monte Carlo sample of alternative realizations is drawn. These alternative realizations of shared parameters may be saved in a static database.

The second stage involves use of Monte Carlo procedures to produce an alternative realization of the distributions of the unshared parameters for each individual. When combined with the vectors of shared parameters, the calculation results in the joint distributions of uncertain results for all members of the cohort. The number of alternative realizations of the dose is made large enough to enable a subjective confidence interval to be obtained. This two-step process is referred to as a two-dimensional Monte Carlo analysis [15, 17].

### Calculation of Dose

The method being used for the TRDS-2009D dose calculations is relatively simple and can be written as a single equation in three parts as [8]:

Here the upper line in the internal brackets represents the dose from the Techa River, the middle line represents dose from exposure to fallout from the East Urals

тате проживания на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС) и нижняя строка описывает расчет дозы медицинского облучения в результате диагностических рентгенологических процедур. При этом дозы облучения от поступления радиоактивного йода в результате атмосферных выбросов ПО «Маяк» теоретически включены в расчет доз в TRDS, однако значения параметров, необходимые для расчета доз, будут включены в систему позднее. Описание параметров уравнения (1) приведено далее:

$D_{o,Y,i}$  = поглощенная доза (Гр) в органе  $o$  человека  $i$ , накопленная к календарному году  $Y$ ;

$Y$  = конечная временная точка расчета доз для конкретного человека (может изменяться в интервале 1950–2015);

$b_i$  = год рождения человека  $i$ ;

$y$  = год радиационного воздействия (внешнего облучения или поступления радионуклидов). Минимальное значение  $y$  при суммировании равно  $y_{\min} = \text{MAX}\{1949, b_i\}$ , год приезда в НП, расположенные вдоль реки Теча или на территории ВУРСа);

$P$  = конечная временная точка внешнего облучения или поступления радионуклидов для конкретного человека (может изменяться в интервале  $1950 - Y, P \leq Y$ );

$L$  = идентификатор (код) населенного пункта (НП);

$M_{y,L,i}$  = доля времени в году  $y$ , прожитая человеком  $i$  в НП  $L$ ;

$r$  = идентификатор радионуклида ( $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{141}\text{Ce}$ ,  $^{144}\text{Ce}$  или  $^{131}\text{I}$ );

$\tau_i$  =  $y - b_i$ , возраст человека  $i$  в году  $y$  (лет);

$I_{y,r,L}^*$  = поступление (Бк) в календарном году  $y$  радионуклида  $r$  в НП  $L$  (функция возраста  $\tau$ , связанная с годом  $y$ );

$I^*$  =  $I \times \zeta_i$ , где  $\zeta_i$  – коэффициент, определенный для каждого человека  $i$ , равный среднему поступлению в НП,  $IMR_i$  (индивидуальный модельный коэффициент), или  $HSR_i$  (хозяйственный модельный коэффициент), обсуждаемый далее;

$DF_{r,o,Y-y}$  = дозовый коэффициент (Гр/Бк) для дозы, накопленной в органе  $o$  в период времени  $Y-y$  после поступления радионуклида  $r$  в календарном году  $y$  (функция возраста и пола, если применимо);

$Y-y$  = время после поступления, годы;

$A_o$  = коэффициент перехода от поглощенной дозы в воздухе к поглощенной дозе в органе  $o$  (функция возраста, связанная с годом  $y$ );

$D_{Riv,L,y}$  = поглощенная доза в воздухе у уреза воды в НП  $L$  в календарном году  $y$  (Гр);

$R_{out/Riv,L}$  = отношение мощности дозы в воздухе на территории расположения дома к мощности дозы в воздухе у уреза воды в НП  $L$ ;

$R_{in/out}$  = отношение мощности дозы в воздухе внутри жилых помещений к мощности дозы вне помещений;

Radioactive Trace (EURT), and the lower line represents dose from medical x-ray examinations. (Note that doses from ingestion of iodine from Mayak releases are theoretically included in the TRDS, but the parameters will only be calculated and added to the system at a later date). The individual components are:

$D_{o,Y,i}$  = absorbed dose (Gy) in organ  $o$  accumulated through calendar year  $Y$  to individual  $i$ ;

$Y$  = the calculational endpoint for a particular individual (can vary according to the analyst's wishes within the range 1950–2015);

$b_i$  = the year of birth of individual  $i$ ;

$y$  = year of environmental exposure (external irradiation and intake of nuclides). The minimum value of  $y$  in the summation is  $y_{\min} = \text{MAX}\{1949, b_i\}$ , year of first moving to the Techa River or EURT area);

$P$  = the endpoint of external exposure and intake of radionuclides for a particular individual (can vary within the range  $1950 - Y, P \leq Y$ ).

$L$  = location (settlement) identifier;

$M_{y,L,i}$  = fraction of year  $y$  spent in location  $L$  by individual  $i$ ;

$r$  = identifier of ingested radionuclide ( $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{141}\text{Ce}$ ,  $^{144}\text{Ce}$  or  $^{131}\text{I}$ );

$\tau_i$  =  $y - b_i$ , the age of individual  $i$  in year  $y$  (years);

$I_{y,r,L}^*$  = intake function (Bq) for year  $y$ , radionuclide  $r$ , and location  $L$  (function of age  $\tau$ , related to  $y$ );

$I^*$  =  $I \times \zeta_i$ , where  $\zeta_i$  is a modifier predetermined for individual  $i$  equal to the village average,  $IMR_i$  (individual to model ratio), or  $HSR_i$  (household-specific ratio), discussed below;

$DF_{r,o,Y-y}$  = conversion factor ( $\text{Gy Bq}^{-1}$ ) for dose accumulated in organ  $o$  in year  $Y-y$  from intake of radionuclide  $r$  in year  $y$  (function of age, related to  $y$ , and gender if applicable);

$Y-y$  = time since intake, years;

$A_o$  = conversion factor from absorbed dose in air to absorbed dose in organ  $o$  (function of age, related to  $y$ );

$D_{Riv,L,y}$  = absorbed dose in air near river shoreline at location  $L$  received in year  $y$  (Gy).

$R_{out/Riv,L}$  = ratio of dose rate in air outdoors at homes to the dose rate by the river at location  $L$ ;

$R_{in/out}$  = ratio of dose rate in air indoors to that outdoors;

$T_1$  = доля времени, проводимая на берегу реки (относительно всего года) (функция возраста, связанная с годом  $y$ );  
 $T_2$  = доля времени, проводимая на территории НП (относительно всего года) (функция возраста, связанная с годом  $y$ );  
 $T_3$  = доля времени, проводимая внутри помещений (относительно всего года) (функция возраста, связанная с годом  $y$ );  
 $G_{Sr,L}$  = плотность загрязнения почвы  $^{90}\text{Sr}$  ( $\text{Бк}/\text{м}^2$ ) в НП  $L$  в результате образования ВУРСа;  
 $\delta_y$  = 0 или 1 в зависимости от года  $y$ . Для ВУРСа  $\delta_y = 0$  при  $y < 1957$ ;  
 $E_{r,y}$  = поступление радионуклида  $r$  при единичной плотности загрязнения почвы  $^{90}\text{Sr}$  в календарном году  $y$  на территории ВУРСа [ $\text{Бк}/(\text{Бк}/\text{м}^2)$ ] (функция возраста, связанная с годом  $y$ ), описано далее;  
 $D_{Sr,y}$  = поглощенная доза в воздухе ( $\text{Гр}$ ) в календарном году  $y$  при единичной плотности загрязнения почвы  $^{90}\text{Sr}$  ( $\text{Бк}/\text{м}^2$ ) в результате образования ВУРСа;  
 $X_o(e,y,\tau)$  = поглощенная доза ( $\text{Гр}$ ) в органе  $o$  в результате медицинского обследования  $e$  в календарном году  $y$  в возрасте  $\tau$ .

Зависящая от времени функция поступления радионуклидов  $I_{y,r,L}$  была получена на основе результатов измерений поверхностной бета-активности эмали передних зубов, выполненных зубным детектором, и содержания  $^{90}\text{Sr}$  в организме человека на спектрометре излучений СИЧ-9.1. Функция, описывающая поступление радионуклида  $r$  в населенном пункте  $L$  для календарного года  $y$ , рассчитывается с использованием выражения (2):

$$I_{y,r,L}(\tau) = I_{y,R}^{Sr90} \times \alpha_{\tau,R}^{Sr90} \times f_L^{Sr90} \times R_{y,r/Sr}^L \quad (2)$$

где:

$I_{y,R}^{Sr90}$  = среднее поступление  $^{90}\text{Sr}$  взрослым жителям реперного населенного пункта  $R$  (Муслиумово) в календарном году  $y$ ;  
 $\alpha_{\tau,R}^{Sr90}$  = коэффициент перехода от среднего поступления  $^{90}\text{Sr}$  для взрослых к поступлению детям определенной возрастной группы в календарном году  $y$ ;  
 $f_L^{Sr90}$  = отношение поступления  $^{90}\text{Sr}$  для НП  $L$  к поступлению  $^{90}\text{Sr}$  для жителей реперного НП;  
 $R_{y,r/Sr}^L$  = отношение поступления радионуклида  $r$  к поступлению  $^{90}\text{Sr}$  в НП  $L$  в календарном году  $y$ .

Для оценивания неопределенностей расчетных значений доз в TRDS решение уравнения (1) выполняется методом Монте-Карло. В данной работе оценены все необходимые входные данные, требуемые для проведения анализа. Результаты оценивания определяются запросом пользователя, т.е. оценивание может быть выполнено для конкретного человека, конкретной конечной точки расчета доз  $Y$ , инте-

$T_1$  = time spent on river bank (relative to whole year) (function of age, related to  $y$ );  
 $T_2$  = time spent outdoors (relative to whole year) (function of age, related to  $y$ );  
 $T_3$  = time spent indoors (relative to whole year) (function of age, related to  $y$ ).  
 $G_{Sr,L}$  = surface deposition of  $^{90}\text{Sr}$  ( $\text{Bq m}^{-2}$ ) at location  $L$  from fallout from the EURT;  
 $\delta_y$  = 0 or 1 depending on  $y$ . For the EURT,  $\delta_y = 0$  for  $y < 1957$ ;  
 $E_{r,y}$  = intake function per unit surface deposition of  $^{90}\text{Sr}$  ( $\text{Bq per Bq m}^{-2}$ ) for EURT for year  $y$ , radionuclide  $r$  (function of age, related to  $y$ ), further described below;  
 $D_{Sr,y}$  = absorbed dose in air ( $\text{Gy}$ ) received in year  $y$  per unit surface deposition of  $^{90}\text{Sr}$  ( $\text{Bq m}^{-2}$ ) from fallout from the EURT; and  
 $X_o(e,y,\tau)$  = absorbed dose to organ  $o$  ( $\text{Gy}$ ) from medical examination  $e$  in year  $y$  for age  $\tau$ .

The intake function  $I_{y,r,L}$  is a complex, time-dependent function derived from a combination of data from tooth beta counting and the whole-body counter. The village-average intake function  $I_{y,r,L}$  for each year  $y$  is calculated as:

where

$I_{y,R}^{Sr90}$  = annual  $^{90}\text{Sr}$  intake for adult residents of the reference settlement (Muslyumovo) in year  $y$ ;  
 $\alpha_{\tau,R}^{Sr90}$  = annual  $^{90}\text{Sr}$  intake for other age groups relative to that for adults living in the reference settlement;  
 $f_L^{Sr90}$  = annual ratio of  $^{90}\text{Sr}$  intake for location  $L$  to  $^{90}\text{Sr}$  intake for residents of the reference settlement; and  
 $R_{y,r/Sr}^L$  = annual ratio of radionuclide ( $r$ )-to- $^{90}\text{Sr}$  intake for location  $L$  in year  $y$ .

The TRDS calculation of uncertainty is based on a Monte Carlo approach to implement calculation of the basic dose equation. The required inputs for these analyses have been developed. The actual results vary depending on the analysis being undertaken, i.e., the specific individual, the particular calculation endpoint year  $Y$ , organ of interest  $o$ , and route of exposure (internal or external). Because the

ресующего органа  $o$ , пути облучения (внутреннее или внешнее). Для эпидемиологического анализа в КРТ расчеты доз выполняются раздельно для внутреннего, внешнего и медицинского облучения. Несмотря на то, что разделение на пять более простых уравнений, по-видимому, может упростить расчет дозы, такой подход повышает сложность расчетного процесса в связи с необходимостью сохранения различных меж-индивидуальных корреляций (общие параметры и параметры типа В) и внутри-индивидуальных корреляций (автокорреляций), как обсуждалось ранее.

### **Описание параметров уравнения для расчета доз**

Параметры, которые используются для описания загрязнения окружающей среды, в которой проживает человек, обычно характеризуются общей неопределенностью. Индивидуальными параметрами являются те, которые уникальны для каждого человека; в дозиметрической системе TRDS таких параметров несколько. В целом предполагается, что входные параметры, которые являются результатом моделирования (например, дозовые коэффициенты), характеризуются неопределенностью Берксона, поскольку такие параметры в действительности не могут быть уникальными для любого человека, даже если в моделировании используется индивидуальный поправочный коэффициент (поскольку поправочные коэффициенты являются общими для всех людей из данной группы). Значения общих параметров и параметров типа В выбираются в процессе генерации многократных реализаций; значения индивидуальных параметров и параметров типа А могут изменяться внутри каждой реализации. Параметры типа АВ состоят из компонент каждого типа (аналогично для параметров типа ВВ).

Присвоение типов неопределенности значениям различных параметров дозиметрической системы TRDS приводится в таблице. Следует отметить, что «общие/индивидуальные» и «тип А/тип В» параметры приводятся раздельно, но используются сходным образом.

epidemiologists have expressed the desire to separately analyze the internal, external, and medical doses, the calculations are separated into their component parts. While this separation into five simpler equations may seem to simplify each individual calculation, it increases the complexity of the calculation process because of the need to ensure the retention of the various inter-individual correlations (shared and Type B parameters) and the intra-individual correlations (autocorrelations) as discussed above.

### **Parameters of the Dosimetric Equation**

The parameters that describe the contamination of the environment in which the subjects live generally have a shared uncertainty. Only inputs that are exclusive to a single individual are unshared; in the TRDS system, there are actually quite few of these. In general, it is assumed that inputs that are themselves the products of models (such as the dose conversion factors) have a shared Berkson uncertainty structure, because they are not really specific to any one individual even if an individual modifying factor is applied (because the individual modifiers are generic to all individuals of this type). Shared and Type B parameters are both selected by realization; unshared and Type A parameters are allowed to vary within a realization. Type AB parameters have components of each type (and the one Type BB is similar).

An assignment of the uncertainty structure to the various TRDS parameters is given in table. Note that “shared/unshared” and “Type A/Type B” are listed separately, but will be handled in a similar fashion.

Таблица

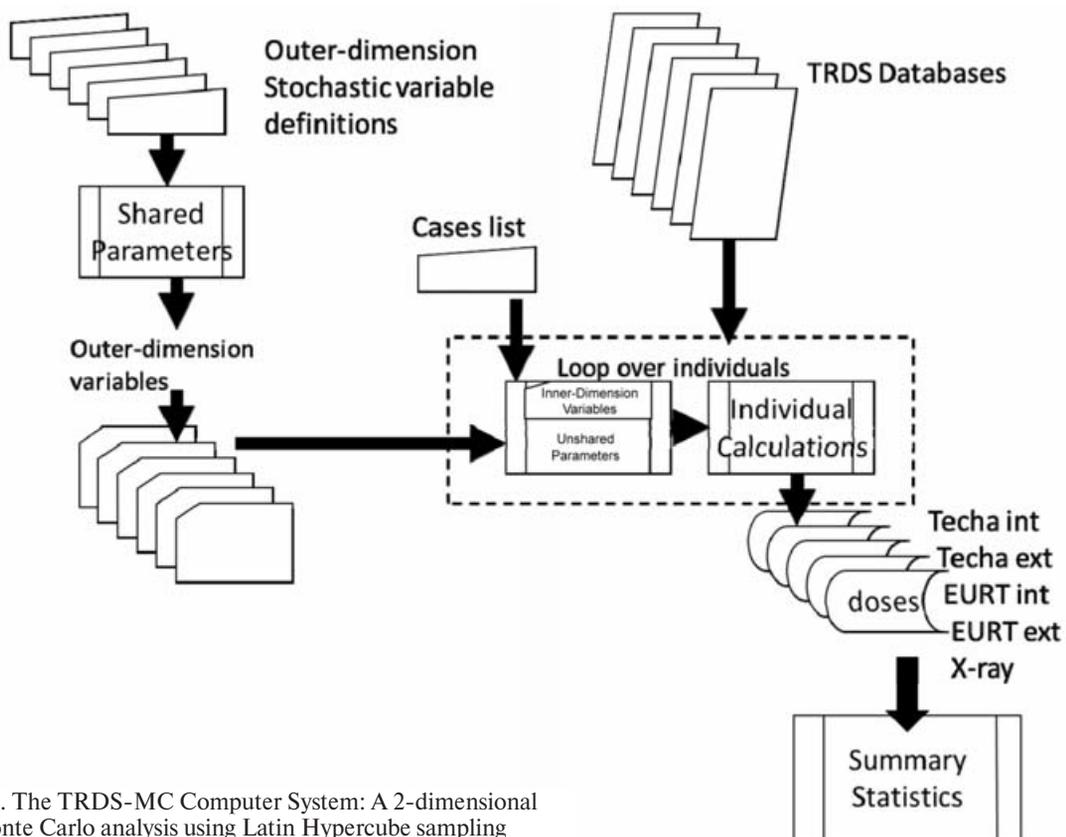
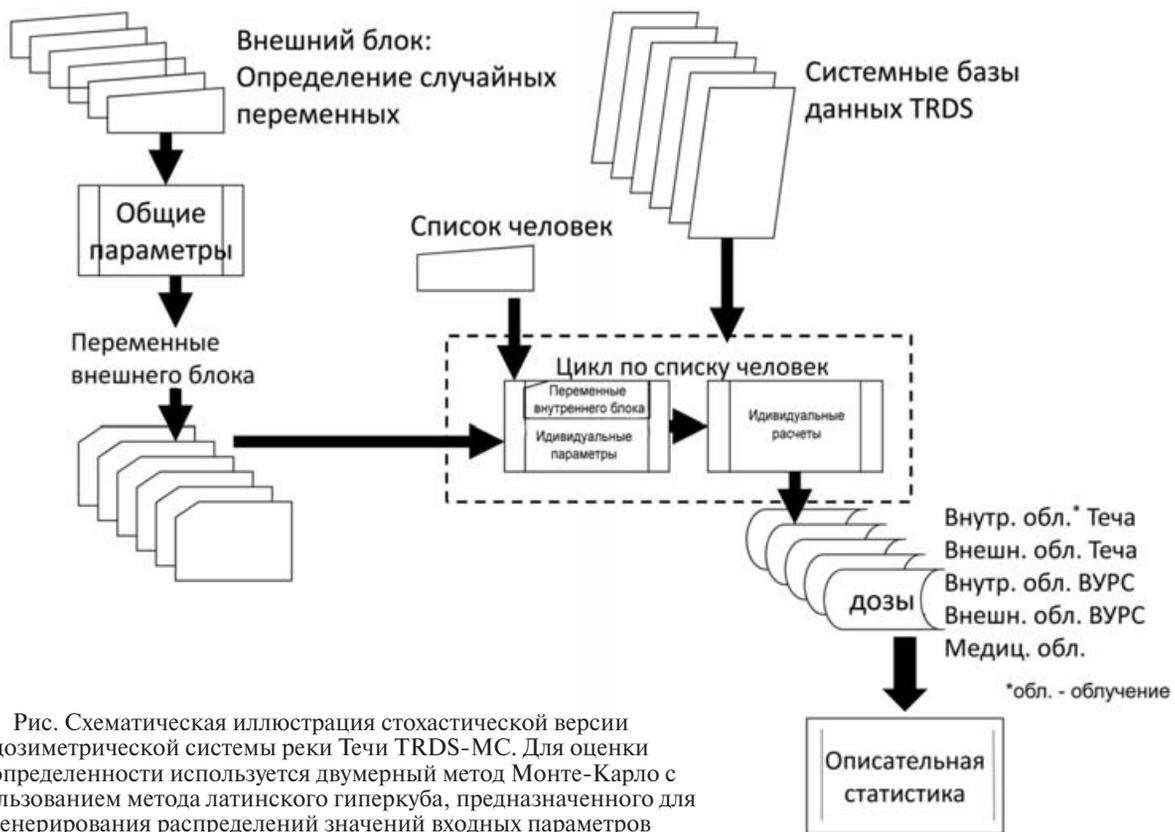
## Характеристики неопределенностей параметров, используемых в TRDS, для расчета доз облучения

Параметр	Определение	Характеристика параметра	Структура	Тип (А/В)
<i>Постоянные – используются для индивидуализации доз облучения</i>				
$Y$	Конечная временная точка расчета для конкретного человека (может изменяться в интервале 1950–2015)	Определен для каждого человека	Постоянная	
$y$	Год радиационного воздействия (внешнего облучения или поступления радионуклидов)	Определен для каждого человека	Постоянная	
$P$	Конечная временная точка внешнего облучения или поступления радионуклидов для конкретного человека (может изменяться в интервале 1950 – $Y$ , $P \leq Y$ )	Определен для каждого человека	Постоянная	
$L$	Идентификатор (код) населенного пункта (НП)	Определен для каждого человека	Постоянная	
$r$	Идентификатор радионуклида, поступившего в организм человека	Определен для каждого человека	Постоянная	
$Y-y$	Время после поступления, годы	Определен для каждого человека	Постоянная	
$e$	Число рентгенодиагностических обследований	Определен для каждого человека	Постоянная	
$b$	Год рождения человека	Определен для каждого человека	Постоянная	
<i>Общие параметры для расчета доз внутреннего и внешнего облучения</i>				
$M_{y,L,i}$	Доля времени в году $y$ , прожитая в НП $L$ человеком $i$	Индивидуальный	Классическая модель	В
$G_{SoL}$	Плотность загрязнения почвы $^{90}\text{Sr}$ (Бк/м <sup>2</sup> ) в НП $L$ в результате образования ВУРСа	Общий для населенного пункта	Классическая модель	АВ
<i>Параметры для расчета доз внутреннего облучения</i>				
$I_{y,rL}$	Поступление (Бк) в календарном году $y$ , радионуклида $r$ , в НП $L$ (функция возраста, связанная с годом $y$ )	Состоит из следующих параметров:		
$I_{y,R}^{Sr90}$	Среднее поступление $^{90}\text{Sr}$ взрослым жителям реперного НП $R$ (Мусломово) в календарном году $y$	Общий	Модель Берксона	АВ
$\alpha_{\tau,R}^{Sr90}$	Коэффициент перехода от среднего поступления $^{90}\text{Sr}$ в реперном НП для взрослых к поступлению детям определенной возрастной группы в году $y$	Общий для группы одного возраста	Модель Берксона	АВ
$f_L^{Sr90}$	Отношение поступления $^{90}\text{Sr}$ для НП $L$ к поступлению $^{90}\text{Sr}$ для жителей реперного НП	Общий для населенного пункта	Модель Берксона	АВ
$R_{y,r/Sr}^L$	Отношение поступления радионуклида $r$ к поступлению $^{90}\text{Sr}$ в НП $L$ в календарном году $y$	Общий для населенного пункта	Модель Берксона	ВВ
$IMR$	Индивидуальный модельный коэффициент; отклонение параметра для конкретного человека от $I_{y,rL}$ (на основе измерений $^{90}\text{Sr}$ для человека, $A_{ind}(\tau, t_m)$ )	Индивидуальный, если имеются измерения $^{90}\text{Sr}$	Классическая модель	А
$IMR$	Используется для людей без измерений $^{90}\text{Sr}$ ; принимается равным 1,0 с широким диапазоном неопределенностей, полученным на основе распределения $IMR$ для жителей села	Общий, если отсутствуют инд. измерения $^{90}\text{Sr}$	Модель Берксона	В
$HSR$	Хозяйственный модельный коэффициент – среднее значение $IMR$ для жителей внутри одного хозяйства	Общий для хозяйства	Классическая модель	АВ
$E_{ky}$	Поступление радионуклида $r$ при единичной плотности загрязнения почвы $^{90}\text{Sr}$ [Бк/(Бк/м <sup>2</sup> )] в календарном году $y$ на территории ВУРСа	Общий для НП с инд. вариацией	Модель Берксона	В
$A_{ind}(\tau, t_m)$	Индивидуальное измерение содержания $^{90}\text{Sr}$ в организме, полученное в возрасте $\tau$ в момент времени $t_m$	Индивидуальный	Классическая модель	А
$DF_{eo,y-y}$	Дозовый коэффициент (Гр/Бк) для дозы, накопленной в органе $o$ через период времени $Y-y$ после поступления радионуклида $r$ в календарном году $y$ (функция возраста)	Общий с автокорреляцией	Модель Берксона	АВ
<i>Параметры для расчета доз внешнего облучения</i>				
$A_o$	Коэффициент перехода от поглощенной дозы в воздухе к поглощенной дозе в органе $o$ (функция возраста, связанная с годом $y$ )	Общий	Модель Берксона	АВ
$D_{RivL,y}$	Доза в воздухе у уреза воды в НП $L$ в календарном году $y$ (Гр)	Общий для НП с автокорреляцией	Классическая модель после 1950	В
$D_{Soy}$	Доза в воздухе (Гр) в календарном году $y$ при единичной плотности загрязнения почвы $^{90}\text{Sr}$ (Бк/м <sup>2</sup> ) в результате образования ВУРСа	Общий для НП с автокорреляцией	Модель Берксона	В
$R_{out/RivL}$	Отношение мощности дозы в воздухе на территории расположения дома к мощности дозы в воздухе у уреза воды в НП $L$	Индивидуальный	Модель Берксона	А
$R_{in/out}$	Отношение мощности дозы в воздухе внутри жилых помещений к мощности дозы на территории НП (функция типа жилища)	Индивидуальный	Модель Берксона	А
$T_1$	Доля времени, проводимая на берегу реки (относительно всего года) (функция возраста, связанная с годом $y$ )	Индивидуальный	Модель Берксона	А
$T_2$	Доля времени, проводимая на территории НП (относительно всего года) (функция возраста, связанная с годом $y$ )	Индивидуальный	Модель Берксона	А
$T_3$	Доля времени, проводимая внутри помещений (относительно всего года) (функция возраста, связанная с годом $y$ )	Индивидуальный	Модель Берксона	А
$X_o(e,y,\tau)$	Поглощенная доза (Гр) в органе $o$ в результате медицинского обследования $e$ в календарном году $y$ в возрасте $\tau$	Общий для процедуры	Модель Берксона	АВ

Table

## Assignment of TRDS parameter uncertainty structures

Parameter	Definition	Sharing	Structure	A/B
<i>Constants – used to define individual calculation</i>				
$Y$	The calculational endpoint for a particular individual (can vary within the range 1950–2005)	Definition of case	Constant	
$y$	Year of environmental exposure (external irradiation and intake of nuclides)	Definition of case	Constant	
$P$	The endpoint of external exposure and intake of radionuclides for a particular individual (can vary within the range 1950– $Y$ , $P \leq Y$ )	Definition of case	Constant	
$L$	River-location (village) identifier	Definition of case	Constant	
$r$	Identifier of ingested radionuclide	Definition of case	Constant	
$Y-y$	Time since intake, years	Definition of case	Constant	
$e$	Number of x-ray exposures per individual	Definition of case	Constant	
$b$	Individual birth year	Definition of case	Constant	
<i>Common to internal and external</i>				
$M_{y,L,i}$	Fraction of year $y$ spent in location $L$ ;	Individual/unshared	Classical	B
$G_{Sr,L}$	Deposition of $^{90}\text{Sr}$ at location $L$ for EURT fallout ( $\text{Bq m}^{-2}$ )	Shared within village	Classical	AB
<i>Internal dose parameters</i>				
$I_{y,r,L}$	Intake function (Bq) for year $y$ , radionuclide $r$ , and location $L$ (function of age, related to $y$ )	Product of the following parameters:		
$I_{y,R}^{Sr90}$	Annual $^{90}\text{Sr}$ intake for adult residents of the reference settlement (Muslyumovo) in year $y$	Shared	Berkson	AB
$\alpha_{\tau,R}^{Sr90}$	Annual $^{90}\text{Sr}$ intake for other age groups relative to that for adults living in the reference settlement	Shared within ages	Berkson	AB
$f_L^{Sr90}$	Annual ratio of $^{90}\text{Sr}$ intake for location $L$ to $^{90}\text{Sr}$ intake for residents of the reference settlement	Shared within village	Berkson	AB
$R_{y,r/Sr}^L$	Annual ratio of radionuclide ( $r$ )-to- $^{90}\text{Sr}$ intake for location $L$ in year $y$	Shared within village; along river	Berkson	BB
$IMR$	Individual-to-Model Ratio; the deviation of an individual for the $I_{y,r,L}$ (based on WBC measurements $A_{ind}(\tau, t_m)$ )	Unshared if available	Classical	A
$IMR$	This is also used for those without WBC measurements; set to 1.0 with a wide uncertainty bound based on village IMRs	Shared if not available for ind.	Berkson	B
$HSR$	Household Specific Ratio – the average of IMR's for one household	Shared within household	Classical	AB
$E_{ey}$	Intake function per $^{90}\text{Sr}$ deposition density ( $\text{Bq per Bq m}^{-2}$ ) for EURT for radionuclide $r$ in calendar year $y$	Shared within village w/ ind. variation	Berkson	B
$A_{ind}(\tau, t_m)$	Individual whole-body counter measurement made at age $\tau$ and time $t_m$	Unshared	Classical	A
$DF_{ro,y,y}$	Conversion factor ( $\text{Gy Bq}^{-1}$ ) for dose accumulated in organ $o$ in year $Y-y$ from intake of radionuclide $r$ in year $y$ (function of age, related to $y$ )	Shared with autocorrelation	Berkson	AB
<i>External dose parameters</i>				
$A_o$	Conversion factor from absorbed dose in air to absorbed dose in organ $o$ (function of age, related to $y$ )	Shared	Berkson	AB
$D_{Riv,L,y}$	Dose in air near river shoreline at location $L$ in year $y$ (Gy)	Shared within village with autocorrelation	Classical after 1950	B
$D_{Sey}$	Dose in air outdoors in year $y$ (Gy) normalized per $^{90}\text{Sr}$ deposition density ( $\text{Bq m}^{-2}$ ) from EURT fallout	Shared within village with autocorrelation	Berkson	B
$R_{out/Riv,L}$	Bank to residence ratio (function of distance of individual's home from river)	Unshared	Classical	A
$R_{in/out}$	Indoor/Outdoor ratio (function of building type)	Unshared	Berkson	A
$T_1$	Time spent on river bank (relative to whole year) (function of age, related to $y$ )	Unshared	Berkson	A
$T_2$	Time spent outdoors (relative to whole year) (function of age, related to $y$ )	Unshared	Berkson	A
$T_3$	Time spent indoors (relative to whole year) (function of age, related to $y$ )	Unshared	Berkson	A
$X_o(e,y,\tau)$	Dose (Gy) from medical exposure $e$ in year $y$	Shared by procedure type	Berkson	AB



## Описание алгоритма

Иллюстрация диаграммы расчетов, выполняемых в стохастической версии дозиметрической системы TRDS-2009MC, приведена на рисунке. В системе используется двумерный расчет методом Монте-Карло с целью разделения «общих» и «индивидуальных» неопределенностей для всей когорты. В качестве центральных значений параметров в системе используются соответствующие значения из детерминированной версии TRDS-2009D. К центральным значениям применяются поправочные коэффициенты для получения желаемых входных распределений.

В первом расчетном модуле фиксируются общие параметры с неопределенностью и формируется статический выходной файл многократных реализаций каждого параметра методом латинского гиперкуба. На этапе генерации реализаций для общих параметров могут быть учтены и корреляции. Этот файл используется в качестве входной информации для всех людей на следующем этапе расчетов. Он подготовлен для заданного числа реализаций. Последующие расчеты ограничиваются этим числом реализаций.

Во втором расчетном модуле используется список людей из когорты, зафиксированный во входном файле случаев, и для каждого человека оценивается распределение расчетных значений доз. В этом модуле расчет доз выполняется для пяти основных путей облучения:

- внешнее облучение в результате проживания в прибрежных НП реки Теча;
- внутреннее облучение от поступления радионуклидов в организм человека в результате проживания в прибрежных НП реки Теча;
- внешнее облучение в результате проживания на территории ВУРС, если применимо к рассматриваемому человеку;
- внутреннее облучение от поступления радионуклидов в организм человека в результате проживания на территории ВУРСа, если применимо к рассматриваемому человеку;
- внешнее облучение в результате медицинского облучения при проведении рентгено-диагностических процедур в клинике УНПЦ РМ, если применимо к рассматриваемому человеку.

Следует отметить, что люди КРТ могли перемещаться по наблюдаемой территории, а некоторые из них переезжали из одного НП в другой несколько раз в течение одного календарного года. Использование данных по местам и срокам проживания людей на загрязненной территории позволяет рассчитывать суммарную дозу облучения для каждого индивидуума.

Во втором модуле системы в качестве центральных значений используются значения из детерминированной версии TRDS-2009D. С учетом распределений поправочных коэффициентов получают желаемые входные распределения параметров, получаемые либо из внешнего статического файла для общих параметров, созданного в первом расчетном

## Algorithm Description

A basic flow diagram of the TRDS-2009MC calculations is shown in figure. The system is a 2-Dimensional Monte Carlo calculation designed to separate 'shared' and 'unshared' uncertainties for the entire cohort. It generally uses the TRDS-2009D database information as central values and applies variable "correction factors" to obtain the desired input distributions

The first module in the calculation accepts definitions of uncertain shared parameters and prepares a "static" output file of multiple realizations of each using a Latin Hypercube method. Correlations may be applied to the shared parameters at the time of generation of the realizations. This file is used as input for all individuals in subsequent calculations. The generated results are prepared for a selected number of realizations. Subsequent calculations are limited to no more than this number of realizations.

The second module in the calculation accepts a list of desired cohort subjects defined in an input "cases" list and prepares a distribution of dose for each subject. This module calculates doses from five major routes of exposure:

- External exposure from living along the banks of the Techa River,
- Internal exposure from intakes acquired along the banks of the Techa River,
- External exposure from living in the region of the East Urals Radioactive Trace (EURT), if applicable for this individual,
- Internal exposure from intakes acquired in EURT villages, if applicable for this individual, and,
- External exposures from medical procedures listed in the URCRM clinic records, if applicable for this individual.

People may change residences; some people may move several times per year. The development of a residence history allows the computation to apply to multiple locations for each individual.

The second module uses the TRDS-2009D database information as central values and applies variable "correction factors" to obtain the desired input distributions, obtained either from the static file of shared outer-dimension parameters created by the first module or from a similar Latin Hypercube calculation internally of

модуле, либо созданные внутри данного модуля с использованием метода латинского гиперкуба для индивидуальных параметров. Во втором модуле сначала формируется файл с местами и сроками проживания каждого человека. При этом для расчетов доз в результате проживания в прибрежных НП реки Течи для периода 1949–1951 гг. каждый календарный год разделяется на 12 временных отрезков, продолжительностью в один месяц каждый. Для всех последующих календарных годов (начиная с 1952 г.) продолжительность каждого отрезка времени составляет 1 год. Таким образом, рассматривается 100 отрезков времени для периода с 1.1.1949 по 31.12.2015. Для расчетов доз в результате проживания в НП на территории ВУРСа календарные годы 1957 и 1958 также разделены на 12 отрезков времени, каждый продолжительностью в один месяц; в последующий период до 2015 года рассматриваются отрезки времени продолжительностью в один год. В случае медицинского облучения рассматриваются отрезки времени продолжительностью в один год для всего периода с 1949 по 2015 гг.

Стохастическая версия дозиметрической системы TRDS-2009MC выполняет многократный расчет годовых поглощенных доз в органах для каждого человека из когорты облученных. Набор возможных расчетных значений дозы для каждого человека из когорты передается эпидемиологам, который служит в качестве исходных данных в анализе «доза–эффект». Индивидуальные выходные дозиметрические данные характеризуют суммарную неопределенность расчетных значений доз. Результаты расчета доз для каждого человека также могут быть представлены в виде статистических характеристик (среднее арифметическое значение, медиана, геометрическое стандартное отклонение и другие статистические характеристики для индивидуальных оценок доз). Однако этот набор результатов включает все виды неопределенностей: общую, индивидуальную, классическую и неопределенность Берксона, т.к. при расчете индивидуальных доз для каждого человека из когорты используются некоторые общие для когорты данные.

В результате расчетов создаются пять файлов, по одному для каждого пути облучения. В файлах содержатся данные о годовой накопленной дозе в Гр для каждого человека из когорты, календарного года и органа, для которого выполняется расчет доз. В результате размер файлов является весьма большим. Для общего ознакомления с реальным распределением доз в программу включен обобщающий модуль, который генерирует одномерные статистические данные по накопленной дозе в органе для конкретного человека (или для всех людей из когорты), для которого выполнен расчет доз.

В TRDS-2009MC используются так называемые системные номера для идентификации людей из когорты. Эти же системные номера используются в каждом модуле расчета доз в качестве «источников», для которых генерируются случайные числа в каждой

unshared parameters. The second module first prepares a “residence history” for each individual for each time slice. For Techa River calculations, the years 1949–1950–1951 are given 12 monthly time slices. All subsequent years get one slice per year. A total of 100 slices provides dates from 1/1/1949 through 12/31/2015. For EURT calculations, the years 1957–1958 are given 12 monthly slices; subsequent years get 1 slice per year through the year 2015. For medical X-ray exposures, data are aggregated into one slice per year for the period 1949–2015.

The stochastic TRDS-2009MC system generates numerous realizations of sequential annual organ absorbed dose for every cohort member. This set of outputs is transferred to the epidemiologists as an input to the dose-response analyses. The individual output vectors embody the overall uncertainty of the doses; the outputs may be mathematically manipulated to provide mean, median, geometric standard deviation, or other desired statistical parameters for individuals’ doses. However, this naive set of outputs incorporates all shared, unshared, classical, and grouping uncertainties, because individual dose realizations for every member of the cohort include the same “shared” data.

Five files are generated, one for each exposure route. The files contain annual dose increments in units of Gy and are structured by individual, by year, by organ. As a result, the output files can become very large. To enable quick comprehension of the actual dose distributions, a summary generating module is available to use to determine univariate statistics on cumulative organ dose for selected (or all) individuals for whom dose estimates have been made.

The TRDS-2009MC system uses “identification numbers” to define the individuals in the cohort database. These tracking numbers are also used in each module as “seeds” for the random number generators for each calculation. Thus, the dose calculations for multiple individuals can be run together or separately, and are completely reproducible.

реализации расчета доз. Поэтому расчет доз можно выполнять для нескольких человек одновременно или для каждого человека в отдельности и такие расчеты являются полностью воспроизводимыми.

### **Выводы**

В данной работе представлена стохастическая версия «Дозиметрической системы реки Течи». В систему включены все параметры, которые используются для расчета доз облучения для 30 тыс. человек, включенных в КРТ. Двумерный подход позволяет разделить общие и индивидуальные параметры, а также рассмотреть неопределенности типа А и типа В (понятийные и случайные) и неопределенности, связанные с измерениями и обобщениями (классическая модель ошибки и модель ошибки Берксона).

Проведено сопоставление результатов расчета доз, полученных с использованием детерминированной TRDS-2009D и стохастической TRDS-2009MC версий дозиметрической системы. Средние арифметические значения для большинства индивидуальных распределений неопределенностей доз, рассчитанные с использованием TRDS-2009MC, совпали с детерминированными точечными оценками, полученными на основе TRDS-2009D. Такое соответствие является надежным критерием контроля качества двух расчетных программ, созданных независимо друг от друга. Анализ неопределенностей дает возможность направить усилия на те компоненты модели, которые нуждаются в усовершенствовании. Например, если среднее значение распределения расчетных доз отличается от детерминированной точечной оценки, то это может указать на ту область в основной модели, которая требует ревизии. В случае TRDS существуют некоторые разногласия в предсказаниях доз внешнего облучения. Эта часть модели уточняется в настоящее время с целью достижения согласованности между двумя вариантами расчета доз.

Полный расчет неопределенности значений дозы занимает порядка 5 секунд для каждого человека. Таким образом, расчет для всей когорты может быть выполнен в течение нескольких дней. Так как система расчетов состоит из нескольких модулей, можно проводить параллельный расчет на нескольких компьютерах.

Размер выходных файлов для всей когорты достаточно большой и может превышать один терабайт. При полном расчете в системе оцениваются годовые поглощенные дозы для 23 органов или тканей для когорты, состоящей из 30 тыс. человек, которые проживали в более чем 100 НП, расположенных на загрязненных территориях, а период проживания мог достигать 60 лет. Для каждого человека в отдельном модуле выводятся статистические характеристики распределения неопределенности оцененных значений дозы (среднее арифметическое значение, медиана, стандартное отклонение и др.).

