

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

**МЕДИЦИНСКАЯ
РАДИОЛОГИЯ
И
РАДИАЦИОННАЯ
БЕЗОПАСНОСТЬ**

**MEDICAL RADIOLOGY
AND
RADIATION SAFETY**

Meditzinskaia Radiologiya i Radiatsionnaia Bezopasnost

2013

Том 58

№ 6

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

Редакционная коллегия (по рубрикам журнала):

Радиационная биология: А.А. Вайнсон (выпускающий редактор), 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:

123098, Москва, ул. Живописная, 46

Телефон: (499) 190-95-51

Address of Editorial Board:

46, Zhivopisnaya st., 123098, Moscow, Russia

Phone: +7 (499) 190-95-51

Email: medradiol@fromru.com
<http://fmbcfmba.org> далее раздел Публикации
Правила для авторов: Instructions for authors:
http://fmbcfmba.org/RadioJournal/prav_ofo.pdf

СОДЕРЖАНИЕ № 6 – 2013

РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

- 5 **Радиоэкологические аспекты реабилитации сельского хозяйства после аварии на АЭС «Фукусима-1»**
Р.М. Алексахин, В.Г. Сычев

- 14 **Загрязнение окружающей среды и продуктов питания радионуклидами и дозы облучения населения после аварии на АЭС «Фукусима-1» :
Сообщение 1. Загрязнение окружающей среды**
В.Ф. Степаненко, М. Хоши, М.Ю. Орлов, Д.В. Дубов, А.Ф. Цыб

- 25 **Радиационная безопасность медицинского персонала патологоанатомической и судебно-медицинской служб при аутопсиях трупов лиц, подвергшихся воздействию ионизирующих излучений**
Ю.Е. Квачева, В.Н. Яценко, А.Г. Глазунов

РАДИАЦИОННАЯ МЕДИЦИНА

- 30 **База данных по острым лучевым поражениям человека. Сообщение 3. Особенности прогнозирования пострадиационной динамики концентрации нейтрофилов в периферической крови при костномозговом синдроме, отягощенном лучевыми ожогами, а также при неравномерном по телу облучении**
В.Ю. Соловьев, А.Е. Баранов, Т.М. Хамидулин, Н.В. Зиновьева

- 36 **Нейтронзахватная терапия глубоко расположенных новообразований на модифицированном пучке проектируемого медицинского реактора МАРС**
Ю.А. Кураченко, Н.К. Вознесенский, Е.С. Матусевич, Л.А. Лебедев, В.А. Левченко, А.В. Левченко

ОБЗОР

- 44 **Мобильная связь и здоровье населения: к оценке риска при техногенном электромагнитном загрязнении экосреды**
Ю.Г. Григорьев, А.П. Бирюков

В ПОМОЩЬ ПРАКТИЧЕСКОМУ ВРАЧУ

- 62 **Случай нетипичного образования камня в нижних мочевых путях у больного с поздним лучевым циститом**
О.В. Терехов, В.В. Пасов

ХРОНИКА

- 65 **10-е заседание Объединенного координационного комитета по изучению последствий радиационных воздействий (ОККИРВ)**
М.Ф. Киселев, С.М. Шинкарев

- 70 **Доклад Научного комитета Организации Объединенных Наций по действию атомной радиации. 60-я сессия. Нью-Йорк, 27–31 мая 2013 г.**
М.Ф. Киселев

- 77 **Научно-практическая конференция «Нейтронная терапия в онкологии: проблемы, успехи, перспективы». Томск, 3–4 октября 2013 г.**
Л.И. Мусабеева

НЕКРОЛОГ

- 79 **Памяти А.Ф. Цыба**

БИБЛИОГРАФИЯ

- 81 **Указатель статей, опубликованных в журнале «Медицинская радиология и радиационная безопасность» в 2013 году**

CONTENTS № 6 – 2013

RADIATION SAFETY	5	Radioecological Aspects of Agricultural Remediation Following the Accident at the Fukushima Daichi NPP <i>R.M. Alexakhin, V.G. Sychev</i>
	14	Environmental and Food Products Contamination by Radionuclides and Doses of Irradiation to Population Following Radiation Accident on Fukushima-1 NPP: Part 1. Environmental Contamination <i>V.F. Stepanenko, M. Hoshi, M.Yu. Orlov, D.V. Dubov, A.F. Tsyb</i>
	25	Radiation Safety of Medical Personnel in Pathology and Forensic Medicine Autopsies of Individuals Exposed to Ionizing Radiation <i>Yu.E. Kvacheva, V.N. Yatsenko, A.G. Glazunov</i>
RADIATION MEDICINE	30	Human Acute Radiation Injuries Database. Report 3. Forecasting Specifics of Postradiation Peripheral Blood Granulocyte Concentration Dynamics of Bone Marrow Syndrome, Complicated by Radiation Burns and also of Nonuniform Body Irradiation <i>V.Yu. Soloviev, A.E. Baranov, T.M. Khamidulin, N.V. Zinovieva</i>
	36	Deep-Seated Neoplasm Neutron-Capture Therapy at the Modified Beam of the MARS Medical Reactor <i>Yu.A. Kurachenko, N.K. Voznesensky, Eu.S. Matusевич, L.A. Lebedev, V.A. Levchenko, A.V. Levchenko</i>
REVIEW	44	Mobile Communications and Public Health: a Risk Assessment of the Man-Caused Electromagnetic Ecological Pollution on Environmental Quality <i>Y.G. Grigoriev, A.P. Birukov</i>
MEDICAL PRACTICE ISSUE	62	A Case Report on Late Radiation Cystitis Complicated with a Large Stone Formed in the Posterior Urethra <i>O.V. Terekhov, V.V. Pasov</i>
CHRONICLE	65	The Tenth International Russian–U.S. Meeting of the Joint Coordinating Committee for Radiation Effects Research (JCCRER), St. Petersburg, September 11–12, 2013 <i>M.Ph. Kiselev, S.M. Shinkarev</i>
	70	Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 60-th session. New-York, 27–31 May, 2013 <i>M.Ph. Kiselev</i>
	77	Scientific-practical Conference with international participation “NEUTRON THERAPY IN ONCOLOGY: PROBLEMS, PROGRESSES, PERSPECTIVES”. Tomsk, October 3–4, 2013 <i>L.I. Musabaeva</i>
COMMEMORATION	79	Commemoration of A.F. Tsyb
BIBLIOGRAPHY	81	Index of papers, published in 2013 issues of Medical Radiology and Radiation Safety Journal

Р.М. Алексахин¹, В.Г. Сычев²

**РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕАБИЛИТАЦИИ
СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА ПОСЛЕ АВАРИИ НА АЭС «ФУКУСИМА-1»**

R.M. Alexakhin¹, V.G. Sychev²

**Radioecological Aspects of Agricultural Remediation Following
the Accident at the Fukushima Daichi NPP**

РЕФЕРАТ

Авария на АЭС «Фукусима Даичи» (ФДАЭС) (В русскоязычных публикациях «Фукусима-1») в Японии 11 марта 2011 г. привела к загрязнению больших площадей, значительная часть которых занята сельскохозяйственными и лесными угодьями. Территории, подлежащие реабилитации, охватывают площади 500 км² (дозы внешнего облучения выше 20 мЗв/год) и 1300 км² (5–20 мЗв/год). Среди комплекса реабилитационных мероприятий существенное место занимают защитные меры в сельском хозяйстве, что связано, во-первых, с важной ролью потребления агропромышленной продукции, содержащей радионуклиды как источник облучения, и, во-вторых, социально-психологической значимостью исключения производства и потребления сельскохозяйственных продуктов, в которых концентрации радиоактивных веществ превышают нормативные количества.

Основными путями радиационного воздействия на население на подвергшейся влиянию аварии территории являются внешнее облучение, ингаляция и внутреннее облучение (поступление радионуклидов с пищей и питьевой водой). Основные дозобразующие радионуклиды в регионе аварии – ¹³¹I и ¹³⁷Cs. Роль пищевого источника определяется составом рациона и временем после выпадений радионуклидов. Значение этого источника относительно внешнего увеличивается по мере удаления от ФДАЭС. При облучении щитовидной железы пищевой путь инкорпорации ¹³¹I относится к доминирующим.

Главным направлением ликвидации последствий аварии на ФДАЭС явилась деконтаминация (очистка) почв (почвенно-растительного покрова), которая достигается удалением верхнего наиболее загрязненного горизонта (до 4–5 см). С учетом достаточно большой территории, подлежащей ремедиации, такая реабилитационная мера приводит к образованию большого количества радиоактивных отходов. По расчетам, их количество может достичь одногодных объемов производимых в Японии твердых бытовых отходов. Указанный основной принцип в стратегии ликвидации последствий аварии в Японии существенно разнится от подходов к решению аналогичных задач при ликвидации последствий Кыштымской и Чернобыльской аварий, где основную роль играли изменения отраслей агропромышленного комплекса на землях сельскохозяйственного назначения, интенсивная химизация, использование специальных сорбентов в кормлении животных и размещение отраслей сельского хозяйства на площадях с учетом плотности загрязнения ¹³⁷Cs, а также временное исключение наиболее загрязненных земель из использования.

Исследованы различные защитные сельскохозяйственные меры (промывка почв, внесение калийных удобрений, коренная мелиорация лугово-пастбищных угодий и др.). Часть этих контрмер оказалась малоэффективной (фитомелиорация, удаление лесной подстилки, обмывание растений).

Комплекс защитных мероприятий в сельскохозяйственном производстве в регионе аварии признан в качестве ведущего способа реабилитации загрязненных территорий.

Ключевые слова: авария на АЭС «Фукусима-1», сельскохозяйственное производство, деконтаминация территорий, защитные мероприятия, население, облучение

ABSTRACT

The accident at the Fukushima Daichi NPP (FDNPP) in Japan on 11 March 2011 has resulted in the extensive areas' contamination, considerable part of which is occupied by agricultural and forested lands. The territories to be remediated cover the areas of 500 km² (exposure doses above 20 mSv/year) and 1300 km² (5–20 mSv/year). In the range of countermeasures of great importance are protective measures in agriculture which is connected with the essential role of contaminated agricultural products consumption, as a source of human irradiation, and social-psychological significance of the products' decontamination where the concentrations of radioactive substances exceed the permitted levels.