### **Conclusions**

A two-dimensional Latin-hypercube Monte-Carlo simulation model has been developed for the Techa River Dosimetry System. This model incorporates all of the main parameters used to estimate doses for the 30,000 members of the Techa River Cohort. The two-dimensional approach allows the separation of shared and unshared parameters as well as consideration of Type A and Type B (epistemic and aleatory) uncertainties and measurement and grouping (classical and Berkson) uncertainty structures.

The TRDS-2009D and TRDS-2009MC results have been compared. The means of most of the uncertainty distributions for each individual calculated with TRDS-2009MC match the deterministic point estimates calculated with TRDS-2009D; this is a strong quality assurance check between the two independently-programmed computer codes. One use of uncertainty analysis is to focus efforts on areas of models that need improvement – if the mean of the generated uncertainty distribution of dose is not the same as the deterministic result, this may indicate an area where the basic model requires revision. For the TRDS models, the only current area of disagreement is in the prediction of external dose from Techa River exposure; this portion of the model is planned for revision in the near future in a way that should bring the two predictions together.

The complete calculation of uncertain dose takes about 5 seconds for each individual. Thus, the estimation of uncertain doses for the entire cohort may be performed in a few days. The system is sufficiently modular that parallel processing is feasible on multiple computers.

The output files for the entire cohort can be greater than one terabyte in size. The complete calculation provides estimates of annual absorbed dose to 23 organs or tissues for a cohort of more than 30,000 individuals who resided in over 100 villages for a period of up to 60 years. A separate module is available that gives summary statistics (mean, median, standard deviation, etc.) for each individual.

Initial evaluations for selected individuals indicate that the uncertainty ranges are variable and depend upon how much individual-specific information is available. For well-documented individuals, individual internal Techa red bone marrow doses appear to be lognormally distributed with geometric standard deviations about 2 to 2.5. However, since less information is available,

Первоначальный расчет, выполненный для нескольких человек из когорты, показал, что диапазон неопределенности индивидуальной оценки дозы зависит от дозиметрической информации, имеющейся для конкретного человека. Например, для людей с максимальным числом имеющихся дозиметрических данных, распределения индивидуальных оценок поглощенной дозы в красном костном мозге (ККМ) в результате проживания в прибрежных НП реки Течи могут быть описаны логнормальным законом распределения со стандартным геометрическим отклонением, равным 2–2,5. Однако для оценки индивидуальной дозы облучения при проживании на территории ВУРСа набор дозиметрических данных является ограниченным, в результате неопределенность значений доз ККМ характеризуется геометрическим стандартным отклонением, равным 3 и выше (но при этом дозы облучения намного ниже). Такой диапазон неопределенностей ожидался на основании результатов нашей предыдущей работы [19].

### Благодарности

Настоящая работа профинансирована Управлением здравоохранения Министерства энергетики США, Управлением радиационной защиты Агентства по охране окружающей среды США и Федеральным медико-биологическим агентством России. Авторы выражают благодарность Шишкиной Е.А. (с.н.с. биофизической лаборатории УНПЦ РМ) за редактирование перевода статьи с английского на русский язык.

### REFERENCES

1. *Krestinina L.Yu., Preston D.L., Ostroumova E.V. et al.* Protracted radiation exposure and cancer mortality in the Techa River Cohort. // *Radiat. Res.*, 2005, **164**, P. 602–611.
2. *Krestinina L.Yu., Davis F., Ostroumova E.V. et al.* Solid cancer incidence and low-dose-rate radiation exposures in the Techa River Cohort: 1956–2002. // *Intl. J. Epidemiol.* 2007, **36**, P. 1038–1046.
3. *Krestinina L., Preston D.L., Davis F.G. et al.* Leukemia incidence among people exposed to chronic radiation from the contaminated Techa River, 1953–2005. // *Radiat. Environ. Biophys.*, 2009, **49**, P. 195–201.
4. *Degteva M.O., Vorobiova M.I., Kozheurov V.P. et al.* Dose reconstruction system for the exposed population living along the Techa River. // *Health Phys.*, 2000, **78**, P. 542–554.
5. *Degteva M.O., Kozheurov V.P., Tolstykh E.I. et al.* The Techa River Dosimetry System: Methods for the reconstruction of internal dose. // *Health Phys.*, 2000, **79**, P. 24–35.
6. *Degteva M.O., Vorobiova M.I., Tolstykh E.I. et al.* Development of an improved dose reconstruction system for the Techa River population affected by the operation of the Mayak Production Association. // *Radiat. Res.*, 2006, **166**, P. 255–270.
7. *Degteva M.O., Shagina N.B., Vorobiova M.I. et al.* Reevaluation of waterborne releases of radioactive materials from the Mayak Production Association into the Techa River in 1949–1951. // *Health Phys.*, 2012, **102**, P. 25–38.
8. *Degteva M.O., Tolstykh E.I., Vorobiova M.I. et al.* Structure of the revised Techa River Dosimetry System: Exposure pathways and system databases. — Chelyabinsk and Salt Lake City: Urals Research Center for Radiation Medicine and University of Utah; Combined report for Milestones 20 and 21, Part 2. 2009.
9. *Stram D.O., Kopecky K.J.* Power and uncertainty analysis of epidemiological studies of radiation-related disease risk in which dose estimates are based on a complex dosimetry system: some observations. // *Radiat. Res.*, 2003, **160**, P. 408–417.
10. *Schafer D.W., Gilbert E.S.* Some statistical implications of dose uncertainty in radiation dose–response analyses. // *Radiat. Res.*, 2006, **166**, P. 303–312.

11. National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). A Guide for Uncertainty Analysis and Dose and Risk Assessments Related to Environmental Contamination, NCRP Commentary No. 14. – Bethesda, Maryland: NCRP, 1996.
12. *Hofer E.* How to account for uncertainty due to measurement errors in an uncertainty analysis using Monte Carlo simulation. // *Health Phys.*, 2008, **95**, P. 277–290.
13. *Carroll R.J., Ruppert D., Stefanski L.A. et al.* Measurement Errors in Non-Linear Models: A Modern Perspective. Second Edition. Vol. 105. Chapman & Hall/CRC. 2006.
14. National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). Uncertainties in the Measurement and Dosimetry of External Radiation, NCRP Report No. 158. – Bethesda, Maryland: NCRP, 2007, 567 pp.
15. National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). Uncertainties in Internal Radiation Dose Assessment, NCRP Report No. 164. – Bethesda, Maryland: NCRP, 2010.
16. International Atomic Energy Agency (IAEA). Evaluating the Reliability of Predictions Made Using Environmental Transfer Models. IAEA Safety Series No. 100, STI/PUB/835. – Vienna, Austria: IAEA, 1989, 106 pp.
17. National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). Radiation Dose Reconstruction: Principles and Practices, NCRP Report No. 163. – Bethesda, Maryland: NCRP, 2010.
18. *Li Y., Guolo A., Hoffman F.O. et al.* Shared uncertainty in measurement error problems, with application to Nevada Test Site fallout data. // *Biometrics*, 2007, **63**, P. 1226–1236.
19. *Napier B.A., Shagina N.B., Degteva M.O. et al.* Preliminary uncertainty analysis for the doses estimated using the Techa River Dosimetry System – 2000. // *Health Phys.*, 2001, **81**, P. 395 – 405.

Поступила 11.11.2011

Принята к публикации: 26.12.2012

**КОММЕНТАРИИ К ПЕРЕВОДУ НА РУССКИЙ ЯЗЫК СТАТЬИ  
NAPIER B.A., DEGTEVA M.O., SHAGINA N.B., ANSPAUGH L.R.  
“UNCERTAINTY ANALYSIS FOR THE TECHA RIVER DOSIMETRY  
SYSTEM”\***

Статья написана в терминах, редко используемых, либо совсем не используемых в российской научной литературе, по крайней мере, в области радиационной защиты. В связи с этим ниже приводятся комментарии к переводу статьи на русский язык.

Авторы статьи используют терминологию, широко применяющуюся в англоязычной литературе по моделям риска: “classical and Berkson error” [1]. В русскоязычной литературе эта терминология только начинает применяться. Например, в работе [2] используются термины «классическая и берксоновская ошибки». Нами термины “classical and Berkson error” были переведены как «классическая ошибка и ошибка Берксона».

Авторы используют термины «ошибка» (error) и «неопределенность» (uncertainty), а также классификацию неопределенностей по типу А и В (Type A and B), введенную в документе МАГАТЭ [3]. Однако эти термины не полностью совпадают с терминами “error, uncertainty, Type A and B”, введенными в международном метрологическом стандарте [4], и аналогичными терминами (тип А и В), принятыми в русскоязычном стандарте [5]. Таким образом, во избежание путаницы, следует принимать во внимание смысловое различие между терминами, используемыми в статье, и стандартной терминологией.

Кроме того, авторы используют еще одну классификацию неопределенностей по типу “aleatory/epistemic uncertainty”, которая закрепились в документах Национальной комиссии по радиационной защите США [6–9]. Поскольку в русскоязычных научных изданиях по радиационной дозиметрии и оценкам риска не удалось найти аналогов подобным терминам, они были переведены как «случайная/понятийная неопределенность».

Существуют различные варианты перевода “propagation of uncertainty”. В настоящей работе этот термин переведен как «распространение неопределенности» в соответствии с рекомендацией по стандартизации [10].

Также в русскоязычной литературе не было найдено аналогов термину “two-dimensional Monte Carlo approach”. Поэтому название этого метода, описанного на английском языке в работе [11], переведено как «двумерный метод Монте-Карло».

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Berkson J. Are there two regressions? // J. Am. Stat. Assoc., 1950, **45**, P. 164–180.
2. Масюк С.В., Шкляр С.В., Кукуш А.Г. и соавт. Влияние неопределенностей в дозах на оценку радиационных рисков. // Радиация и риск (бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра), 2008, **17**, С. 64–75.
3. International Atomic Energy Agency (IAEA). Evaluating the Reliability of Predictions Made Using Environmental Transfer Models. IAEA Safety Series No. 100, STI/PUB/835. –Vienna, Austria: IAEA, 1989, 106 pp.
4. International Organization for Standardization (ISO). Guide to the expression of uncertainty in measurement. First edition. – Geneva: ISO, 1993, 101 pp.
5. Рекомендации по межгосударственной стандартизации РМГ 91-2009. «ГСИ. Совместное использование понятий «погрешность измерения» и «неопределенность измерения». Общие принципы». – М.: Стандартинформ, 2009.
6. National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). A Guide for Uncertainty Analysis and Dose and Risk Assessments Related to Environmental Contamination, NCRP Commentary No. 14. – Bethesda, Maryland: NCRP, 1996.
7. National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). Uncertainties in the Measurement and Dosimetry of External Radiation, NCRP Report No. 158. – Bethesda, Maryland: NCRP, 2007, 567 pp.
8. National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). Radiation Dose Reconstruction: Principles and Practices, NCRP Report No. 163. – Bethesda, Maryland: NCRP, 2010.
9. National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). Uncertainties in Internal Radiation Dose Assessment, NCRP Report No. 164. – Bethesda, Maryland: NCRP, 2010.
10. Рекомендации по стандартизации Р 50.1.062-2007. Статистические методы. Неопределенность при повторных измерениях и иерархических экспериментах. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – М.: Стандартинформ, 2008.
11. Simon T.W. Two-dimensional Monte Carlo simulation and beyond: a comparison of several probabilistic risk assessment methods applied to a superfund site // Human and Ecological Risk Assessment, 1999, **5**, P. 823–843.

\* Комментарии подготовлены Е.А. Шишкиной.

**В.А. Тараненко<sup>1</sup>, М. И. Воробьева<sup>1</sup>, М.О. Дегтева<sup>1</sup>, Н.Г. Бугров<sup>1</sup>,  
Е.И. Черепанова<sup>2</sup>, Э.С. Куропатенко<sup>2</sup>**

**ВЕРИФИКАЦИЯ УРОВНЕЙ ВНЕШНЕГО ОБЛУЧЕНИЯ В ВЕРХОВЬЕ  
РЕКИ ТЕЧИ (МЕТЛИНО) МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЙ  
ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ СТРОИТЕЛЬНОЙ КЕРАМИКИ**

**V.A. Taranenko<sup>1</sup>, M.I. Vorobiova<sup>1</sup>, M.O. Degteva<sup>1</sup>, N.G. Bougrov<sup>1</sup>,  
E.I. Cherepanova<sup>2</sup>, E.S. Kuropatenko<sup>2</sup>**

**Verification of the External Exposure Levels in the Upper Streams of Techa  
River (Metlino) by Luminescence Measurements**

РЕФЕРАТ

**Цель:** Оценить дозы внешнего облучения в верховье реки Течи в условиях уточненной геометрии облучения и с учетом новых данных о сбросах и сравнить с результатами измерений доз люминесценции образцов строительной керамики.

**Материал и методы:** Дозиметрическая система для территории вокруг реки Течи (TRDS-2009) была разработана с учетом архивных данных ПО «Маяк» о сбросах жидких радиоактивных отходов в реку. При этом были приняты во внимание значительные изменения динамики и радионуклидного состава сбросов, а также уточненные гидрологические характеристики для населенного пункта (НП) Метлино, ближайшего к точке сброса. Расчетные значения уровней внешнего облучения для НП Метлино были верифицированы результатами измерений выхода стимулированной люминесценции из облученного кварца, содержащегося в образцах строительной керамики (кирпичи мельницы и зернохранилища). Предыдущие (по TRDS-2000) результаты расчетов поглощенной дозы в воздухе у уреза воды вблизи юго-западной стены мельницы превышали данные измерений на 20 %. Такое расхождение должно быть учтено и объяснено, поскольку расчетные значения поглощенной дозы в воздухе используются для оценки доз облучения населения.

**Результаты:** В новой дозиметрической системе TRDS-2009 уточнение динамики и радионуклидного состава сбросов привело к незначительному увеличению на 4 % (по сравнению с TRDS-2000) накопленной дозы в воздухе у уреза воды в период 1949–1956 гг. в Метлино, которая составила 27,7 Гр. Новые оценки доз производились для трех основных дозообразующих радионуклидов внешнего облучения: <sup>137</sup>Cs, <sup>95</sup>Nb и <sup>95</sup>Zr.

Результаты моделирования переноса излучения в новой геометрии возле юго-западной стены мельницы показали уменьшение в среднем на 10 % накопленной дозы в воздухе на берегу реки по сравнению с предыдущей реконструкцией. Использование уточненного источника излучения и геометрии облучения привело к улучшению соответствия расчетных значений доз в воздухе и полученных независимо доз по данным измерений люминесценции. Основной вывод исследования аналогичен сделанному для TRDS-2000: результаты измерений люминесценции кирпича не противоречат нашим представлениям о внешнем облучении в верховье Течи.

**Ключевые слова:** *еча, ПО Маяк, реконструкция дозы, внешнее облучение, люминесцентная дозиметрия, метод Монте-Карло*

ABSTRACT

**Purpose:** To estimate the external exposure doses in the upper streams of Techa river according to the updated source term and geometry of irradiation; to compare the results with the results of luminescence measurements of building bricks.

**Material and methods:** The Techa River Dosimetry System, TRDS-2009 has been developed based on archival data of liquid radioactive waste discharges to the Techa river. Major changes in the source term and hydrological data for Metlino settlement located 5–7 km from the point of discharges were taken into account. Estimated levels of external exposure in Metlino can be validated by results of luminescence measurements of irradiated natural quartz contained in building bricks (bricks of the watermill and the granary). Prior reconstruction (TRDS-2000) of the accumulated dose in air at the river shore close to south-west wall of the mill overestimated the results of the luminescence measurements by approx 20 %. This discrepancy has to be explained and taken into account, since the data on accumulated dose in air are used to estimate the external exposure to the river residents.

**Results:** Based on the improved source term, TRDS-2009 shows insignificant 4 % increase (relative to TRDS-2000) of accumulated in 1949–1956 dose in air at the shore in Metlino and yields 27.7 Gy. The new estimation for external doses due to <sup>137</sup>Cs, <sup>95</sup>Nb and <sup>95</sup>Zr were also carried out. The results of radiation transport modeling for the south-western wall of the mill showed on average 10 % decrease of accumulated dose in air reconstructed from the luminescence dose in comparison with previous estimation. Overall, a better agreement between the TRDS-2009 dose in air and independent luminescence measurements in bricks of Metlino is achieved using the new irradiation geometry and the source term.

**Conclusion:** As in TRDS-2000, that the results of present validation shows that luminescence measurements do not contradict our knowledge about external exposure in the upper Techa.

**Key words:** *Techa, Mayak, dose reconstruction, external exposure, luminescence dosimetry, Monte Carlo method*

<sup>1</sup> Уральский научно-практический центр радиационной медицины, Челябинск

<sup>2</sup> Российский Федеральный ядерный центр – ВНИИ технической физики им. акад. Е. И. Забабахина, Снежинск.  
E-mail: valery.taranenko@gmail.com

<sup>1</sup> Ural Research Center for Radiation Medicine, Chelyabinsk, Russia  
<sup>2</sup> Russian Federal Nuclear Center—the All-Russian Scientific and Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia.  
E-mail: valery.taranenko@gmail.com

## Введение

Производственное объединение (ПО) «Маяк» было создано на Южном Урале как предприятие для наработки оружейного плутония. В связи с несовершенством технологии производства и обращения с радиоактивными отходами часть радиоактивных сточных вод ПО «Маяк» уже с 1949 года сбрасывалась в реку Течу, что привело к значительному загрязнению реки и облучению населения прибрежных населенных пунктов. Дозиметрические исследования радиационной ситуации на реке Тече проводились с 1950 года (водоемы-отстойники в верхнем течении реки), с 1952 года – вдоль реки на всем ее протяжении и продолжают до сих пор. В течение многих лет сотрудниками Уральского научно-практического центра радиационной медицины (УНПЦ РМ) проводится работа по восстановлению мощностей доз и накопленных доз внешнего облучения в период сбросов (1949–1956), в том числе в период максимальных сбросов (1950–1951). Ретроспективные дозиметрические исследования радиационной ситуации на реке представляют собой комплексную задачу, для решения которой используются архивные данные 1950-х годов, данные более поздних измерений, а также модельные расчеты накопленной дозы в кварцсодержащих материалах (строительном кирпиче) полученных экспериментальными методами термолюминесцентной и оптически стимулированной люминесцентной (ТЛ/ОСЛ) дозиметрии.

Верификация расчетных значений доз внешнего облучения для жителей НП Метлино (ближайший от места сброса населенный пункт по течению реки, 5–7 км от места сброса) проводилась на основании результатов измерений методом ТЛ/ОСЛ дозиметрии образцов строительной керамики мельницы и с использованием результатов модельных расчетов методом Монте-Карло уровней внешнего облучения кварцсодержащих материалов (кирпич) и мощностей доз гамма-излучения на прибрежной территории.

Значения мощности поглощенной дозы в воздухе в Метлино у уреза воды составили 80–570 мкГр ч<sup>-1</sup>

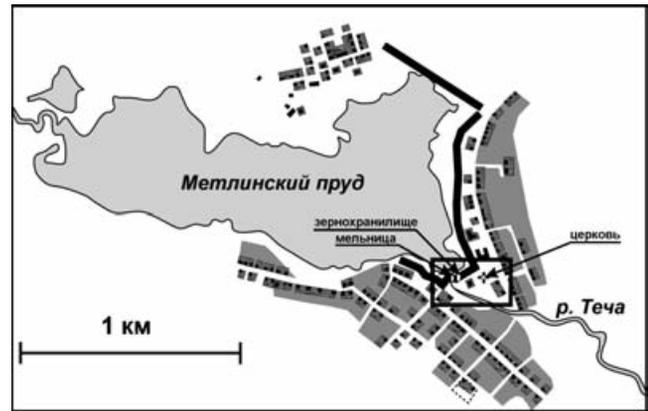


Рис. 1. Карта населенного пункта Метлино. В истоке реки Течи обозначено местоположение водяной мельницы и других строений. Черными квадратами показаны дома жителей

по данным измерений 1952–1956 гг.; на территории НП – 0,006–32 мкГр ч<sup>-1</sup> по данным измерений 1952–1954 гг.

Для верификации доз внешнего облучения населения, проживавшего в Метлино, были отобраны пробы строительного кирпича на различной высоте из юго-западной стены старой мельницы (рис. 1) [1].

Измерение кривых выхода термолюминесценции (ТЛ) и оптически стимулированной люминесценции (ОСЛ) проводилось на автоматическом приборе (TL-DA12, RISØ), скорость нагрева 5° С с<sup>-1</sup> в атмосфере азота, подаваемого в измерительную область со скоростью 4 л мин<sup>-1</sup>. Оценка доз проводилась по аддитивной методике [14], добавочное облучение образцов проводилось на источнике <sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y. В лаборатории университета штата Юта измерения спектров ТЛ проводились на программируемом приборе (Daybreak/Utah 100 TL reader).

Подготовка образцов зерен кварца и полиминеральных «тонких зерен», извлекаемых из образцов строительной керамики, для люминесцентных изме-

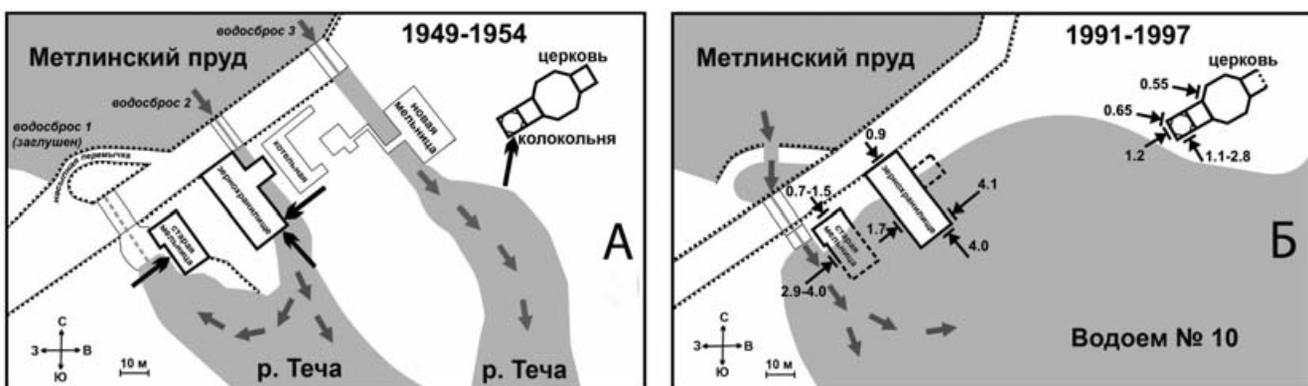


Рис. 2. Схематическое изображение обновленной геометрии водотока в истоке реки Течи до (А) и после (Б) строительства водоема № 10 [8]. На (Б) приведены значения техногенной накопленной дозы в кирпиче по данным измерений ТЛ/ОСЛ

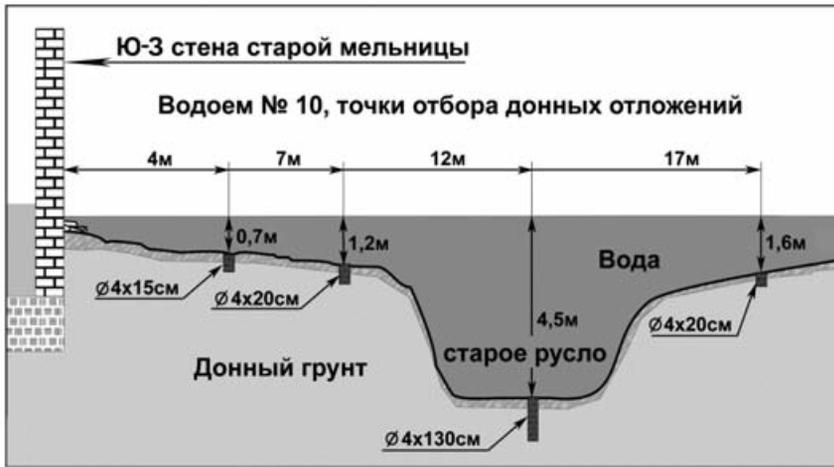


Рис. 3. Схематическое изображение современного профиля дна водоема № 10 напротив юго-западной стены мельницы [8]. Показано также старое русло реки Течи до затопления

рений и анализ ТЛ/ОСЛ спектров проводились физико-химическими методами, описанным ранее [2–6]. Среднее значение измеренной техногенной дозы в кирпиче составило 3–4 Гр.

Полная поглощенная доза в кирпиче может быть определена по таким минералам, как кварц и полевые шпаты, содержащимися в керамическом образце. Доза внешнего  $\gamma$ -излучения  $D_T$ , накопленная от источников, появившихся в результате радиоактивных сбросов, может быть представлена следующим уравнением:

$$D_T = D_{ТЛ} - D_E$$

$$D_E = A \times (R_\alpha + R_\beta + R_\gamma + C) \quad (1)$$

где:  $D_{ТЛ}$  – полная поглощенная доза (мГр), измеренная методом ТЛ/ОСЛ;  $D_E$  – накопленная доза от всех естественных источников ионизирующих излучений (мГр);  $A$  – возраст образца в годах;  $R_\alpha$  – составляющая мощности дозы  $\alpha$ -частиц урана и тория, распределенного в теле образца, в общей мощности

дозы. Эта величина учитывает также поправочный коэффициент эффективности формирования сигнала ТЛ от  $\alpha$ -частиц и называется *эффективной внутренней мощностью дозы  $\alpha$ -частиц* (мГр  $\text{г}^{-1}$ );  $R_\beta$  – составляющая мощности дозы  $\beta$ -частиц от урана, тория и калия-40 в образце (мГр  $\text{г}^{-1}$ );  $R_\gamma$  – мощность дозы гамма-излучения от урана, тория и калия-40 в образце и от естественного гамма-фона окружающей среды (мГр  $\text{г}^{-1}$ );  $C$  – мощность дозы космического излучения (мГр  $\text{г}^{-1}$ ).

Результаты измерений ТЛ/ОСЛ в кирпичах представляют особый интерес, т.к. позволяют с помощью математического моделирования полей гамма-излучения сложной геометрии оценить дозовое распределение на береговой полосе реки Течи и Метлинского пруда. Для проведения таких расчетов необходимо знать точную геометрию расположения источников внешнего гамма-излучения (рельеф береговой поверхности, отметки уровня воды) по отношению к расположению кирпичей.

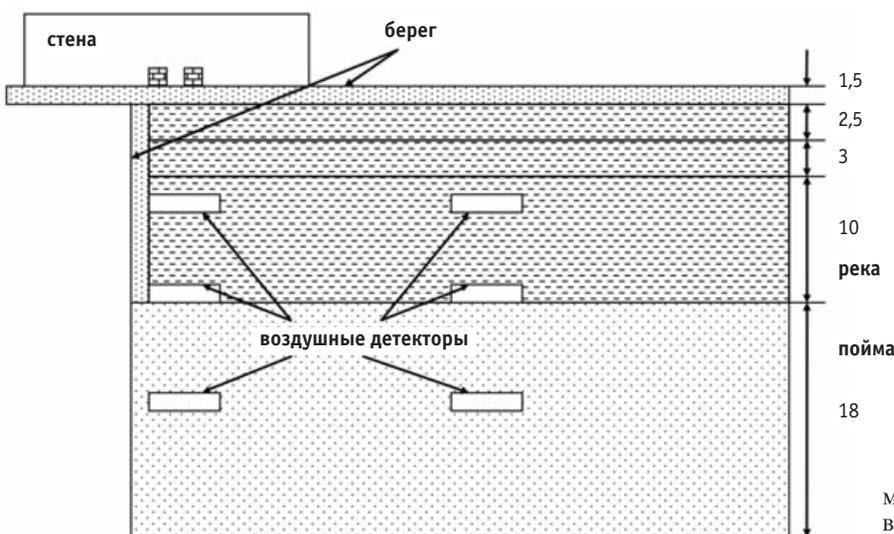


Рис. 4. Обновленная геометрия облучения юго-западной стены мельницы до построения водоема № 10, вид сверху. Размеры приведены в метрах

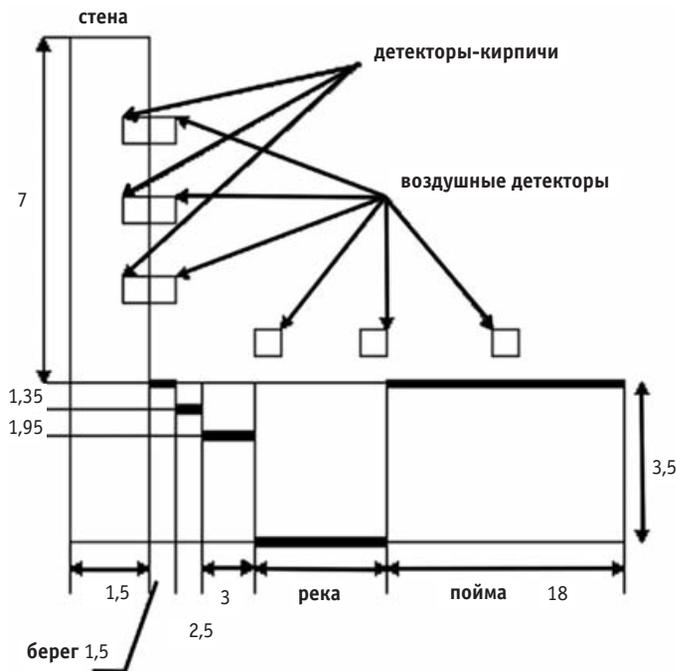


Рис. 5. Обновленная геометрия облучения юго-западной стены мельницы до построения водоема № 10, вид сбоку. Размеры приведены в метрах

В результате архивного поиска материалов, относящихся к эксплуатации Метлинского пруда в 1950-е годы, были обнаружены документы, уточняющие конструкцию и расположение гидросооружений плотины [7]. Из этих документов следует, что существующий в настоящее время водослив из Метлинского пруда в период максимального сброса активности (до 1952 г.) не эксплуатировался. Обнаруженные архивные данные требовали пересмотра геометрии облучения, использованной в более ранних расчетах. Они позволили восстановить условия облучения в период 1949–1952 гг. (рис. 2), а также уточнить профиль дна реки около юго-западной стены мельницы (рис. 3) [8]. В настоящей работе описывается решение задачи реконструкции поглощенной дозы в кирпичах Метлинской мельницы, и интерпретируются результаты расчета для обновленной геометрии облучения.

### Материал и методы

В работах [1, 8] подробно описаны модели расчета доз внешнего облучения, которые были приняты до обнаружения новых данных о геометрии этого облучения, и методика оценки мощности дозы в кирпичах Метлинской мельницы.

Ранее рассматривались две модели облучения: модель облучения от реки и модель облучения от пруда. Геометрия первой модели включала линейный речной сегмент. Источниками излучения считались

два берега (ближний и дальний), пойма (левая и правая), донные отложения. В 1956 году вниз по течению реки Течи была построена плотина П-10, в связи с чем уровень воды поднялся на 1 м, образовался водоем В-10, пойма реки была затоплена. Во второй модели в качестве источника излучения рассматривался берег, расположенный перпендикулярно к стене мельницы, и донные отложения.

**Аппроксимация геометрии облучения.** В соответствии с новыми архивными данными [8] в расчетах была изменена геометрия облучения кирпичей по сравнению с используемой ранее [1, 9]. Обновленная геометрия изображена на рис. 4 и 5.

Длина моделируемой стены составляет 20 м, высота стены – 7 м, толщина – 1,5 м. Источниками гамма-излучения являлись береговая полоса, пойма и донные отложения реки. В модели рассматриваются 5 источников: береговая полоса (два берега – вдоль стены и перпендикулярно стене, длиной 16 м), оба шириной 1,5 м, пойма (правая) шириной 18 м. Вертикальный профиль русла, представленный на рис. 3, был аппроксимирован как показано на рис. 5. Дно реки представляет собой три источника: на глубине 1,35 м шириной 2,5 м, на глубине 1,95 м шириной 3 м и на глубине 3,5 м шириной 10 м. Толщина источников варьировалась в пределах от 0 до 10 см.

В соответствии с TRDS, основным дозообразующим радионуклидом для внешнего облучения был  $^{137}\text{Cs}$ , поэтому в качестве модельного источника был взят фотонный изотропный источник, равномерно распределенный внутри слоя почвы, с энергией 662 кэВ (основная линия моноэнергетического фотонного излучения).

Были оценены уровни поглощенных доз в воздухе и в кирпичах мельницы с учетом изменения геометрии облучения в различные периоды времени: для модели реки в период 1949–1955 гг. и для модели пруда с 1956 г. [1]. Модель пруда была разработана вследствие существенного изменения геометрии облучения стены в 1956 г., после того как вниз по течению была построена плотина и территория вокруг мельницы была залита водой. Детекторы располагались в тех же местах, что по модели реки и модели пруда в предыдущих расчетах [1]. Шесть виртуальных воздушных детекторов расположены в два ряда: первый ряд – напротив кирпичей-детекторов, расположенных в стене, второй ряд – в 20 м от них. Воздушный детектор представляет собой объем воздуха, внутри которого рассчитывается поглощенная доза методом Монте-Карло. Все детекторы находились на высоте 1 м от поверхности земли. Шесть виртуальных керамических детекторов были расположены в стене, в позициях, аналогичных местам отбора проб для измерений люминесценции. Детекторы-кирпичи

находились в стене на высоте 2, 4, 6 м по два детектора на каждой высоте. Они располагались в 2 ряда, с расстоянием между ними 2 м. Перед каждым располагался воздушный детектор, как в модели пруда [1]. Состав материалов, использованных в расчетах, приведен в табл. 1.

Таблица 1

**Состав и плотность сред, использованных в моделировании переноса излучения методом Монте-Карло**

Почва		Вода		Воздух, воздушные детекторы		Кирпичная стена, детекторы-кирпичи	
плотность $1,6 \text{ г см}^{-3}$		плотность $1,0 \text{ г см}^{-3}$		плотность $1,2 \times 10^{-3} \text{ г см}^{-3}$		плотность $1,8 \text{ г см}^{-3}$	
Элемент	Весовая доля, %	Элемент	Весовая доля, %	Элемент	Весовая доля, %	Элемент	Весовая доля, %
H	2,1	H	66,6667	H	0,064	O	47,5
C	1,6	O	33,3333	C	0,014	Na	0,5
O	57,7			N	75,086	Mg	1,7
Al	5,0			O	23,555	Al	8,5
Si	27,1			Ar	1,281	Si	29,6
K	1,3					S	0,2
Ca	4,1					K	2,6
Fe	1,1					Ca	4,0
						Ti	0,6
						Fe	4,8

**Моделирование методом Монте-Карло переноса гамма-излучения.** Моделирование переноса гамма-квантов, высвобождаемых при распаде радионуклидов источника, осуществлялось методом Монте-Карло с использованием программ MCNP и ПРИЗМА [10, 11]. При этом для фотонов учитывались следующие эффекты: когерентного рассеяния, некогерентного (комптоновского) рассеяния, фотопоглощения, образования пар. В реакции образования пар учитывалось, что позитрон теряет всю кинетическую энергию в точке рождения пары, после чего аннигилирует с испусканием двух гамма-квантов равных энергий. Перенос вторичных электронов также учитывался. Фотоны источника разыгрывались равномерно по объему с изотропным угловым распределением.

Расчеты проводились до достижения относительной погрешности дозовой оценки не более 5 %. Облучение от донных отложений из-за экранирования водой дало пренебрежимо малые дозы.

Для вычисления поглощенной дозы использовались оценки по пробегу в воздушных детекторах и оценки по столкновениям в кирпиче. Доза в кирпичах рассчитывалась в слое 1 см на глубине 5 мм, в соответствии с измерениями ТЛ.

**Результаты и обсуждение**

**Модель реки.** В результате архивного поиска было выяснено, что взаимное расположение реки, стены мельницы, источников излучения несколько отличалось от предполагаемого ранее [1, 3]. В обновленной модели присутствуют два берега – источника излучения (берег вдоль стены, как в модели реки и берег, перпендикулярный стене, как в модели пруда), пойма (которая в модели реки рассматривалась как правая пойма), донные отложения, которые, как и в предыдущих моделях, экранированы слоем воды, и дают пренебрежимо малые дозы.

В связи с обновлением геометрии облучения ожидалось, что результаты расчетов по новой модели будут отличаться от ранее полученных.

В первую очередь рассмотрим результат моделирования методом Монте-Карло переноса фотонов для источников: «берег» толщиной 10 см и «пойма» толщиной 5 см, как рассматривалось в [1] (табл. 2). Оценка толщины источников основывалась на данных современных измерений распределения активности по глубине донных отложений пруда.

Таблица 2

**Результаты Монте-Карло-моделирования для «модели реки» для объемных источников излучения толщиной 10 см**

Детектор	Доза облучения от источника, $10^{-18} \text{ Гр фотон}^{-1} \text{ м}^{-3}$		
	Берег вдоль стены	С-3 берег «слепого» ручья	Ю-3 пойма
Воздух над поймой (край)	0,0226	1,3	10,5
Воздух над поймой (середина)	0,019	0,0132	12,0
Кирпич на высоте:			
Левый профиль			
2 м	1,43	0,685	0,317
4 м	0,62	0,589	0,446
6 м	0,352	0,460	0,543
Правый профиль			
2 м	1,46	0,396	0,339
4 м	0,598	0,419	0,475
6 м	0,344	0,380	0,580

В качестве новой реперной точки был взят воздушный детектор у края поймы, который располагается над поймой напротив детекторов-кирпичей, т.к. в новой геометрии реперная точка из [1] теперь располагается над рекой.

В ранее рассматриваемой модели облучения от реки вычислялся коэффициент перехода  $C_h$  от дозы в реперной точке к дозе в кирпиче мельничной стены на высоте  $h$ , который рассчитывался, как отношение

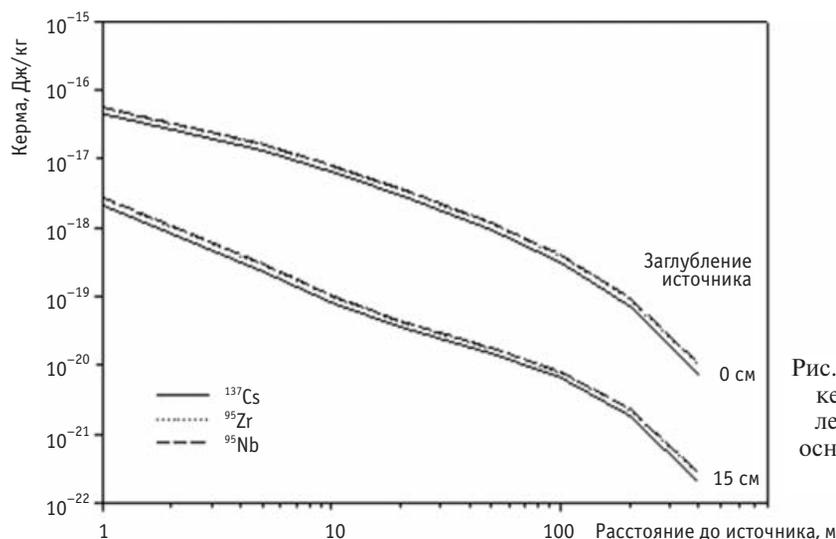


Рис. 6. Спад расчетных значений воздушной кермы в зависимости от расстояния для ленточного источника шириной 1 м для основных дозообразующих радионуклидов ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ )

суммарной расчетной дозы в керамике на высоте 2, 4, 6 м к суммарной расчетной дозе в реперной точке в воздухе. Суммарная доза в кирпиче вычислялась как суперпозиция вкладов отдельных источников с учетом весового коэффициента  $\omega$  — относительной мощности (степень радионуклидной загрязненности) источника «пойма» к источнику «берег». Ранее на основе результатов измерения спада мощности поглощенной дозы было определено значение  $\omega = 0,033$ . В представленных ниже предварительных оценках доз для обновленной геометрии использовалось именно это значение весового коэффициента. Полученные коэффициенты перехода (от дозы в воздухе к дозе в кирпиче) усредненные по обоим (левому и правому) профилям, приведены в табл. 3. Из таблицы видно значимое (50–70 %) отличие взвешенного  $C_h$  от результатов из [1].

**Модель пруда.** Для модели пруда в качестве реперных точек использовались воздушные детекторы, расположенные непосредственно напротив керамических детекторов на расстоянии 2 см от стены. До-

зовые вклады от каждого из источников в каждый детектор оценивались аналогично модели реки.

Коэффициент дозового перехода в модели пруда соотносит результирующую (от всех источников) дозу в керамике на каждой высоте к результирующей дозе в реперной точке, расположенной напротив кирпичного детектора на той же высоте. В результате проведенных расчетов (табл. 4) получены коэффициенты перехода для новой модели облучения, которые хорошо согласуются с ранее опубликованными данными из [1].