The major exposure pathways for the population on the affected territory are: external irradiation, inhalation and internal irradiation (radionuclide uptake with food and drinking water). The main dose-forming radionuclides in the accidental area are: ¹³¹I and ¹³⁷Cs. The role of the dietary source is defined by the diet composition and time after radionuclide fallout. The importance of this source of exposure, in comparison with external irradiation, is an increasing with the distance from the FDNPP. In case of the thyroid gland irradiation the dietary pathway of ¹³¹I transfer is dominating.

The main option when mitigating consequences of the FDNPP accident was decontamination (cleanup) of soils (soil-plant cover) which is achieved by removal of the top most affected horizon (up to 4–5 cm). Since the territory to be remediated is large, this rehabilitation measure produces great amounts of radioactive wastes. Their estimated amounts may reach volumes of solid domestic waste produced annually in Japan. The above main principle of mitigating consequences of the accident in Japan differs significantly from the approaches to solving similar tasks after the Kyshtym and Chernobyl disasters where the main options were retargeting of the agricultural branches on farmland, high chemicalization, use of special sorbents in animal feeding and area allocation for farming branches based on ¹³⁷Cs contamination density, as well as temporary exclusion of the most affected lands from the use.

Various protective agricultural measures have been studied (soil washing, application of potassium fertilizers, radical amelioration of meadow-pasture lands, etc.). Some of these measures have been found to be ineffective (phytoremediation, removal of forest litter, plant washing).

A comprehensive set of measures in agriculture in the accidental region has been recognized as the key way for the affected area remediation.

Key words: accident at the Fukushima-1 NPP, agricultural production, area decontamination, countermeasures, population, exposure

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии Россельхозакадемии, Обнинск, Калужская область. E-mail: alexakhin@yandex.ru

² Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н.Прянишникова Россельхозакадемии, Москва

¹ All-Russian Institute of Agricultural Radiology and Agroecology of RAAS, Obninsk, Russia. E-mail: alexakhin@yandex.ru

² D.N. Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agriculture and Soil Science, Moscow, Russia

Введение

Одним из важнейших аспектов ликвидации последствий аварии на АЭС «Фукусима Даичи» (ФДАЭС) в Японии, произошедшей 11 марта 2011 г., является ремедиация сельскохозяйственных территорий в зоне ее воздействия. Аварийный выброс радионуклидов в окружающую среду привел к загрязнению обширных площадей сельскохозяйственных угодий и исключению ведения на них производства из-за превышения предельно-допустимого содержания радионуклидов в продукции. С этой точки зрения аварию на ФДАЭС, как и две крупнейшие радиационные аварии с выбросом радиоактивных веществ в окружающую среду – Кыштымскую на Южном Урале (Восточно-Уральский радиоактивный след) в 1957 г. и на Чернобыльской АЭС в 1986 г., можно отнести к сельским (коммунальным) авариям [1]. Основанием для такого классификационного определения этих аварий главным образом являются два фактора.

Во-первых, потребление содержащих радионуклиды сельскохозяйственных продуктов населением на территории воздействия аварии становится важным (а иногда и доминирующим) компонентом суммарного облучения населения. Нельзя не принимать во внимание экспорт радионуклид-содержащей сельскохозяйственной продукции за пределы региона аварийного загрязнения.

Во-вторых, аргументом в пользу того, чтобы считать эти аварии аграрными, как и аварию на ФДАЭС, является их социально-экономический аспект. Отселение населения с территории, где невозможно производство агропромышленной продукции, отвечающей радиационно-гигиеническим стандартам, является очень важным при поддержании социально-экономической и психо-демографической устойчивости в регионе.

Следует отметить, что во многом и другие, меньшие по масштабам радиационные аварии и инциденты, сопровождавшиеся радиоактивным загрязнением окружающей среды, – аварии в Уиндскейле (Великобритания) в 1957 г., потеря медицинского источника, содержащего ^{137}Cs , в Гойании (Бразилия) в 1987 г. и рассеяние радионуклидов в окружающей среде после аварий самолетов США с ядерным зарядом $^{239,240}\text{Pu}$ на борту в Паломаресе (Испания) в 1966 г. и в Туле (Гренландия) в 1968 г., также были связаны с проведением комплекса дезактивационных мероприятий на землях сельскохозяйственного назначения [1, 2].

Руководство научно-исследовательскими и производственными работами по реабилитации загрязненных сельскохозяйственных угодий после аварии на ФДАЭС, а также контролю за их выполнением осуществляется министерством сельского, лесного

и рыбного хозяйства Японии. В изучении проблем ремедиации загрязненных сельскохозяйственных территорий принимают участие 6 национальных научно-исследовательских институтов, 6 префектурных сельскохозяйственных станций, 11 университетов, одна благотворительная организация и 3 частных компании. Усилия этих организаций сконцентрированы на реализации проекта «Развитие технологий и деконтаминация земли сельскохозяйственного назначения».

Характеристика аварии

11 марта 2011 г. вблизи о. Хонсю в Японии произошло землетрясение магнитудой 9,0 баллов, приведшее к возникновению цунами. В результате этих событий погибло 18493 чел., 2683 чел. пропало без вести и 6217 чел. были ранены. Под затопление попала территория площадью 500 км². Как следствие этого стихийного бедствия имело место разрушение ФДАЭС [3].

Авария на ФДАЭС стала крупнейшей гражданской радиационной катастрофой после аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. Были даны рекомендации о выселении 78 тыс. чел. с территории в радиусе 20 км от ФДАЭС и укрытии в убежищах 62 тыс. чел. в поясе 20–30 км от ФДАЭС. Еще 10 тыс. чел. было рекомендовано эвакуироваться из наземных «языков» радиоактивности к северо-востоку от ФДАЭС из-за высоких плотностей загрязнения почвы. Аварии на ФДАЭС был присвоен высший (7-ой) уровень опасности по международной шкале ядерных и радиологических событий INES (к такому уровню опасности ранее была отнесена авария на ЧАЭС).

Выбросы основных дозообразующих радионуклидов – ^{137}Cs и ^{131}I составили соответственно 100–500 и 6–20 ПБк, что равно 2–8 и 1–3 % от общих запасов этих радионуклидов в трех аварийных энергоблоках ФДАЭС. Роль других радионуклидов (Sr, Ba и Pu) была незначительна. Для сравнения можно указать, что выбросы ^{137}Cs и ^{131}I при авариях в Уиндскейле (1957 г.) были равны соответственно 0,74 и 0,22 ПБк, а на ЧАЭС соответственно 1700 и 86 ПБк. Таким образом, выбросы ^{137}Cs и ^{131}I при аварии на ФДАЭС были в среднем в 3,4–17 и 4,3–14 раз ниже, чем при аварии на ЧАЭС. По выбросам ^{133}Xe (10^{19} Бк) авария на ФДАЭС превзошла аварию на ЧАЭС ($6,5 \times 10^{18}$ Бк).

Основными путями радиационного воздействия на население в первый год после аварии были внешнее облучение, ингаляция и поступление с пищевыми продуктами (внутреннее облучение). Относительный вклад пищевого пути в облучение относительно внешнего воздействия возрастал по мере удаления от ФДАЭС, что важно при оценке эффективности аграрных контрмер. При облучении щитовидной же-

лезы радиойодом поступление с пищевыми продуктами было определяющим.

В пищевом рационе населения Японии к числу основных составляющих среди сельскохозяйственных продуктов относятся (приблизительно, г/сутки): овощи – 350, рис – 350, пшеница – 100, фрукты – 100, говядина – 15, свинина – 50, мясо птицы – 20, молоко – 100 (у детей – 200–250), яйцо – 40; на долю рыбы приходится 40, морепродуктов – 40, грибов – 20 г/сутки. Эти показатели учитывались при оценке поступления радионуклидов с рационом.

Первые результаты измерений содержания радионуклидов в пищевых продуктах (молоко, мясо, овощи, зерно, рыба и др.) были получены 17 марта, запрет на их продажу и производство при превышении нормативов (издан 17 марта) был наложен соответственно 21 и 23 марта (таблица).

Важной особенностью аварии на ФДАЭС в сельскохозяйственном ракурсе явилось то, что она произошла в зимнее время года. Это обстоятельство серьезно снизило масштабы прямого (аэрального) загрязнения растений (исключение представили озимые культуры), основная часть осаждавшихся из воздуха радиоактивных веществ задерживалась на оголенных от снега участках почвы, коре деревьев и т.п.) [6]. Как следствие, зимнее время выпадений радионуклидов существенно ослабило размеры возможного загрязнения сельскохозяйственной продукции в целом и ограничило негативные аграрные последствия аварии, которые, как известно, особенно значительны в ее первый период, как показали итоги реабилитационных работ в регионах Кыштымской аварии и аварии на ЧАЭС. С этой точки зрения авария на ЧАЭС, с которой с первых дней сравнивали аварию на ФДАЭС, произошедшая поздней весной – ранним летом 1986 г., привела к значительно более серьезным

последствиям для сельского хозяйства. По метеорологическим условиям радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных угодий авария на ФДАЭС более сходна с Кыштымской аварией в 1957 г. (позднее осеннее время).

По расчетам В.Ю. Голикова и И.А. Звоновой [7], в первые месяцы после аварии на ФДАЭС вклад содержащих радионуклиды пищевых (сельскохозяйственных) продуктов в суммарную эффективную дозу как в зоне плановой эвакуации, так и в ближайших районах колебался от 22 до 40 % (на долю внешнего облучения приходилось до 50–74 % общей дозы). Вклад внутреннего облучения в суммарную дозу с течением времени в поставарийный период может возрастать. При облучении щитовидной железы детей вклад от накопленных радионуклидов в дозу превалировал (поступление радиойода). В течение первого года после аварии на ФДАЭС в первый месяц реализуется около 80–90 % от общей дозы, связанной с потреблением пищевых продуктов, содержащих радионуклиды.