Кроме  $^{137}\text{Cs}$ , существенный вклад во внешнее облучение дают такие нуклиды, как  $^{95}\text{Nb}$  и  $^{95}\text{Zr}$ . На рис. 6 показан спад кермы в воздухе как функция расстояния от ленточного источника шириной 1 м для фотонного излучения этих нуклидов. Они имеют близкие значения энергии фотонов и интенсивности излучения. Также видно, что графики спада кермы в воздухе для этих радионуклидов имеют аналогичный вид. Следовательно, существенного изменения коэффициентов дозового перехода, рассчитанных для этих нуклидов, не ожидается.

Таблица 3

**Коэффициенты перехода  $C_h$  от поглощенной дозы в воздухе к поглощенной дозе в образцах строительной керамики для обновленной геометрии облучения от реки в сравнении с предыдущими расчетами (последняя колонка)**

Высота $h$ , м	$C_h$	$C_h$ с учетом $\omega$	$C_h$ с учетом $\omega$ из [1]
2	0,195	0,168	0,11
4	0,13	0,095	0,11
6	0,11	0,066	0,10

Таблица 4

**Коэффициенты перехода  $C_h$  от поглощенной дозы в воздухе к поглощенной дозе в образцах строительной керамики для обновленной геометрии облучения от пруда в сравнении с прежними расчетами (последняя колонка)**

Высота $h$ , м	$C_h$	$C_h$ с учетом $\omega$	$C_h$ с учетом $\omega$ из [1]
2	0,648	0,61	0,6
4	0,621	0,53	0,5
6	0,658	0,51	0,45

## Выводы

В новой дозиметрической системе TRDS-2009 скорректированный радионуклидный состав и режим сбросов показывают увеличение накопленной дозы в воздухе у уреза воды на 4 % (по сравнению с TRDS-2000), которая составила 27,7 Гр за 1949–1956 гг. [12, 13]. В описанных выше расчетах перенос излучения от загрязненной реки к кирпичам в уточненной геометрии (главным образом уширение водного зеркала реки) рассчитывался подробно для  $^{137}\text{Cs}$ . Для других основных дозообразующих нуклидов внешнего облучения, т.е.  $^{95}\text{Nb}$  и  $^{95}\text{Zr}$ , также рассчитывался спад поглощенной дозы в воздухе с расстоянием от источника; динамика спада дозы оказалась для них аналогична  $^{137}\text{Cs}$ .

Результаты моделирования переноса излучения  $^{137}\text{Cs}$  в новой геометрии возле юго-западной стены мельницы выявили уменьшение накопленной дозы в воздухе у уреза воды в среднем на 10 % по сравнению с реконструированной ранее дозой (с 32 Гр до 28,8 Гр). В целом, уточнение источника излучения и геометрии облучения улучшило соответствие дозы в TRDS-2009 (27,7 Гр в воздухе у уреза воды для 1949–1956 гг.) и дозы, вычисленной независимо по данным измерений люминесценции кирпича из Метлино (28,8 Гр). Основной вывод исследования аналогичен сделанному ранее для TRDS-2000: результаты измерений люминесценции кирпича не противоречат нашим представлениям о внешнем облучении в верховье реки Течи.

Разработка детальной схемы расчета мощностей моделируемых источников излучения на загрязненной территории, а также дополнительная модель переноса излучения в зимнее время (со снежным покровом) позволит в будущем уменьшить неопределенность реконструируемой дозы внешнего облучения в Метлино.

## Благодарности

Разработка дозиметрической системы реки Течи и работа по верификации доз внешнего облучения были осуществлены при финансовой поддержке Министерства энергетики США и Федерального медико-биологического агентства России (Проект 1.1) под эгидой объединенного координационного комитета по изучению последствий радиационных воздействий. Расчеты методом Монте-Карло были выполнены в рамках проекта №2841 Международного научно-технического центра (2005–2008 гг.).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Taranenko V., Meckbach R., Degteva M.O. et al.* Verification of external exposure assessment for upper Techa riverside by luminescence measurements and Monte Carlo photon transport modeling. // *Radiat. Env. Biophysics*, 2003, **42**, P. 17–26.
2. *Chen R., McKeever S.W.S.* Theory of Thermoluminescence and Related Phenomena. – Singapore: World Scientific, 1997.
3. *Bougrov N.G., Goeksu H.Y., Haskell E. et al.* Issues in the reconstruction of environmental doses on the basis of thermoluminescence measurements in the Techa Riverside. // *Health Phys.*, 1998, **75**, P. 574–583.
4. *Bailiff I.K., Buetter-Jensen L., Correcher V. et al.* Absorbed dose evaluations in retrospective dosimetry: methodological developments using quartz. // *Radiat. Meas.*, 2000, **35**, P. 609–613.
5. *Бугров Н.Г., Дегтева М.О., Тексу Х. и соавт.* Ретроспективная термолюминесцентная дозиметрия на прибрежных территориях верховьев р. Течи. // *Вопр. радиац. безопасности*, 2001, № 3, С. 51–62.
6. *Goeksu H.Y., Degteva M.O., Bougrov N.G. et al.* First international intercomparison of luminescence techniques using samples from the Techa River valley. // *Health Phys.*, 2002, **82**, P. 94–102.
7. *Мокров Ю.Г., Стукалов П.М., Мартюшов В.З.* К вопросу об оценке доз внешнего облучения жителей п. Метлино (р. Теча, Челябинская обл.) в начале 1950-х гг. // *Вопр. радиац. безопасности*, 2005, № 4, С. 51–57.
8. *Бугров Н.Г., Дегтева М.О., Воробьева М.И. и соавт.* Оценка распределения техногенных доз в с. Метлино, восстановленных люминесцентными методами. // *Вопр. радиац. безопасности*, 2009, № 3, С. 33–47.
9. *Jacob P., Gökse Y., Taranenko V. et al.* On an evaluation of external dose values in the Techa River Dosimetry System (TRDS) 2000. // *Radiat. Env. Biophysics*, 2003, **42**, P. 169–174.
10. *Arnautova M.A., Kandiev Ya.Z., Lukhminsky B.E., Malyshkin G.N.* Monte-Carlo simulation in nuclear geophysics. Comparison of the PRIZMA Monte Carlo program and benchmark experiments. // *Nucl. Geophys.*, 1993, **7**, No. 3, P. 407–418.
11. MCNP-A General Monte-Carlo N-Particle Transport Code. Ed. by *Briesmeister J.F.* – Los Alamos National Laboratory, X–5, LA–12625–M, 1997.
12. *Degteva M.O., Shagina N.B., Vorobiova M.I. et al.* Re-evaluation of waterborne releases of radioactive materials from the “Mayak” production association into the Techa river in 1949–1951. // *Health Phys.*, in press.
13. *Degteva M.O., Shagina N.B., Tolstykh E.I. et al.* Individual dose calculations with use of the revised Techa river dosimetry system TRDS-2009D. Final Report for Milestone 22. US-Russian Joint Coordinating Committee on Radiation Effects Research Project 1.1: “Further Studies on Uncertainty, Confounding and Validation of the Doses in the Techa River Dosimetry System”, 2009.
14. *Goeksu H.Y., Bailiff I., Botter-Jensen L. et al.* Interlaboratory source calibration using TL and OSL of natural quartz. // *Radiat. Meas.* 1995, **24**, P. 479–483.

Поступила 11.11.2011

Принята к публикации: 11.08.2012

**В.Ю. Соловьев, А.В. Барабанова, А.Ю. Бушманов, А.К. Гуськова,  
Л.А. Ильин**

**АНАЛИЗ МЕДИЦИНСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ РАДИАЦИОННЫХ  
ИНЦИДЕНТОВ НА ТЕРРИТОРИИ БЫВШЕГО СССР  
(по материалам регистра ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И.Бурназяна  
ФМБА России)**

**V.Yu. Soloviev, A.V. Barabanova, A.Yu. Bushmanov, A.K. Guskova, L.A. Il'in**  
**Review of the Medical Consequences of Radiation Accidents in the Former  
USSR Territory (Burnasyan FMBC of FMBA of Russia Register Data)**

## РЕФЕРАТ

Представлены обобщенные сведения по радиационным инцидентам на территории бывшего СССР, связанные с облучением людей с клинически значимыми последствиями.

За более чем 60-летний период (с 1949 г.) на территории бывшего СССР произошло, по крайней мере, 356 радиационных инцидентов, сопровождавшихся облучением людей с клинически значимыми последствиями у 765 пострадавших. Из этой когорты облученных диагноз острой лучевой болезни (ОЛБ), включая случаи, отягощенные местными лучевыми поражениями (МЛП), был установлен в 358 случаях. 407 пострадавших имели только местные лучевые поражения. В общей сложности в результате радиационного воздействия в первые 3–4 месяца после облучения погиб 71 человек.

**Ключевые слова:** радиационный инцидент, медицинские последствия, острая лучевая болезнь, местные лучевые поражения, база данных

## ABSTRACT

The paper sums up the information on radiation accidents resulted into clinically significant human exposure occurred at the former USSR territory.

For the period from 1949 to the present moment, at least 356 radiation accidents and incidents linked with 765 cases of the clinically significant human exposure have been registered. The exposed cohort includes 348 patients of acute radiation sickness including those aggravated with local radiation injuries. Also there were 407 victims suffered with local radiation injuries only. Totally, 71 radiation induced fatalities within first 3–4 months after the irradiation were observed. The attempt to classify all cases by the type of radiation accident dependently on the source of radiation and the kind of radiological or nuclear facility has been made.

**Key words:** radiation accident, medical consequences, acute radiation sickness, local radiation injuries, database

Ранее неоднократно публиковались сведения о ближайших медицинских последствиях радиационных инцидентов на территории бывшего СССР [1–5] на основании анализа материалов Регистра радиационных аварий и инцидентов ГНЦ ФМБЦ им. А.И.Бурназяна ФМБА России. В этих публикациях приводились сведения о пострадавших в инцидентах с диагнозом острой лучевой болезни (ОЛБ) или местных лучевых поражений (МЛП) в хронологической последовательности с дополнением лишь некоторых деталей, уточняющих характеристики медицинских последствий. В настоящей работе мы решили несколько расширить анализ особенностей отдельных инцидентов внутри традиционно выделяемых групп и остановиться на более подробной характеристике их ближайших медицинских последствий.

Наиболее значимой по медицинским последствиям является авария на Чернобыльской АЭС 1986 г., унесшая жизни 30 человек (двух погибших непосредственно в результате взрыва реактора и 28 – в ре-

зультате радиационного воздействия). 134 пострадавшим был поставлен диагноз ОЛБ (21 – крайне тяжелой степени, 22 – тяжелой, 50 – средней и 41 – легкой степени тяжести). Из них у 54 пострадавших развитие ОЛБ было отягощено клинически значимыми лучевыми ожогами поверхности тела. Здесь и далее в статистике медицинских последствий учитывается только число погибших в результате воздействия аварийного облучения, т.е. речь идет о 28 умерших в острый период лучевой болезни.

Все другие радиационные инциденты в рамках настоящей публикации объединены в группы, для которых проанализированы общие характеристики и особенности их медицинских последствий.

**Инциденты на рентгеновских установках и  
ускорителях заряженных частиц**

В отдельную группу всегда выделялись инциденты с рентгеновскими установками и ускорителями

Таблица

**Обобщенные сведения о радиационных инцидентах на территории бывшего СССР (по материалам Регистра ГНЦ ФМБЦ им. А.И.Бурназяна ФМБА России, состояние на 01.01.2012 г.) и численность пострадавших с острой лучевой болезнью (ОЛБ) и местными лучевыми поражениями (МЛП).  
Дополнено и уточнено из [1–5, 7–12] )**

Классификация инцидентов	Кол-во инцидентов	Количество пострадавших с клиническими значимыми последствиями (ОЛБ+МЛП)							
		всего	в т.ч. с ОЛБ (по степеням тяжести)*				ОЛБ + МЛП	МЛП без ОЛБ	умершие
			I–IV	II–IV	III–IV	IV			
1. Инциденты с радиоизотопными установками и источниками излучений (всего)	94	171	51	27	11	6	34	120	16
в т.ч.: <sup>60</sup> Co	17	28	15	9	6	3	9	13	3
<sup>137</sup> Cs	19	58	13	7	1	–	12	45	9
<sup>192</sup> Ir	39	56	11	3	–	–	9	45	1
другие источники	19	29	12	8	4	3	3	17	3
2. Рентгеновские установки и ускорители (всего)	43	52	–	–	–	–	–	52	–
в т.ч. рентгеновские установки	30	38	–	–	–	–	–	38	–
ускорители электронов	10	11	–	–	–	–	–	11	–
ускорители протонов	3	3	–	–	–	–	–	3	–
3. Реакторные инциденты и потеря контроля над критичностью делящегося материала (всего, без Чернобыльской аварии 1986 г.)	33	82	73	39	25	13	31	9	13
в т.ч. потеря контроля над критичностью	16	42	42	30	20	10	26	–	10
реакторные инциденты (другие причины)	17	40	31	9	5	3	5	9	3
4. Случаи с МЛП на предприятиях ПО “Маяк” (1949–1956 гг.)	168**	168	–	–	–	–	–	168	–
5. Аварии на атомных подводных лодках и нештатные ситуации на ядерных испытаниях	5	141	93	37	19	12	74	48	12
6. Другие инциденты	12	17	7	3	2	2	3	10	2
Всего (без аварии на ЧАЭС 1986 г.)	355**	631	224	106	57	33	142	407	43
7. Чернобыльская авария 1986 г.	1	134	134	93	43	21	54	–	28
ИТОГО (1949–2010 гг.)	356**	765	358	199	100	54	196	407	71

**Примечание:**

\* степени тяжести ОЛБ: I – легкая, II – средняя, III – тяжелая, IV – крайне тяжелая (“II–IV” означает “средняя степень и выше”)

\*\* каждый случай с МЛП на предприятиях ПО “Маяк” 1949–1956 гг. рассматривается как отдельный инцидент

(см. табл.). Всего зарегистрирован 31 такой инцидент, из которых 8 имели место в медицинских учреждениях, а остальные – в научных институтах и в вузах. Последствиями для пострадавших в этих инцидентах были только МЛП различной степени тяжести без фатальных исходов. Однако некоторые из них привели к стойкой инвалидизации и требовали длительного, до 10–30 лет лечения. В инцидентах с рентгеновскими установками за период 1962–2006 гг. только в одном инциденте было несколько пострадавших, что связано с выполнением рентгенотерапевтических процедур в клинике косметологии на неисправном оборудовании (Нижний Новгород, 2001 г.). Рассматривая географию подобных инцидентов, необходимо отметить, что только один инцидент произошел за границами РФ – в университете г.

Фрунзе (Киргизская ССР, 1967 г.), все остальные – на территории РФ.

На ускорителях заряженных частиц за период 1957–2005 гг. в 13 инцидентах облучению подверглось 14 человек. 10 инцидентов произошли на ускорителях электронов и 3 – на ускорителях протонов. Только в одном случае (Ленинград, 1979 г.) в инциденте на ускорителе электронов пострадало сразу два человека, в остальных случаях было по одному пострадавшему. Медицинские последствия аварий на ускорителях в большинстве случаев были более серьезными, чем на рентгеновских установках, причем четко прослеживалась зависимость тяжести поражения от энергии излучения. Почти все инциденты, кроме одного (Киев, 1977 г.), произошли на территории РФ.

### **Инциденты на промышленных гамма-установках и с радионуклидными источниками излучений**

Наиболее значительную по численности группу инцидентов составляют случаи с источниками гамма-излучения. Эту группу, в свою очередь, можно разделить на подгруппы. Так, в отдельную подгруппу следует выделить аварийные ситуации, произошедшие при эксплуатации мощных промышленных гамма-установок для стерилизации медицинского оборудования или других целей, на которых используются источники  $^{60}\text{Co}$  активностью от 4,0 до 20 ПБк и более ( $\geq 1000$  Ки). Всего зарегистрировано 6 аварийных ситуаций, и во всех случаях имело место общее облучение всего тела с развитием ОЛБ, отягощенной в трех случаях тяжелыми МЛП. В двух наиболее серьезных инцидентах (Ленинград, 1980 и Несвиж – Белоруссия, 1997) дозы гамма-излучения были, безусловно, смертельными и составляли более 15 Гр на все тело. В обоих случаях имело место развитие кишечной формы ОЛБ, больные умерли на 10-й и 111-й день соответственно. Такое значительное различие сроков гибели обусловлено существенным, произошедшим за 20 лет прогрессом в области лечения лучевой болезни. В четырех других инцидентах пострадали 5 человек: у двоих облучение было относительно равномерным; в остальных распределение поглощенной дозы по телу было неравномерным, и костномозговой синдром ОЛБ сочетался с МЛП. Во всех инцидентах этой группы причиной были грубые нарушения самими пострадавшими правил безопасности.

Вторая выделяемая подгруппа более многочисленная – 52 аварийные ситуации при использовании радионуклидных источников  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{192}\text{Ir}$  преимущественно для дефектоскопии. Во всех случаях имело место только МЛП, всего пострадало 62 человека.

Третью подгруппу (42 ситуации) составляют инциденты с источниками гамма-излучения, над которыми был потерян контроль, т.н. «потерянными» источниками, а также инциденты, когда источники ионизирующего излучения использовались в криминальных целях или с целью самоубийства (см. также раздел «другие инциденты»).

Во всех этих ситуациях имело место крайне неравномерное облучение, с развитием ОЛБ с МЛП (31 случай) или только МЛП (58 случаев). В этой подгруппе – 14 погибших в результате облучения.

Анализируя особенности медицинских последствий в трех перечисленных подгруппах, целесообразно повторить один из выводов нашей предыдущей публикации [6], о том, что аварии с «потерянными» источниками особенно опасны тем, что пострадавшими в них оказываются почти исключительно лица из населения, включая детей, и их медицинские

последствия, безусловно, более тяжелы в сравнении с авариями при дефектоскопии, где пострадавшие – всегда лица из числа персонала. Одной из причин тяжести последствий инцидентов с «потерянными» источниками является поздняя, как правило, госпитализация из-за незнания и/или непонимания причины начинающихся проявлений болезни. Значительному лучевому воздействию подверглись 7 человек, пострадавших в трех аварийных ситуациях с «потерянными» источниками гамма-излучения, использовавшимися в медицине. При этом в двух ситуациях имела место неисправность оборудования при транспортировке отработавшего источника. Одна из этих аварий более подробно рассмотрена ниже.

Всего в 103 зарегистрированных инцидентах с радиоизотопными источниками пострадали 171 человек, 51 из них был поставлен диагноз ОЛБ, из которых у 34 пострадавших имело место отягощение МЛП, а у 120 человек – только МЛП. 17 человек умерли в острый период ОЛБ. Структура инцидентов по типу наиболее распространенных источников следующая: 17 инцидентов с источниками  $^{60}\text{Co}$  (энергия 1,1 и 1,3 МэВ), 19 – с источниками  $^{137}\text{Cs}$  (энергия  $\gamma$ -квантов 0,662 МэВ) и 39 – с источниками  $^{192}\text{Ir}$  (максимальная энергия  $\gamma$ -квантов 0,618 МэВ). Однако тяжесть поражений зависела не столько от энергии излучения, сколько от активности источника и конкретных условий облучения в каждом отдельном случае.

Некоторые из перечисленных инцидентов и аварий заслуживают отдельного упоминания, поскольку в них пострадали по несколько человек, а причиной была неисправность аппаратуры или неправильное хранение источников. К таковым относится, в частности, инцидент с источником  $^{60}\text{Co}$  (Свердловск, 1975), где причиной была неисправность транспортного контейнера, из которого источник выпал в кузов перевозившего его автомобиля. Пострадали 3 человека, один из которых – водитель, он был облучен в дозе 7 Гр и умер от ОЛБ тяжелой степени на 35-й день.

К тяжелым последствиям привел инцидент с мощным источником  $^{137}\text{Cs}$  в войсковой части, дислоцированной в Азербайджанской ССР (1982 г.), когда в результате неправильного хранения «отработавших» источников один из них оказался в плаще-накидке, который по очереди носили несколько человек, а также передавали источник из рук в руки. В результате 18 человек подверглись облучению с крайне неравномерным распределением дозы по телу. Пять человек погибли в результате тяжелых МЛП (локальные дозы  $\geq 700$  Гр), сочетавшихся с ОЛБ тяжелой степени (у одного больного) и легкой или средней степени тяжести у остальных. У 13 пациентов были диагностированы МЛП рук (у одного из

них в сочетании с МЛП области бедра), которые не привели к летальным последствиям, но в трех случаях стали причиной инвалидизации.

Из 19 инцидентов с источниками  $^{137}\text{Cs}$  с 1969 по 1997 гг. два имели место в Украинской ССР, в Краматорске (1982 г.) и в Харькове (1983 г.). Один, уже упомянутый инцидент – в Азербайджанской ССР (1982 г.), а после распада СССР – в Таллине (Эстония, 1994 г.) и в Тбилиси (Грузия, 1997 г.). Остальные 14 инцидентов имели место на территории РФ.

Инцидент в Краматорске (1982 г.) значительно отличается от большинства аварийных ситуаций. Он связан с попаданием мощного источника  $^{137}\text{Cs}$  в конструкционный блок жилого дома, в результате чего происходило длительное облучение жильцов. Диагноз лучевой болезни ни у кого зарегистрирован не был, т.к. облучение не было острым, однако суммарные дозы, накопленные за длительный период, оказались значительными, и в одной семье погибли два человека; при этом причиной смерти были опухолевые заболевания, т.е. отсроченные эффекты, которые в данном случае могут быть практически однозначно связаны с предшествующим облучением.

Относительно инцидента в пригороде Таллина, где источник  $^{137}\text{Cs}$  был принесен подростком в жилой дом со склада металлолома, известно, что четверым пострадавшим был поставлен диагноз ОЛБ, отягощенный МЛП, один из пострадавших умер вследствие своевременно не распознанной ОЛБ средней степени тяжести. В аварийной ситуации в Тбилиси пострадали 9 человек, у некоторых из них отмечены множественные МЛП, погибших нет.

К гибели пострадавшего привел также инцидент с криминальной составляющей в Москве (1993 г.), когда диагноз ОЛБ поставлен не был, а облучение продолжалось весьма длительное время. Еще один случай криминального характера также имел место в Москве (1995 г.), в результате которого у пострадавшего были зафиксированы лучевые ожоги. Облучение также было продолжительным по времени.

Еще в трех случаях можно говорить о криминальном использовании источника (или попытке такового). В Липецке (1974 г.) – два молодых человека оказались пострадавшими в результате облучения от похищенного ими для сомнительных целей источника. У них сформировалась ОЛБ средней степени тяжести, у одного из них в сочетании с лучевыми ожогами; оба были успешно вылечены. В Норильске (1985 г.) источник был обнаружен вмонтированным в кресло, фатальных исходов не было, но в результате облучения у трех человек сформировались лучевые ожоги и нарушения сперматогенеза. Без фатального исхода обошлось и в г. Братске (1991 г.), где имело место хищение источника с последующей механиче-

ской разгерметизацией. У пострадавшего зафиксирована ОЛБ легкой степени.

Среди инцидентов с «потерянными» источниками  $^{192}\text{Ir}$  следует отдельно описать инцидент в Южно-Сахалинске (1980 г.), когда подобранный источник мальчик 10 лет умер вследствие ОЛБ с тяжелыми МЛП. Потеря источника в г. Горький (1984 г.) привела к облучению с клинически значимыми последствиями 8 человек, у 4 из которых была диагностирована ОЛБ легкой степени, отягощенная МЛП, у 4 остальных – только МЛП; погибших нет. В результате облучения от потерянного источника в Харькове (1990 г.) у пострадавшего сформировалась ОЛБ с отягощением МЛП без летального исхода. Случай криминального характера с источником  $^{192}\text{Ir}$  с одним пострадавшим с МЛП отмечен в Приморском крае (1972 г.).

Как уже указано выше, было зарегистрировано 39 инцидентов с широко используемыми в аппаратах для гамма-дефектоскопии источниками  $^{192}\text{Ir}$  (за период с 1969 по 2007 г.), из которых 27 были связаны с нештатными ситуациями при работе на таких установках. Анализируя географию этих инцидентов, можно отметить, что по одному инциденту зарегистрировано во Фрунзе (Киргизская ССР, 1979 г.), на Игналинской АЭС (Литовская ССР, 1985 г.), в Ташкенте (Узбекская ССР, 1988 г.) и Харькове (Украинская ССР, 1990 г.). Два инцидента имели место на территории Казахстана после развала СССР (Аксай, 1992 г. и Актюбинск, 2007 г.). Остальные инциденты – на территории РФ.

### **Инциденты с другими источниками излучения**

В различных сферах народного хозяйства использовались и другие изотопные источники ионизирующего излучения. Всего в Регистре зафиксировано 19 подобных инцидентов, в которых пострадали в общей сложности 29 человек, из которых у 12 был поставлен диагноз ОЛБ. Трое пострадавших умерли в острый период.

Три инцидента, связанные с утечкой загрязненной воды, имели место в далеком прошлом на предприятиях ПО «Маяк» (1952, 1953 и 1963 гг.); в них пострадали 5 человек, им установлен диагноз ОЛБ, двое из них погибли (инцидент 1952 г.). В результате аварийной ситуации в 1954 г. в г. Арзамас-16 (Саров) имело место внутреннее поступление  $^{210}\text{Po}$ , пострадали два человека, один – с фатальным исходом. В инциденте с подобным источником в 1968 г. в этом же городе пострадали два человека, без фатальных исходов. В других инцидентах с источниками, анализируемыми в данном разделе, погибших не было. Заре-

гистрированы также инциденты с источником  $^{124}\text{Sb}$  (Арзамас-16, 1955 г., Москва, 1984 г.), в обоих случаях облучению подверглось по одному человеку, в 1955 г. – с диагнозом ОЛБ. С источниками  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  имели место два инцидента (Москва, 1984 г., – один пострадавший; Лия, Грузия, 2001 г. – трое пострадавших, один из них умер через значительный промежуток времени после облучения, он не включен в статистику умерших в острый период). Зафиксирован также один инцидент с источником  $^{104}\text{Rh}$  на радиохимическом заводе в г. Томск-7 (ныне Северск) в 1974 г. с одним пострадавшим с МЛП. Один инцидент имел место с источником  $^{46}\text{Sc}$ , пострадал один человек с МЛП. Один инцидент криминального характера был зафиксирован в Риге (Латвийская ССР, 1988 г.) с источником  $^{252}\text{Cf}$ ; пострадала медсестра, похитившая источник; у нее сформировалось МЛП на теле в проекции кармана халата. Об инциденте 1969 г. на стерилизационной установке нет информации по типу источника, известно только, что в результате пострадал один человек с МЛП. По остальным инцидентам с другими источниками информация имеется в весьма сокращенном объеме.

#### **Реакторные инциденты и инциденты с потерей контроля над критичностью**

Авария на ЧАЭС 1986 г. произошла на 4-ом блоке ядерного реактора. Однако в обобщенных таблицах наших прежних публикаций эта авария всегда выделялась отдельно, и ее медицинские последствия неоднократно обсуждались [7]. За исключением этой аварии, в базе данных есть сведения о 33 авариях на ядерных реакторах и инцидентах с потерей контроля над критичностью с возникновением самопроизвольной цепной реакции (СЦР).

Инциденты, связанные с развитием СЦР, подробно рассмотрены коллективом российских и американских ученых, ими был подготовлен документ с обзором наиболее значимых случаев с потерей контроля над критичностью, произошедших в мире [8]. В этом документе в общем виде было проанализировано более 20 инцидентов. Мы считаем подобный обзор недостаточно полным, т.к. располагаем более подробными данными по медицинским последствиям 17 таких инцидентов, произошедших только на территории бывшего СССР.

Один инцидент с СЦР произошел в Киеве (УССР, 1970 г.), в результате которого пострадал один человек (ОЛБ тяжелой степени, отягощенная МЛП), без фатального исхода. Остальные 16 инцидентов зарегистрированы на территории Российской Федерации в период 1953–1997 гг. В г. Челябинск-40 (ныне Озерск) в 1953–1958 гг. произошли 3 инцидента, в

которых пострадали в общей сложности 12 человек (у всех установлен диагноз ОЛБ, у 6 из них отягощенной МЛП), 5 человек умерли в острый период заболевания. Три инцидента зарегистрированы в Обнинске (1954, 1962 и 1977 гг.), пострадало в общей сложности 4 человека (диагноз ОЛБ), умерших нет. Два инцидента произошли в г. Томск-7 (ныне Северск) в 1961 и 1978 гг. Пострадали 4 человека (диагноз ОЛБ), умерших нет. Четыре аварии имели место в ИАЭ (Москва, 1953, 1961, и две – в 1971 г.), 15 человек пострадали (у всех диагноз ОЛБ, а у 9 человек с отягощением МЛП), 2 человека погибли в период разгара лучевой болезни (1971 г.). Два инцидента произошли в г. Арзамас-16 (ныне Саров) в 1963 и 1997 гг., пострадало 3 человека, один погиб (1997 г.). Еще один инцидент зарегистрирован в Челябинске (Сунгуль, 1968 г.), пострадали 2 человека с фатальным исходом.

Следует отметить, что именно аварии с СЦР оказались первыми для детального описания и изучения ОЛБ. В них же зарегистрированы наиболее тяжелые случаи с ранними смертельными исходами. В частности, показано [6, 9], что случаи кардиоваскулярной формы ОЛБ, закончившиеся смертью пострадавших в сроки от 49 до 120 ч после облучения (дозы  $\geq 40$  Гр) наблюдались исключительно в условиях этих аварий. Можно добавить, что и случаи кишечной формы ОЛБ (дозы от 12 до 20 Гр) в этих авариях наблюдались чаще, чем во всех остальных.

#### **Другие реакторные инциденты и инциденты с МЛП на предприятиях ПО «Маяк» 1949–1956 гг.**

Рассматривая данную группу инцидентов, можно отметить, что сведения об инцидентах, имевших место в 50-е гг. прошлого столетия, достаточно скудны. Есть информация о том, что в период 1950–1955 гг. в г. Челябинск-40 произошло 9 инцидентов на реакторах, в основном связанных с операциями с ТВЭЛами, когда в результате облучения пострадали в общей сложности 25 человек, у 19 из которых был поставлен диагноз ОЛБ без фатальных исходов.

Примерно в этот же период (1949–1956 гг.) в г. Челябинск-40 на предприятиях ПО «Маяк» имели место многократные инциденты с последствиями облучения в виде МЛП. Ревизия архивных данных, проведенная А.К. Гуськовой [10], и переданная ею нам для включения в Регистр, позволила установить, что клинически значимые радиационные поражения были у 168 человек. Более детальный анализ этих случаев оказался невозможным, и нет данных, были ли это отдельные инциденты или были ситуации, когда в результате одного инцидента пострадали несколько человек. В условиях этой неопределенности

нами было принято решение считать каждый случай отдельным инцидентом и в обобщенные таблицы по статистике инцидентов на территории бывшего СССР несколько условно включались эти 168 случаев, выделенные, к тому же, в отдельную подгруппу.

К группе реакторных инцидентов отнесены также инциденты, связанные с операциями с ТВЭЛами: 1963 г. (Челябинск-40), 1969 г. (Обнинск), 1969 г. (Нововоронежская АЭС), 1978 г. (ИАЭ, г. Москва) и 1979 г. (Свердловск). В этих инцидентах было в общей сложности 7 пострадавших (из них 4 с диагнозом ОЛБ), погибших нет. Об инциденте из МСО-99 (1969 г.) есть сведения, что он имел место при работе на реакторе, пострадало 2 человека, у одного из них был диагноз ОЛБ легкой степени, погибших нет.

И последним в этом списке стоит инцидент на заводе «Красное Сормово» в Нижнем Новгороде (1970 г.), когда на модернизируемой атомной подводной лодке АПЛ-329 произошел выброс пара из реактора [11]. Пострадали 5 человек. Диагноз ОЛБ поставлен во всех 5 случаях и имело место отягощение лучевыми ожогами кожи. Трое из них с ОЛБ крайне тяжелой степени и распространенными до 90 % поверхности тела ожогами кожи, оказавшимися несовместимыми с жизнью. Эти трое больных погибли в течение первого месяца после облучения.

Следует отметить, что абсолютное большинство ядерных аварий на предприятиях атомной промышленности имели место в сроки до середины 70-х гг. прошлого столетия. В последующие годы было зарегистрировано только два подобных инцидента (1993 и 1997 гг.).

#### **Радиационные аварии на атомных подводных лодках (АПЛ) и нештатные ситуации на испытаниях ядерного оружия**

В 2010 г. вышла монография [11], в которой сообщается, что «с 1960 по 2000 г. на кораблях ВМФ произошло около 55 аварий, связанных с ядерно-энергетическими установками (ЯЭУ)». В ней дается описание наиболее значимых инцидентов и приводятся сведения из открытой литературы о пораженных ионизирующей радиацией. В частности, приведены сведения о пострадавших в аварии 10.06.1985 на АПЛ К-314 в бухте Чажма с десятью погибшими во время взрыва. До этой публикации у авторов были сведения о данной группе инцидентов только в объеме монографии Е. Гогина с соавторами [12], а о погибших в бухте Чажма информации из открытых источников не было. Авария произошла из-за нарушения техники безопасности при перезарядке ядерного реактора, при этом возникла СЦР, сопровождавшаяся мгновенным выбросом радиоактивных продуктов.

Все 10 человек, производившие регламентные работы, мгновенно погибли. Литературные данные о последствиях облучения других пострадавших несколько разнятся. По данным [12], 7 с диагнозом ОЛБ легкой и средней степени тяжести, среди них погибших не было.

Из четырех описанных в работе [12] инцидентов две аварии на АПЛ 1961 и 1968 гг. были связаны с потерей критичности реактора и привели к гибели от радиационного воздействия 12 человек.

В аварии 1961 г. на АПЛ Северного флота К-19 с баллистическими ракетами на борту в результате разгерметизации первого контура возникла необходимость производства работ в необитаемом реакторном отсеке. В результате этого повышенному облучению подверглись 54 человека, из них диагноз ОЛБ средней, тяжелой и крайне тяжелой степени с отягощением МЛП установлен у 30 человек, 8 из них погибли; все пострадавшие с МЛП остались живы [12].

27.08.1968 г. на АПЛ К-140, находившейся на ремонте в г. Северодвинске, из-за самопроизвольного поднятия компенсирующей решетки ядерного реактора произошел несанкционированный выход реактора на мощность. Из 68 пострадавших в инциденте диагноз ОЛБ с отягощением МЛП был поставлен 44 военнослужащим, 4 из них погибли.

По инциденту 1979 г. в работе [12] имеются сведения о четырех пострадавших с диагнозом ОЛБ.

В нашем архиве имеются сведения еще об одном инциденте, которые ранее не были опубликованы. Инцидент связан с нештатной ситуацией при проведении воздушных ядерных испытаний на Семипалатинском полигоне 16.03.1956 г. Пострадала бригада операторов, занимавшаяся съемкой фильма о данном испытании, и прикрепленные к ней военнослужащие. По окончании съемки, через 15–20 мин после взрыва, радиационная обстановка по пути следования бригады была крайне неблагоприятной. 8 пострадавшим был поставлен диагноз ОЛБ средней степени тяжести, погибших в острый период развития костномозгового синдрома не было.

Обобщенные сведения о числе пострадавших при авариях на АПЛ и в результате нештатной ситуации при испытаниях ядерного оружия представлены в таблице.

#### **Другие инциденты**

В эту группу выделены инциденты, которые по разным причинам не укладываются в рассмотренные выше разделы, в т.ч. из-за отсутствия достоверной информации о характере инцидента. В частности, в эту группу вошли случаи суицида, связанные с источниками излучений. Всего инцидентов в этой вы-

деленной группе – 12, в которых пострадало 17 человек, из них 7 с диагнозом ОЛБ, у 3 из них имело место отягощение МЛП, два человека погибли в острый период. Обобщенные сведения обо всех радиационных инцидентах на территории бывшего СССР представлены в таблице.

Классификация инцидентов, рассмотренных в настоящем обзоре, по их причинам (техническая неисправность или отказы оборудования, человеческий фактор и т.п.) практически невозможна, т.к. в клиническом архиве собиралась, прежде всего, информация, необходимая для оценки степени тяжести поражения каждого пострадавшего и принятия решения по тактике лечения. Особенно это относится к инцидентам, имевшим место в 1950-х гг.

Большая часть наиболее тяжело пострадавших в рассмотренных радиационных инцидентах проходила лечение в клинике ФМБЦ им. А.И.Бурназяна ФМБА России, образованного в результате объединения Института биофизики и Клинической больницы № 6. Истории болезни пострадавших находятся в клиническом архиве ФМБЦ им. А.И.Бурназяна, а выкопированная из них информация – в «Базе данных по острым лучевым поражениям человека» [13]. Она представляет собой уникальный информационный ресурс для изучения клиники радиационной патологии человека и применявшихся методов лечения, который может быть полезным для поддержки принятия решения врачам-специалистам при диагностике степени тяжести острых лучевых поражений.

Авторы выражают благодарность А.Е. Баранову, И.А. Галстян, И.А. Гусеву, В.И. Краснюку, Н.М. Надежиной за дополнительную информацию о медицинских последствиях радиационных инцидентов, проанализированных в настоящем сообщении.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соловьев В.Ю., Ильин Л.А., Баранов А.Е. и соавт. Радиационные инциденты, связанные с облучением человека, на территории бывшего СССР до и после Чернобыля. // In "One Decade after Chernobyl: Summing up the Consequences of the Accident". Poster presentation. – Vol. 2, Internat. Conf. held in Vienna, 8–12 April 1996, IAEA, Sept. 1997, P.601–607.
2. Соловьев В.Ю., Ильин Л.А., Баранов А.Е. и соавт. Ближайшие медицинские последствия радиационных инцидентов за полувековой период деятельности атомной отрасли. // Бюлл. по атомной энергии. 2002, №9, С. 50–52.
3. Soloviev V. Yu., Ilyin L. A., Baranov A. E. et al. Radiation Accidents in the Former U.S.S.R. // In: Medical Management of Radiation Accidents. Second Edition. Ed. by I. A. Gusev, A. K. Guskova, F. A. Mettler. – London, N.-Y., Washington, D.C.: CRC Press Boca Raton, 2001, P. 157–172.
4. Ильин Л.А., Соловьев В.Ю. Ближайшие медицинские последствия радиационных инцидентов на территории бывшего СССР. Мед. радиол. и радиац. безопасность, 2004, 49, № 6, С. 37–48.
5. Соловьев В.Ю., Бушманов А.Ю., Барабанова А.В. и соавт. Анализ профессиональной принадлежности пострадавших в радиационных инцидентах на территории бывшего СССР. // Медико-биол. и социально-психол. проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях, 2011, № 1, С. 5–9.
6. Барабанова А.В., Бушманов А.Ю., Соловьев В.Ю. Анализ наиболее тяжелых случаев облучения человека в радиационных авариях, связанных с развитием самопроизвольной цепной реакции (СЦР). // Медико-биол. и социально-психол. проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях, 2011, № 2, С. 32–38.
7. Medical Management of Radiation Accidents. Second Edition. Ed. by I. A. Gusev, A. K. Guskova, F. A. Mettler. London, N.-Y., Washington, D.C.: CRC Press Boca Raton, 2001.
8. McLaughlin T., Monahan S., Pruvost P. et al. A Review of Critical Accidents. 2000 Revision. Los Alamos National Laboratory. LA-1368, May 2000, 142 pp.
9. Barabanova A., Wiley A., Bushmanov A. Dose-dependent analysis of acute medical effects of mixed neutron-gamma radiation from selected severe  $^{235}\text{U}$  or  $^{239}\text{Pu}$  criticality accidents in USSR, United States, and Argentina. Health Physics, 2012, No. 4, P. 391–399.
10. Гуськова А.К. Частное сообщение.
11. Василенко В.А., Ефимов А.А., Степанов И.К. и соавт. Технология обеспечения радиационной безопасности на объектах с ЯЭУ. Под ред. В.А. Василенко. – СПб.: НИЦ «Моринтех», 2010, 576 с.
12. Гогин Е.Е., Емельяниченко В.М., Бенецкий Б.А., Филатов В.Н. Сочетанные радиационные поражения. – М.: ППО «Известия», 2000. 240 с.
13. Соловьев В.Ю., Баранов А.Е., Барабанова А.В. и соавт. База данных по острым лучевым поражениям человека. Сообщение 1. Интеллектуальный интерфейс как составная часть системы поддержки принятия решения при диагностике и лечении острых лучевых поражений. // Мед. радиол. и радиац. безопасность, 2011, 56, № 3, С. 5–13.

Поступила: 21.03.2012

Принята к публикации: 26.12.2012

**Е.А. Дунаева, Э.А. Кадиева, Л.В. Демидова, А.В. Бойко,  
С.А. Кожевникова, Т.А. Телеус, О.Б. Дубовецкая, Р.Н. Плавник,  
Е.С. Цветаева, Н.И. Храмова**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ КОНФОРМНОЙ ДИСТАНЦИОННОЙ  
ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ У МОЛОДЫХ ЖЕНЩИН С ТРАНСПОЗИЦИЕЙ  
ЯИЧНИКОВ ПРИ РАКЕ ШЕЙКИ МАТКИ**

**E.A. Dunaeva, E.A. Kadieva, L.V. Demidova, A.V. Boyko, S.A. Kozhevnikova,  
T.A. Teleous, O.B. Dubovetskaya, R.N. Plavnik, E.S. Tsvetaeva,  
N.I. Khramtsova**

**Methodic of Conformal Radiation Therapy of Cervical Cancer with Ovarian  
Transposition**

РЕФЕРАТ

**Цель:** Разработать оптимальные методики дистанционной лучевой терапии (ДЛТ) с использованием 3D планирования у молодых женщин с инвазивным раком шейки матки (РШМ) для защиты транспозированных яичников.