Общая характеристика региона аварии

Префектура Фукусима является третьей по размерам префектурой Японии. В этом регионе с очень благоприятными почвенно-климатическими условиями площадью 972 тыс. га основную часть занимают леса (71 % общей территории, по лесистости четвертое место в стране), сельскохозяйственные культуры размещены на площади 150 тыс. га плодородных почв (11 % от общей территории, седьмое место в Японии). Аграрная отрасль является ведущей областью хозяйственной деятельности в префектуре Фукусима.

Таблица

Предельно-допустимые концентрации радионуклидов в пищевых продуктах и питьевой воде, введенные 17 марта 2011 г. до марта 2012 г. [4, 5]

Радионуклиды	Продукты	Предельно допустимая концентрация, Бк/кг
Радиоактивные нуклиды йода (преимущественно ¹³¹ I)	Молоко, молочные продукты, питьевая вода	200
	Овощи (исключая корне- и клубнеплоды), рыба	2000
Радиоактивный цезий	Питьевая вода, молоко, молочные продукты	200
	Овощи, зерно, мясо, яйцо, рыба и др.	500
Изотопы урана	Детское питание, питьевая вода, молоко, молочные продукты	20
	Овощи, зерно, мясо, яйцо, рыба и др.	100
Альфа-излучающие изотопы плутония и трансурановые элементы (суммарные концентрации ²³⁸ Pu, ²³⁹ Pu, ²⁴⁰ Pu, ²⁴² Pu, ²⁴¹ Am, ²⁴² Cm, ²⁴³ Cm, ²⁴⁴ Cm)	Детское питание, питьевая вода, молоко, молочные продукты	1
	Овощи, зерно, мясо, яйцо, рыба и др.	10

Цели и задачи реабилитации сельскохозяйственных территорий

Основным стратегическим направлением реабилитационной деятельности при ликвидации последствий радиоактивного загрязнения почвенно-растительного покрова в Японии была избрана интенсивная деконтаминация (очистка) почв (точнее почвенно-растительного покрова) в зоне воздействия аварии. При этом считается, что реабилитация сельскохозяйственных угодий является одним из главных способов снижения доз облучения населения. Конечная цель реабилитационных работ – достижение уровня облучения населения 1 мЗв/год.

Указанный подход к реабилитации земель сельскохозяйственного назначения в Японии существенно отличается от принципов решения аналогичных задач по ликвидации последствий двух крупнейших аварий – на Южном Урале в 1957 г. (Восточно-Уральский радиоактивный след) и аварии на ЧАЭС в 1986 г. Причинами этих различий явились, прежде всего, разница в размерах загрязненных площадей и, в меньшей степени, особенности японского менталитета в подходе к ликвидации последствий аварии на ФДАЭС.

Во-первых, площадь загрязненной после аварии на ФДАЭС составляет 13 тыс. км² (только наземная часть), что существенно меньше территории, загрязненной при аварии на ЧАЭС, и меньше, чем площадь на Южном Урале (Кыштымская авария). Так, в Чернобыльском регионе загрязненной считалась территория с содержанием ¹³⁷Cs в почве свыше 37 кБк/м² (1 Ки/км²), что составляет 150 тыс. км². При Кыштымской аварии загрязненная площадь (содержание в почве ⁹⁰Sr выше 74 кБк/м² (2 Ки/км²) равна 23 тыс. км² [1]. Программа по реабилитации загрязненной территории после аварии на ФДАЭС охватывает площадь 500 км², на которой дозы облучения выше 20 мЗв/год, и около 1300 км², где эта величина колеблется от 5 до 20 мЗв/год [8].

Во-вторых, если в Уральском и Чернобыльском регионах можно было прибегнуть к экономически и экологически обоснованному временному исключению сельскохозяйственных угодий из пользования, то в Японии такие возможности оказались (или, по крайней мере, рассматривались) крайне ограниченными. Кроме того, большие размеры загрязненных площадей в Кыштымской и Чернобыльской авариях представили широкие возможности для маневра в изменении направлений сельскохозяйственного производства для ограничения дозы внутреннего (и, следовательно, суммарного) облучения – например, исключение производства молока как наиболее загрязненного пищевого продукта и замена его на про-

изводство мяса и т.п., что было менее реально для аварии на ФДАЭС.

Значительные трудности при деконтаминации почв методом снятия ее верхнего загрязненного слоя связаны с сильно пересеченной местностью с достаточно сложной орографией, которая характерна для загрязненной территории в префектуре Фукусима, что ограничивает использование технических средств для удаления верхнего слоя почвы.

К основным недостаткам деконтаминации почв методом отчуждения ее верхнего слоя надо отнести следующие:

- образование больших количеств удаляемой почвы с высоким содержанием радионуклидов (по существу радиоактивных отходов), что выдвигает необходимость решения вопросов обращения с этими отходами;
- снятие и удаление верхнего наиболее плодородного слоя почвы и, как следствие, скорее всего необходимость создания нового плодородного слоя (например, путем завоза новых объемов «чистой» почвы или окультуривания слоев почвы, лежащих непосредственно под снятым горизонтом).