**Материал и методы:** В МНИОИ им. П.А. Герцена с 2009 по 2011 гг. у 44 женщин (средний возраст  $34,4 \pm 5,7$  года) по поводу инвазивного РШМ ( $T_{1b1,2,2a,b}, N_{0-1}, M_0$ ), проведено комбинированное лечение с транспозицией яичников. В первой группе из 26 больных на первом этапе выполняли транспозицию яичников лапароскопическим доступом с последующей предоперационной химиолучевой терапией (5-фторурацил СД = 2–2,5 г и цисплатин СД = 90 мг, ДЛТ тормозным излучением 18 МВ с МЛК до СОД 30 Гр + 2 сеанса внутриволостной гамма-терапии с СОД 10 Гр) и операцией Вертгейма. Вторую группу составили 18 пациенток, которым сначала произведена операция Вертгейма с транспозицией яичников лапаротомным доступом, а на втором этапе была проведена послеоперационная сочетанная лучевая терапия на область малого таза с СОД = 42,5–47,5 Гр от ДЛТ и 20–25 Гр на культю влагалища от внутриволостной гамма-терапии. Предлучевая подготовка включала КТ-топометрию и дозиметрические расчеты планов облучения. В зависимости от расположения транспозированных яичников разработаны следующие методики облучения. При локализации придатков матки выше верхней границы мишени – методика 6-польного облучения с направлениями пучков 0°, 55°, 100°, 180°, 260°, 305°. При положении яичников на уровне верхней границы мишени или ниже единая мишень делилась на две части: верхнюю (зона общих подвздошных лимфоузлов), размерами не менее 4 см облучали двумя противоположными пучками 0° и 180°. При глубине залегания мишени менее 8–9 см от поверхности тела возможно облучение с одного переднего поля. Облучение нижней части мишени проводили по 6-польной методике. При низкой топике яичников мишень облучали двумя противоположными пучками – передним и задним, 0° и 180°.

**Результаты:** При использовании разработанных методик облучения доза, полученная яичниками, транспозированными лапароскопическим доступом (СОД на мишень подведена 30 Гр), составила 0,53 Гр (от 0,13 до 3,5 Гр). Среднее значение дозы, пришедшее на яичники, перемещенные лапаротомным доступом, когда мишень получила СОД 42,5–47,5 Гр, составило 1,31 Гр (от 0,34 до 4,14 Гр).

**Выводы:** Разработанные методики с реализацией возможностей конформного облучения на современной радиационно-терапевтической аппаратуре позволяют исключить транспозированные яичники из зоны ионизирующего излучения у молодых женщин с инвазивным РШМ.

**Ключевые слова:** рак шейки матки, транспозированные яичники, конформная лучевая терапия

ABSTRACT

**Purpose:** To study optimal methods of conformal external beam radiation with 3D planning of cervical cancer in women with ovarian transposition for ovary care.

**Material and methods:** 44 young women with cervical cancer ( $T_{1b1,2,2a,b}, N_{0-1}, M_0$ ) treated at Herzen Moscow Research Oncological Institute in period from 2009 to 2011. The patients were treated with combined method included ovarian transposition. First group included 26 cervical cancer patients, with laparoscopic ovarian transposition, preoperative radiochemotherapy (5-FU 2000–2500 mg, cisplatin 90 mg, external beam radiation after 30 Gy + 2 fractions of brachytherapy 10 Gy) and panhysterectomy. Second group included 18 cervical cancer patients with panhysterectomy and ovarian transposition, postoperative external beam radiation after 42.5–47.5 Gy and brachytherapy after 20–25Gy to vagina. Further evaluation included CT scan and dosimetry.

We use 6 treatment fields with gantry angles 0, 55, 100, 180, 260 and 350 degrees in localization ovaries upper than superior limb of target. In cases of low ovaries transposition the whole target treated two-fields method with gantry 0 and 180 degrees.

**Results:** Mean ovary dose of laparoscopic ovarian transposition was 0.53 Gy (from 0.13 to 3.5 Gy). Mean ovary dose of laparotomic ovarian transposition was 1.31 Gy (from 0.34 to 4.14 Gy).

**Conclusion:** Our methods of conformal radiation therapy with new technique give a possibility to avoid irradiation of transpositional ovaries in young women with cervical cancer.

**Key words:** cervical cancer, ovarian transposition, conformal external beam radiation

## Введение

Важным аспектом современной онкогинекологии является сохранение качества жизни у молодых женщин после проведенного агрессивного лечения. Так, у 60–80 % пациенток репродуктивного возраста с инвазивным раком шейки матки (РШМ) в результате использования стандартных методов лечения (хирургического, лучевого, комбинированного) развивается постовариоэктомический синдром, который приводит к существенному ухудшению качества жизни больных и удлинению сроков реабилитации [1].

Низкая частота метастазирования РШМ в яичники (0,5 % при плоскоклеточной форме и 1,4 % при аденокарциноме) послужили основанием для оставления придатков матки с целью сохранения овариальной функции у молодых пациенток [2–4].

В дальнейшем были разработаны различные варианты транспозиции яичников, суть которых заключалась в выделении сосудистой ножки яичников с последующей фиксацией их к брюшине латеральных каналов танталовыми скрепками для визуализации придатков на рентгеновских снимках при последующей лучевой терапии (ЛТ) [5–12].

Формирование прикладных программ для планирования лучевого лечения наряду с бурным развитием компьютерных технологий для обработки математических данных, разработкой целого спектра методик и аппаратов для 3D визуализации органов и тканей привело к обоснованию концепции визуально-контролируемой лучевой терапии. Основой для развития данной концепции явилось использование таких методов визуализации опухоли шейки матки, как ультразвуковое исследование, компьютерная и магнитно-резонансная томография, позитронная эмиссионная томография. Переход от стандартного плоскостного (2D) к индивидуальному объемному планированию (3D) с оптимизацией параметров облучения на основании гистограмм доза–объем являются одним из перспективных направлений в повышении эффективности лучевого лечения и снижения частоты развивающихся осложнений. Линейные ускорители последнего поколения, оснащенные многолепестковыми коллиматорами, позволяют индивидуально, в зависимости от анатомических особенностей пациентки и степени распространенности опухолевого процесса, подвести максимальную дозу на зону поражения и минимизировать ее на окружающие здоровые ткани, и, тем самым, снизить лучевую нагрузку на критические органы – мочевой пузырь, прямую кишку и, в том числе, на яичники [13].

Известно, что факторами, определяющими риск необратимых изменений в яичниках, являются доза ионизирующего излучения и возраст больной. Так, доза излучения менее 1,5 Гр по данным ряда исследователей считается абсолютно «толерантной» для яич-

ников. При дозе от 1,5 до 8 Гр вероятность наступления менопаузы зависит от возраста пациентки и, соответственно, овариального резерва. Суммарная доза на яичники, равная 8 Гр и выше, приводит к стойкому прекращению овариальной функции [14].

Зарубежные исследования, посвященные изучению особенностей ЛТ РШМ с сохранением яичников, главным образом содержат материал о толерантности гонад к лучевой и химиотерапии, но при этом отсутствуют данные о защите транспозированных яичников с использованием конформного 3D планирования [14, 15]. Таким образом, проблема использования возможностей современной планирующей системы для минимизации дозы ионизирующего излучения, пришедшейся на яичники, представляет не только научный интерес ввиду недостаточной освещенности вопроса, но имеет и практическое значение, обусловленное отсутствием оптимальных методик, адаптированных к аппаратам нового поколения, осуществляющих конформную дистанционную лучевую терапию.

## Материал и методы

В условиях МНИОИ им. П.А.Герцена с декабря 2009 г. по декабрь 2011 г. у 44 женщин по поводу инвазивного РШМ проведено комбинированное лечение с транспозицией яичников. Средний возраст больных составил  $34,4 \pm 5,7$  (от 24 до 44 лет). Гистологическая структура опухолей была представлена в основном плоскоклеточным раком – 40 больных (90,9 %), различной степени дифференцировки: низкой – 22 (55 %), умеренной – 16 (40 %) и высокой – 2 (5 %). Аденокарцинома встретилась у 3 (6,8 %) больных и железисто-плоскоклеточный рак – у 1 (2,3 %) пациентки.

С учетом определенных клинических ситуаций больным проведено комбинированное лечение в различной последовательности хирургического и химиолучевого этапов.

У 26 пациенток, у которых опухолевый процесс был признан условно резектабельным и классифицировался как IB2, IIA, B и IIIB стадии FIGO (T<sub>1b2, 2a, b</sub> N<sub>0-1</sub> M<sub>0</sub>), было проведено предоперационное химиолучевое лечение. У данной группы пациенток во избежание развития постовариоэктомического синдрома на первом этапе лечения выполняли лапароскопическую транспозицию яичников. Техника данного хирургического вмешательства заключалась в отсечении придатков от матки с выделением сосудистой ножки яичников на протяжении 10–12 см и последующим проведением последних по латеральному каналу вверх до уровня реберной дуги с дальнейшей фиксацией к париетальной брюшине и подлежащим тканям боковых отделов живота [16]. У единственной пациентки выполнена транспозиция

одного яичника, второй кистозно измененный яичник был удален. На втором этапе, для уменьшения опухолевого объема и создания условий для радикального оперативного вмешательства, проводили предоперационную химиолучевую терапию, которая включала использование лекарственных препаратов 5-фторурацила ( $250 \text{ мг/м}^2$  в течение 5 дней) и цисплатина ( $20 \text{ мг/м}^2$  в течение 3 дней) на фоне дистанционного облучения малого таза в режиме динамического фракционирования дозы: РОД 4 Гр в течение первых 3 дней, далее РОД 2,5 Гр, до СОД 30 Гр. После чего проводили 2 сеанса внутриволостного облучения с РОД 5 Гр. На третьем этапе комбинированного лечения, через 2–3 недели после окончания химиолучевой терапии, выполняли расширенную экстирпацию матки.

Вторую группу составили 18 пациенток с распространенностью процесса IB<sub>1,2</sub> и IIIB стадии FIGO ( $T_{1b1,2}$ ,  $N_{0-1}$ ,  $M_0$ ), которым на первом этапе комбинированного лечения произведена расширенная экстирпация матки с транспозицией яичников лапаротомным доступом. На втором этапе больным проведена послеоперационная сочетанная лучевая терапия на область малого таза, которая осуществлялась путем чередования дистанционного и внутриволостного компонентов. Лечение начиналось с дистанционного облучения малого таза и путей лимфооттока с РОД 2,5 Гр. После достижения дозы 20 Гр присоединялась внутриволостная гамма-терапия, а дистанционная лучевая терапия продолжалась в чередовании с ней на зоны параметрального и лимфогенного метастазирования, до СОД 42,5–47,5 Гр в зависимости от стадии заболевания. Внутриволостная гамма-терапия проводилась на аппарате MULTISOURCE по принципу remote afterloading путем подведения системы овоидов к культе влагалища, РОД 5 Гр на расстоянии 1 см от слизистой культи, ритм облучения 2 раза в неделю, количество сеансов 4–5.

Предлучевая подготовка включала КТ-топометрию и, собственно, дозиметрические расчеты планов облучения. Перед КТ-топометрией больным маркировали культю влагалища (рентгеноконтрастной меткой). КТ-топометрия выполнялась на спиральном компьютерном томографе с использованием лазерных центраторов. Положение больной: лежа на спине, головой к аппарату, руки на груди, без одежды ниже пояса. Фиксирующие устройства под ноги и голову. Установка лазерных центраторов: сканирование от нулевой отметки до верхней границы больших половых губ с шагом томографа 0,5 см.

Для визуализации транспозированных яичников на КТ-сканах необходимо, чтобы нулевой скан был на уровне реберных дуг, т.к. хирургами производится фиксация придатков к латеральным отделам брюшной стенки в области подреберья.

Компьютерная система планирования ХЮ, связанная со спиральным компьютерным томографом через систему DICOM, принимает на свою станцию целую серию КТ-сканов, на каждом из которых выполняется оконтуривание мишени (шейка матки или культи влагалища, параметральная, ретропузырная клетчатка, зоны obturatorных, внутренних, наружных и общих подвздошных л/узлов). Верхняя граница объема облучения – бифуркация аорты (L 4–5), нижняя граница – нижний край obturatorных отверстий. Определение и оконтуривание клинического и планируемого объемов облучения (CTV+PTV) осуществлялись в соответствии с рекомендациями МКРЕ [International Commission on Radiation Units and Measurements: Prescribing, Recording and Reporting Photon Beam Therapy: ICRU Report 50. Bethesda, MD, 1993].

При планировании облучения важно учитывать дозу на окружающие ткани, поэтому помимо клинической мишени в планирующую систему вносили критические органы (мочевой пузырь, прямую кишку, сигмовидную кишку). Обязательному оконтуриванию подлежали транспозированные яичники, причем правый и левый – разным цветом, с целью оценки дозной нагрузки на каждый из них, после чего проводили дозиметрические расчеты.

Реализация дистанционного компонента облучения осуществлялась на линейном ускорителе электронов (тормозное излучение 18 МВ) оснащенном многолепестковым коллиматором, который позволяет облучить необходимый объем опухолевого поражения, имеющий сложную конфигурацию, и уменьшить лучевую нагрузку на органы риска, в частности транспозированные яичники.

В зависимости от расположения транспозированных яичников были разработаны и применены следующие методики облучения.

При локализации придатков матки выше верхней границы мишени более, чем на 1 см применялась методика 6-польного облучения с направлениями пучков  $0^\circ$ ,  $55^\circ$ ,  $100^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $260^\circ$  и  $305^\circ$  (рис. 1). В зависимости от анатомического строения тела пациентки данные направления могут варьировать в пределах  $10^\circ$ .

При положении яичников на уровне верхней границы мишени или ниже ее на 3–5 см единая мишень делилась на две части: верхнюю – анатомически соответствующую группе общих подвздошных лимфатических узлов, и нижнюю часть, состоящую из группы наружных, внутренних и obturatorных лимфатических узлов, а также шейки матки или культи влагалища, параметральной клетчатки. Верхнюю часть мишени, которая составляла не менее 4 см, облучали либо двумя противоположащими пучками – передним и задним,  $0^\circ$  и  $180^\circ$  соответственно (рис. 2а), либо одним передним. Использование одного поля предпочтительно у пациенток астенической конституции при

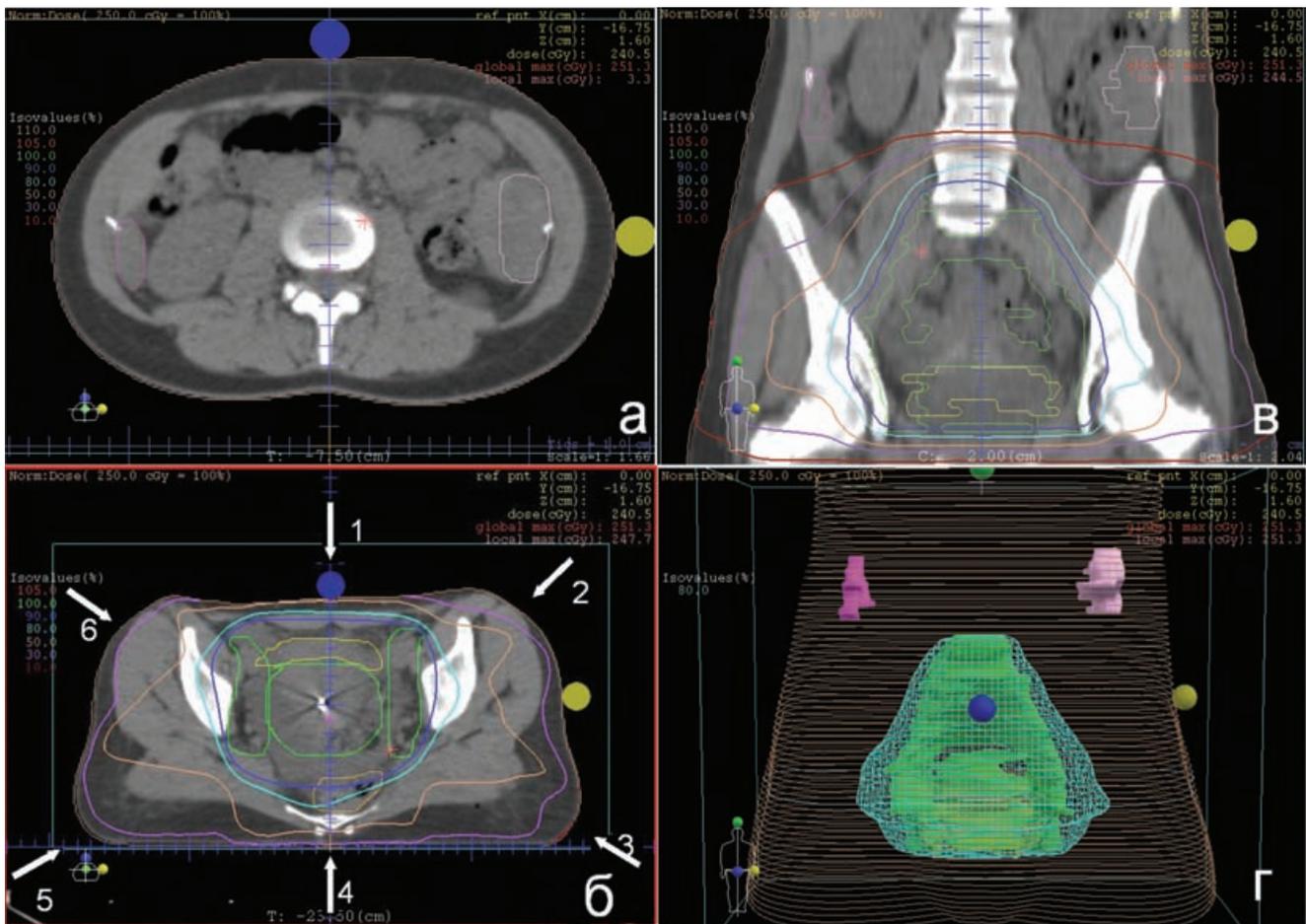


Рис. 1. Дозное распределение при 6-польной методике облучения, когда яичники транспозированы выше мишени более чем на 1 см

а – трансверсальное сечение на уровне яичников (показано отсутствие дозы на яичники); б – трансверсальное сечение на уровне шейки матки; в – фронтальное сечение; г – 3D изображение с 80 % изодозой, охватывающей мишень

глубине залегания верхней части мишени менее 8–9 см (рис. 2б). Облучение нижней часть мишени проводили по 6-польной методике (рис. 2в).

Для исключения лучевого воздействия, которое может приходиться на придатки с нижнего объема облучения, необходимо, чтобы граница, разделяющая две мишени, находилась ниже нижнего полюса яичников более чем на 1 см. Поэтому высота верхней части мишени может варьировать в зависимости от места нахождения яичников. Следует отметить, что яичники при этом располагались от срединной линии более чем на 5 см.

При низком расположении одного или обоих яичников, в случае их короткой сосудистой ножки из-за анатомических особенностей пациентки, были выбраны два противоположных пучка – передний и задний, 0° и 180° соответственно, с такими весовыми вкладками, чтобы было достигнуто оптимальное дозовое распределение в мишени (рис. 3). Яичники при этом отстояли от срединной линии более чем на 8 см.

## Результаты и обсуждение

Поскольку суммарные очаговые дозы, подводимые к мишени, при лапароскопической и лапаротомной транспозиции были различны ввиду разных задач облучения (предоперационные и послеоперационные), то дозы, полученные яичниками, при обоих доступах оценивались отдельно.

Использование вышеуказанных методик облучения у больных первой группы, которым яичники были перемещены лапароскопическим доступом, позволило исключить их из зоны ионизирующего облучения. Поэтому среднее значение дозы, полученной яичниками, составило 0,53 Гр, при вариации от 0,13 до 3,5 Гр. При этом из 25 больных, которым были транспозированы оба яичника, у 21 (84 %) пациентки дозы, пришедшиеся на гонады, составили менее 1 Гр, у 3 (12 %) – от 1 до 1,5 Гр. У единственной больной (4 %) доза, полученная одним яичником, превысила 1,5 Гр и составила 3,5 Гр (второй яичник при этом получил 0,82 Гр). В одном случае, когда был

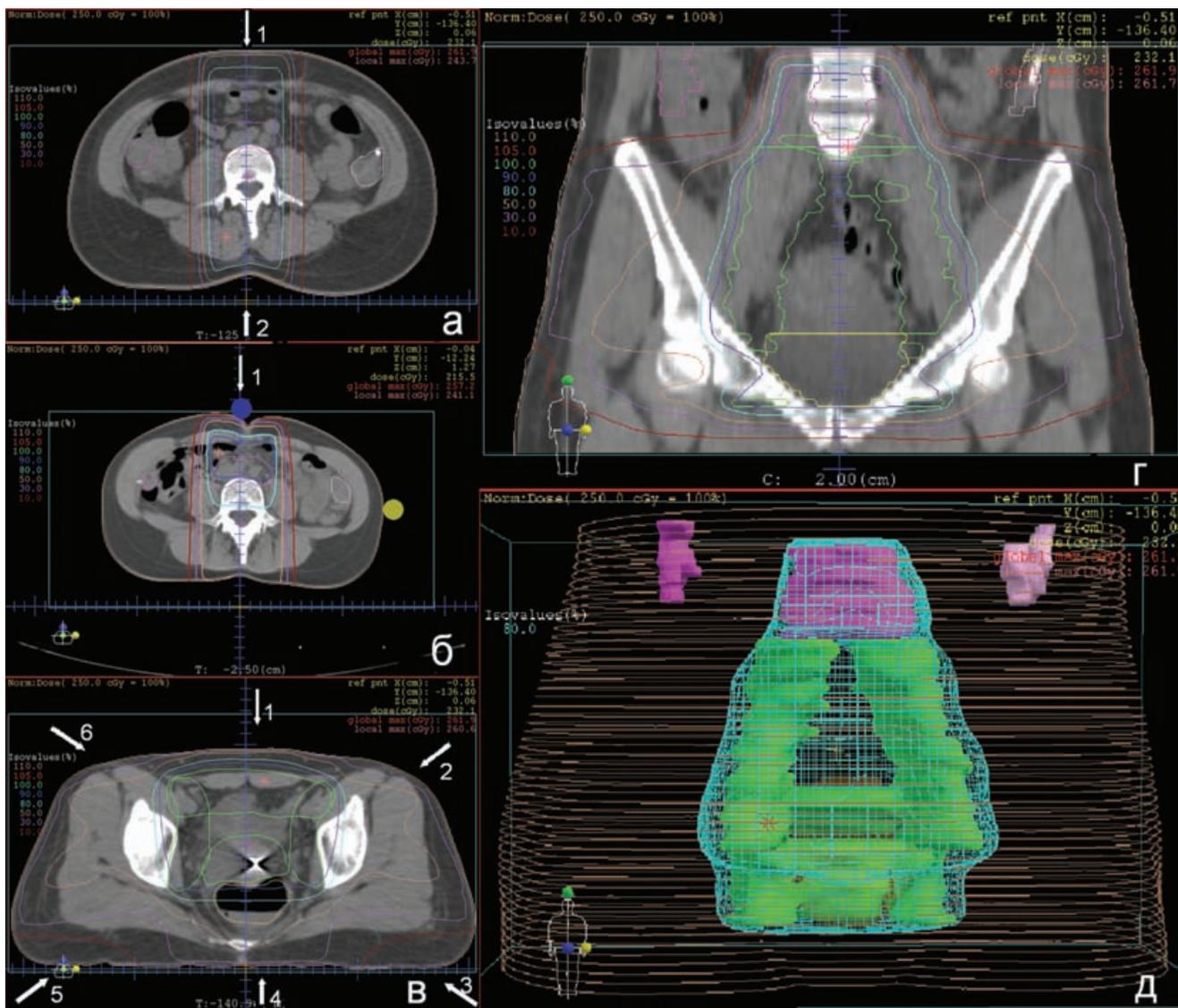


Рис. 2. Дозное распределение при облучении «верхней» и «нижней» частей мишени, когда яичники транспозированы на уровне «верхней» части мишени  
 а – трансверсальное сечение на уровне «верхней» части мишени, два противоположных пучка; б – трансверсальное сечение на уровне «верхней» части мишени, один пучок при глубине залегания мишени менее 8–9 см; в – трансверсальное сечение на уровне «нижней» части мишени, 6-польная методика; г – фронтальное сечение; д – 3D изображение с 80 % изодозой, охватывающей мишень

транспозирован один яичник, доза, пришедшаяся на него, составила 0,23 Гр.

Отмечено, что правые придатки, в силу особенностей лапароскопической техники выполнения, перемещаются выше, чем левые. Поэтому доза, полученная правым яичником, составила в среднем 0,42 Гр (от 0,13 до 1,18 Гр), тогда как левым яичником – 0,63 Гр (от 0,13 до 3,5 Гр).

Ведущим в определении выбора методики облучения было местонахождение придатков.

При расположении обоих яичников выше мишени и применяемой 6-польной методикой облучения,

у 1 пациентки (3,8 %), на правые придатки получена доза, равная 0,46 Гр, на левые – 0,59 Гр.

При положении обоих или одного из придатков на уровне верхней границы мишени или ниже ее на 3–5 см, у 22 пациенток (84,6 %), среднее значение дозы на правый яичник составило 0,4 Гр (от 0,13 до 1,18 Гр), на левый яичник – 0,49 Гр (от 0,13 до 1,41 Гр).

Крайне редко встречалась клиническая ситуация, при которой один или оба яичника были транспозированы низко, у 3 (11,6 %) больных, – правые гонады получили 0,54 Гр (от 0,36 до 0,82 Гр), левые – 1,67 Гр (от 0,13 до 3,5 Гр).

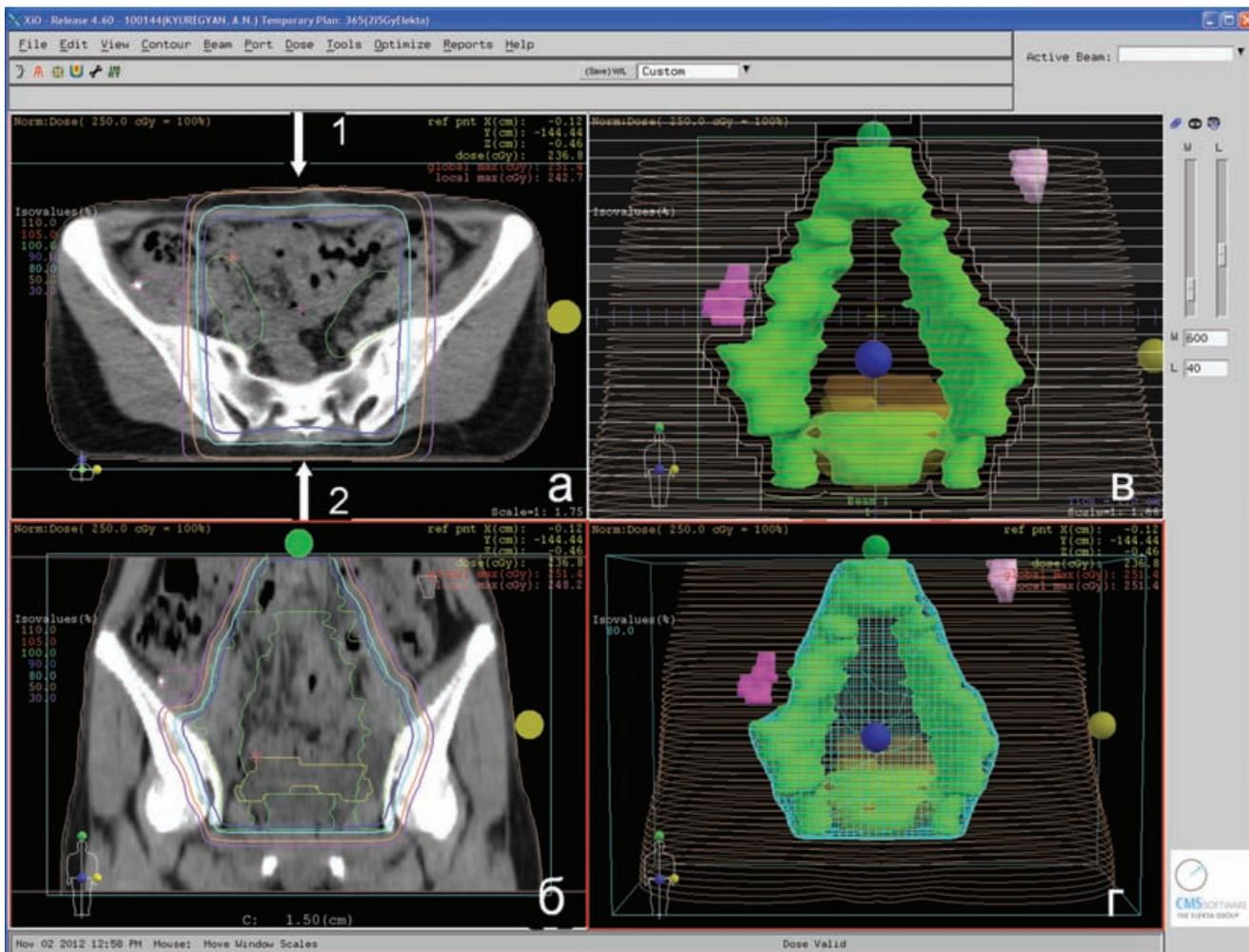


Рис. 3. Дозное распределение при облучении мишени двумя противлежащими пучками, когда один из яичников транспозирован «низко»

а – трансверсальное сечение на уровне транспозированного яичника; б – фронтальное сечение; в – изображение мишени из переднего пучка (BEV); г – 3D изображение с 80 % изодозой, охватывающей мишень

Лучевая нагрузка на мочевой пузырь и прямую кишку при использовании 6-польной методики составила 27,4 Гр (23–28,5 Гр) и 23,7 Гр (19,5–28,2 Гр) соответственно. В случае применения двух встречных пучков (как отмечалось ранее, это редко встречаемая клиническая ситуация), указанные органы риска получили дозу, равную СОД мишени, т.е. по 30 Гр.

Анализ дозного распределения при использовании описанных выше методик у больных второй группы, когда операция выполнялась лапаротомным доступом, показал, что ни в одном случае придатки не входили в зону облучения. Исключение составила единственная пациентка, оперированная в другом лечебном учреждении, у которой в связи с отсутствием маркировки танталовыми скрепками перемещенных яичников не удалось визуализировать правый яичник. Это свидетельствует о необходимости маркировать придатки рентгеноконтрастными клипсами.

Среднее значение дозы, пришедшейся на яичники, транспозированные лапаротомным доступом, (когда мишень получила СОД – 42,5–47,5 Гр), составило 1,31 Гр (от 0,34 до 4,14 Гр). Обращает на себя внимание, что при открытом оперативном вмешательстве, в отличие от лапароскопического доступа, левые придатки перемещаются выше, чем правые, что объясняет несколько большую дозную нагрузку на последние. Так, среднее значение СОД, полученной правым яичником, составило 1,62 Гр (от 0,38 до 4,14 Гр), левым яичником – 1,02 Гр (от 0,34 до 2,52 Гр).

Из 17 пациенток с двумя визуализируемыми яичниками у 6 (35,3 %) больных доза, пришедшаяся на придатки, была менее 1 Гр, у 10 (58,8 %) больных – от 1 до 2,89 Гр. У одной пациентки (5,9 %), доза, полученная правым яичником, составила 4,14 Гр (левый яичник при этом получил 1,62 Гр). У единственной

женщины с визуализированным левым яичником доза, пришедшаяся на него, составила 1,8 Гр.

При расположении обоих яичников выше мишени у 1 пациентки (5,5 %) гонады получили равную дозу (по 0,38 Гр).

При положении обоих или одного из придатков на уровне верхней границы мишени или ниже ее на 3–5 см, у 14 пациенток (77,8 %), среднее значение дозы на правый яичник составило 1,38 Гр (от 0,38 до 2,89 Гр), на левый яичник – 0,87 Гр (от 0,34 до 2,52 Гр).

При низкой топике одного или обоих яичников, у 3 (16,7 %) больных – правые гонады получили 3,07 Гр (от 2,38 до 4,14 Гр), левые гонады – 1,93 Гр (от 1,62 до 2,38 Гр).

Среднее значение дозы на мочевой пузырь и прямую кишку при 6-польной методике составило 29,4 Гр (24,5–35,7 Гр) и 24,3 Гр (22–33 Гр) соответственно. При использовании встречных пучков дозная нагрузка, пришедшаяся на данные критические органы, составила 38,5 Гр (35,3–39,8 Гр) и 30,2 Гр (27,6–32,6 Гр) соответственно.

### Выводы

Разработанные методики с реализацией возможностей конформного облучения на современной радиационно-терапевтической аппаратуре позволяют исключить транспозированные яичники из зоны ионизирующего излучения.

Местоположение перемещенных яичников определяет методику лучевой терапии.

При лапароскопической транспозиции яичников с предоперационной дистанционной лучевой терапией в СОД 30 Гр доза, пришедшаяся на придатки, составила 0,53 Гр (от 0,13 до 3,5 Гр). При лапаротомической транспозиции яичников с послеоперационной дистанционной лучевой терапией в СОД 42,5–47,5 Гр доза, полученная гонадами, составила 1,31 Гр (от 0,34 до 4,14 Гр).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айламазян Э.К., Потин В.В., Тарасова М.А. Гинекология от пубертата до постменопаузы: практическое руководство для врачей. – М.: МЕД пресс-информ, 2004, С. 340–342.
2. Сухин В.П. Метастатическое поражение яичников при раке шейки матки. // Онкология, 2008, **10**, № 3, С. 374–376.
3. Landoni F., Zanagnolo V., Lovato-Diaz L. et al. Ovarian metastases in early-stage cervical cancer (IA2–IIA): a multicenter retrospective study of 1695 patients (a Cooperative Task Force study). // Int. J. Gynecol. Cancer, 2007, No.17, P. 623–628.
4. Shimada M., Junzo Kigawa, Ryuichiro Nishimura et al. Ovarian metastasis in carcinoma of the uterine cervix. // Gynecol. Oncology, 2006, **101**, P. 234–237.
5. Hodel K., Rich M., P. Austin et al. The role of ovarian transposition in conservation of ovarian function in radical hysterectomy followed by pelvic radiation. // Gynecol. Oncol., 1982, **13**, P. 195–202.
6. Husseyzadeh N., Nahhas W.A., Velkley D.E. et al. The preservation of ovarian function in young women undergoing pelvic radiation therapy. // Gynecol. Oncol., 1982, **18**, P. 373–379.
7. Вознесенский В.И. Транспозиция яичников при функционально-щадящем лечении инвазивных форм рака шейки матки. – М.: Автореферат дисс. канд. мед. наук, МНИОИ им. П.А. Герцена, 1995.
8. Ferrari S., Persico P., Di Puppo F. et al. Laparoscopic lateral ovarian transposition: a fertility sparing procedure. // Minerva Ginecol., 2009, **61**, No. 5, P. 465–468.
9. Pahisa J., Martinez-Roman S., Martinez-Zamora P. et al. Laparoscopic ovarian transposition in patients with early cervical cancer. // Int. J. Gynecol. Cancer, 2008, **18**, No. 3, P. 584–589.
10. Gareer W., Gad Z., Gareer H. Needle oophorepexy: a new simple technique for ovarian transposition prior to pelvic irradiation. // Surg. Endosc., 2011, **25**, P. 2241–2246.
11. Ajala T., Rafi J., Larsen-Disney P., Howell R. Fertility preservation for cancer patients: A Review. // Obstetrics and Gynecology Internat., 2010, Article ID 160386, P. 9–12.
12. Eitan R., Krissi H., Beller U. et al. Laparoscopic adnexal transposition novel surgical technique. // Int. J. Gynecol. Cancer, 2011, **21**, P. 1704–1707.
13. van de Bunt L., van der Heide U.A., Ketelaars M. et al. Conventional, conformal, and intensity-modulated radiation therapy treatment planning of external beam radiotherapy for cervical cancer: the impact of tumor regression. // Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys., 2006, **64**, No. 1, P. 189–196.
14. Wallace W.H.B., Shalet S.M., Hendry J.H. et al. Ovarian failure following total abdominal irradiation in childhood: the radiosensitivity of the human oocyte. // Brit. J. Radiol., 1989, **62**, P. 995–998.
15. Jaymeson S., Strouk et al. Effects of cancer treatment on ovarian function. // Fertility and Sterility, 2009, **92**, No. 2, P. 417–428.
16. Новикова Е.Г., Антипов В.А., Шевчук А.С. Лапароскопическая транспозиция яичников в комбинированном лечении больных раком шейки матки. – М.: Медицинская технология, ФГУ МНИОИ им. П.А. Герцена, 2009.

Поступила: 08.11.2012

Принята к публикации: 26.12.2012

**О.А. Архипова, Т.В. Мартынюк, Л.Е. Самойленко, В.Б. Сергиенко,  
И.Е. Чазова**

**ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРФУЗИОННОЙ СЦИНТИГРАФИИ ЛЕГКИХ  
У БОЛЬНЫХ С ЛЕГОЧНОЙ ГИПЕРТЕНЗИЕЙ РАЗЛИЧНОЙ  
ЭТИОЛОГИИ**

**О.А. Arkhipova, T.V. Martynyuk, L.E. Samoilenko, V.B. Sergienko,  
I.E. Chazova**

**Application of Perfusion Lung Scintigraphy in Patients with Pulmonary  
Hypertension of Various Etiologies**

РЕФЕРАТ

**Цель:** Изучение нарушения легочной перфузии у больных с легочной гипертензией (ЛГ) различного генеза по данным перфузионной сцинтиграфии легких.

**Материал и методы:** Обследовано 94 пациента с ЛГ, в том числе 20 пациентов с ЛГ, ассоциированной с врожденными пороками сердца (ВПС), 21 пациент с хронической тромбоэмболической ЛГ (ХТЭЛГ), 20 пациентов с ЛГ, ассоциированной с системными заболеваниями соединительной ткани (СЗСТ), и 33 пациента с идиопатической ЛГ (ИЛГ). Группы были сопоставимы по возрасту, полу, дистанции, пройденной в тесте 6-минутной ходьбы, функциональному классу, частоте имеющихся отеков как проявления сердечной недостаточности. После проведения общеклинического обследования с целью уточнения диагноза заболевания всем больным была выполнена перфузионная сцинтиграфия легких.

**Результаты:** Между группами больных с ЛГ были обнаружены статистически достоверные различия в зависимости от этиологии заболевания. У больных с ЛГ, ассоциированной с ВПС, выявлено достоверное перераспределение легочного кровотока в сторону правого легкого. Распределение кровотока в пределах каждого легкого, а также верхушечно-основной градиент перфузии ( $U/L_{-o}$ ) были не нарушены. Включение РФП в органы большого круга кровообращения свидетельствует о наличии функционирующего легочно-системного шунта. У больных с ХТЭЛГ визуализированы более крупные дефекты перфузии преимущественно в нижних отделах, что привело к повышению  $U/L_{-o}$ . Распределение включения РФП между правым и левым легкими не нарушено. У больных с ЛГ, ассоциированной с СЗСТ, обнаружены наиболее выраженные нарушения легочной микроциркуляции в виде значительного снижения перфузии верхней зоны Веста и  $U/L_{-o}$ . У больных с ИЛГ выявлено статистически незначимое перераспределение легочного кровотока в сторону правого легкого, мозаичное снижение перфузии легких с обеднением верхних зон Веста и снижение  $U/L_{-o}$ .

**Ключевые слова:** перфузионная сцинтиграфия легких, легочная гипертензия, количественная оценка сцинтиграмм

ABSTRACT

**Purpose:** To study changes of pulmonary perfusion in patients with pulmonary hypertension (PH) of various genesis according to perfusion lung scintigraphy.

**Materials and methods:** The study included 94 patients with PH: 20 patients from PH associated with congenital heart diseases (CHD), 21 patients with chronic thromboembolic pulmonary hypertension (CTEPH), 20 patients with PH associated with connective tissue diseases (CTD) and the 33 patient with idiopathic PH (IPAH). Groups were comparable by age, sex, distance passed in the 6-minute test of walking, a functional class, frequency of edemas, implications of a heart failure. After carrying out the whole-clinical inspection for the diagnosis specification the perfusion lung scintigraphy was performed for all patients.

**Results:** Found differences appeared to be depending on the PH etiology. Significant intensifying of perfusion of the right lung has been revealed in PH with CHD associated patients. Blood flow distribution in each lung and the upper/lower gradient of perfusion ( $U/L_{-o}$ ) weren't broken. Inclusion of radiopharmaceutical means in organs of large circulation circle testified an existence of functioning pulmonary-systemic shunt. Large-scale defects of perfusion in the lower parts and increase of  $U/L_{-o}$  was revealed in CTEPH patients. There was no disturbance in inclusion of radiopharmaceutical means among right and left lungs. Distribution of including of RFP between right and left lungs isn't broken. The most expressed depression of perfusion of the upper Vest zone and  $U/L_{-o}$  was found in LG associated with CTD patients. Patients with IPAH revealed non-significant redistribution of lung blood circulation in direction to right lung with perfusion and pauperization of the upper Vest zones and  $U/L_{-o}$  decreasing.

**Key words:** perfusion lung scintigraphy, pulmonary hypertension, quantitative assessment of scintigrams

**Введение**

Легочная гипертензия (ЛГ) объединяет группу заболеваний, характеризующихся прогрессирующим повышением легочного сосудистого сопротивления, давления в легочной артерии (ЛА) и ее ветвях, а также в правых отделах сердца. Это, в свою очередь,

приводит к ремоделированию сердца и сосудов, развитию правожелудочковой сердечной недостаточности и преждевременной гибели пациентов.

Диагностическими критериями ЛГ являются повышение среднего давления в ЛА (ДЛАСр) более 25 мм рт. ст. в покое и легочного сосудистого сопротивления (ЛСС) более 3 единиц Вуда (или  $240 \text{ дин} \times \text{сек} \times \text{см}^{-5}$ ) по

данным катетеризации правых отделов сердца (КПОС) [(3)].

Современная отечественная классификация включает 5 клинических групп [1]:

- 1) артериальная ЛГ (в том числе идиопатическая ЛГ (ИЛГ), ассоциированная с врожденными пороками сердца (ВПС) и системными заболеваниями соединительной ткани);
- 2) ЛГ, ассоциированная с поражением левых отделов сердца;
- 3) ЛГ, ассоциированная с патологией дыхательной системы и/или гипоксемией;
- 4) ЛГ вследствие хронических тромботических или эмболических заболеваний;
- 5) смешанные формы ЛГ.

В настоящее время в литературе отмечается дефицит исследований, посвященных изучению перфузии легких у больных с ЛГ различной этиологии. Единичные работы включают небольшие группы больных и носят несистемный характер. Вместе с тем, исследование перфузии легких является востребованным методом в дифференциальной диагностике у больных с ЛГ [1]. Впервые на тесную взаимосвязь между давлением в левом предсердии и изменениями легочной перфузии у пациентов с митральным пороком сердца указали W. Friedman и E. Braunwald [2]; у больных с повышенным венозным давлением в малом круге кровообращения возрастает кровоток в верхних зонах правого и левого легких и уменьшается в нижних зонах. Позднее подобное перераспределение было выявлено у больных с другими пороками сердца [3] и ишемической болезнью сердца [4]. В малочисленных работах, посвященных изучению перфузии легких у пациентов с ЛГ, ассоциированной с системными заболеваниями соединительной ткани (СЗСТ), сообщается о снижении перфузии, которую авторы связывают с наличием васкулита и внутрисосудистой микрокоагуляции [5]. У пациентов с ВПС скинтиграфическая картина может быть не изменена, либо встречаются очаговые дефекты перфузии, связанные с перенесенной тромбоэмболией легочной артерии (ТЭЛА) [3, 6]. Скинтиграфическая картина при ИЛГ также может быть не измененной, либо представлена множественными мелкими периферическими субсегментарными дефектами перфузии, в отличие от более крупных дефектов в долевыми и сегментарными зонами при хронической тромбоэмболической легочной гипертензии (ХТЭЛГ) [7, 8]. При этом степень нарушения перфузии может свидетельствовать о тяжести ЛГ.

Имеются лишь единичные работы, посвященные сравнительной оценке скинтиграфической картины у больных с ИЛГ и ХТЭЛГ [7]. Сравнительная оценка изменений перфузии при других формах ЛГ в литературе не доступна. Вместе с тем, при выявлении достоверных различий, это может иметь большое практическое применение.

Целью настоящего исследования явилось изучение нарушения легочной перфузии у больных с ЛГ различного генеза по данным перфузионной скинтиграфии легких.

### Материал и методы

В исследование были включены 94 пациента с ЛГ, находившихся на стационарном лечении в Отделе системных гипертензий Института клинической кардиологии им. А.Л. Мясникова РК НПК. Из них 20 пациентов с ЛГ, ассоциированной с ВПС (8 пациентов с дефектом межпредсердной перегородки, 7 пациентов с открытым артериальным протоком, 3 пациента с сочетанным дефектом межжелудочковой перегородки (ДМЖП) и ОАП и 2 с ДМЖП), 21 пациент с ХТЭЛГ, 20 пациентов с ЛГ, ассоциированной с СЗСТ (больные системной склеродермией) и 33 пациента с ИЛГ (рис. 3).

Группы были сопоставимы по возрасту ( $38,9 \pm 12,9$ ,  $45,7 \pm 12,5$ ,  $47,3 \pm 13,6$ ,  $37,5 \pm 10,5$  лет;  $p > 0,05$ ), полу (в каждой группе женщин было больше, чем мужчин ( $p = 0,08$ )), дистанции, пройденной в тесте 6-минутной ходьбы ( $354,3 \pm 7,2$  м,  $371,9 \pm 149,6$  м,  $358,6 \pm 85,2$  м,  $377,3 \pm 85,9$  м;  $p > 0,05$ ), степени одышки по Боргу ( $3,4 \pm 1,3$ ,  $3,6 \pm 1,2$ ,  $3,0 \pm 1,3$ ,  $3,5 \pm 1,6$  балла;  $p > 0,05$ ). Функциональный класс III по классификации ВОЗ достоверно чаще, чем остальные классы, встречался во всех группах ( $p = 0,07$ ). Также не было выявлено значимых различий при анализе частоты проявлений сердечной недостаточности: в первой группе отеки отмечены у 44 %, во второй — у 33 %, в третьей — у 40 %, в четвертой — у 45 % больных.

Группы достоверно различались по длительности ЛГ: наибольшая была у пациентов с ВПС — 9 (4–21) лет ( $p = 0,01$ ); во второй группе 2 (1,5–6) лет, в третьей 2,5 (0,75–7) лет, в четвертой 4 (2–7) лет. Кроме того, у больных с ИЛГ наиболее часто (52 %;  $p = 0,003$ ) в анамнезе встречались обмороки в сравнении с ВПС (11 %), ХТЭЛГ (19 %) и СЗСТ (15 %).

Так же группы значимо различались по уровню гемоглобина. Максимальное значение был выявлено у больных с ВПС (15,8 г/дл), минимальное — у больных с СЗСТ ( $13,3 \pm 2,0$  г/дл;  $p = 0,007$ ). У пациентов с ТЭЛА и ИЛГ выявлены схожие показатели ( $14,4 \pm 2,3$  г/дл,  $14,8 \pm 2,1$  г/дл соответственно).

Всем больным с ЛГ было проведено тщательное общеклиническое обследование с целью уточнения диагноза заболевания. При необходимости проводилась катетеризация правых отделов сердца.

Всем больным была проведена перфузионная скинтиграфия легких на двухдетекторной гамма-камере «Sky Light» фирмы Philips. Предварительно гамма-камеру настраивали на энергетический пик  $^{99m}\text{Tc}$  140 кэВ при ширине окна дифференциального дискриминатора 20 %.

Радиофармацевтический препарат (РФП)  $^{99m}\text{Tc}$ -МАА для проведения перфузионной сцинтиграфии легких готовили непосредственно перед введением пациенту согласно инструкции фирмы-изготовителя. РФП активностью 111–148 МБк вводили в кубитальную вену в положении пациента сидя. Регистрацию изображения начинали спустя 10 мин после инъекции.

Запись изображения осуществляли по стандартному протоколу исследования в 4 проекциях (передняя, задняя, левая боковая и правая боковая). При необходимости дополнительно регистрировали левую и правую переднюю косую  $45^\circ$  проекции. Исследование выполняли в положении больного лежа на спине. Руки располагались вдоль туловища в передней, задней и косых проекциях, за головой в боковых проекциях. На каждую проекцию набирали 1 млн импульсов в матрицу  $256 \times 256$ . Специальной подготовки к исследованию не требовалось.

Обработку сцинтиграмм осуществляли на компьютере (фирма Philips), сопряженном с гамма-камерой, по протоколу программы для оценки легочной перфузии.

Анализ пульмоносцинтиграмм состоял из визуальной и количественной оценки. При визуальном анализе оценивали наличие включения РФП в легкие, четкость контуров изображения легких, характер распределения РФП (равномерный/неравномерный), наличие участков сниженной аккумуляции РПФ с оценкой их количества (единичные/множественные), формы, размера по отношению к размеру сегмента, локализации с указанием сегментов. Определяли наличие включения РФП вне зоны интереса, т.е. вне области проекции легких (в органах большого круга кровообращения).

Диагноз ТЭЛА считали высоко вероятным при наличии на сцинтиграммах не менее двух больших прилегающих друг к другу сегментарных дефектов перфузии, либо при наличии арифметического эквивалента умеренных дефектов перфузии, или большого и умеренного дефекта перфузии при отсутствии изменений в этих сегментах на рентгенограммах легких (критерии RЮPED) [9, 10].

Количественную оценку сцинтиграмм проводили, используя изображения легких, полученные в передней и задней проекциях. Определяли скорость счета импульсов для каждого легкого, которую вычисляли как среднее арифметическое значение между скоростью счета импульсов в передней и задней проекциях. Также определяли процентное соотношение накопления РФП в правом и левом легком. Помимо этого рассчитывали средний процент включения РФП в верхнюю (ВЗВ), среднюю и нижнюю (НЗВ) зоны Веста по изображениям, полученным в передней и задней проекциях. При оценке

процентного соотношения накопления РФП по зонам Веста за 100 % принимали включение РФП в каждое легкое. Поскольку в литературе представлены границы нормального распределения РФП в зонах Веста, рассчитанные исходя из суммарных значений накопления РПФ в обоих легких [11], для выполнения данного исследования был сделан перерасчет с вычислением аккумуляции РФП в каждом легком в отдельности. Полученные таким образом результаты нормального распределения РПФ представлены в табл. 1.

Таблица 1

### Нормальные значения распределения РФП в легких

Зоны Веста, %	Правое легкое	Левое легкое
Верхняя	22,5 – 27,5	21,4 – 23,4
Средняя	36,8 – 39,6	38,0 – 40,4
Нижняя	35,0 – 38,6	36,7 – 40,1

Кроме оценки региональной перфузии легких вычисляли верхушечно-основной градиент перфузии ( $U/L-Q$ ) в правом и левом легких по формуле:  $U/L-Q = \text{накопление РФП ВЗВ (\%)} / \text{накопление РФП в НЗВ (\%)}$ .

Статистическую обработку результатов проводили при помощи компьютерной программы Statistica v. 6.1 for Windows (StatSoft Inc., USA). Большинство параметров соответствуют нормальному распределению. Различия считались статистически значимыми при уровне значимости  $p < 0,05$ .

### Результаты

У всех пациентов с повышенным давлением в ЛА при проведении сцинтиграфии легких визуализировалось мозаичное нарушение перфузии.

У пациентов с ВПС при визуальном анализе отмечалось перераспределение кровотока между легкими в виде обеднения перфузии левого легкого и усиления правого. При количественной оценке сцинтиграмм включение РФП в левое легкое в этой группе пациентов было наименьшим, при сравнении с больными ТЭЛА ( $p = 0,02$ ) и с СЗСТ ( $p = 0,05$ ). Перфузия в ВЗВ левого легкого была увеличена, в нижних зонах – снижена с обеих сторон. Градиент перфузии  $U/L-Q$  в правом и левом легком оставался в пределах нормальных значений (рис. 1). У 14 больных на сцинтиграммах визуализировалось включение РФП во внутренние органы (почки, селезенка, щитовидная железа). При сопоставлении результатов эхокардиографии и сцинтиграфии у больных с ВПС закономерно получена высокая корреляционная связь ( $r = 0,70$ ;  $p < 0,0001$ ) между наличием сброса крови при внутрисердечных дефектах и визуализацией РФП в органах большого круга кровообращения.

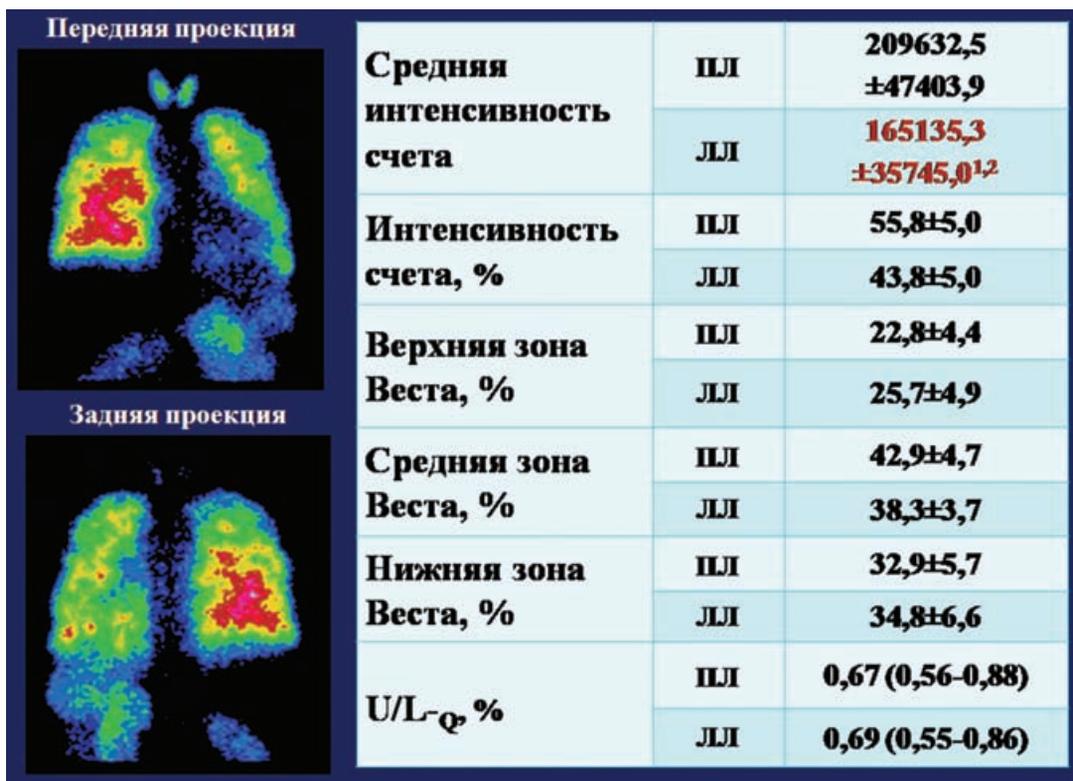


Рис. 1. Показатели легочной перфузии у больных с легочной гипертензией вследствие ВПС  
<sup>1</sup> $p_{\text{ТЭЛА-ВПС}} = 0,02$ ; <sup>2</sup> $p_{\text{ВПС-ЗСТ}} = 0,05$

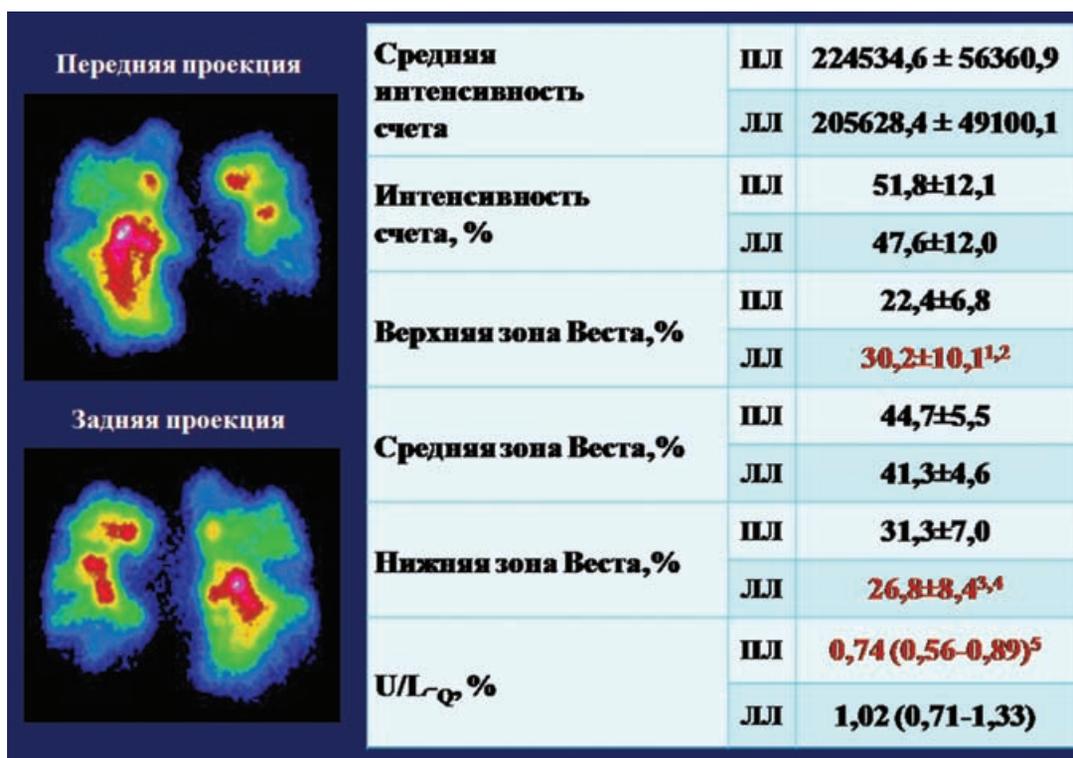


Рис. 2. Показатели легочной перфузии у больных легочной гипертензией вследствие ТЭЛА  
<sup>1</sup> $p_{\text{ТЭЛА-ЗСТ}} = 0,01$ ; <sup>2</sup> $p_{\text{ИЛГ-ТЭЛА}} = 0,004$ ; <sup>3</sup> $p_{\text{ВПС-ТЭЛА}} = 0,006$ ; <sup>4</sup> $p_{\text{ИЛГ-ТЭЛА}} = 0,0009$ ; <sup>5</sup> $p_{\text{ТЭЛА-ИЛГ}} < 0,05$

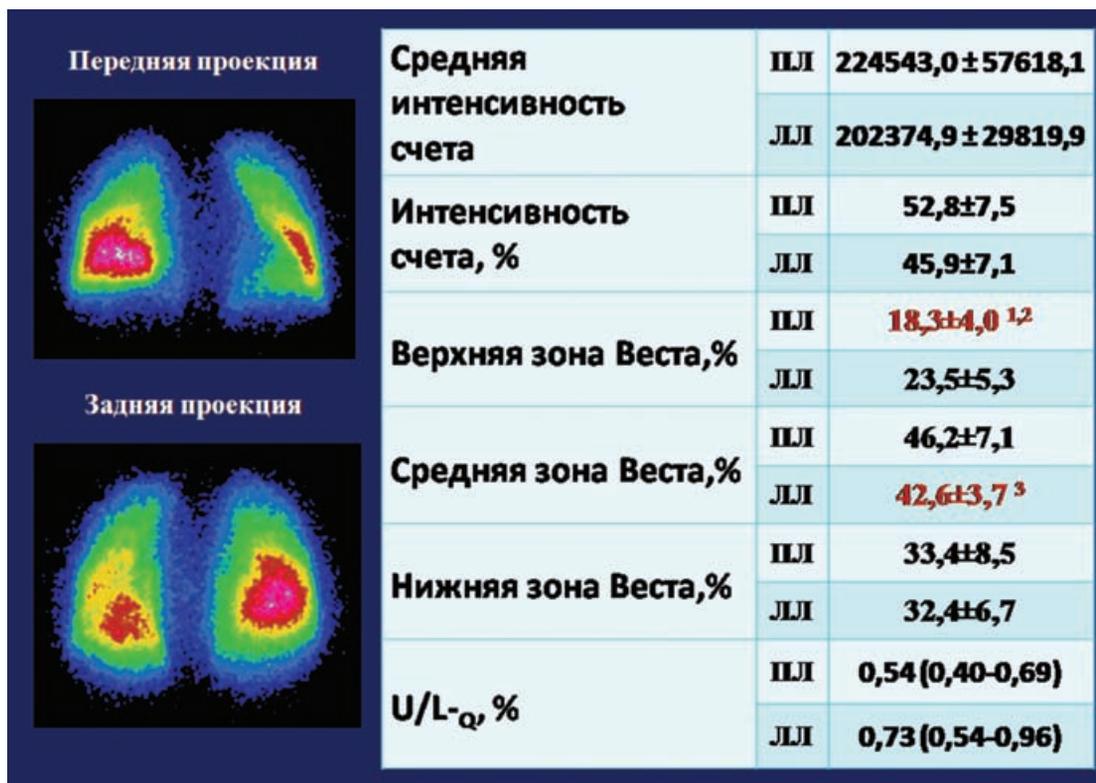


Рис. 3. Показатели легочной перфузии у больных с легочной гипертензией, ассоциированной с системной склеродермией  
<sup>1</sup> $p_{\text{ВПС-ЗСТ}} = 0,04$ ; <sup>2</sup> $p_{\text{ТЭЛА-ЗСТ}} = 0,04$ ; <sup>3</sup> $p_{\text{ВПС-ЗСТ}} = 0,01$

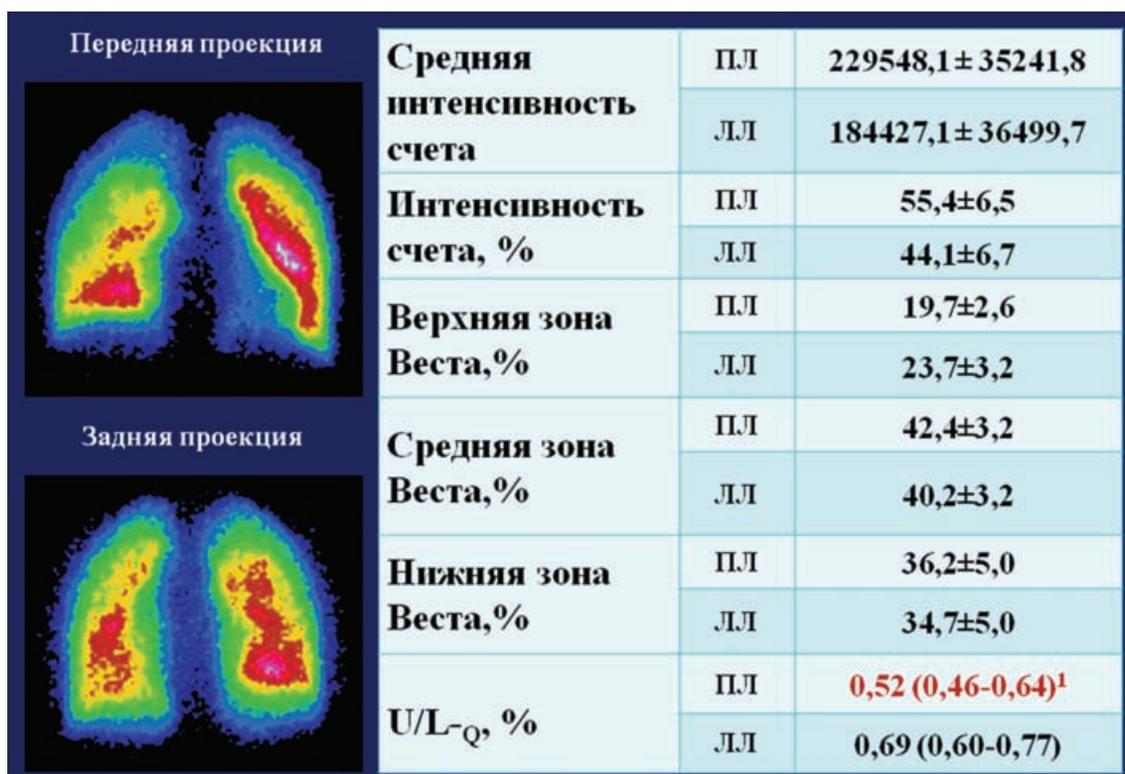


Рис. 4. Показатели легочной перфузии у больных с идиопатической легочной гипертензией  
<sup>1</sup> $p_{\text{ТЭЛА-илг}} < 0,05$

При визуальном анализе скинтиграмм у больных с ТЭЛА, в отличие от остальных групп, имелись крупные дефекты перфузии, преимущественно в НЗВ. По данным количественной оценки, распределение РФП между легкими было не нарушено. Отмечалось увеличение перфузии в ВЗВ левого легкого. В правом легком распределение кровотока было на нижней границе нормы. Включение РФП в ВЗВ левого легкого было максимальным по сравнению с другими группами и достоверно отличалось от больных с СЗСТ и ИЛГ. Обращало на себя внимание наиболее выраженное, по сравнению с пациентами других групп, повышение градиента перфузии  $U/L_{-q}$ , связанное со значительным обеднением перфузии нижних долей, в большей степени в левом легком. Снижение перфузии в нижней доле левого легкого у больных ТЭЛА достоверно отличалась от групп больных с ВПС и ИЛГ (рис. 2).

В группе больных с ЛГ, ассоциированной с СЗСТ, при визуальной оценке обращало на себя внимание обеднение перфузии ВЗВ обоих легких. Количественный анализ показал, что соотношение включения РФП между правым и левым легкими не было нарушено. Перфузия ВЗВ правого легкого была значительно снижена (на 18,7 %) в сравнении с нормальными значениями и достоверно отличалась от групп больных с ВПС и ТЭЛА. Перфузия ВЗВ левого легкого оставалась на верхней границе нормы. Выявлено обеднение НЗВ обоих легких. Отмечалось снижение  $U/L_{-q}$  справа на фоне небольшого увеличения градиента слева (рис. 3).

У больных с ИЛГ, так же как у больных с ЛГ, ассоциированной с СЗСТ, при визуальной оценке обращало на себя внимание обеднение перфузии ВЗВ обоих легких. Количественная оценка позволила выявить незначительное перераспределение перфузии в сторону правого легкого. Выявлено снижение перфузии в ВЗВ справа и НЗВ левого легкого. Градиент перфузии  $U/L_{-q}$  в правом легком был снижен и, по сравнению с остальными группами, был минимальным, в левом легком — был подобен  $U/L_{-q}$  в группе больных с ВПС (рис. 4).

При выявлении взаимосвязи между уровнем давления в ЛА и распределением РФП в легких были получены лишь слабые корреляции между перфузией в ВЗВ справа с систолическим давлением в ЛА ( $r = 0,36$ ;  $p = 0,009$ ),  $DLA_{cp}$  ( $r = 0,39$ ;  $p = 0,006$ ), давлением заклинивания легочной артерии (ДЗЛА) ( $r = 0,38$ ;  $p = 0,006$ ), давлением в правом желудочке (ДПЖ) ( $r = 0,38$ ;  $p = 0,007$ ) и в правом предсердии ( $r = 0,29$ ;  $p = 0,04$ ) по данным катетеризации правых отделов сердца.

Аккумуляция РФП в левом легком коррелировала с кардиоторакальным индексом, рассчитанным при проведении рентгенографии органов грудной клетки ( $r = -0,51$ ,  $p = 0,004$ ), конечно-диастоличе-

ским объемом ПЖ (КДО ПЖ) ( $r = -0,49$ ,  $p = 0,003$ ) и конечно-систолическим объемом ПЖ (КСО ПЖ) ( $r = -0,41$ ,  $p = 0,02$ ), полученным при проведении радионуклидной томовентрикулографии. Выявлена связь между накоплением РФП справа и легочным сосудистым сопротивлением ( $r = 0,53$ ,  $p = 0,007$ ).

### Обсуждение результатов

Несмотря на то, что скинтиграфические методы визуализации легких внедрены в клиническую практику довольно давно, количественная оценка нарушения перфузии при наличии повышенного давления в ЛА у больных с ИЛГ, ВПС и СЗСТ в литературе представлена скудно. Исключение составляют лишь пациенты, перенесшие ТЭЛА, т.к. перфузионная скинтиграфия легких для них является одним из основных методов диагностики [12]. В связи с этим задачей данной работы было изучение состояния легочной микроциркуляции по данным перфузионной скинтиграфии легких и определение роли данного метода у пациентов с ЛГ различного генеза.

Для оценки перфузии легких, помимо визуального, был применен количественный анализ скинтиграмм. В литературе встречаются различные подходы к объективизации нарушенной перфузии. Наиболее часто легочные поля правого и левого легких делят по горизонтали на три равные симметричные зоны (зоны Веста). Уровень накопления РФП в каждом легком равномерно увеличивается от верхушки к основанию. Это объясняется тем, что легочный кровоток определяется равновесием между альвеолярным, легочным артериальным, легочным венозным и интерстициальным давлением. В вертикальном положении в состоянии покоя в верхних отделах альвеолярное давление превышает легочное артериальное давление, что приводит к спадению капилляров. По данным различных авторов, в норме перфузионный кровоток в верхних зонах правого и левого легких составляет 6,6–13,3 % и 6,5–10,4 %, в средних зонах — 16,6–20,3 % и 16,7–18,2 % и в нижних — 19,6–29 % и 17,8–25,2 % соответственно [11]. При этом пульмоносцинтиграммы в передней проекции отображают состояние перфузии преимущественно верхней и средней долей справа, верхней доли слева; тогда как в задней проекции наиболее полно — перфузию нижних долей легких. По сумме проекций в норме  $53,1 \pm 1,2$  % общего кровотока приходится на правое легкое и  $46,9 \pm 0,9$  % на левое легкое [13]. Счет со всех зон обоих легких принимается за 100 %, и вычисляется процентное распределение счета между легкими и по зонам в каждом легком в передней и задней проекциях [13, 14]. В настоящей работе был сделан перерасчет с вычислением накопления РФП в зонах Веста для каждого легкого по отдельности (табл. 1).

С учетом того, что перфузия верхушек легких осуществляется только посредством легочного артериального давления, для определения степени выраженности нарушений легочной микроциркуляции возможно вычисление верхушечно-основного градиента перфузии, называемого также апикально-базальным градиентом перфузии  $U/L-Q$ . Градиент рассчитывается как отношение накопления РФП в верхней доле легкого к нижней. По данным литературы, у здоровых добровольцев этот показатель составляет 0,6–0,7 [15]. У больных периферическим раком легкого отмечено снижение градиента  $U/L-Q$  на стороне поражения, у пациентов с внебольничной пневмонией, напротив, обнаружено увеличение  $U/L-Q$  в пораженном легком, в отличие от больных с инфильтративным туберкулезом, у которых этот показатель оставался в пределах нормальных значений [15, 16]. В настоящем исследовании для оценки легочной перфузии был использован показатель  $U/L-Q$ .

Хорошо известно, что в норме левое легкое примерно на 10 % меньше правого из-за сердца, расположенного, преимущественно, в левой половине грудной клетки. При анализе скинтиграмм легких обследованных в данной работе больных с ЛГ было выявлено перераспределение РФП в сторону правого легкого у пациентов с ВПС на 21,2 % ( $p < 0,05$ ) и ИЛГ на 19,6 % ( $p > 0,05$ ) в сравнении с левым, что остается до конца неясным. Обращает на себя внимание наличие обратной связи между процентом включения РФП в левое легкое с кардиоторакальным индексом ( $r = -0,51$ ,  $p = 0,004$ ), а также с КДО ПЖ ( $r = -0,49$ ,  $p = 0,003$ ) и КСО ПЖ ( $r = -0,41$ ,  $p = 0,02$ ). Возможно, увеличение правых отделов приводит к ротационным сдвигам и большому смещению сердца влево, нежели вправо, и, соответственно, к уменьшению перфузии левого легкого, в основном за счет снижения его объема. В таком случае увеличение перфузии правого легкого является относительным на фоне снижения в левом. Однако этот вопрос требует дальнейшего изучения, т.к. подобный характер перераспределения был выявлен не при всех формах ЛГ.

В норме распределение кровотока между зонами Веста в легких подчиняется гравитационным механизмам и зависит, как отмечалось выше, от альвеолярного, легочного артериального, легочного венозного и интерстициального давления. Следовательно, при повышении легочного артериального давления следует ожидать перераспределение легочного кровотока к верхним отделам легких. Однако увеличение легочного кровотока в ВЗВ было выявлено во всех группах только для левого легкого, что на фоне снижения перфузии нижних зон может носить относительный характер из-за механического уменьшения нижней доли левого легкого за счет увеличения сердца.

Перфузия в ВЗВ правого легкого у больных с СЗСТ и ИЛГ оказалась сниженной. Более того, снижение перфузии регистрировалось и в НЗВ. Вероятно, подобная картина обусловлена общим снижением легочной перфузии при данной патологии. Снижение градиента  $U/L-Q$  в правом легком у больных СЗСТ и ИЛГ также свидетельствует о нарушении перфузии, что соответствует данным литературы [15].

При сравнении изменений перфузии в ВЗВ правого легкого можно найти параллели с выживаемостью пациентов с различными формами ЛГ. Наихудшая выживаемость отмечается у пациентов с СЗСТ, наилучшая – с ВПС [17, 18]. Возможно, нарушение микроциркуляции в легких на фоне ЛГ влияет на прогноз заболевания в большей степени, чем повышение давления в ЛА или дилатация правых отделов сердца.

У больных с ТЭЛА выявленное повышение градиента  $U/L-Q$  связано со значительным обеднением перфузии нижних долей, в большей степени слева. Это обусловлено тем, что у обследованных нами пациентов наиболее крупные тромбы были выявлены именно в нижних долях легких.

В единственной доступной работе, посвященных изучению перфузии легких в горизонтальном положении у больных с ИЛГ, показана средняя корреляция между  $U/L-Q$  и ДЛА<sub>ср</sub> ( $r = 0,64$ ,  $p < 0,05$ ),  $U/L-Q$  и ДЗЛА ( $r = 0,63$ ,  $p < 0,001$ ),  $U/L-Q$  и ЛСС ( $r = 0,50$ ,  $p < 0,001$ ), а также  $U/L-Q$  и фракцией выброса ПЖ ( $r = 0,51$ ,  $p < 0,05$ ) [19]. При оценке корреляционной связи во всей когорте обследованных больных нами была выявлена средняя корреляция только между процентом включения РФП справа и легочным сосудистым сопротивлением ( $r = 0,53$ ,  $p = 0,007$ ), при этом связь с  $U/L-Q$  была не достоверна. Уровни ДЛА<sub>ср</sub> и ДПЖ слабо коррелировали с перфузией только в ВЗВ правого легкого ( $r = 0,49$ ,  $p = 0,005$  для ДЛА<sub>ср</sub>;  $r = 0,37$ ,  $p = 0,04$  для ДПЖ). Нельзя исключить, что более низкая степень корреляции обусловлена большим разбросом значений давления (от 37 до 126 мм рт. ст.), а также наличием патогенетических особенностей в зависимости от этиологии ЛГ.

Была выявлена связь между перфузией ВЗВ справа и ДЗЛА (у больных ИЛГ  $r = 0,44$ ,  $p = 0,01$ ; во всей когорте  $r = 0,38$ ,  $p = 0,006$ ). Уменьшение просвета мелких артерий и артериол приводит к расширению более крупных ветвей ЛА, депонированию крови в малом круге кровообращения и шунтированию в бронхиальные вены, что приводит к снижению возврата к левому желудочку и, как следствие, снижению конечно-диастолического давления ЛЖ и ДЗЛА.

Как и ожидалось, получена высокая корреляционная связь у пациентов с внутрисердечными дефектами при сопоставлении данных эхокардиогра-

фии и перфузионной сцинтиграфии между наличием сброса крови и визуализацией активности в органах большого круга кровообращения ( $r = 0,70$ ;  $p < 0,0001$ ). Это имеет большое практическое значение, так как визуализировать поток через шунт по данным эхокардиографии не всегда возможно.

### Выводы

1. У больных ЛГ, ассоциированной с ВПС, выявлено достоверное перераспределение легочного кровотока в сторону правого легкого. Распределение кровотока в пределах каждого легкого, а также  $U/L-Q$  были не нарушены. Включение РФП в органы большого круга кровообращения свидетельствует о наличии функционирующего легочно-системного шунта.
2. У больных ХТЭЛГ визуализированы более крупные дефекты перфузии преимущественно в нижних отделах, что привело к повышению  $U/L-Q$ . Распределение включения РФП между правым и левым легкими не нарушено.
3. У больных ЛГ, ассоциированной с СЗСТ, обнаружены наиболее выраженные нарушения легочной микроциркуляции в виде значительного снижения перфузии ВЗВ, что привело к снижению  $U/L-Q$ .
4. У больных ИЛГ выявлено статистически незначимое перераспределение легочного кровотока в сторону правого легкого, мозаичное снижение перфузии легких с обеднением верхних зон Веста и снижение  $U/L-Q$ .

### СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

$^{99m}Tc$ -МАО – микроагреганты альбумина, меченные технецием

$U/L-Q$  – верхушечно-основной градиент перфузии

ВПС – врожденный порок сердца

ВЗВ – верхняя зона Веста

ДЗЛА – давление заклинивания легочной артерии

ДЛА<sub>ср</sub> – среднее давление в легочной артерии

ДПЖ – давление в правом желудочке

СЗСТ – заболевания соединительной ткани

ИЛГ – идиопатическая легочная гипертензия

КДО ПЖ – конечно-диастолический объем правого желудочка

КСО ПЖ – конечно-систолический объем правого желудочка

ЛА – легочная артерия

ЛГ – легочная гипертензия

НЗВ – нижняя зона Веста

РФП – радиофармацевтический препарат

ХТЭЛГ – хроническая тромбоэмболическая легочная гипертензия

ТЭЛА – тромбоэмболия легочной артерии

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Galie N., Torbicki A., Barst R. et al. Guidelines on diagnosis and treatment of pulmonary arterial hypertension. The task force on diagnosis and treatment of pulmonary arterial hypertension of the European Society of Cardiology. // Eur. Heart J., 2004, **25**, P. 2243–2278.
2. Friedman W.F., Braunwald E. Alterations in regional pulmonary blood flow in mitral valve disease studied by radioisotope scanning. A simple nontraumatic technique for estimation of left atrial pressure. // Circulation, 1966, **3**, 34, P. 363–376.
3. Tamir A., Melloul M., Berant M. et al. Lung perfusion scans in patients with congenital heart defects. // J. Amer. Coll. Cardiol., 1992, **19**, P. 383–388.
4. Бодров В.Е., Тюкавин А.И. Паттерны легочной микроциркуляции у больных с ишемической болезнью сердца. // Эфферентная терапия, 2006, **4**, № 12, С. 62–70.
5. Suzuki K., Kamata N., Inokuma S. et al. Clinical significance of ventilation/perfusion scans in collagen disease patients. // Ann. Nucl. Med., 2000, **14**, P. 405–413.
6. Boothroyd A.E., McDonald E.A., Carty H. Lung perfusion scintigraphy in patients with congenital heart disease: sensitivity and important pitfalls. // Nucl. Med. Commun., 1996, **17**, P. 33–39.
7. Lisbona R., Kreisman H., Novales-Diaz J., Derbekyan V. Perfusion lung scanning: differentiation of primary from thromboembolic pulmonary hypertension. // Amer. J. Roentgenol., 1985; **144**, No. 1, P. 27–30.
8. Moser K.M., Page G.T., Ashburn W.L., Fedullo P.F. Perfusion lung scans provide a guide to which patients with apparent primary pulmonary hypertension merit angiography. // J. Med., 1988, **148**, No. 2, P. 167–170.
9. Parker J.A., Coleman R.E., Siegel B.A. et al. Procedure guideline for lung scintigraphy: 1.0. // J. Nucl. Med., 1996, **37**, P. 1906–1910.
10. Vreim C.E. Value of the ventilation/perfusion scan in acute pulmonary embolism. Results of the Prospective Investigation of Pulmonary Embolism Diagnosis (PIOPED). The PIOPED Investigators. // JAMA, 1990, **263**, P. 2753–2759.
11. Радионуклидная диагностика для практических врачей. Под ред. Лишманова Ю.Б., Чернова В.И. – Томск: STT, 2004, С. 138–157.
12. Guidelines on the diagnosis and management of acute pulmonary embolism. // Eur. Heart J., 2008, **29**, P. 2276–2315.
13. Рубин М.П., Кулешова О.Д., Чечурин Р.Е. Радионуклидная перфузионная сцинтиграфия легких: методика исследования и интерпретация результатов. // Радиология – Практика, 2002, № 4, С. 16–21.