Помимо того, что характер размещения на загрязненной территории лесов в виде отдельных массивов или полос различных размеров предопределяет сложности при механической деконтаминации, традиционно в равнинных условиях лесные экосистемы рассматриваются как биогеохимические барьеры, препятствующие горизонтальной и вертикальной миграции радионуклидов. На пересеченной же местности возможна миграция радионуклидов из лесных биогеоценозов, не исключая вторичного загрязнения уже деконтаминированных почв, занятых сельскохозяйственными растениями.

Первым этапом реабилитационных работ в области сельскохозяйственного производства явился радиационный мониторинг почвенно-растительного покрова. После аварии на ФДАЭС этот мониторинг почв осуществлялся изначально на 580 станциях, к которым впоследствии добавилось еще 3500 [9].

С первого периода аварии были выделены 7 стратегических первоочередных задач, связанных с проблемой загрязнения сельскохозяйственных угодий [10]:

1. Исследование рассеяния радиоактивных веществ на сельскохозяйственной территории в префектуре Фукусима и соседних префектурах (картирование загрязненных территорий и радиационный мониторинг):
 - обследование и изучение распределения радиоактивного цезия на местности;
 - динамика миграции радиоактивного цезия в почвах и изменение его распределения со време-

нем на территории и в вертикальном профиле почв.

2. Разработка упрощенных методов определения содержания радионуклидов в объектах сельскохозяйственного назначения (почвах, растениях и др.).
3. Изучение накопления радионуклидов различными сельскохозяйственными растениями и животными:
 - исследование поступления радионуклидов в сельскохозяйственные растения: рис на почвах палди, разные полевые культуры, овощи, фрукты, пастбищные растения и т.п.;
 - расчет коэффициентов накопления радионуклидов растениями из различных почв.
4. Развитие технологий по удалению радионуклидов из корневого слоя почв или уменьшению их количества с верификацией методов реабилитации загрязненных территорий с помощью растений с высоким уровнем накопления радионуклидов.
5. Разработка методов по уменьшению усвоения растениями радионуклидов, в том числе применение различных удобрений (особенно калийных), сорбентов и материалов.
6. Разработка методов по удалению радионуклидов из сельскохозяйственной продукции (при ее переработке):
 - распределение радионуклидов в сельскохозяйственных продуктах;
 - удаление радионуклидов при переработке сельскохозяйственной продукции (за пределы объемов, имеющих пищевую ценность).
7. Разработка специальных методов по снижению доз облучения при выполнении сельскохозяйственных работ.

В рамках программы деконтаминации почв при удалении верхнего слоя при реабилитации земель сельскохозяйственного назначения в качестве приоритетных задач на первом этапе были выделены:

1. Отделение радиоцезия из отчуждаемой при деконтаминации почвы.
2. Деконтаминация дамб и очистных конструкций.
3. Снижение концентрации радиоцезия в сельскохозяйственных продуктах за счет совершенствования методов обработки почвы после удаления ее верхнего слоя.
4. Разработка безопасных методов реализации этого процесса на реабилитируемых территориях.
5. Восстановление плодородия после снятия верхнего слоя почвы и ее обработки с переворотом пласта.

Таким образом, проблема реабилитации загрязненных сельскохозяйственных угодий после аварии на ФДАЭС сводится в основном к вопросам обращения с большими количествами радионуклидов.

Высокие плотности радиоактивного загрязнения почвенного покрова обусловили введение запрещения на сельскохозяйственное производство с учетом превышения допустимого содержания радиоактивных веществ в продукции. Так как коэффициент накопления радиоцезия рисом был принят равным 0,1, то производство этой культуры было запрещено при превышении концентрации радиоцезия в почве 5 кБк/кг (это приблизительно соответствует плотности загрязнения радиоцезием 40 Ки/км², 1500 кБк/м²). При этом измерение концентрации радиоцезия производилось в слое 0–15 см для почв палди и 0–30 см – для суходольных почв (с учетом распределения радиоцезия при пахоте или миграции радионуклидов, а также глубины размещения корневых систем растений). Заметим, что примерно при указанной плотности содержания радиоцезия на достаточно плодородных черноземных и серых лесных почвах прекращалось производство основных сельскохозяйственных культур при аварии на ЧАЭС в 1986 г. [11].

Результаты работ по реабилитации сельскохозяйственных угодий

Выбранная стратегия рекультивации сельскохозяйственных территорий после аварии послужила основанием для проведения широкой программы экспериментальных исследований, имеющих целью оценку уменьшения содержания радиоцезия в почвенно-растительном покрове после деконтаминации, определение концентрации радионуклидов в отчуждаемых объемах почвы и ограничение химической подвижности радионуклидов в почвах и их доступности для корневого усвоения растениями.

Рис – одна из основных продовольственных зерновых культур в Японии, в том числе в провинции Фукусима, и оценке закономерностей накопления радиоцезия было уделено особое внимание. Коэффициент накопления ¹³⁷Cs рисом для 17 выбранных точек с различными типами почв колебался от 0,00035 до 0,64 (среднее геометрическое 0,012). Для официального использования была принята консервативная величина 0,1 (90 %-ый перцентиль для коэффициента накопления), что примерно в 10 раз выше среднего значения. Эта величина была использована для официальных ограничений в рисосеянии. В регионе аварии на ФДАЭС коэффициент накопления рисом радиоцезия найден равным 0,0065, что в 15 раз ниже приведенного выше (0,1) [10]. Это соответствует величинам, приведенным МАГАТЭ в сводке данных по коэффициентам накопления [12], в которой для низинных богатых глиной почвах палди, аналогичных почвам в префектуре Фукусима, коэффициенты накопления ¹³⁷Cs в коричневом рисе колеблются

в пределах 0,0014–0,15 (при среднем геометрическом 0,017). Предполагается, что с течением времени коэффициент накопления радиоцезия рисом снизится, о чем свидетельствует опыт в Чернобыле, где отмечалось постепенное со временем уменьшение доступности радиоцезия для корневого усвоения растениями [13].

При оценке эффективности защитных мероприятий в сельскохозяйственном производстве в первый год после аварии предпочтение было отдано консервативному принципу (например, в расчет брались наиболее высокие коэффициенты перехода радиоцезия в сельскохозяйственные культуры при определении параметров миграции радионуклидов в окружающей среде). Предполагается, что в дальнейшем, с течением времени после аварии, по мере накопления данных о транспорте радионуклидов по трофическим цепочкам можно будет внести соответствующие коррективы в программу проведения аграрных контрмер.

Для реализации программы работ по реабилитации земель сельскохозяйственного назначения вблизи селения Иитате (Iitate), в 40 км от ФДАЭС, в «языковой» зоне отселения, радиус которой равен 20 км (концентрации ^{134}Cs + ^{137}Cs в почве достигают 25 кБк/кг и выше, т.е. примерно 200 Ки/км² и более), был заложен экспериментальный полигон для работ по сельскохозяйственной радиоэкологии. Основные итоги этих исследований изложены ниже [10]. Общая площадь опытного полигона равна 230,13 км², лесистость 75 %, среднегодовая температура 10 °С, среднегодовое количество осадков 1300 мм, число крестьянских хозяйств около 1700, население около 6 тыс. (из них дети до 14 лет 12 %), под пашней находится 2331 га (почвы пашни 1173 га, равнинные земли 1155 га, сады 4 га). Средняя площадь одного фермерского участка около 3 га. Число отселенных жителей 99,78 % (не отселено 13 человек – 8 семей). Площадь деконтаминируемых земель составляет 8300 га (затопляемые рисовые чеки 6300 га, суходольные поля – 2000 га). Предполагалось, что при выполнении защитных мероприятий на рисовых полях будет учтена плотность загрязнения радиоцезием – до 5, 5–10 и 10–25 кБк/кг. Задача контрмер – достичь концентрации радиоцезия в почве ниже 5 кБк/кг.

Полигон состоял из ряда экспериментальных участков (опыты по применению контрмер, направленных на снижение накопления радиоцезия в растениях, изучение горизонтальной и вертикальной миграции радиоцезия в почвенно-растительном покрове и т.п.). В некотором смысле это напоминает создание известной в СССР в 1958 г. радиоэкологической Опытной научно-исследовательской станции на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа [1].

В число мероприятий, проведенных на опытных участках, входили:

- 1) удаление верхнего слоя почвы с использованием почвенного уплотнителя (площадь 1000 м², концентрация радиоцезия 9,1 кБк/кг;
- 2) фитомелиорация с выращиванием подсолнечника и амаранта (15000 м², 7,7 кБк/кг;
- 3) та же задача с возделыванием амаранта (200 м², 5,7 кБк/кг);
- 4) снятие верхнего слоя луговой почвы (50 м², 13,6 кБк/кг);
- 5) деконтаминация почвы с помощью воды (4200 м², 15,3 кБк/кг);
- 6) снятие верхнего слоя почвы пашни (800 м², 10,4 кБк/кг), 7) обработка почвы с оборотом пласта (2800 м², 4,1 кБк/кг).

Основные итоги опытов на полигоне Иитате сводятся к следующему [10]. Снятие верхнего слоя почвы обеспечивает снижение концентрации радиоцезия на 75 %, а мощность экспозиционной дозы – с 7,1 до 3,4 мкЗв/час. Объем удаляемой почвы составляет примерно 40 кг/м², продолжительность операции 0,055 мин/м². При применении магниевого уплотнителя (выполнение полевых работ требует 7–10 погожих дней) происходит отверждение верхнего слоя почвы, которое позволяет удалить 82 % имеющегося в ней радиоцезия при сокращении мощности дозы с 7,8 до 3,6 мкЗв/час, при этом объем отчужденной почвы равен 30 кг/м², т.е. меньше, чем без использования уплотнителя. Уплотнение почвы препятствует образованию пыли, что важно с точки зрения облучения сельскохозяйственных рабочих. Верхний слой почвы приобретает светлую окраску, что облегчает его выделение при обработке. Не отмечено отрицательного влияния на почву, причем возможно использование различных уплотнителей.