14. Чазова И.Е. Клинико-морфологическая характеристика и течение различных форм ПЛГ. Автореф. канд. дисс. мед. наук, Москва, РК НПК, 1990.
15. Авдеев С.В., Завьялов А.А., Дубоделов Е.Л. и соавт. Влияние продленной эпидуральной анальгезии на состояние вентиляции и перфузии легких в раннем послеоперационном периоде у больных раком легких. // Сибирский онкол. журнал, 2009, **32**, № 2, С. 5–9.
16. Лишманов Ю.Б., Кривоногов Н.Г., Мишустин С.П. и соавт. Оптимизация дифференциальной диагностики внебольничной пневмонии и инфильтративного туберкулеза легких. // Фундаментальные исследования, 2008, № 2, С. 35–36.
17. McLaughlin V.V., Presberg K.W., Doyle R.L. et al. Prognosis of pulmonary arterial hypertension: ACCP evidence-based clinical practice guidelines. // Chest., 2004, **126**, P. 78S–92S.
18. Kunieda T., Nakanishi N., Satoh T. et al. Prognoses of primary pulmonary hypertension and chronic majorvessel thromboembolic pulmonary hypertension determined from cumulative survival curves. // Intern. Med., 1999, **38**, No. 7, P. 543–546.
19. Fukuchi K., Hayashida K., Nakanishi N. et al. Quantitative analysis of lung perfusion in patients with primary pulmonary hypertension. // J. Nucl. Med., 2002, **43**, P. 757–761.

Поступила: 08.11.2012

Принята к публикации: 26.12.2012

**А.К. Гуськова****СОВРЕМЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ МЕДИЦИНСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ЛИЦ, ПОДВЕРГАЮЩИХСЯ ВОЗДЕЙСТВИЮ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ****А.К. Guskova****Present Organization of Medical Support of Radiation Exposed Persons**

РЕФЕРАТ

Статья посвящена анализу динамики основных направлений организации медицинского сопровождения работников атомной отрасли и других лиц, подвергающихся воздействию облучения. Показана оперативность отклика гигиенистов и врачей клинического профиля в срочном определении наиболее значимых направлений практической и научной деятельности на отдельных этапах. Обращается внимание на необходимость постоянного совместного решения ключевых проблем радиационной безопасности учеными, технологами и медиками. Подобное содружество позволило сделать атомную отрасль одной из наиболее совершенных по безопасности труда технологии. Введены обоснованные нормативы и регламенты для весьма различных по уровням облучения контингентов, вовлеченных в контакт с источниками радиации. Формулируются наиболее актуальные направления научных и практических исследований по радиационной безопасности на современном этапе, с явным преобладанием нерадиационных факторов в условиях труда и жизни подавляющего большинства лиц. Указывается на необходимость четкого ранжирования контингентов с различным соотношением этих факторов как в плане организации диспансерного наблюдения, так и в экспертизе установления связи изменений состояния их здоровья с теми или иными факторами. Подчеркивается исключительная значимость своевременной адресной информации об условиях облучения, изложенной в доступной для понимания форме.

**Ключевые слова:** облучение, персонал, население, медицинское сопровождение

ABSTRACT

The article analyses the main trends in the organization of medical support for nuclear industry employees and other persons exposed to radiation; it shows the role of timely response of hygienists and clinicians in urgent defining the most significant directions of practical and scientific activities at the separate stage. Attention is paid to the need of constant collaboration of scientists, technologists and physicians in the key problems of radiation safety solving. Such joint efforts have made the nuclear industry one of the most perfect in terms of security. Relevant standards and regulations for groups of people exposed to widely varying doses of radiation are introduced. The most topical directions of scientific and practical research in the field of radiation safety at present time are formulated. The obvious prevalence of non-radiation factors in life and labor conditions should be taken into account. The author points out the need of accurate ranging of the groups with various factors relation, both in respect of the organization of out-patient supervision and in establishing of the links between their state health changes and above mentioned factors. The utmost importance of timely address information presented in comprehensive form on the radiation exposure conditions is emphasized.

**Key words:** exposure, staff, population, medical management

Более чем за полвека своего существования атомная отрасль во всем мире стала одной из наиболее совершенных по принципам нормирования, постепенной минимизации уровня доз и их строгому соблюдению. Это обеспечило радиационную безопасность для персонала и лиц, проживающих поблизости от указанных предприятий при штатном режиме их деятельности.

Последнее было достигнуто благодаря тесному взаимодействию ученых-конструкторов, технологов и медиков на всех этапах становления и развития атомной отрасли. Задачи, стоявшие перед технологами и медиками, существенно изменялись, что требовало оперативной трансформации основных задач и методов их реализации.

На первом этапе формирования отрасли основной задачей являлось квалифицированное осуществление подбора персонала и установление временных

нормативов для их деятельности и проживания лиц поблизости от предприятия в условиях штатного режима. Сложности этой задачи усугублялись отсутствием предшествующего собственного опыта и крайней скудностью имеющейся информации о подобной деятельности за рубежом. Сведения о последствиях острого кратковременного облучения при атомных взрывах в Японии в 1945 г. и единичные указания на подобные ситуации при проведении отдельных экспериментов и испытаний были пригодны лишь для прогноза возможных последствий нарушения штатного режима работы предприятий. Тем не менее, была необходима готовность к проведению неотложных лечебно-диагностических мероприятий и в этих случаях.

Наиболее полные исследования и первые попытки обобщения их результатов были предприняты медико-биологическим персоналом, обслуживающим

ПО «Маяк», а также в работах некоторых специализированных лабораторий (лаборатория «Б» и др.) [1, 2], создававшихся в те же годы. Все работы велись со строгим соблюдением режима секретности, и результаты их были доступны только узкому кругу специалистов.

На том же этапе, и особенно в последующие три—пять лет, в связи с невозможностью минимизации уровней облучения на рабочих местах путем только технологических манипуляций, возникла не менее актуальная задача предотвращения или смягчения неблагоприятных последствий облучения у персонала и ограниченных групп населения.

Эта задача решалась медиками и биологами при поддержке технологов путем выявления минимальных признаков реакции организма человека на облучение и прекращения его дальнейшего контакта с источниками радиации.

Реализация этих решений была очень непростой, имея в виду дефицит персонала с уже приобретенной некоторой профессиональной квалификацией, а также из-за отсутствия непосредственно в закрытом административном образовании предприятий, на которых могли быть трудоустроены переведенные из основного производства лица. Численность лиц, нуждающихся в таких мероприятиях, была велика. Длительность срока прекращения облучения или снижения его до минимального уровня также была неизвестна и последовательно изменялась от 3–6 месяцев до года. В дальнейшем для части лиц очевидной становилась неизбежность пожизненного прекращения контакта с излучением и тем самым необходимость временного перевода на инвалидность для приобретения новой профессиональной квалификации.

За это же время следовало оценить и предварительные итоги полноты восстановления состояния здоровья у подавляющего большинства таких переведенных лиц и более обоснованно решить для них вопросы последующей трудовой деятельности и условий проживания.

Такого рода результаты были обобщены на следующем этапе (первое десятилетие) и сформулированы как возможность значительных и полных восстановительных процессов для подавляющего большинства переведенных (порядка 90–95 %). К сожалению, для небольшой части из них не удалось путем прекращения облучения достигнуть стойких восстановительных процессов и, наоборот, у части лиц имело место дальнейшее закономерное прогрессирование изменений с трансформацией в лейкоз апластических и диспластических процессов в кроветворении (11 пациентов из более чем 3 тыс. переведенных). Перевод в условия, исключающие дальнейшее

внешнее облучение и поступление радиоактивных аэрозолей плутония, оказался запоздалым еще у 8 человек, у которых имело место неуклонное прогрессирование изменений в бронхо-легочной системе и других органах, критических для содержащегося в их организме нуклида.

Следующий период (второе десятилетие) характеризовался неуклонным снижением уровня облучения на рабочих местах, что позволило последовательно снижать и нормативы профессионального облучения (до 5 бэр в год) и соблюдать их в дальнейшем у подавляющего большинства работающих.

В силу физических процессов, а также путем совершенствования защитных мероприятий снижались и уровни облучения населения, подвергавшегося воздействию сверхрегламентных и аварийных выбросов атомных предприятий.

Новые предприятия отрасли вводились в это время в строй уже при отсутствии возможности переоблучения в начальный период, как это имело место на ПО «Маяк». Таким образом, возникла возможность обобщения материалов медицинских наблюдений за большими группами людей, в течение ряда лет в большинстве своем не выходящих за пределы принятых нормативов 5 бэр в год. Была и небольшая группа людей с наличием у них в прошлом периода переоблучения, но оставшихся на предприятии в связи с нормализацией радиационной ситуации на тех же рабочих местах.

Вместе с тем закономерно удлинился и период контакта с ионизирующим излучением до 10–30 и более лет, что позволяло перейти к изучению более закономерных для этого срока последствий (онкологические и другие заболевания). Актуальным становилось также изучение состояния здоровья потомков, родившихся у облучавшихся лиц с различными уровнями воздействия, в том числе и с возможностью облучения самих детей.

Этот период ознаменовался рядом публикаций, характеризующих первые сведения о некоторых закономерных онкологических эффектах, связанных с воздействием значительных доз внешнего облучения в прошлом или поступлением в организм плутония [1, 3].

Появились и первые более обоснованные сведения о реакции на облучение населения с меньшей интенсивностью и медленным накоплением суммарных доз от внешних и внутренних источников [4].

Первоначально в интерпретации этих данных по населению допускались значительные ошибки — отнесение всех синдромосходных состояний к последствиям облучения независимо от сроков их выявления и уровня доз. Уточнение характеристик дозы, принадлежности по времени проживания и его лока-

лизации к источнику наибольших радиоактивных выбросов резко ограничило численность населения, у которого могли быть выявлены признаки, как правило, нетяжелой хронической лучевой болезни (66 случаев) [5, 6].

Наличие у ограниченной группы медиков некоторого собственного опыта и критический анализ литературных данных позволили в 1957 г. при аварийном выбросе из хранилища ПО «Маяк» принять для значительного числа жителей адекватные решения. Срочное отселение было реализовано для трех населенных пунктов – порядка тысячи человек, и отсроченное – еще для некоторых пунктов с общей численностью около десяти тысяч человек. Адекватность мер была подтверждена в ходе динамического наблюдения в течение пятидесяти лет [7].

Соответствующий анализ совместной деятельности всех этих групп специалистов, что представляется нам чрезвычайно важным, изложен в ряде публикаций и обобщен в монографии А.К. Гуськовой, А.В. Аклеева, Н.А. Кошурниковой «Первые шаги в будущее вместе: атомная промышленность и медицина в Южном Урале», а также в книге «Техногенное облучение и безопасность человека» под редакцией Л.А. Ильина.

С 1954 г. (дата пуска первой АЭС) начинается тридцатилетний период победного развития атомной энергетики в стране. Он характеризовался также и благоприятным течением основных технологических процессов на других предприятиях атомной отрасли. Более широко в это же время источники ионизирующего излучения стали использоваться в различных отраслях промышленности, сельского хозяйства, науки и медицины.

За этот период появлялись преимущественно сведения об отдельных инцидентах и нештатных ситуациях, не приносивших тяжелых последствий или с наличием редких случаев острой лучевой болезни и местных лучевых поражений различной тяжести.

К сожалению, отдельные сложные технологические ситуации, требовавшие изменения режима установок, не становились предметом общего обсуждения с извлечением полезных уроков для предприятий атомной энергетики.

Попытки предусмотреть не исключавшуюся даже при высоком технологическом совершенстве предприятий возможность аварийных ситуаций на реакторах промышленного и энергетического назначения не находили поддержки административных органов.

Соответствующий раздел в руководстве по авариям был исключен. Авторам А.К. Гуськовой и А.А. Моисееву было разрешено лишь на узком ведомственном совещании в институте реакторострое-

ния изложить ориентировочный сценарий повреждения ограниченного объема топливной зоны реакторов с наличием медицинских последствий для аварийной смены.

Крупномасштабные аварии в Виндскейле (Великобритания) и на Три-Майл-Айленд (США) благодаря системе защитных мероприятий не повлекли за собой серьезных радиационных последствий, что, в известной мере, также способствовало отсутствию соответствующей адекватной настороженности у руководства и персонала АЭС.

Новую эпоху открыла крупномасштабная авария Чернобыльской АЭС 26 апреля 1986 г., повлекшая за собой не только развитие радиационных поражений у лиц – первых участников ликвидации аварии (134 человека), но и загрязнение значительных по площади и численности населения регионов Белоруссии, Украины и России. Следы радиоактивного загрязнения распространились и на более отдаленные участки земного шара, хотя по величине выбросов они не достигали опасных для состояния здоровья уровней облучения.

Возникли совершенно новые контингенты лиц, подвергшихся воздействию облучения: персонал АЭС, работавший в аварийной зоне, лица, привлеченные для противоаварийных работ из числа сотрудников отрасли и других учреждений, люди, оказавшиеся на территориях со значительным радиоактивным загрязнением.

Авария оказала значительное влияние на формирование атомной энергетики во всем мире. Потребовалась сложная система организационных мер внутри пострадавших республик бывшего СССР. Она изменила судьбы многих людей, вовлеченных в аварийную ситуацию с весьма различными, чаще очень низкими, у них уровнями облучения. Единственной группой лиц со значительным облучением щитовидной железой изотопами йода оказались дети раннего возраста, находившиеся в ближайшие сроки после аварии в зоне значительного выброса нуклидов и пользовавшиеся водой, молоком и другими продуктами местного производства.

Социально-экономический и эмоционально-психологический резонанс был исключительно велик и далеко неадекватен собственно радиационному воздействию и ущербу.

Была возможность оценить целесообразность и срочность неотложных решений по данным изучения объективных свидетельств о мероприятиях, проводившихся в первые часы и дни после аварии. В отличие от популистских измышлений следует указать, что необходимая информация лицам, принимавшим решения, была обеспечена уже в первые часы и сутки от момента возникновения аварии.

Службой Госкомгидромета избыточная радиоактивность на почве была обнаружена в районе Чернобыля на основании круглосуточного мониторинга. Эти данные были в последующем проверены измерением в первые сутки и уточнены, в том числе и для воздушной среды путем привлечения авиации (Ю.А. Израэль).

Малоинформативные сведения, поступавшие от руководства АЭС в первые часы (Минэнерго, Минатом, Госсаннадзор, 3 ГУ МЗ СССР) потребовали срочного направления в Чернобыль квалифицированных физиков утром 26 апреля (группа организации помощи при аварийных ситуациях). Уже к исходу первых суток была подготовлена карта мощности экспозиционных доз гамма-излучения на промышленной площадке и ближайшем расстоянии от нее. Это позволило правительственной комиссии к концу дня 26 апреля 1986 г. принять обоснованные решения о радиусе аварийной зоны (30 км), величине аварийной дозы для персонала (250 мЗв) и населения (за различные сроки) и определить показания для срочной эвакуации утром 27 апреля населения г. Припяти, а в течение первой недели – еще нескольких поселков, прилегающих к аварийной зоне.

К сожалению, подобная необходимая информация о принятых мерах, их обоснованию и доступных рекомендациях участникам противоаварийных работ, населению пострадавших регионов и стране в целом, не была предоставлена.

Особую группу решений представляли срочные рекомендации о выводе из аварийной зоны лиц с признаками, сходными с проявлениями острой лучевой болезни. Эти решения и мероприятия проводились только по клиническим показаниям и осуществлялись в основном работниками медсанчасти предприятия при содействии персонала аварийной смены. Пациенты проходили минимальную обработку на здравпункте, где им оказывалась неотложная помощь и в части случаев проводилась смена одежды. Затем они повторными рейсами машины скорой помощи направлялись в стационар медсанчасти. Отдельные пострадавшие при удовлетворительном самочувствии проделывали этот путь самостоятельно. Медицинский анализ последовательно уточнявшихся доз облучения различных групп людей и оценки их состояния здоровья позволил подтвердить обоснованность описанных выше срочных решений как по диагностике и оказанию помощи пострадавшим от облучения, так и по режиму и деятельности лиц, привлеченных к противоаварийным работам и населению загрязненных районов в первое время после аварии [8].

Результаты изучения отдельных аспектов проблемы были опубликованы в 1987–1989 гг. [9–11]. Их

первоначальное обобщение было представлено на конференции в МАГАТЭ уже в августе 1986 г. (The accident at the Chernobyl' nuclear power plant and its consequences).

Ретроспективный анализ деятельности советской делегации на этом совещании и основных докладов позволяет отметить удивительную полноту сведений, представленных в столь ранние сроки после крупномасштабной аварии. Анализировались ее возможные причины (сочетание технологических дефектов с ошибками персонала), возможности срочной диагностики лучевой болезни по клиническим данным без указания об уровне доз по дозиметрическим критериям, объем медицинской помощи и его соответствие международному уровню, обоснованность установления сроков пребывания в аварийной зоне и характер выполнявшихся работ. Было указано также на серьезную проблему последствий перорального поступления изотопов йода населению (Л.А. Ильин). Многие из этих первоначальных указаний в столь краткие сроки были в дальнейшем подтверждены, а основные источники трудностей и ошибочности решений повторно тщательно проанализированы.

Подтвердилось определяющее значение не поступления йода при ингаляции, а его наличия в пищевых продуктах, в воде и молоке. Это обусловило значительное превышение доз облучения щитовидной железы у детей раннего возраста, не отселенных своевременно, хотя бы на краткий срок, из регионов со значительным загрязнением радионуклидами йода и цезия. Даже в тех случаях, когда такое отселение проводилось, оно не было достаточно точно идентифицировано по срокам и персоналиям, что затрудняло оценку дозы на щитовидную железу у лиц, у которых сформировались в последующем признаки ее поражения.

В отдельных республиках СССР использовался и различный метод сопоставления эффекта с величиной радиационной нагрузки. На Украине контингенты подвергшихся воздействию лиц были значительно расширены за счет использования коллективной дозы на щитовидную железу (большая численность при низких средних дозах облучения).

Для России и Белоруссии использовались не всегда достаточно точные данные о дозах на щитовидную железу по результатам прямых многочисленных измерений, т.е. производилось ранжирование групп по величине дозы на щитовидную железу (С.М. Шинкарев). Эти сведения позволили в дальнейшем более обоснованно оценить, какой части лиц с наличием опухоли щитовидной железы может быть обоснованно приписано влияние радиационного фак-

тора. Эти данные содержатся в совместных публикациях В.К. Иванова и М.А. Максютова [12].

Очень большое значение имеет последовательная информация, начиная с первых часов обнаружения необычно высокой активности почв поблизости от Чернобыля, и кончая публикацией «Атласа радиоактивных загрязнений России и Беларуси» (2009 г.). Этот атлас не только содержит характеристику динамики загрязнений путем прямого наблюдения, но и сопоставление реальных и прогнозируемых уровней. Это позволило авторам дать прогноз загрязнений до 2050 г. по указанным территориям.

Данные эти исключительно важны, демонстрируя как закономерное сужение территорий с реальным радиоактивным загрязнением, так и существенное уменьшение его уровня. Атлас возвращает странам значительные территории, практически освободившиеся к настоящему времени от техногенного загрязнения, что позволяет ввести их в обычное хозяйственное землепользование и снять с населения необоснованные ограничения его деятельности.

Появление подобных публикаций по динамическому наблюдению и уточнению в целом уровней доз и источников облучения различных контингентов позволяет существенно изменить представление о вкладе радиационного фактора в состояние здоровья огромных групп лиц. Это очень важно, т.к. позволяет направить внимание руководства страны на проблемы, решение которых может реально улучшить качество жизни и здоровья населения.

В последний период появились и очень полезные сведения, касающиеся анализа медико-демографической ситуации различных регионов страны и групп населения. Возникли также и некоторые существенные уточнения индивидуальных доз облучения и их распределения во времени и в объеме тела, что необходимо для интерпретации биологического эффекта.

Индивидуальные дозы облучения в динамике довольно полно характеризуются в медико-дозиметрических регистрах предприятий отрасли. Менее четко оцениваются индивидуальные дозы облучения при медицинских процедурах, зачастую подменяемые сведениями о типичной дозе для данного типа аппарата и соответствующей процедуры.

Дозы облучения персонала формируются за разное время, а учитываются в целом за рабочую смену, на протяжении которой облучение может быть очень кратковременным.

Для внешнего гамма-излучения более правильно считать его относительно равномерным в связи с тем, что поза человека во время выполнения работы изменяется, а манипуляции могут быть повторными. Таким образом, происходит фракционирование

дозы, при этом какая-либо одна фракция может быть наиболее значима.

Строгое следование правилам радиационной безопасности обеспечивает снижение дозы до приемлемого уровня даже при потенциально опасных видах работ. Такие примеры известны в практике работы высококвалифицированных специалистов.

Индивидуальные дозы облучения участников противоаварийных работ при аварии на ЧАЭС стали более систематически измеряемыми только после формирования дозиметрического регистра в июле 1986 г. До этого измерения проводились эпизодически при использовании различных, не всегда адекватных, индивидуальных дозиметров (например, в группе военнослужащих).

Очень важные уточнения в дозах внутреннего облучения ликвидаторов вносились многочисленными прямыми прижизненными и посмертными измерениями содержания радионуклидов в их организме. Однако они не были также исчерпывающими по отношению к динамике поступления нуклида в организм.

Огромное число измерений содержания нуклидов аварийного выброса в организме людей позволяет обоснованно считать, что доля внутреннего облучения в суммарной дозе радиационного воздействия очень невелика и не превышает 10–13 %. Это дает основания считать, что имевшие место у большинства ликвидаторов уровни доз внешнего и, тем более, внутреннего облучения невелики и не могут быть причиной радиационных эффектов, влияющих на состояние здоровья.

Во всех случаях воздействие излучения как у профессионалов, так и у населения сочетается с влиянием других нерадиационных факторов риска. Это положение очень важно, особенно в последнее время при закономерном снижении доз облучения у всех контингентов.

Упорно насаждается концепция по формированию группы риска в соответствии только с уровнем доз и ожидаемым при этом значительным увеличением частоты того или иного биологического эффекта.

Наверное, это было во многом правильно для начального периода работы отрасли, когда уровень доз был очень высоким, а к работе приступали люди относительно молодого возраста без существенного отягчения их здоровья заболеваниями. Срок работы был кратким и речь шла преимущественно о детерминированных эффектах или самых ранних проявлениях стохастических эффектов (лейкозы — в первые 2–5 лет, солидные опухоли — в первые 5–10 лет).

Иное положение имеет место в настоящее время, когда уровни доз невелики, а длительность контакта с ними может быть очень значительной, с одновре-

менным увеличением возраста пациента и обогащением его жизни многими другими длительно действующими факторами риска (курение, хронические заболевания различных органов, нарушение режима питания и др.).

Таким образом, нам кажется более правильным формирование групп риска лиц, контактирующих с источниками излучения в настоящее время по двум составляющим: доза облучения и прочие факторы риска, отличающиеся для различных соматических и онкологических заболеваний. Подобные факты были получены, например, при исследовании контингентов, принадлежащих к близким дозовым группам, но с существенным отличием по частоте и наличию у них нерадиационных факторов риска. Так было у лиц с относительно ранним развитием атеросклероза, первоначально приписываемым действию излучения. Эта группа лиц оказалась существенно более отягощенной уже в исходном состоянии рядом факторов риска (высокий индекс массы тела, наклонность к артериальной гипертензии и др.).

Аналогичные сведения были получены на тех же когортах с развитием онкологических заболеваний и без таковых при близких сроках наблюдения. Группа лиц с развитием онкологических заболеваний по уровню доз незначительно отличалась от такового в группе сопоставления. Очень существенно отличались эти группы по числу факторов риска (исходные заболевания того или иного органа, курение, злоупотребление алкоголем и др. у лиц с онкологическими заболеваниями).

Очень значимыми являются несомненные достижения в последние годы в области медицинской статистики онкологических заболеваний в стране, а также статистики осложнений заболеваний сердечно-сосудистой системы (инфаркт, инсульт).

При четких диагностических критериях клинического синдрома и наличии многих показателей, характеризующих контингент (сроки возникновения, возраст развития и наступления летального исхода, стадии заболевания, принадлежности к определенному полу и этнической группе) становятся более понятными различия, относимые к тому или иному фактору, влияние которого исследуются.

Только при наличии сведений о том, что при облучении существенно изменяются типичные показатели, присущие населению России с фоновым природным и медицинским облучением, можно предполагать определенный вклад техногенной радиации в изучаемый эффект.

Значительно расширились методические подходы к изучению медико-демографических ситуаций в отдельных регионах страны. На это направлен ряд

исследований сотрудников Института безопасного развития атомной энергетики [13].

В этих исследованиях было показано, что для выявления влияния радиационного загрязнения территорий на медико-демографическую ситуацию нужно располагать данными за много лет о положении этого региона в ряду других территорий страны. При этом выделяются средние, наиболее типичные для большинства регионов показатели заболеваемости, смертности, рождаемости, ожидаемой продолжительности жизни и других характеристик качества жизни. Выделяются также территории с заведомо и постоянно более высокими качествами медико-демографической ситуации и социально-экономическим уровнем региона. И наконец, существует ограниченная группа так называемых аутсайдеров с наиболее неблагоприятными, стойко сохраняющимися показателями медико-демографической ситуации.

На примере Брянской области была продемонстрирована ее принадлежность к территориям со средними медико-демографическими показателями на протяжении многих лет наблюдения. В качестве сравнения адекватными для нее явились две другие области (Рязанская и Белгородская) [13]. При динамическом слежении за колебаниями анализируемых показателей эти три группы оказались принципиально весьма сходными, что не позволяет указать на существенное влияние избирательно большего техногенного облучения населения некоторых районов Брянской области.

О значимости подбора необходимых стандартов медико-демографических характеристик контингентов и территорий говорят и некоторые другие исследователи (В.Ф. Демин и др.). Отсутствие адекватного контроля является источником ошибочных интерпретаций, типичных для литературы последних лет, акцентирующей определяющее значение радиационных факторов в изменении здоровья людей сегодня и в будущем (А.И. Яблоков и др.). Часть авторов при этом исходит из представления о неполном учете доз облучения, особенно внутреннего компонента, что, как мы видели, не находит никакого подтверждения. Другие авторы используют в оценке риска расчетные показатели, основанные на неадекватно примененной в данном случае беспороговой концепции действия излучения. При этом указанные авторы игнорируют достаточно большие по численности и длительности наблюдения в широком диапазоне доз, позволяющие сказать, что и для отдаленных соматических и онкологических эффектов, несмотря на их вероятностный характер, нельзя пренебрегать уровнем доз, предполагающим и определенную характеристику этиопатогенеза.

Очень значимым для появления подобных необоснованных страхов заведомо поражающего действия всех уровней облучения лежит и своеобразное восприятие энергии ионизирующей радиации в организме. В организме человека и животных отсутствует специализированная система рецепции, и, таким образом, для человека определяющим становится словесная информация о воздействии радиации и ее дозе.

В свете всего выше указанного, кратко сформулируем основные положения об уровнях облучения различных групп людей в настоящее время, а также реально сохраняющихся источниках опасности и оптимальных формах организации медицинского наблюдения за этими различными контингентами.

Уровни облучения в настоящее время в атомной отрасли и в других отраслях экономики при правильной организации работы и соблюдении правил радиационной безопасности являются очень низкими. Обеспечивается соблюдение принятых с большим запасом нормативов облучения всех контингентов за крайне редким исключением. Такого рода исключения возникают при техногенных или обусловленных ошибками персонала нарушениях штатного режима работы предприятия, а также при природных бедствиях и других повреждениях зданий, в которых расположены источники излучения. Примером подобной аварии является повреждение энергетических реакторов в Японии 11–15 марта 2011 г. при возникновении землетрясения и цунами. Подобные источники потенциальной опасности подлежат особо строгому контролю, а для персонала – получению более систематической прямой и индивидуальной дозиметрической информации, в том числе и восстановлению уровня доз по биологическим методам при отсутствии данных по их измерениям, а также строго индивидуализированному анализу причин возникающих заболеваний.

На фоне низких уровней доз более строгому учету для определенных типов трудовой деятельности и условий проживания подлежат нерадиационные факторы риска, на поиск которых и идентификацию вызываемых ими изменений должно быть направлено внимание врача. Предпосылки к этому заложены в ряде фундаментальных исследований профпатологов В.В. Матюхина, О.И. Юшковой, Э.Ф. Шардаковой, в которых показана вероятность снижения работоспособности и нарушения здоровья работников при воздействии факторов трудового процесса в зависимости от класса условий труда и его тяжести [14]. Все указанные в этих работах факторы (повышенное напряжение и нагрузки на зрительный, слуховой, мышечный аппарат, эмоционально-когнитивную сферу) имеют место и в атомной отрасли,

особенно на некоторых рабочих местах. Так, операторы, осуществляющие текущий контроль деятельности атомной установки, должны уметь быстро оценить многостороннюю, срочно поступающую информацию и принять немедленные решения в отношении работающей смены и уровня адресной информации в зависимости от сложности ситуации. Особые решения должны принимать также сотрудники, ведущие ремонтно-восстановительные работы на действующих установках, в условиях резко ограниченного времени их реализации, потенциальной опасности облучения и необходимости максимального соблюдения правил радиационной безопасности по отношению к себе и находящимся поблизости сотрудникам. Такого рода работы требуют наличия специального дозиметра, позволяющего оценить более высокие уровни доз с немедленным контролем его показаний по завершении манипуляции.

Огромная численность людей, вовлеченных в контакт с источниками излучения, требует более строгого ранжирования групп для определения частоты и объема наблюдения за ними. Должны быть определены системы и органы, подвергающиеся наибольшей опасности вследствие исходной предрасположенности и повышенной рабочей нагрузки. Именно на эту систему и орган с особой значимостью его сохранности для адекватного исполнения служебных обязанностей следует направлять деятельность отделов техники безопасности и медицинских работников. Исключительную важность приобретает профессиональная культура работающего и соответствие свойств его личности, соматической сферы и психофизиологических резервов требованиям, предъявляемым характером работы. Заключение об оставлении человека на прежнем рабочем месте должно определяться согласованными решениями цехового врача, дополнительных специалистов – по показаниям, сотрудников отдела техники безопасности и руководителя работ.

Для подавляющего большинства основные правила диспансерного наблюдения в настоящее время являются аналогичными таковым для не облучающихся лиц соответствующего пола, возраста и характера трудовой деятельности со сходными факторами нерадиационных рисков. Радиационный фактор при этом уходит на второй план в отношении воздействия на организм, но является очень значимым в связи с тем, что принимаемые работником атомной отрасли решения в случае их неадекватности становятся опасными не только для него самого, но и для объекта в целом и даже для населения страны.

Именно эта высочайшая ответственность за оценку радиационной информации, ее использование и адекватные решения делает труд работников

атомной отрасли особенно напряженным и требующим некоторых особых свойств здоровья и личности, чтобы быть профессионально пригодными к выполняемой работе.

Подобное категорирование работников атомной отрасли должно быть проведено в ближайшее время с выделением указанной выше группы особой ответственности за принимаемые решения и даваемую ими информацию. Подлежит изучению влияние обычных наиболее распространенных социально значимых заболеваний (гипертоническая, язвенная болезнь, атеросклероз, пограничные свойства личности в эмоционально-психологическом плане) для приема и продолжения работ в атомной отрасли. Вместе с тем, при существующих ныне уровнях облучения при добровольном согласии пациента могут быть значительно редуцированы ранее существовавшие противопоказания для работы в отрасли. Так, могут быть, по-видимому, возвращены на работу лица, перенесшие онкологическое заболевание с практическим выздоровлением при их определенной трудовой мотивации к сохранению прежнего рабочего места в отрасли.

Крайне необходимо введение в практику обучения не только работников атомной отрасли, но и всего населения, систематических адресных курсов по радиобиологии человека. Только знание основных закономерностей, соотношения принятых нормативов с реально опасными для человека, и наоборот, максимальное внимание к строжайшему выполнению правил радиационной безопасности для каждого человека может стать основой его соматического и психического здоровья.

По-прежнему актуальным является постоянное сотрудничество и взаимное доверие друг к другу специалистов, ученых, формирующих новые отрасли техники (в т.ч. нанотехнологии), технологов, реализующих эти разработки, и врачей, сопровождающих указанные контингенты в процессе выполнения этих работ или в связи с проживанием на территориях с природным повышенным или техногенным облучением.

Подлежат дальнейшему совершенствованию и углублению сведения о формах взаимоотношения энергии ионизирующего излучения в живом организме на клеточном и молекулярном уровне.

В свете современных достижений медицинской науки и особенно реаниматологии должны совершенствоваться методы лечения острого лучевого синдрома человека с попыткой расширить курабельный диапазон доз при так называемом кишечном синдроме ОЛБ.

Имеющиеся достижения пластической и заместительной терапии, безусловно, должны использоваться при лечении местных лучевых поражений, с той поправкой, которую вносит своеобразие временной динамики последствий облучения по сравнению с другими травмирующими факторами.

После некоторой изоляции специалистов по радиационной медицине от медицинского сообщества в связи с режимом секретности, они должны вновь более тесно взаимодействовать с врачами общей практики, поскольку к последним чаще всего адресуются пациенты, предполагающие развитие изменений в их здоровье «в связи с облучением». Психологический ущерб, первоначально нанесенный этой неадекватной информацией, потом практически невозможно ослабить.

Экспертные советы преимущественно призваны определить связь заболеваний с облучением, за много лет предшествующим развитию тех или иных болезней. Для преодоления этих сложностей очень важно, помимо необходимого объема указанной выше информации о дозах и условиях облучения, систематическое изложение динамики различных синдромов у данного человека. К сожалению, зачастую в направлениях на экспертный совет оно подменяется перечислением синдромов и болезней, диагностированных теми или иными специалистами, без попытки установить их взаимовлияние и определяющую роль у данного конкретного человека. Чрезвычайно желательно отметить какие-либо существенные особенности в возрасте выявления болезней, характере их течения, частоте осложнений в соответствии с периодом причастности данного человека к воздействию радиации. Более строгими должны быть суждения о закономерной связи тех или иных болезней с реальным соотношением уровня доз и других факторов риска. Это не только правильно ориентирует человека на основной повреждающий его фактор, но и аргументирует систему целенаправленных лечебно-профилактических мероприятий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Гуськова А.К., Аклеев А.В., Кошурникова Н.А. Первые шаги в будущее вместе: атомная промышленность и медицина на Южном Урале. Под ред. А.К. Гуськовой. — М.: ФМБЦ им. А.И.Бурназяна ФМБА России, 2009, 183 с.
2. Лаборатория «Б». Сунгульский феномен. — Снежинск. Изд-во РФЯЦ — ВНИИТФ, 2000, 440 с.
3. Мороз Г.С. Злокачественные новообразования у лиц, подвергающихся профессиональному облучению. // Бюлл. радиац. медицины, 1972, № 2. С. 21–24.

4. *Аклеев А.В., Большакова С.А., Булдаков Л.А. и соавт.* Радиационные аварии на Урале: экологические, медицинские и социальные аспекты. // Проблемы экологии Южного Урала, 1997, № 2, С. 48–59.
5. *Косенко М.М.* О распространенности хронической лучевой болезни у населения, проживающего на территории, загрязненной отходами предприятия атомной промышленности. // Проблемы охраны труда и окружающей среды на предприятиях атомной промышленности. Вып. II, М., 1986, С. 153–160.
6. *Аклеев А.В., Косенко М.М., Крестинина Л.Ю. и соавт.* Здоровье населения, проживающего на радиоактивно загрязненных территориях Уральского региона. – М., 2001, 195 с.
7. Опыт преодоления последствий техногенных аварий и развитие атомных технологий. Научно-практическая конференция, посвященная 50-летию аварии на ПО «Маяк». 25–26 сент. 2007 г. Челябинск.
8. *Гуськова А.К., Галстян И.А., Гусев И.А.* Авария на Чернобыльской атомной станции (1986–2011гг.): последствия для здоровья, размышления врача. Под ред. А.К. Гуськовой. – М.: ФМБЦ им. А.И.Бурназяна ФМБА России, 2011, 253с.
9. *Гуськова А.К., Баранов А.Е., Барабанова А.В. и соавт.* Острые эффекты облучения у пострадавших при аварии на Чернобыльской АЭС. // Мед. радиол., 1987, **32**, № 12, С. 3–18.
10. *Гуськова А.К., Баранов А.Е., Барабанова А.В. и соавт.* Диагностика, клиническая картина и лечение острой лучевой болезни у пострадавших при аварии на Чернобыльской АЭС. // Тер. архив, 1989, № 1, С. 95–103.
11. *Гуськова А.К., Баранов А.Е., Барабанова А.В. и соавт.* Диагностика, клиническая картина и лечение острой лучевой болезни у пострадавших при аварии на Чернобыльской АЭС. Сообщение II. Некостномозговые синдромы лучевых поражений и их лечение. // Тер. архив, 1989, № 8, С. 99–103.
12. *Иванов В.К., Максюттов М.А.* Доклад на заседании РНКРЗ, апрель 2012 г. Электронная версия.
13. *Мелихова Е.М., Бархударова И.Е.* Методические вопросы оценки демографической ситуации на радиационно-загрязненных территориях (на примере Брянской области). – М.: препринт ИБРАЭ № ИВРАЕ-2012-03, 2012, 33 с.
14. *Матюхин В.В., Юшкова О.И., Шардакова Э.Ф. и соавт.* Вероятность снижения работоспособности и нарушения здоровья работников при воздействии факторов трудового процесса в зависимости от класса условий труда. // В сб. «Актуальные проблемы медицины труда». Под ред. *Н.Ф. Измерова*. – М.: НИИ медицины труда РАМН, 2012, 368 с.

Поступила: 22.08.2012

Принята к публикации: 26.12.2012

**ИНФОРМАЦИЯ О РОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
«ОСТРЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПРОТИВОЛУЧЕВЫХ СРЕДСТВ:  
КОНСЕРВАТИЗМ ИЛИ МОДЕРНИЗАЦИЯ»****Information on the Russian Conference “Critical Problems of Ionizing  
Radiation Countermeans Elaboration: Conservatism or Modernization”**

В Москве 13–14.11.2012 на базе ИБХФ РАН состоялась конференция, организованная НС РАН по радиобиологии в сотрудничестве с ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России и ВМА им. С.М. Кирова и посвященная проблемам радиобиологии противолучевых средств.

Организаторы конференции в первый же рабочий день устроили обсуждение за круглым столом всех острых проблем, включающих в себя и чисто научные вопросы, и моменты инфраструктурного обеспечения научных исследований. Озвученная на этом заседании опросная анкета явила довольно неприглядную картину состояния исследовательской инфраструктуры. Это дефицит установок для острого и низкоэнергетического облучения, недоступность СПФ-мышей, отсутствие современных вивариев для содержания таких животных, слабая доступность англоязычной научной литературы. Практически стало невозможным проведение опытов на крупных лабораторных животных, что поставило под вопрос доведение исследуемых препаратов до стадии клинических испытаний. Ясно, что решение указанных проблем требует значительных финансовых вложений. Но, как отметил зам. руководителя ФМБА России М.Ф. Киселев, чтобы получить такое финансирование, надо предъявить разработанный и обоснованный проект решения важной проблемы, а таких предложений не видно.

Большое число исследований заканчивается на оценке выживаемости мышей в условиях острого облучения и предварительного введения экстрактов различных природных веществ. Массовое появление новых биологически активных пищевых добавок против радиации просто дискредитирует научный подход к профилактике лучевых поражений. В то же время совершенно недостаточное внимание уделяется цитокинам — наиболее эффективным противолучевым препаратам, находящим к тому же применение в общемедицинской практике.

Проблемы создания противолучевых препаратов для защиты от пролонгированного облучения (ава-

рийно-спасательные работы, космические полеты), от побочных эффектов лучевой терапии онкологических заболеваний остаются вне поля зрения исследователей. Но здесь начинается порочный круг: нет современной исследовательской инфраструктуры — тиражируются мелкотемные исследования — нет серьезных проектов — нет серьезного финансирования — устаревают инфраструктура — нет притока молодых кадров и т.д.

В выступлении на круглом столе В.Ю. Ковтуна в соавторстве с В.Б. Назаровым (НПЦ Фармзащита) была представлена современная законодательная база по испытанию противолучевых средств. По мнению авторов, некоторые статьи Хельсинской декларации Всемирной медицинской ассоциации «делает невозможным проведение второй фазы клинических испытаний радиопротекторов, а, следовательно, и их регистрацию».

В первый день работы были представлены обобщающие и концептуальные доклады.

В докладе Л.М. Рождественского (ФМБЦ им. А.И. Бурназяна) было отмечено: а) отсутствие связи между большинством экспериментальных разработок противолучевых средств и реальными возможными сценариями радиационного поражения человека; б) серьезное отставание от развитых стран в использовании современных геномных технологий. По исследованию средств экстренного лечения острых радиационных поражений достигнуто наибольшее продвижение в связи с разработкой препарата Беталейкин и его комбинаций с другими цитокинами (тромбопоэтин, Г-КСФ'ы — Лейкостим и Нейпомакс) для борьбы с лейкопениями как радиационного, так и химиотерапевтического происхождения (последнее уже реализуется в онкологии, что делает Беталейкин препаратом двойного назначения). По исследованию средств защиты от пролонгированного радиационного воздействия с низкой мощностью дозы, несмотря на обилие номинальных претендентов на роль реального радиомодификатора, перспективы связаны пока тоже с одним только

Беталейкином. Остро стоит вопрос об индикаторе/маркере повышенной радиорезистентности, без которого невозможно проводить вторую фазу клинических испытаний. Предложенные индикаторы, в основном, недостаточно охарактеризованы на специфичность и чувствительность.

В докладе В.И. Легезы и А.Н. Гребенюка (ВМА им. С.М. Кирова) был представлен обзор существующих в мире (подчас лишь номинально) противолучевых средств. К числу перспективных радиозащитных средств, которые интенсивно изучаются в эксперименте, авторы отнесли андростендиол, флагеллин, а также различные антиоксиданты, эстрогены и иммуномодуляторы. В отечественной системе медицинской противорадиационной защиты основное место сохраняют серосодержащие препараты (цистамин) и препараты рецепторного действия (индралин, мексамин). Имеются средства борьбы с первичной реакцией на облучение, средства, предупреждающие накопление в организме радиойода и других радионуклидов. Широко представлены высокоэффективные средства терапии острого костномозгового синдрома: Беталейкин, Нейпоген, Лейкомакс, Лейкостим.

В.Ф. Михайлов (ФМБЦ им. А.И. Бурназяна) проанализировал возможность изменения радиочувствительности клеток при воздействии на сигнальные пути, запускающие программы клеточной гибели либо пролиферации. В мире широко исследуются возможности реализации как защиты клетки, так и ее инактивации через воздействия на гены антиоксидантной системы, систем репарации ДНК и клеточных шаперонов, на р53-зависимую систему сохранения стабильности генома для увеличения пострадиационной выживаемости. Необходимо развивать эти подходы в отечественной радиобиологии, ибо за ними будущее и появление препаратов нового поколения.

В.М. Васин (НИИЦ авиационной и космической медицины) представил современную классификацию противолучевых средств, выделив следующие группы препаратов: 1) радиопротекторы – препараты кратковременного действия на физико-химическом и биохимическом уровне; 2) радиомитигаторы – препараты длительного действия, реализующие свой эффект путем ускорения пострадиационного восстановления радиочувствительных тканей; 3) радиомодуляторы – лекарственные средства и пищевые добавки, повышающие резистентность организма к воздействию низкоинтенсивного ионизирующего излучения посредством повышения антиоксидантной защиты организма.

В докладе А.Н. Гребенюка (ВМА им. С.М. Кирова) были представлены обобщающие экспериментальные данные о радиозащитной (введение за 24 ч)

и лечебной (введение через 1 ч) эффективности Беталейкина в условиях острого гамма-рентгеновского облучения, а также о применении этого цитокина с целью купирования лейкопении, развивающейся при воздействии цитостатиков. При фракционированном радиационном воздействии Беталейкин обладает лечебным эффектом при использовании как в ходе продолжающегося облучения, так и после его окончания В условиях локального бета- и гамма-облучения, а также при сочетанных поражениях, Беталейкин как при системном, так и при местном применении оказывает благоприятное влияние на заживление поверхностных и, в меньшей степени, глубоких лучевых ожогов кожи.

А.С. Симбирцев (НИИ ОЧБ) полагает, что в связи с низким уровнем синтеза эндогенных цитокинов в ответ на облучение использование генноинженерных препаратов цитокинов является терапией выбора в вопросе защиты человека от радиации. Наибольшим радиозащитным действием обладает генноинженерный аналог интерлейкина-1 бета (Беталейкин). В основе противолучевого действия Беталейкина лежит активация постлучевых восстановительных процессов и костномозгового кроветворения, начиная с уровня стволовых кроветворных клеток. Местное применение Беталейкина оказывает ранозаживляющее действие при ранах и ожогах, в том числе при радиационных и термических ожогах кожи.

А.Н. Котеров (ФМБЦ им. А.И. Бурназяна) подчеркнул, что переход от разработки радиопротекторов экстренного действия к проблемам защиты от низкоуровневого излучения заставляет сделать основной упор на снижении канцерогенного риска. Возможность использования в разработке этого направления опыта исследования генных механизмов старения пока весьма проблематична.

А.А. Иванов и И.Б. Ушаков (ИМБП РАН) полагают, что радиационный фактор может стать главным барьером на пути продвижения человека в дальний космос. Профилактика и лечение возможных детерминированных эффектов ионизирующего излучения при дальних космических полетах должны базироваться на применении классических радиопротекторов, цитокинов и клеточных технологий.

В докладах и стендовых сообщениях следующего дня были затронуты частные вопросы разработки противолучевых средств. Некоторые из них представлены ниже.

В докладе В.Ю. Ковтуна и соавт. (НПЦ Фармзащита) было отмечено, что применение дигидрохлорида гастропепина (пиренцепина) в комбинации с латраном позволяет впервые решить проблему купирования первичной реакции на облучение.

Л.Н. Шишкиной (ИБХФ РАН) отмечено, что применение природных антиоксидантов имеет важное значение в системе защиты организма от облучения в малых дозах, а синтетические антиоксиданты более эффективны как радиопротекторы при облучении в дозах, вызывающих костномозговую форму гибели.

Р.А. Тарумов (ВМА им. С.М. Кирова) выявил радиозащитный эффект по тесту выживаемости мышей при применении за 1 ч до, через 1 ч после облучения или в течение 5 сут после облучения отечественных синтетических антиоксидантов, причем в варианте защиты самым эффективным оказался генистеин, а в лечебном – Мексидол.

И.С. Драчев (ВМА им. С.М. Кирова) отметил, что профилактическое применение селеноорганических соединений улучшает течение и исход острого радиационного поражения и связал этот эффект с возрастанием общей антиоксидантной активности плазмы крови животных.

Л.В. Пикалова с соавт. (ВМА им. С.М. Кирова) обнаружили снижение уровня хромосомных aberrаций в костном мозге у облученных в дозах 2–4 Гр крыс при профилактическом введении животным синтетического аналога гипофизарного гормона ме-

латонина, правда, в дозах, многократно превышавших физиологический уровень.

В.М. Макаручук с соавт. (МРНЦ) предложили рассматривать ингибиторы NO-синтазы (NOS) в качестве возможной основы дизайна новых радиопротекторов, хотя в основе действия этих веществ, по мнению авторов, лежит давно знакомая тканевая и циркуляторная гипоксия.

В докладе Н.И. Заргаровой с соавт. (ВМА им. С.М. Кирова) отмечено, что при сочетанных радиационных поражениях (4 Гр общего гамма-облучения крыс и 120 Гр местного облучения кожи) коллагеновые покрытия оказались эффективными средствами лечения.

С.С. Сорокина с соавт. (ИТЭБ РАН) обнаружили увеличение количества радиационно-индуцированных повреждений и отсутствие адаптивного ответа в клетках костного мозга и тимуса у мышей, предварительно облучённых малыми дозами низкоинтенсивного плотноионизирующего излучения, как в присутствии адьювантов (дибазол, хлористый кальций), так и при их отсутствии.

Зам. председателя оргкомитета  
Л.М. Рождественский

**Н.И. Рожкова, Т.В. Шерстнева, О.Н. Авилов, М.А. Шершнева,  
О.Б. Тарарухина**

**ЭКСТРААБДОМИНАЛЬНАЯ ФОРМА ДЕСМОИДНОЙ ОПУХОЛИ  
МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ**

**N.I. Rozhkova, T.V. Sherstneva, O.N. Avilov, M.A. Shershneva,  
O.B. Tararuchina**

**Extraabdominal Fibromatosis of Desmoid Breast Tumor**

РЕФЕРАТ

Десмоид – редкая опухоль, занимающая промежуточное положение между доброкачественными и злокачественными новообразованиями. Клинические и лабораторно-инструментальные данные обычно выявляют признаки, характерные и для неопластических, и для доброкачественных процессов. Цель работы – представить два случая десмоида молочной железы, наблюдавшихся в нашей клинике, и продемонстрировать на конкретных примерах все этапы постановки этого диагноза.

**Ключевые слова:** фиброматоз, экстраабдоминальная форма, фибросаркома

ABSTRACT

Fibromatosis or desmoid breast tumor is a rare tumor, which has both characteristics of a benign and a malignant tumor. During clinical, instrumental and laboratory tests features of both malignant and benign tumor have been established. The article is a report of two desmoid breast tumor cases, observed in our clinic, and presents the pattern of the diagnostics, based on clinical experience.

**Key words:** extraabdominal fibromatosis, malignant tumor, fibrosarcoma

Десмоидный фиброматоз – редкий доброкачественный процесс, для которого характерны местно-инфильтрирующий рост и пролиферация веретенообразных клеток (фибробластов и миофибробластов) [1]. Десмоидные опухоли чаще всего встречаются у молодых женщин и девушек эстроген-зависимого типа. В возрасте до 12–15 лет среди больных преобладают мальчики, в более зрелом возрасте мужчины болеют крайне редко.

Десмоидный фиброматоз встречается крайне редко, в 0,2 % от всех образований молочной железы [2–4]. При этом новообразование может первично развиваться из стромы молочной железы или из фасции, покрывающей большую грудную мышцу [5].

Впервые опухоли передней брюшной стенки у беременной женщины описал McFarland в 1832 г. Он назвал их абдоминальными десмоидами, т.к. опухоли были очень плотными, белесоватого цвета (от греческого *desmos* – связка). Эти опухоли локализуются в передней прямой мышце живота и редко рецидивируют после операции. Далее появились сообщения о подобных же по морфологии опухолях, локализующихся в любых мягких тканях. Они получили название экстраабдоминальные десмоиды. В силу их оппозиционного роста и наличия спикул после хирургического лечения рецидивы развиваются в 50–90 % случаев. Stout описал ювенильный фиброматоз – группу заболеваний, связанных с доброкачественной пролиферацией фиброзной ткани у детей до 15 лет [6]. Впоследствии стало очевидным, что данные изменения

встречаются и у взрослых, в связи с чем был введен термин «фиброматоз» или десмоидная опухоль. Enzinger и Weiss выделили три основных вида опухоли: десмоид брюшной стенки (абдоминальный фиброматоз), интраабдоминальный десмоид и экстраабдоминальный десмоид (агрессивный фиброматоз) [7].

По клиническому течению десмоидные опухоли занимают промежуточное место между доброкачественной фибромой и фибросаркомой. При гистологическом исследовании обнаруживают разрастания веретенообразных клеток с овальными или удлинёнными ядрами. Клетки собраны в широкие переплетающиеся пучки, отложения коллагена умеренные или незначительные, иногда находят очаги миксоматоза и кальцинаты. Клеточный полиморфизм минимальный, митотическая активность низкая [1]. Несмотря на доброкачественное гистологическое строение, десмоидные опухоли характеризуются инфильтрирующим ростом, частым рецидивированием после хирургического удаления, но не метастазируют [2]. Рецидивы десмоидного фиброматоза, как правило, возникают в течение первых двух лет после операции в 21–27 % случаев при локализации в строме молочной железы и в 57 %, если источником опухоли являлась фасция, покрывающая большую грудную мышцу [8].

Этиология десмоидной опухоли молочной железы не ясна, равно как и ее патогенез. Однако есть сообщения о связи данной патологии с синдромом Гарднера, силиконовыми имплантатами, а также послеоперационными и посттравматическими изме-

нениями. С беременностью заболевание связано редко, хотя гормональный фактор играет немаловажную роль в его патогенезе и ассоциируется с повышенным уровнем эстрогенов [1].

Синдром Гарднера – наследственный симптомокомплекс, включающий различные кожные и костные проявления в сочетании с интестинальным полипозом толстой кишки. Тип наследования – аутосомно-доминантный с различной степенью экспрессивности гена, локализованного в хромосоме 5, отвечающего за регуляцию бета-катенина. При данном синдроме выявляют эпидермальные и сально-железистые кисты, десмоидные опухоли, фибромы, липомы, трихоэпителиомы, кератоакантомы и лейомиомы [9].

В 30 % случаев в анамнезе у пациентов отмечают

предшествующие хирургические вмешательства, в 31–47 % – травмы [10]. После протезирования молочной железы десмоидная опухоль может развиваться из фиброзной капсулы, окружающей имплантат. По данным мировой литературы, описаны 11 случаев возникновения фиброматоза после протезирования молочных желез [8]. Однако важно отметить, что прямая связь между вышеуказанными факторами и развитием фиброматоза до сих пор достоверно не установлена.

Диагностика десмоидной опухоли не вызывает особых трудностей при типичной локализации – в прямой мышце живота. Распознавание же экстраабдоминального десмоидного фиброматоза затруднительно. Его следует дифференцировать, прежде все-

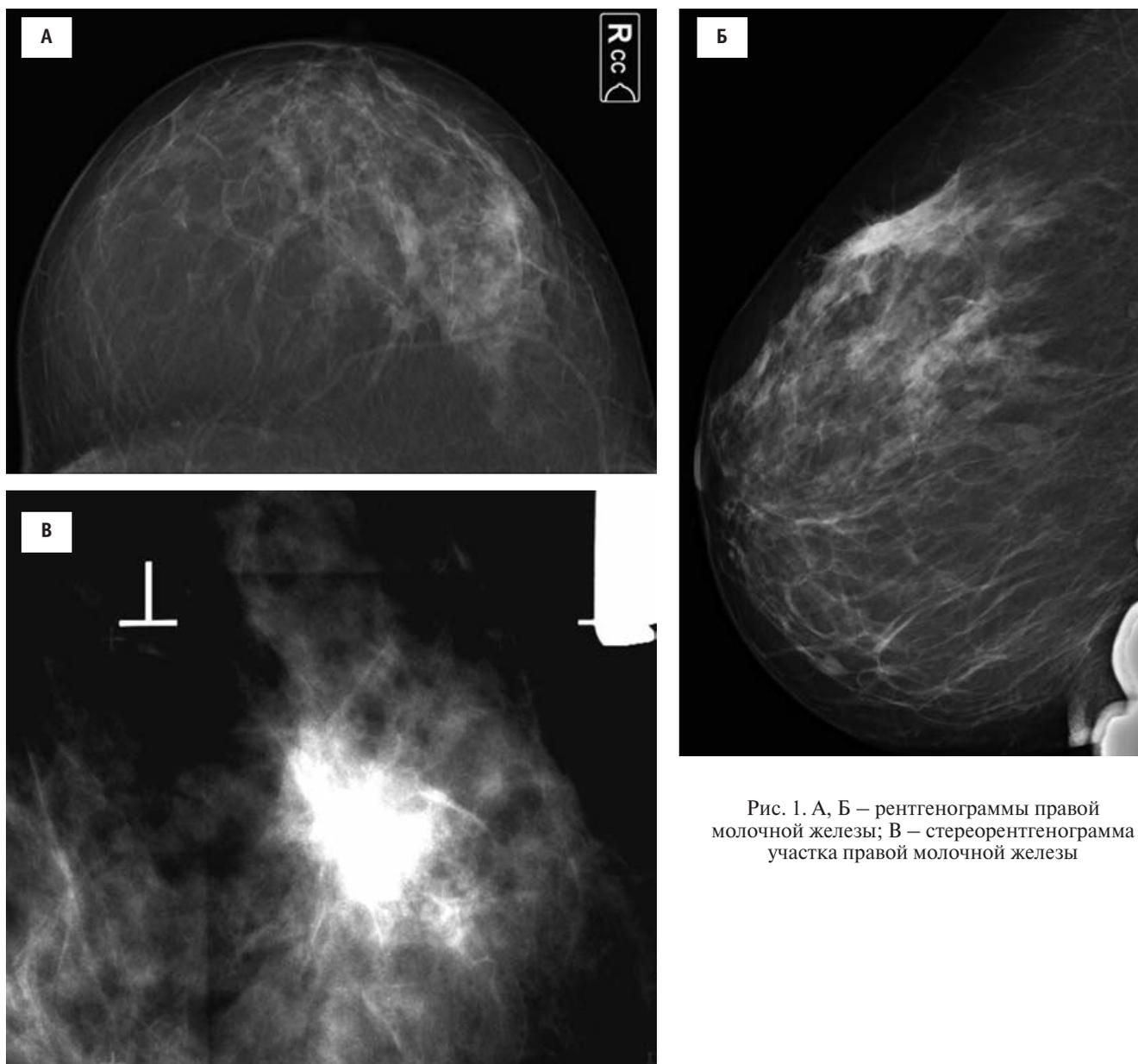


Рис. 1. А, Б – рентгенограммы правой молочной железы; В – стереорентгенограмма участка правой молочной железы

го, с медленно растущей высокодифференцированной фибросаркомой.

Клиническая картина десмоидного фиброматоза в молочной железе не имеет специфических симптомов и отчетливой клинической манифестации, поэтому до операции правильный диагноз устанавливается крайне редко [2]. При пальпации определяется плотное округлое образование, может отмечаться втяжение кожи и соска. Рентгенологически десмоидный фиброматоз проявляется плотным узлом неправильной формы с лучистыми контурами, что затрудняет дифференциальную диагностику с раком молочной железы, наличие микрокальцинатов не характерно. При ультразвуковом исследовании обнаруживают гипоэхогенное образование с четкими или нечеткими контурами и дистальной акустической тенью.

Лечение — хирургическое. При экстраабдоминальной локализации десмоидной опухоли показано широкое ее иссечение. Результаты лечения повышаются при использовании комбинированной терапии, включающей, кроме хирургического метода, послеоперационную лучевую терапию. Имеются отдельные сообщения о включении в лечебный комплекс тамоксифена и химиотерапии при многократном рецидивировании [10].

Представленные далее клинические наблюдения демонстрируют возможности комплексного лучевого обследования молочной железы с применением интервенционных методик в углубленной диагностике данного заболевания.

Больная Д., 60 лет, самостоятельно обнаружила образование в правой молочной железе. В анамнезе травм и хирургических вмешательств на молочной железе не было. При осмотре в верхне-наружном квадранте правой молочной железы определялся опухолевый узел размерами 3,0 × 4,0 см с неровными контурами и симптомом «площадки» над ним.

Обследование пациентки проводилось на цифровом маммографе Senographe Essential фирмы General

Electric. При маммографическом исследовании определялась картина нерезкой фиброзной мастопатии, на фоне которой справа в верхне-наружном квадранте определяется участок уплотнения ткани молочной железы тяжистой структуры с микрокальцинатами, размерами 1,5 × 1,5 см (рис. 1).

Ультразвуковое исследование выполнено на ультразвуковом сканере Hitachi Hi Vision 8500 (Hitachi, Япония) с использованием мультисекторного линейного датчика с частотой 7,5–13 МГц, оснащенного программным обеспечением для соноэластографии. При УЗИ визуализировалось гипоэхогенное образование с нечеткими контурами, неоднородной структуры, размерами 1,4 × 0,8 см (рис. 2А). В правой аксиллярной области определялись лимфатические узлы до 1,0 см, некоторые из них — без дифференцировки структуры. В режиме ультразвуковой ангиографии в образовании фиксировался выраженный центральный кровоток (рис. 2Б).

Ультразвуковая эластография — это методика, позволяющая оценивать эластичность образования. В режиме эластографии было выявлено смешанное картирование с преобладанием участков синего цвета, свидетельствующее о высокой степени жесткости образования, а также высокое значение коэффициента деформации — 6,69, характерное для жестких образований (рис. 3). Качественные и количественные критерии соответствовали злокачественной природе выявленных изменений.

С целью изучения метаболических характеристик выявленного образования больной была назначена сцинтимаммография с <sup>99m</sup>Tc-МИБИ (Технетрил). Так как механизм накопления технетрила в злокачественной опухоли связан с ее усиленным метаболизмом, было сделано предположение, что высокое накопление РФП в проекции узла будет свидетельствовать о злокачественном характере образования. При сцинтиграфии был выявлен низкоинтен-

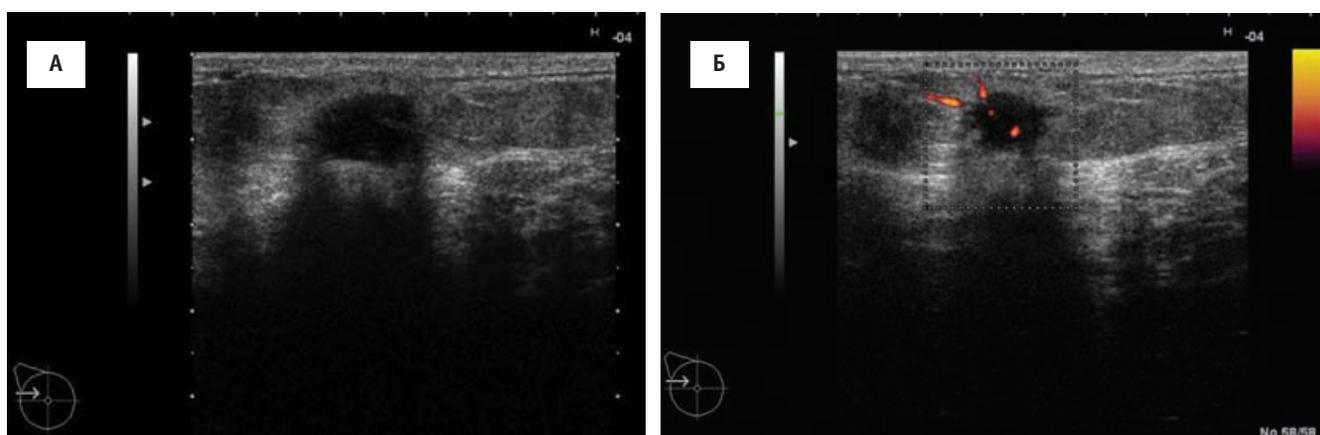


Рис. 2. А — сонограмма правой молочной железы; Б — доплеросонограмма правой молочной железы

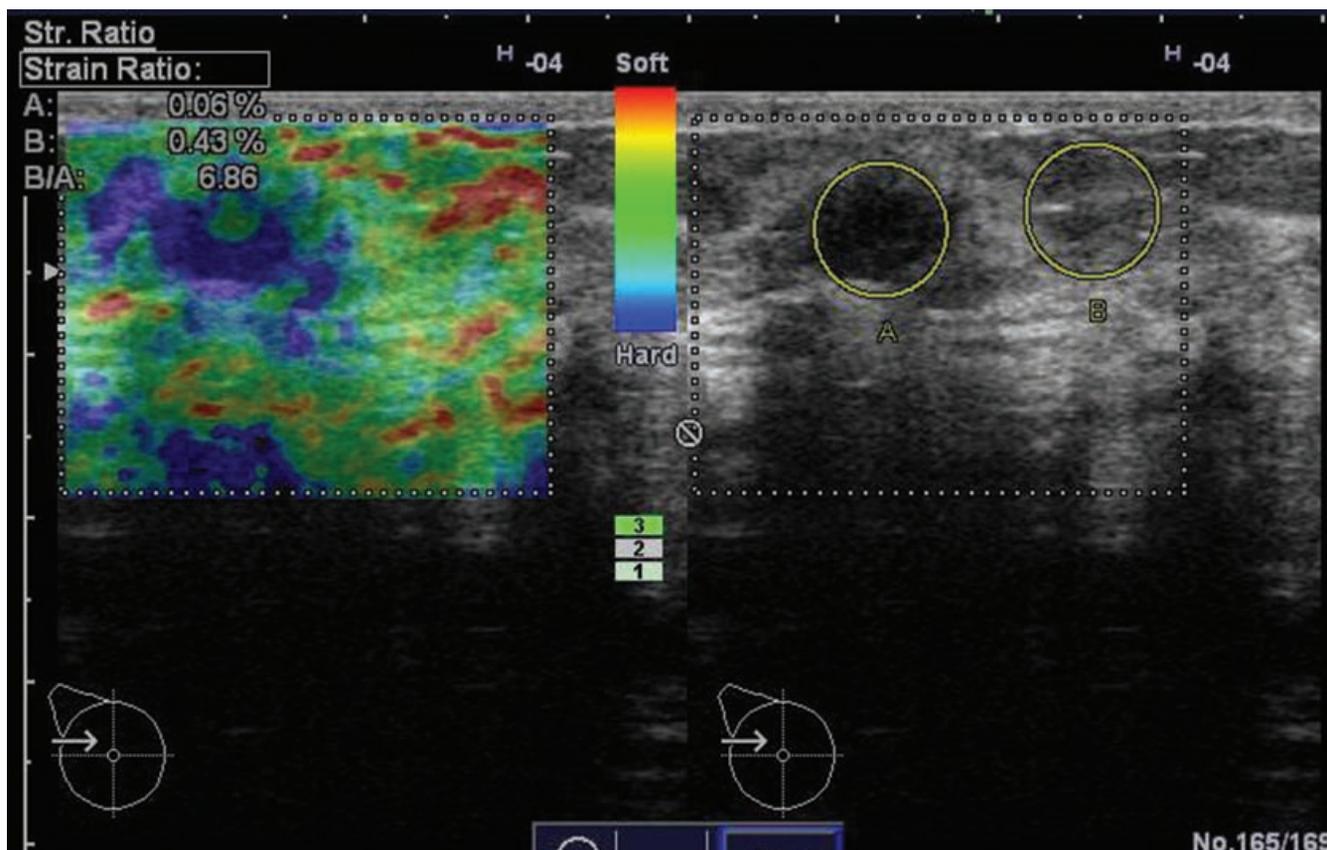


Рис. 3. Эластограмма правой молочной железы: смешанное картирование с преобладанием участков синего окрашивания, КД = 6,86

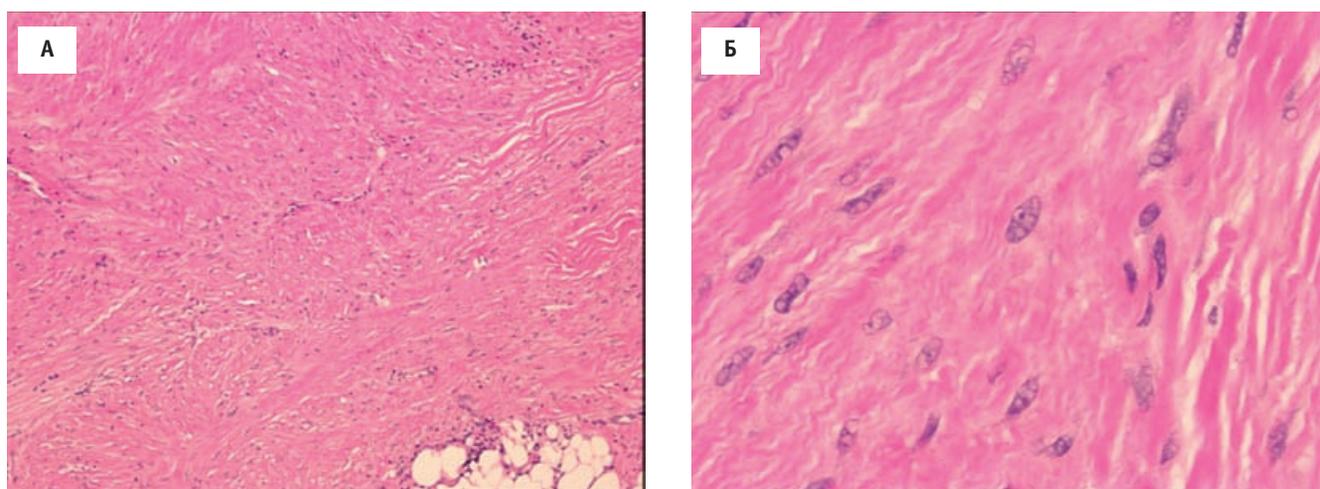


Рис. 4. Гистологические препараты: клетки собраны в широкие переплетающиеся пучки. Окраска гематоксилином и эозином  $\times 40$  (А),  $\times 400$  (Б)

сивный очаг накопления РФП (КДН 144 %), что более типично для доброкачественных опухолей.

Для уточнения диагноза под контролем УЗИ была выполнена тонкоигльная аспирационная биопсия новообразования правой молочной железы и лимфатического узла правой подмышечной области. По данным цитологического исследования в образо-

вании были выявлены эритроциты, фрагменты соединительной ткани и немногочисленные клетки кубического эпителия. В лимфатическом узле – лимфопролиферативная реакция.

Учитывая несоответствие клинической картины и результатов цитологического исследования, было принято решение о проведении аспирационной био-

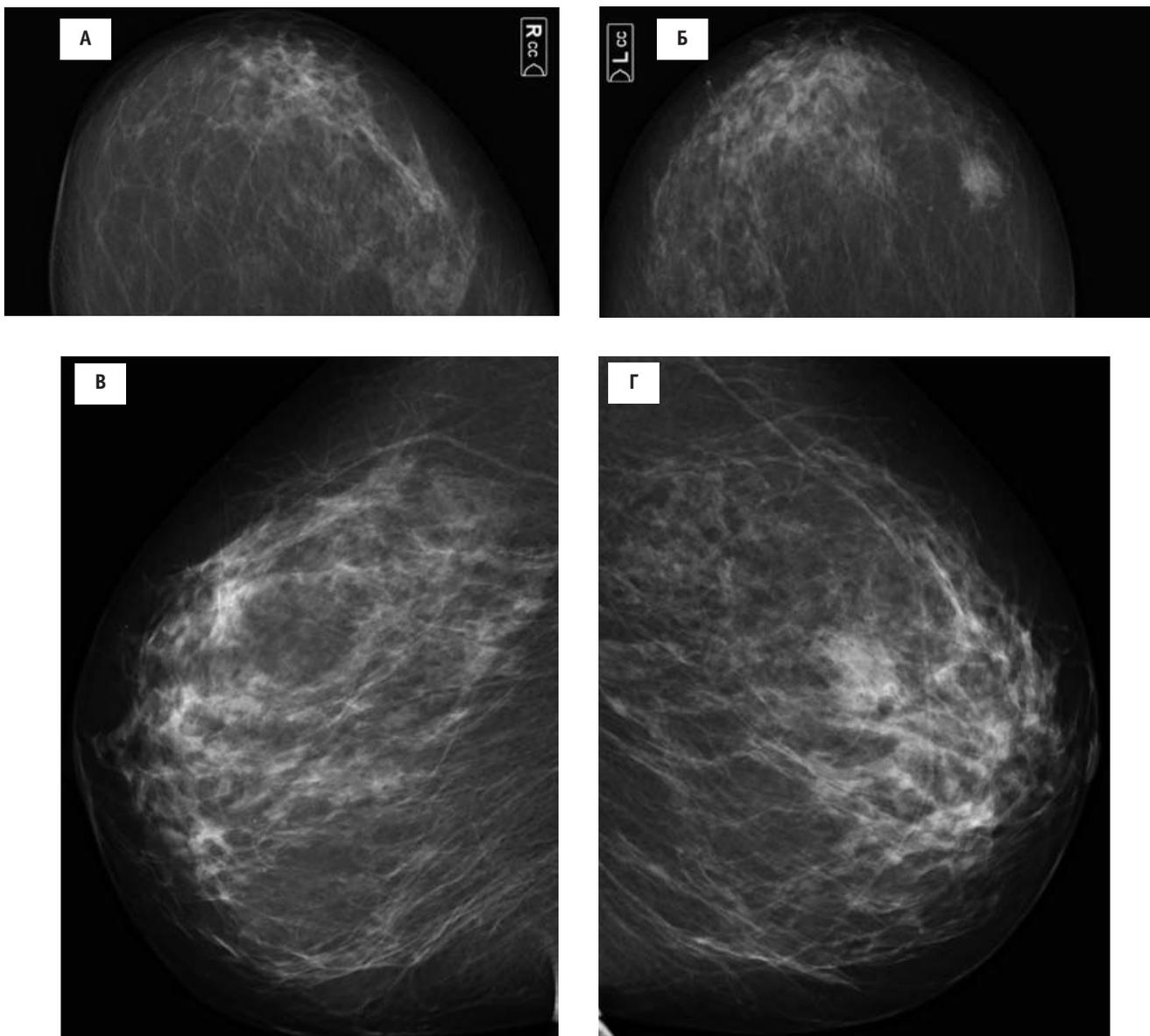


Рис. 5. А, В – рентгенограммы правой молочной железы; Б, Г – рентгенограммы левой молочной железы

псии правой молочной железы с забором гистологического материала под контролем рентгеновской цифровой стереотаксической приставки («пистолет-игла»). По данным цитологического исследования выявлены эритроциты, группа клеток кубического эпителия, единичные клетки с полиморфизмом, подозрительные по принадлежности к раку. При гистологическом исследовании – узел десмоидного фиброматоза молочной железы.

В связи с расхождением данных цитологического, гистологического исследований и данных обследования была выполнена повторная аспирационная биопсия правой молочной железы системой «пистолет-игла» под контролем УЗИ. По данным гистологического исследования, ткань опухоли молочной

железы построена из веретенообразных фибробластов/миофибробластов с овальными гиперхромными ядрами с низкой митотической активностью. Клетки опухоли формируют пучки среди коллагеновой стромы и инфильтрируют жировую ткань железы (рис. 4). Было необходимо дифференцировать десмоидный фиброматоз и пограничную листовидную опухоль.

Впоследствии пациентке было проведено хирургическое лечение в объеме широкой секторальной резекции правой молочной железы. Удален узел звездчатой формы, размерами 1,6 × 1,5 × 1,5 см, ткань опухоли – однородная серая. Гистологическое исследование удаленной ткани позволило подтвердить диагноз, поскольку был выявлен экстраабдоминальный

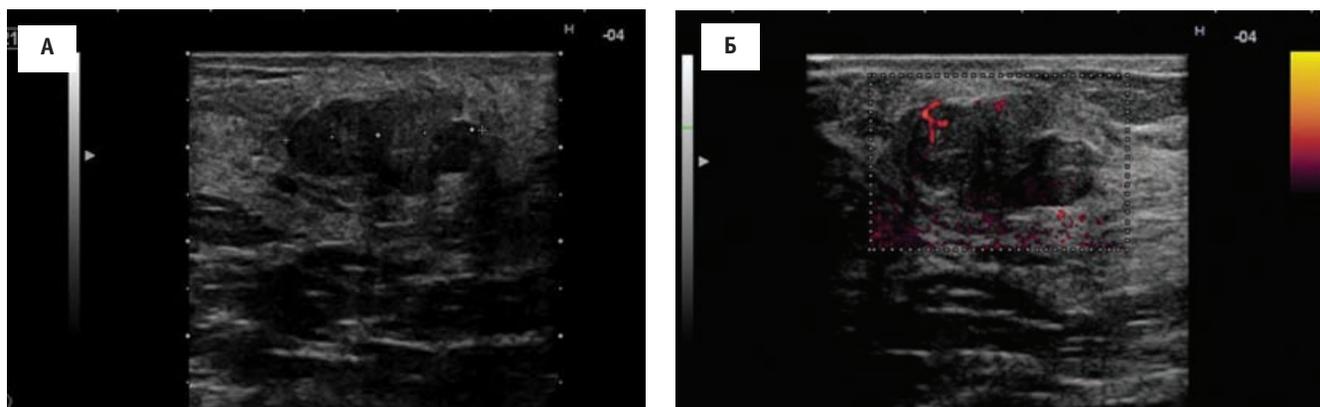


Рис. 6. А – сонограмма левой молочной железы; Б – доплеросонограмма левой молочной железы

десмоидный фиброматоз молочной железы с врастанием опухоли в ретикулярный слой дермы кожи железы.

Больная С. 47 лет, обратилась с жалобами на боли в левой молочной железе. При пальпации в верхне-внутреннем квадранте пальпировалось уплотнение с нечеткими контурами до 2,5 см в диаметре. При рентгенологическом исследовании определялась картина нерезкой фиброзной мастопатии, диффузно расположенные микрокальцинаты, на этом фоне слева на границе внутренних квадрантов был выявлен опухолевый узел с нечеткими контурами, размерами 3,6 × 2,0 см (рис. 5).

При УЗИ визуализировалось гипоэхогенное образование, с четкими неровными контурами, неоднородной структуры, размерами 2,1 × 1,5 см (рис.

6А). В режиме ультразвуковой доплерографии в образовании фиксировался кровоток (рис. 6Б).

В режиме эластографии было выявлено смешанное картирование с преобладанием участков синего цвета, свидетельствующее о высокой степени жесткости образования, а также высокое значение коэффициента деформации – 19 (рис. 7).

Для уточнения диагноза под контролем УЗИ была выполнена аспирационная биопсия образования левой молочной железы системой «пистолет-игла». По данным цитологического исследования, в образовании были выявлены эритроциты, фрагменты соединительной ткани, группы клеток кубического эпителия. Элементов злокачественной опухоли не выявлено. При гистологическом исследовании – фиброаденома молочной железы.

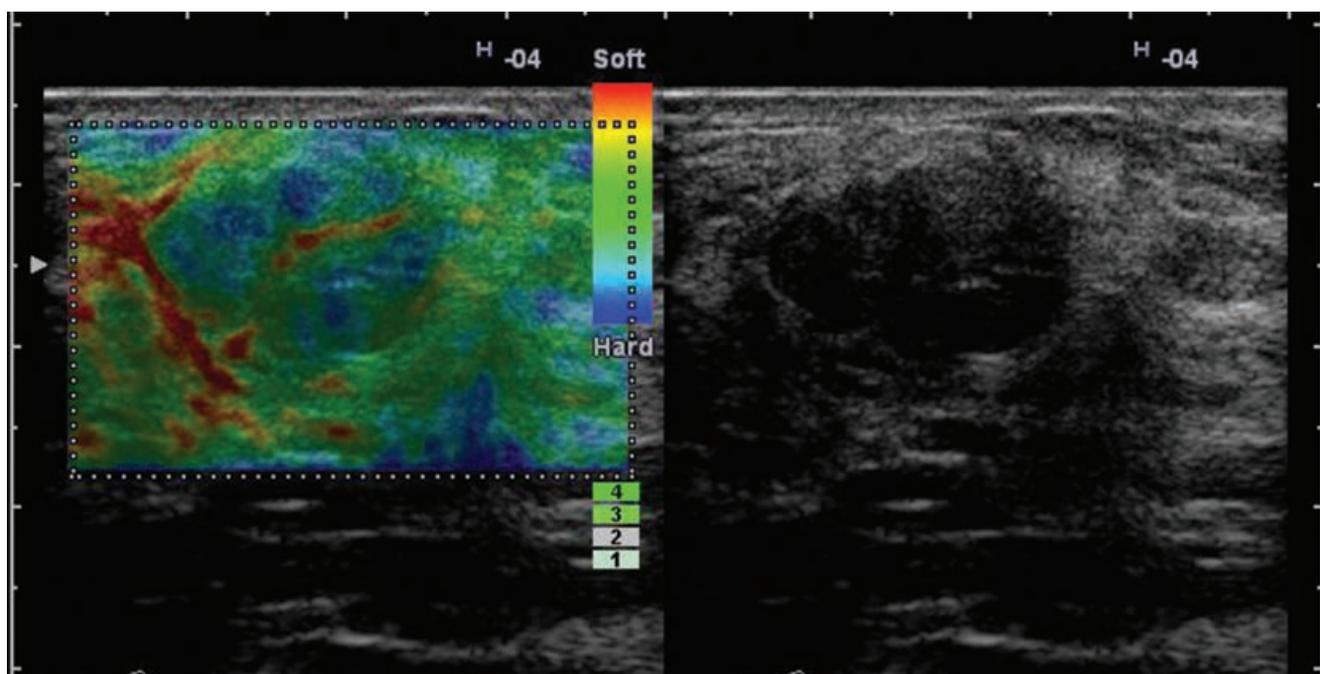


Рис. 7. Эластограмма левой молочной железы: смешанное картирование с преобладанием участков синего окрашивания

Пациентке проведено хирургическое лечение в объеме секторальной резекции левой молочной железы. Удален опухолевый узел размерами 2,0×1,5×1,5 см, ткань опухоли — однородная, серая. При срочном гистологическом исследовании был подтвержден диагноз фиброаденомы. Лишь плановое гистологическое исследование удаленной ткани позволило поставить окончательный диагноз, был выявлен узел десмоидного фиброматоза молочной железы.

Приведенные клинические наблюдения иллюстрируют длительный и сопряженный с трудностями путь к установлению диагноза у пациентов с редким заболеванием молочной железы — десмоидным фиброматозом, а также возможности и значение неинвазивных и инвазивных методов лучевой диагностики в распознавании этой патологии. Причина появления симптомов, патогномоничных для рака молочной железы, связана с особенностями морфологического строения десмоидной опухоли. Так, нечеткость и лучистость контуров узла обусловлена инфильтрирующим типом роста опухоли. А высокая плотность узла при рентгенологическом исследовании и в режиме ультразвуковой эластографии объясняется наличием в структуре опухоли коллагеновых волокон и фибробластов, увеличивающих жесткость образования. Таким образом, рентгенологические и ультразвуковые данные не позволяли гарантированно судить о природе выявленного образования молочной железы. Результаты неоднократного цитологического и гистологического исследования также носили спорный характер. В первом случае, всё же, при гистологическом исследовании стало возможным предположить наличие десмоидного фиброматоза.

Таким образом, важность дифференциальной диагностики редко встречающегося десмоидного фиброматоза и злокачественной опухоли молочной железы определяется необходимостью применения различной тактики лечения пациентов в этих случаях. При рентгеновской маммографии и ультразвуковом исследовании патогномоничные признаки десмоидного фиброматоза отсутствуют, данные методы позволяют лишь выявить образование. Методики интервенционной радиологии (преимущественно биопсия системой «пистолет-игла») позволяют получить материал для цитологического и гистологического исследования. Гистологическая интерпретация биоптатов молочной железы также крайне не проста. Повторные биопсии, подтверждающие наличие веретеноклеточной пролиферации, можно расценить как

фиброматоз, особенно если этот диагноз соответствует клиническим и рентгенологическим данным. Однако следует помнить, что в молочной железе обнаруживают целый ряд веретеноклеточных опухолей, как доброкачественных, так и злокачественных (фиброматоз, миофибробластома, филлоидные опухоли, саркома).

Описываемые случаи — достаточно редкие наблюдения. Но именно такой опыт заставляет врача думать, анализировать ситуации, а в повседневной практике уходить от выработанных стандартов и постоянно расширять свой клинический кругозор.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маммология: Национальное руководство. Под ред. В.П. Харченко, Н.И. Рожковой. — М.: «ГЭОТАР-Медиа», 2009, 324 с.
2. Erguvan-Dogan B., Dempsey P.J., Ayyar G. et al. Primary desmoid tumor (extraabdominal fibromatosis) of the breast. // AJR, 2005, **185**, P. 488–489.
3. Hermas S., Soummani A., Boumezgou K. et al. Mammary fibromatosis (apropos of one case). // Gynecol. Obstet. Fertil., 2000, **28**, P. 38–43.
4. Koibuchi Y., Iino Y., Oyama T. et al. Fibromatosis of the breast: a case report // Jpn. J. Clin. Oncol., 1995, **25**, P. 16–19.
5. Povoski S.P., Jimenez R.E. Fibromatosis (desmoid tumor) of the breast mimicking a case of ipsilateral metachronous breast cancer. // W. J. Surgic Oncol., 2006, **4**, P. 57–59.
6. Stout A.P. Juvenile fibromatosis. // Cancer, 1954, **7**, P. 953–978.
7. Enzinger F.M., Weiss S.W. Fibromatosis. // In: “Soft tissue tumors”. Enzinger F.M., Weiss S.W., eds. 3rd ed. St Louis, MO: Mosby — Year Book Inc, 1995, ch. 10.
8. Jamshed S., Farhan M.I., Marshall M.B. et al. Fibromatosis of the breast after mammary prosthesis implantation. // Clin. Advances in Hematol. & Oncol., 2008, **9**, P. 687–693.
9. Rammohan A., Wood J.J. Desmoid tumour of the breast as a manifestation of Gardner’s syndrome. // Int. J. Surg. Case Reports, 2012, **3**, P. 139–142.
10. Ng W.-H., Lee J., Poh W.-T. Desmoid tumor (fibromatosis) of the breast // Arch Surg., 1997, **132**, P. 444–446.

Поступила: 25.06.2012

Принята к публикации: 26.12.2012

## К 85-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ Л.А. ИЛЬИНА



Леонид Андреевич Ильин родился 15 марта 1928 г. в Харькове. После окончания с отличием 1-го Ленинградского медицинского института и его военно-морского факультета в 1953 г. Л.А. Ильин служил на Военно-морском флоте СССР. Был начальником медицинской службы боевого корабля, затем создал первую на Черноморском флоте радиологическую лабораторию. После демобилизации работал в Ленинграде старшим научным сотрудником медико-биологического отдела научно-исследовательского института Военно-морского флота СССР. В 1961 г. Л.А. Ильин избирается по конкурсу руководителем лаборатории радиационной защиты Ленинградского научно-исследовательского института радиационной гигиены Минздрава РФ, в 1962 г. назначен заместителем директора по научной работе этого института.

В 1968 г. Леонид Андреевич Ильин по инициативе заместителя Министра здравоохранения СССР А.И. Бурназяна назначается директором и научным руководителем Государственного научного центра – Института биофизики Минздрава СССР, который за успехи, достигнутые в развитии медицинской науки, здравоохранения и подготовки кадров, в 1977 г. удостоен высшей правительственной награды СССР – ордена Ленина.

Академик РАМН Л.А. Ильин – один из наиболее компетентных и признанных мировых авторитетов в

области радиационной медицины и противорадиационной защиты.

Основные научные исследования Л.А. Ильина посвящены важнейшим направлениям радиационной медицины: изысканию и созданию лекарственных препаратов и средств защиты организма от воздействия гамма-нейтронного излучения, инкорпорации радионуклидов в организме и контактного радиоактивного загрязнения кожных покровов, ран и ожогов, разработке медико-гигиенических проблем защиты профессионалов и населения при создании и освоении новых атомных технологий и в случае радиационных аварий; регламентации допустимых уровней облучения человека; радиобиологии низкоинтенсивного излучения и прогнозирования стохастических последствий радиоактивного облучения людей.

В результате научных исследований Леонида Андреевича, его учеников и сотрудников созданы, испытаны и внедрены в отечественную практику высокоэффективные препараты для профилактики и лечения острых радиационных поражений. Например, радиопротектор Б-190 в качестве средства профилактики гамма-нейтронного облучения принят в атомной промышленности и энергетике, на атомном флоте и в других профильных организациях. Препарат дезоксинат рекомендован в качестве одного из эффективных средств лечения острых радиационных

поражений. В результате исследований Л.А. Ильина для борьбы с последствиями инкорпорации различных радионуклидов в организме разработаны и выпускаются препараты альгисорб, ферроцин, препараты стабильного йода и группа комплексонов. Известный практикам препарат “Защита” является одним из наиболее эффективных средств для деконтаминации кожных покровов от трансплутониевых элементов. С именем Л.А. Ильина связаны разработка и внедрение в практику атомной промышленности и энергетики специальных портативных аптечек для профессионалов и аптечек для населения с соответствующими противорадиационными препаратами для применения в случае радиационных аварий. По идеям Леонида Андреевича и при его непосредственном участии разработаны медико-биологические средства и специальные системы защиты личного состава от одного из видов ядерного оружия, за это ему в 1985 г. присуждена Ленинская премия. Л.А. Ильин неоднократно принимал участие, в том числе в качестве научного руководителя, в испытаниях разработанных препаратов в полигонных условиях. Он ветеран подразделений особого риска.

Под руководством и при непосредственном участии Л.А. Ильина разработаны отечественные регламенты аварийного облучения людей и впервые в мировой практике (1971 г.) – методические рекомендации по защите населения в случае аварии на ядерных реакторах. Эти разработки и дальнейшая их модификация (1983 г.) стали основополагающими в обосновании мероприятий по защите людей во время и после аварии на ЧАЭС.

С первых дней и в течение наиболее тяжелого периода этой катастрофы Л.А. Ильин работал в очаге поражения, был одним из научных руководителей медико-биологических и гигиенических работ по ослаблению последствий аварии, принимал принципиальные решения по стратегии и тактике защиты людей.

Л.А. Ильин – первый в мире ученый, который разработал и обосновал прогноз радиологических последствий этой катастрофы, в последующем подтвержденный ведущими зарубежными и отечественными специалистами.

Теоретические работы Леонида Андреевича посвящены одной из наиболее актуальных проблем радиационной медицины и гигиены – оценке реальных рисков облучения людей и на этой основе регламентации уровней низкоинтенсивного хронического облучения. Он разработал концепцию “практического порога” в радиационной эпидемиологии и гигиеническом нормировании.

Л.А. Ильин автор и соавтор 20 монографий, учебников, руководств и более 400 научных публикаций. Среди них такие фундаментальные монографии, как

“Основы защиты организма от воздействия радиоактивных веществ” (1977 г.), “Радиоактивный йод в проблеме радиационной безопасности” (1972 г.; переведена на английский язык, 1975 г.), “Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры” (2001 г.; переведена на японский язык в 2002 г.; издана на английском языке в 2004 г.), научный редактор 4-х томного издания «Радиационная медицина» (1998 г., 2001 г., 2002 г., 2004 г.). Монография Л.А. Ильина “Ядерная война: медико-биологические последствия” (1982 г., 1984 г.), написанная в соавторстве с Е.И. Чазовым и А.К. Гуськовой, вышла двумя изданиями и переведена на пять языков. Эта книга сыграла важную роль в мировой политике предотвращения ядерной катастрофы в качестве одного из первых научных обоснований и расчетных оценок последствий термоядерной войны, свидетельствующих о невозможности достижения победы в такой войне. Е.И. Чазов, Л.А. Ильин и А.М. Кузин вместе с тремя американскими учеными Б. Лауном, Г. Миллером и Э. Чеваном в декабре 1980 г. в Женеве создали международное движение “Врачи за предотвращение ядерной войны”. В 1985 г. это движение было удостоено Нобелевской премии мира.

Научно-публицистическая книга Л.А. Ильина “Реалии и мифы Чернобыля” вышла двумя изданиями в России (1994 г., 1996 г.), издана на английском языке (1995 г.) и опубликована на родном языке в Японии (1998 г.). В этой монографии автор впервые на основании собственных исследований и опыта работ в Чернобыле представил объективную картину медико-биологических и психосоциальных последствий катастрофы. Учебник Л.А. Ильина “Радиационная гигиена” (в соавторстве с В.Ф. Кирилловым и И.П. Коренковым) стал настольной книгой врачей и студентов, а по заключению известных физиков, работающих в атомной области, этот учебник может быть с успехом использован для преподавания в технических вузах при подготовке специалистов в области радиоэкологии, дозиметрии и защиты. В 2001 г. этот учебник и его авторы удостоены премии Правительства Российской Федерации.

В 1974 г. Л.А. Ильин избран членом-корреспондентом, а в 1978 г. – действительным членом Академии медицинских наук СССР.

С 1980 по 1984 г. Л.А. Ильин – член Президиума АМН, с 1984 по 1990 г. – вице-президент Академии медицинских наук СССР. В течение двух сроков (1993–2000 г.) Л.А. Ильин избирался членом Главного комитета Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ). С 1972 по 2010 г. являлся представителем СССР, затем – Российской Федерации в Научном комитете по действию атомной радиации ООН (НКДАР ООН). В течение 20 лет был председателем НКРЗ СССР.

Л.А. Ильин – лауреат Ленинской премии (1985 г.), Государственных премий СССР (1977 г.) и Российской Федерации (2000 г.) и дважды лауреат премий Правительства Российской Федерации в области науки и техники (2001, 2006 гг.)

За заслуги перед страной и выдающиеся достижения в развитии науки о действии излучения на человека Л.А. Ильин в 1988 г. удостоен звания Героя Социалистического Труда.

С 2008 г. и по настоящее время академик РАМН Л.А. Ильин является Почетным президентом Федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный научный центр Российской Фе-

дерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна» (до 2008 года Государственный научный Центр – Институт биофизики» и Клиническая больница № 6 имени А.И.Бурназяна Федерального медико-биологического агентства).

*Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна»  
Редакция журнала «Медицинская радиология и радиационная безопасность»*

**ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ ДЛЯ ОПУБЛИКОВАНИЯ  
В ЖУРНАЛЕ «МЕДИЦИНСКАЯ РАДИОЛОГИЯ И РАДИАЦИОННАЯ  
БЕЗОПАСНОСТЬ»\***

**Rules for Authors of Papers to be Published in Journal of  
Medical Radiology and Radiation Safety**

1. Для опубликования принимаются статьи по всем разделам медицинской радиологии и радиационной безопасности. Статьи могут быть экспериментальными или клиническими, теоретическими или концептуальными, обзорными по материалам литературы, дискуссионного, исторического или хроникального характера, информацией о проблемах медицинской радиологии и радиационной безопасности, а также в виде рецензий, хроники и т. п.

2. Редакция переходит на электронный документооборот. Наряду с присылкой статей по обычной почте в виде бумажного варианта + электронного текста на дискетах/компакт дисках их можно присылать только по электронной почте: medradiol@fromgu.com. Однако, если в статье имеются цветные иллюстрации, желательно их представить в цвете в бумажном варианте, т.к. это облегчит работу рецензента и редактора.

3. Рекомендуются использовать редактор *Word for Windows*; шрифт *Times New Roman* 12 обычный; интервал полуторный. Абзацный отступ 0,6 см устанавливается командами компьютера: «Формат – Абзац – Абзацный отступ». Выравнивание производится по левому краю, без переносов слов; поля документа 2 см. Точка после заголовков, включая фамилии авторов, а также отдельно стоящих предложений (заголовки таблиц, рисунков, надписи на рисунках и т.д.) не ставится.

4. Первая страница (не нумеруется) начинается с **инициалов и фамилии авторов** (именно в таком порядке, в конце точка не ставится, шрифт жирный). Если соавторы относятся к различным учреждениям, то необходимо в конце фамилии каждого соавтора указывать ссылку <sup>1,2</sup> и т.д., которая воспроизводится перед названием соответствующих учреждений.

Через одну строку прописными буквами следует **НАЗВАНИЕ СТАТЬИ**. Затем через одну строку на английском языке – **инициалы авторов и фамилии** и еще через строку – **название статьи строчными буквами**; все слова в английском названии, кроме предлогов, связок и артиклей, начинаются с прописных букв. Далее через три строки – ключевые слова, сначала на русском, затем – на английском языке:

**Ключевые слова:** [сами слова светлым курсивом].

Пустая строка

**Key words:** [сами слова светлым курсивом]

Внизу страницы приводится наименование учреждения/учреждений (обязательно для всех работающих) и адрес электронной почты ответственного автора.

Обращаем внимание на необходимость указывать фамилии всех соавторов и их инициалы, а также наименование учреждения на английском языке. Фамилии и имена (для нас важны инициалы) на английском языке могут быть написаны несколькими способами, а редакция хотела бы отразить Ваше предпочтение. Наименование учреждения на английском языке должно соответствовать официальному наименованию, указанному в Уставе. Сама редакция не может сделать адекватный перевод наименования, например, из-за того, что различные учреждения, которые по-русски называются «Научный центр», в одних случаях называют по-английски как *Scientific Center*, в других — как *Research Center*; в названиях используется как американское написание *Centre*, так и английское — *Center*.

Внизу страницы приводятся данные для связи с автором/авторами при решении редакционных вопросов: фамилия, имя и отчество ответственного автора/авторов, почтовый адрес с индексом, номера телефонов и обязательно адрес/адреса электронной

\* Правила представлены также на сайте [http://www.fmbcfmba.org/RadioJournal/prav\\_ofo.pdf](http://www.fmbcfmba.org/RadioJournal/prav_ofo.pdf)

почты. Эта информация предназначена только для редакции.

5. На второй странице (уже пронумерованной) располагается реферат на русском языке.

#### **РЕФЕРАТ**

Цель:

Материал и методы:

Результаты:

Выводы:

Названия разделов реферата подчеркиваются, после двоеточия текст начинается с Прописной буквы. Реферат, кроме изложения сути работы, должен содержать основную числовую информацию и **иметь объем не более одной страницы текста** через полтора интервала. При превышении этого объема реферат будет направляться на перделку.

6. На третьей странице располагается реферат на английском языке, причем буквального соответствия английского и русского рефератов не требуется.

#### **ABSTRACT**

Purpose:

Material and methods:

Results:

Conclusion:

7. Текст статьи начинается на четвертой странице. Статьи экспериментального, клинического или теоретического плана, как правило, не должны превышать в целом 15 страниц, обзоры – в целом 25 страниц. Статьи экспериментального или клинического характера имеют следующие разделы (точки после названий разделов отсутствуют, выравнивание по левому краю, **шрифт полужирный**, размер 12):

**Введение**

**Материал и методы**

**Результаты и обсуждение**

**Выводы** (по пунктам 1, 2, 3 ...)

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ** (прописные буквы, шрифт обычный).

Статьи теоретического и концептуального характера обычно не имеют раздела **Материал и методы**.

Обзоры литературы имеют: **Введение**, **Разделы** по отдельным обсуждаемым вопросам и **Выводы**. Вместо реферата приводится **СОДЕРЖАНИЕ (CONTENTS)** со списком этих разделов. Количество литературных ссылок в оригинальных статьях не должно превышать 10–15, в обзорах – 50–60.

Следует различать длинное тире «—», тире «-» и дефис «-» (в составных словах). Длинное тире — это то, что авторы используют как тире, короткое тире ставится только между числами, например, 3–4 мес,

дефис используется в составных словах. Для ввода длинного тире используйте сочетание клавиш Ctrl+Alt + тире вверху справа на правой (цифровой) клавиатуре, для ввода тире — сочетание клавиш Ctrl + тире вверху справа на правой (цифровой) клавиатуре, для ввода дефиса (-) — знак на основной или на правой цифровой клавиатуре.

8. Слово Таблица, например 1, располагают над таблицей у левого поля светлым курсивом. Строкой ниже следует тематическое название таблицы жирным шрифтом (строчные буквы) с выравниванием по центру, заливка полей таблицы не производится. При отсутствии данных в какой-либо ячейке (ячейках) таблицы ставится прочерк в виде тире «—», а не «-». Расшифровка входящих в таблицу символов и (или) сокращений приводится в **Примечании**: (Слово Примечание с прописной буквы, шрифт светлый прямой с подчёркиванием), которое располагают под левым нижним углом таблицы. Текст самого примечания — без подчёркивания. Все формулы должны быть набраны в математическом редакторе Word MS Equation. Номера формул пишут прямым шрифтом у правого поля рукописи и заключаются в круглые скобки. Каждую таблицу и каждый рисунок приводят на отдельной странице.

9. Графики и диаграммы принимаются к печати в MS Excel или как диаграммы Word. Редакция постарается воспроизводить в журнале цветные графики и иллюстрации. Во всех случаях диаграммы и графики следует размещать на белом поле.

Тоновые рисунки, фотографии с разрешением не менее 300 пикс/дюйм должны быть сохранены в формате TIFF (обязательно архивированы), в крайнем случае — в формате JPEG и приложены отдельными файлами (**пожалуйста, не вставляйте рисунки в документ Word**). Обозначьте для верстальщика верх и низ фотографии, если это может представлять трудности для неспециалиста. Все подписи на рисунках, графиках и диаграммах, в том числе и надписи на осях координат, должны быть выполнены на русском языке. Рекомендуется не перегружать рисунки надписями в поле самого рисунка: предпочтительно различные элементы изображения пронумеровать, а расшифровку каждого номера привести в подписи под рисунком. Фрагменты рисунка должны помечаться строчными буквами кириллицы: а, б, в, г. Номера и подписи ко всем рисункам обязательно повторяются на отдельной странице. На рисунки и таблицы в тексте ссылаются так: рис. 4 или табл. 2.

10. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ размещается после текста статьи и формируется в виде библиографических ссылок **в порядке их упоминания** в тексте безотносительно того, на каком языке они написаны. При наличии четырех авторов упоминайте всех, а при большем числе — только первых трех и далее пишете: *и соавт.* или *et al.* Затем следуют название работы и библиографические данные. Названию периодического издания (журнала) или сборника предшествует символ // (две наклонные). Журналы называются в принятых сокращениях, а монографии и сборники цитируются полностью. После названия журнала указывают год, **том** (полужирным прямым, буквы Т или Vol. не пишутся), номер журнала (не в скобках), начальная и конечная страницы цитируемой статьи, разделенные тире без пробелов. За названием монографии, отдельного отчета, диссертаций и т.п. указывают место издания, издательство или организацию, год выпуска. После названия сборника курсивом пишут инициалы и фамилию редактора или составителя.

Просьба внимательно следить за правильной постановкой специфических знаков (точка, тире, двоеточие, запятая, две косые черты, пробелы и др.), кратким обозначением страницы: с. — при указании общего объема публикации, С. — при указании конкретных страниц документа в публикации; обозначения Вып., знак № (для работ на русском языке), No. (для работ на иностранных языках, так как латинская раскладка клавиатуры не имеет знака №), С. и с. пишутся раздельно от числа. Следуйте примерам:

*Иванов И.А., Петров П.А., Никитенко Н.А. и соавт.* Лучевая терапия рака пищевода. // Мед. радиол. и радиац. безопасность, 1996, **41**, № 6, С. 14–17.

*Иванов И.А., Петров П.А., Никитенко Н.А., Коломийцев Н.П.* Стресс при подготовке статей. — СПб.: Медицина, 2000, 820 с.

*Лягинская А.М., Романова Л.К., Покровская М.С.* Опасности облучения плода. // В сб. «Репродуктивное здоровье женщины и потомство в регионах с радиоактивным загрязнением». Под. ред. *М.Я. Федорова, В.И. Краснопольского.* — М.: Медицина, 1997, С. 246–260.

*Караваев П.И.* Топометрическая подготовка онкологических больных к конформному облучению. — М.: Автореферат дисс. докт. мед. наук, 2007, 32 с.

*Akiyama M.* Role of somatic mutations for risk evaluation. // In: Proc. of Fukui Workshop on Health Risks: Perspectives. Ed. by *T. Sugahara, K. Torizuka, S. Kobayashi, Y. Ishii.* — Kyoto: Health Research Foundation, 1992, P. 172–175.

*Author A.A., Author B.B., Author C.C. et al.* Radiation and health. // *Lancet*, 1999, **109**, Suppl. 3, No. 5, P. 2–5.

*Otake M., Schull W.* Radiation-related small head sizes among prenatally exposed atomic bomb survivors. TR 6–92. — Hiroshima: RERF, 1992, 87 pp.

World Health Organization. Environmental Health Criteria \*2.5, Selected Radionuclides. — Geneva: WHO, 1983, 234 pp.

При ссылке на наш журнал требуется указывать его том. Напоминаем тома по годам: 1980 — **25**; 1981 — **26**; ... 2008 — **53**; 2009 — **54**; 2010 — **55**; 2011 — **56**; 2012 — **57**.

Для отправки материала в редакцию по электронной почте рекомендуется создать отдельную папку, в которой находятся файл статьи (формат doc) и файлы рисунков (форматы gif/tiff/png/jpeg). Перед отправлением по электронной почте папку нужно сжать архиватором zip. Высылать сразу всю архивированную папку.

11. Принятые в журнале сокращения и символы соответствуют существующим стандартам. Допускаются и другие сокращения. Обращаем внимание на отсутствие точек после большинства сокращений.

Общие сокращения: год — г., годы — гг.; тысяча — тыс.; абсолютная единица — абс. ед.; другие — др.; единицы — ед.; область — обл.; сборник — сб.; книга — кн.; смотри — см.; то есть — т.е.; так как — т.к.; и так далее — и т.д.; тому подобное — т.п.; часть — ч.; экземпляр — экз.; объемные проценты — об. %;

**но** месяц — мес; неделя — нед; сутки — сут; час — ч; минута — мин; секунда — с; килограмм — кг; грамм — г; миллиграмм — мг; микрограмм — мкг; литр — л; миллилитр — мл; микролитр — мкл; километр — км; метр — м; сантиметр — см; миллиметр — мм; микрометр — мкм; нанометр — нм; миллиард — млрд; миллион — млн; молярность раствора (при цифре) — М, mM; район — р-н; температура — 42 °С или 315 К (раздельно от числа, как и обозначение процентов %); паскаль — Па; килоом — кОм; вольт — В; киловольт — кВ; ампер — А; миллиампер — mA; дроби типа нмоль/л, мг/кг, МБк/км<sup>2</sup> даются с использованием косой черты.

Радиационная физика: беккерель — Бк; мегабеккерель — МБк; килогеккерель — кБк; грей — Гр; использование внесистемных единиц активности кюри (Ки), милликюри (мКи), микрокюри (мкКи) не рекомендуется; зиверт — Зв; миллизиверт — мЗв; тесла — Тл; электронвольт — эВ; килоэлектронвольт — кэВ; мегаэлектронвольт — МэВ; символы радионуклидов пишутся как <sup>137</sup>Cs, <sup>99m</sup>Tc (m — латинское!) или цезий-137, технеций-99m, но не Cs<sup>137</sup>, Tc<sup>99m</sup>; гамма-излучение, бета-частицы, альфа-частицы; допускается написание с использованием

греческого алфавита –  $\gamma$ -облучение,  $\beta$ -излучение,  $\alpha$ -частицы; напряжение на рентгеновской трубке в пиковых киловольтах – кВп; слой половинного ослабления – СПО; тормозное излучение 6 МВ, но тормозное излучение с максимальной энергией 6 МэВ; фотоэлектронный умножитель – ФЭУ; полупроводниковый детектор – ППД; термолюминесцентный детектор (дозиметр) – ТЛД; ИК – инфракрасный; УФ – ультрафиолетовый; ВЧ – высокочастотный; СВЧ – сверхвысокочастотный; атомная электростанция – АЭС.

Лучевая диагностика: УЗИ – ультразвуковое исследование; МРТ – магнитно-резонансная томография; МРС – магнитно-резонансная спектроскопия; ЭПР – электронный парамагнитный резонанс; КТ (РКТ) – компьютерная томография (рентгеновская компьютерная томография); цифровая субтракционная (разностная) ангиография – ЦСА; усилитель рентгеновского изображения – УРИ; приборы с зарядовой связью – ПЗС (например, цифровой детектор рентгеновского излучения на основе ПЗС-матрицы); металл-оксид-полупроводник – МОП (например, МОП-конденсатор); электронно-оптический преобразователь – ЭОП; экспозиция измеряется в единицах мАс; система архивирования и передачи изображений – САПИ (в английской транскрипции – PACS).

Ядерная медицина: однофотонная эмиссионная компьютерная томография – ОФЭКТ; комбинированный ОФЭКТ /КТ-сканер; позитронная эмиссионная томография – ПЭТ; радиоиммунологический анализ – РИА; гамма-камера, гамма-томограф; радионуклидная диагностика – РНД; кривая «время–активность»; радионуклидная терапия – РНТ; радиофармпрепарат – РФП; функция передачи модуляции – ФПМ; пространственное разрешение измеряется в единицах мм FWHM (полная ширина на половине высоты пика функции чувствительности точечного источника излучения); фтородезоксирибоза – ФДР.

Радиобиология: относительная биологическая эффективность – ОБЭ; линейная передача энергии – ЛПЭ; кумулятивный радиационный эффект – КРЭ; коэффициент кислородного усиления – ККУ; ФУД – фактор усиления дозы; дезоксирибонуклеиновая кислота – ДНК; рибонуклеиновая кислота – РНК; линейно-квадратичная модель – ЛКМ; номинальная стандартная доза – НСД; летальная доза – ЛД; острая лучевая болезнь – ОЛБ; хроническая лучевая болезнь – ХЛБ; зависимость «доза–эффект».

Лучевая терапия: лучевая терапия – ЛТ; интраоперационная лучевая терапия – ИОЛТ; лучевая терапия с модуляцией интенсивности пучка излучения и лучевая терапия с управлением по изображениям – вместо русских аббревиатур повсеместно используются английские аббревиатуры IMRT и IGRT соответственно; суммарная очаговая доза – СОД; разовая очаговая доза – РОД; расстояние источник – поверхность – РИП; многолепестковый коллиматор – МЛК; фактор время – доза – фракция – ВДФ; гистограмма «доза – объём» – ГДО. Не рекомендуется использовать единицы сантигрей (сГр) и сантисиверт (сЗв), вместо них следует использовать либо Гр и Зв, либо мГр и мЗв.

Радиационная безопасность: радиационная безопасность – РБ; радиоактивные отходы – РАО; минимально значимая активность (на рабочем месте) – МЗА; радиационная авария – РА; нормы радиационной безопасности – НРБ; санитарные правила и нормы – СанПиН; источник ионизирующего излучения – ИИИ.

Общая медицина: центральная нервная система – ЦНС; артериальное давление – АД; ишемическая болезнь сердца – ИБС; объём циркулирующей крови – ОЦК; скорость оседания эритроцитов – СОЭ; электрокардиограмма – ЭКГ.

Следует избегать нестандартных сокращений, которые авторы считают общепринятыми, но на самом деле неизвестны большинству читателей журнала. Сокращение следует вводить в скобках только после первого упоминания полной формы данного термина в реферате и (или) в основном тексте статьи. Употребление любых, даже общепринятых, сокращений в названии статьи недопустимо.

Общее количество сокращений в статье не должно быть более 5–7.

12. Оставляйте только значащие цифры. Например, если ожидаемое число случаев болезни 7,2, а наблюдали всего 11 случаев, то их отношение выражается как 1,53 или даже 1,5, но не 1,5277. У среднеквадратического отклонения или ошибки среднего не должно быть больше знаков после запятой, чем у среднего. При статистической обработке поясняйте, идет ли речь о среднеквадратическом отклонении или о стандартной погрешности (ошибке) среднего. Указывайте название статистического критерия при суждении о достоверности.

Несколько напоминаний: 3, 5, 7 и 8-я позиции; 5-й, 5-е, 5-го и 5-му; 5-литровый, 20 %-ный, не рекомендуется писать: у 25-и больных, в 35-и случаях и т.п. МечеНый препарат, но мечеННый техно-

цием-99m (например) препарат.

«Одиночные» числа в пределах 10 в тексте рекомендуется писать словами, а не цифрами. Десятичные дроби в реферате и в основном тексте статьи (в том числе в таблицах и на рисунках) пишутся только через запятую, но в реферате на английском языке (Abstract) — только через точку.

13. Стил ь изложения материала в статье должен отвечать общепринятым нормам русского литературного языка. Перед отправкой статьи в редакцию тщательно прочтите весь текст и исправьте все выявленные ошибки. Особенно следите за правильностью использования знаков препинания.

В случае каких-либо затруднений при пересылке рукописи статьи звоните в редакцию по тел. 8-499-612-79-45 (Эмме Саркисовне Зубенковой).

## **RULES FOR AUTHORS OF PAPERS TO BE PUBLISHED IN JOURNAL OF MEDICAL RADIOLOGY AND RADIATION SAFETY**

### **Правила оформления статей для опубликования в журнале «Медицинская радиология и радиационная безопасность»**

Papers on all areas of medical radiology and radiation safety are acceptable for publication. Papers can be experimental, clinical, theoretical or conceptual ones as well as reviews of literature of discussible, historical or chronicle character and information on issues of medical radiology and radiation safety; overviews or chronicles are acceptable too.

Papers should be e-mailed to the editorial board: medradiol@fromru.com.

The word processor software of *Word for Windows* is recommended; the font of *Times New Roman 12 regular* and 1.5 line spacing are recommended. The paragraph spacing of 0.6 cm should be pre-established applying "Format – Paragraph – Paragraph Spacing". The left margin levelling of the page text should be done without word's breaks; document margins are 2 cm. Dots at the end of headers (including author family names) as well as at the end of separate sentences (headers of tables, pictures, picture inscriptions etc.) should not be placed. The long ("–") and short ("-", in multiple part word) dashes should be distinguished. To input long dash, please, use combination of buttons "Ctrl" and upper right button of "-" on the keyboard. All syntax signs should be followed by space.

Papers of experimental or clinical character should have the following parts (no dots after part titles, levelling on left margin, **bold font** of 12):

#### **Introduction**

#### **Material and methods**

#### **Results and discussion**

#### **Conclusions (list of items)**

LITERATURE REFERENCES (upper case letters, font 12 regular, left margin levelling).

Papers of theoretical and conceptual character usually do not have section of **Material and methods**.

Literature reviews have:

#### **Introduction**

**Sections** on separate issues under discussion and

**Conclusions.** Instead of abstract, the **CONTENTS** should be provided and include list of these sections.

The first page of the paper (no number) should be started from **initials and family names of authors** (this very order); the endpoint dot is absent and the bold font is used. In one line spacing, the upper case letters should be used to print the **TITLE OF THE PAPER**. The next items (in one line spacing) are initials and family names of authors (in English) and (after one more line spacing) the title of paper (in English) written in upper case letters. Than (after three lines spacing) keywords (in Russian and in English) should be provided:

**Keywords:** [in light *italic* font] (in Russian)

Empty line

**Keywords:** [in light *italic* font] (in English)

In the bottom of page the name(s) of institution(s) should be provided (obligatory for all employees). If co-authors are affiliated by different institutions, the footnote<sup>1,2</sup> etc. should be put at the end of co-author family name with correspondent link number at the beginning of the institution name. The mail address of each institution is not obligatory. Only the e-mail address is obligatory.

At the bottom of the page the author communication information should be provided to solve the editorial issues e-mail address and telephone.

The second page should contain the abstract text.

#### **ABSTRACT**

Purpose:

Material and methods:

Results:

Conclusion:

The paper body text should be started at page 3. The marks of first inclusion of reference to picture or table should be put on the page margins.

All formulae should be composed using mathematical editor of Word MS Equation. Formula numbers should be written in regular font at the right side of the manuscript and put in round brackets. Each table and each picture

\* Правила представлены также на сайте [http://www.fmbcfmba.org/RadioJournal/prav\\_ofo.pdf](http://www.fmbcfmba.org/RadioJournal/prav_ofo.pdf)

should be provided in separate page without page number.

The words of *Table 1* should be written in light italic and placed at the left above the table. The next line should contain the topical name of the table (in bold lower case letters) with central levelling; the table cells should not be shaded. The decoding of symbols and/or acronyms given in the table should be done by Note: (started from the upper case letter and written in light regular font with underlying), which should be placed under the left lower corner of the table. The note text should not be underlined. If the table cell(s) does not contain any data the long dash “ – ” should be placed (no short dash “ - ” should be placed).

All graphs and diagrams in the picture are accepted in **black – white** colours only and they should be done applying MS Excel or MS Word diagrams. In case of full colour images, diagrams and graphs the paper would be immediately returned to authors for corrections of pictures. The grey scale pictures and **black – white** photographs of good clarity and contrast and resolution of 300 pixels/inch at least should be saved in GIF/TIFF/PNG/JPEG format and attached as separate files (pictures should not be placed into the Word document!). It is recommended not to overload pictures with inscriptions in picture field: it is preferable to number different elements of image and decode these numbers in the picture underneath text. The underneath texts of the pictures should be placed in the separate page according to the picture numbering order. The text reference to the pictures and tables should be as follows: Fig. 11 and Table 4.

LITERATURE REFERENCES should be placed after the body text. Since 2008 this list is formatted as the numbered list of bibliography references in the alphabetical order **but not in the reference order** in the body text of the paper irrespectively to their language of quoting or inscription. Family names and initials of authors (this very order) are in italic. In case of four and more authors only 3 first authors should be written and *et al* should be added. Than the title of paper and bibliography data should be provided. The name of periodical publication (journal) or compendium should be preceded by // (double slash). Journals should be named according to common used acronyms; monographs and compendium names should be given in full. After the name of journal the year, **volume** (bold regular font, “Vol.” should not be written), number of issue (no brackets), initial and final page numbers of quoted paper (separated by long dash and without spacing) should be given. The name of monograph, separate report, dissertation etc. should be followed by the place of publishing, publisher or organization, and the year of publication. The name of the compendium should be followed by the family name and initials of the editor or compiler.

LITERATURE REFERENCES should be composed, if possible, applying the automated computerized numbering; the numbers should be placed into square brackets within the paper body text for reference.

Please, be attentive with proper punctuation (dot, dash, colon, comma, double slash, spacing etc.) and page symbol (p. when indicating to the total number of pages in the publication and P. when indicating specific pages in the publication) and signs of Issue, No.; P. and pp. are written separately from the following number. Please, follow to the examples below:

*Ivanov I.A., Petrov P.A., Nikitenko N.A. et al.* Radiation therapy of oesophagus cancer. // *Med. Radiol. and Radiat. Safety*, 1996, **41**, No. 6, P. 14 – 17.

*Akiyama M.* Role of somatic mutations for risk evaluation. // In: “Proc. of Fukui Workshop on Health Risks: Perspectives”. Ed. by *T. Sugahara, K. Torizuka, S. Kobayashi, I. Ishii* – Kyoto: Health Research Foundation, 1992, P. 172 – 175.

*Author A.A., Author B.B., Author C.C. et al.* Radiation and health. // *Lancet*, 1999, **109**, Suppl. 3, no. 5, P. 2 – 5.

*Otake M., Schull W.* Radiation-related small head sizes among prenatally exposed atomic bomb survivors. TR 6–92. – Hiroshima: RERF, 1992, 87 pp.

World Health Organization. Environmental Health Criteria \*2.5, Selected Radionuclides. – Geneva: WHO, 1983, 234 pp.

When referencing to our journal it is necessary to write its volume referenced. Please, see below volume numbers according to years:

1980 – **25**; 1981 – **26**; ... 2008 – **53**; 2009 – **54**; 2010 – **55**; 2011 – **56**; 2012 – **57**.

For German language journals, please, use Bd. (Band) – volume, H. (Heft) – part (issue) and S. (Seite) – page.

The accepted abridgements, acronyms and symbols correspond to existing standards. Other abridgements are permitted. Please, note the absence of dots after the majority of abridgements.

**General**: year – y. (with dot); years – yy.(with dot); month – mo; week – wk; day – d; hour – h; minute – min; second – s; kilogram – kg; gram – g; milligram – mg; microgram – µg; litre – L; millilitre – mL; microliter – µL; kilometre – km; metre – m; centimetre – cm; millimetre – mm; micrometre – µm; nanometre – nm; billion – bn; million – mn; thousand – th. (with dot); absolute unit – abs. unit; units – u.; molarity of the solution (after the number) – M, mM; region – reg.; compendium – comp.; that is – i.e.; and so on – etc.; part – p.; volumetric percentage – vol. % (with dot); temperature – 42°C or 315 K (separately from the number as same as percentage, %); pascal – Pa; kilohm – kOhm; volt – V; kilovolt – kV; amper – A; milliamper – mA;

fractions like nmol/L, mg/kg, MBq/km<sup>2</sup> are written with dash.

Radiation physics: becquerel – Bq; megabecquerel – MBq; gray – Gy; application of non-SI units of radioactivity, curie (Ci), millicurie (mCi), microcurie ( $\mu$ Ci) is not recommended; sievert – Sv, millisievert – mSv; tesla – T; electronvolt – eV, kiloelectronvolt – keV, mega-electronvolt – MeV; radionuclide symbols are written as <sup>137</sup>Cs, <sup>99m</sup>Tc or cesium – 137, technetium – 99m but not like Cs<sup>137</sup>, Tc<sup>99m</sup>; gamma radiation, beta particles, alpha particles – Greek letters are permitted; potential on X ray tube in peak kilovolts – kVp; half attenuation layer – HAL; 6 MV bremsstrahlung radiation but bremsstrahlung radiation of 6 MeV maximum energy; photoelectric multiplier – PEM; semiconductor detector – SCD; thermoluminescent dosimeter – TLD; IR – infrared; UV – ultraviolet; HF – high frequency; UHF – ultrahigh frequency; nuclear power plant – NPP.

Diagnostic radiology: USI – ultrasound imaging; MRI – magnetic resonance imaging; MRS – magnetic resonance spectrometry; ESR – electron spin resonance; X-ray CT – computer tomography (X ray computer tomography); digital subtraction angiography – DSA; X ray image amplifier (IA); devices with charge sensitive response – CSR (for instance, digital X ray detector with CSR matrix); metal – oxide – semiconductor – MOS (for instance, MOS capacitor); electronic optical transformer – EOT; exposition is measured in mAs; picture archive and communication system – PACS.

Nuclear medicine: single photon emission computer tomography – SPECT; positron emission tomography – PET; radioimmunological assay – RIA; gamma camera, gamma tomography machine; radionuclide diagnosis – RND; radionuclide therapy – RNT; radiopharmaceutical agent – RPA, modulation transfer function – MTF; spatial resolution is measured in mm of FWHM (full width at half maximum of sensitivity function peak for point radiation source); fluoride desoxyglucose – FDG.

Radiobiology: relative biological efficiency – RBE; linear energy transfer – LET; cumulative radiation effect – CRE; oxygen amplification factor – OAF; linear quadratic model – LQM; nominal standard dose – NSD; lethal dose – LD; acute radiation syndrome – ARS, chronic radiation disease – CRD.

Radiation therapy: radiation therapy – RT; intraoperational radiation therapy – IORT; intensity modulated radiation therapy and image guided radiation therapy – IMRT and IGRT; total focal dose – TFD; single focal dose – SFD; source to skin distance – SSD; multileaf collimator – MLC; dose – time fractionation factor – DTF; dose – volume histogram – DVH.

Non-standard acronyms should be avoided, when authors consider them as common used but they are not familiar to the journal audience majority. The abridgement should be introduced in brackets only at first inclusion of this term in the abstract and/or in the paper body text. The application of any (even common used) acronyms is not permitted in the title of paper.

Leave only significant numbers. For instance, if the expected number of disease cases is 7.2 and only 11 cases were observed, than their ratio is expressed as 1.53 or even 1.5 but not as 1.5277. The average quadratic deviation and average error should not have more numbers after comma if compared to the average. Please, give the name of statistical criterion when making the confidence judgement.

Several reminders:

3<sup>rd</sup>, 5<sup>th</sup>, 7<sup>th</sup> and 8<sup>th</sup> positions; third, fifth, seventh and eighth positions;

5 litres, 20 per cents; it is not recommended to write “in twenty five patients”, “for thirty five cases” etc.

If reviewers or editors propose to revise the paper, the written review with comments will be sent to author. The revised copy of the paper should be sent to journal by e-mail: medradiol@fromru.com.