При снятии верхнего слоя почвы на луговых угодьях толщиной 3 см концентрация радиоцезия в ней падала на 97 %, объем удаленной почвы был равен 40 кг/м², операционное время приблизительно 0,25 мин/м². Преимуществами такой деконтаминации является уничтожение сорняков, она применима для торфяных почв, лугов и сорных угодий, где сильно развита дернина.

Предполагается, что механическим способом снимается верхний наиболее загрязненный радиоцезием слой почвы (его толщина варьирует от 2 до 4 см). Далее отчужденный объем почвы вывозится с деконтаминированного поля. Первично эта почва может складироваться в полиэтиленовые мешки, расположенные по краям полей, с сооружением бетонного ограждения. При удалении верхнего почвенного слоя толщиной до 5 см общий объем образующихся отходов составляет 650 млн. м³. По содержанию радиону-

кливо снятый верхний слой почвы можно отнести к низко- или, в крайнем случае, к средне-активным отходам. При этом возникают следующие вопросы – где и как можно разместить такие радиоактивные отходы, как предотвратить распространение загрязнения при транспортировке отходов от места сборов до места захоронения, как избежать контактов отходов с атмосферными осадками или подземными водами (соответственно в поверхностном или подземном хранилищах).

Предпринимались попытки зафиксировать находящийся в почве радиоцезий с помощью внесения специальных химических соединений (для уменьшения усвоения корневыми системами растений и ограничения перехода радиоцезия в подземные воды).

Удаление верхнего слоя почвы включает 3 варианта:

- удаление верхнего слоя почвы (4 см);
- удаление верхнего слоя почвы с применением затвердителя;
- для лугов удаление растительности и дернины (3 см).

Наиболее эффективным оказалось удаление слоя 2–4 см, эффективность не менее 75–97 %. Недостаток метода – большие объемы отчуждаемой почвы (при слое 4 см – до 400 т/га), необходимость выдержки 7–10 дней.

Глубинная пахота – не очень дорогостоящий и достаточно эффективный прием. Захоронение верхнего слоя почвы на глубину 30–60 см обеспечивает уменьшение мощности экспозиционной дозы в воздухе в 2,3 раза (при обычной пахоте это снижение составляет 1,8 раза). При этом не происходит отчуждения почвы. Обычно в земледельческой практике глубинная пахота ведется до глубины 45 см, далее могут возникать трудности, связанные с приближением к грунтовым водам. В затопляемых почвах фиксация радиоцезия твердой фазой почв проходит медленнее.

Промывка почв пади состоит в затоплении рисовых чеков и последующим отделении суспензии (глинистая и илистая фракции). При проведении этого приема эффективность по снижению концентрации радиоцезия в почвах составила 36 %, а по мощности экспозиционной дозы – 15 %. В зависимости от свойств почвы (количество глины и гумуса) эффективность может возрасти до 71 %. Преимущество этого метода – существенно меньшие объемы отчуждаемой почвы (в 33 раза по сравнению с простым удалением верхнего слоя почвы).

На почвах пади залив рисовых чеков водой с последующим сбросом воды (концентрация радиоцезия при этом в ней незначительна) позволяет с помощью насосов удалять верхний слой почвы (жидкообразная масса), очищенной на 30–70 % в за-

висимости от ее типа (прием малоэффективен для песчаных почв и может быть применен только на тяжелых глинистых почвах). При этом объем отчуждаемой почвы относительно других ее обработок невелик – 1,2–1,5 кг/м². Мощность дозы облучения уменьшается с 7,6 до 6,5 мкЗв/ч.

Вспашка с оборотом пласта, впервые оцененная в полевых условиях на почвах Восточно-Уральского радиоактивного следа [1, 14], при которой предполагается заглубление верхнего слоя почвы на 25–60 см, приводит к перемещению более 50 % радиоцезия на глубину ниже 15 см (в контроле весь радиоцезий находится в слое 0–15 см). При этом мощность дозы облучения уменьшается с 0,7 до 0,3 мкЗв/ч, однако велик риск загрязнения подземных вод. Размещение загрязненной почвы, содержащейся в полиэтиленовых мешках, в цементные контейнеры снижает мощность дозы внешнего облучения (на удалении 1 см от стенок контейнера) до 94 %.

В число реабилитационных методов агрохимического и агрономического характера важнейшими входят внесение минеральных удобрений и управление водным режимом почвы. Среди удобрений на первом месте стоят калийные, так как калий – антагонист радиоцезия, хотя в отличие от чернобыльской аварии, где широко использовалось внесение двойного и более количества калийных удобрений (относительно нормы) – до 200 кг/га и выше [13], в Японии рекомендуемые дозы вносимого калия были ниже – 80–100 кг/га.

Японские специалисты не избежали некоторых ошибочных решений, известных из опыта ликвидации последствий чернобыльской аварии. Как выяснилось, они были мало знакомы с достаточно обширной информацией по этим вопросам; хотя по инициативе японской стороны на японский язык в 2002 г. была переведена монография [1], где отражены итоги работ по реабилитации площадей, подвергнутых радиоактивному загрязнению на территории СССР (России). В частности, большие надежды возлагались на так называемую фитомелиорацию почв, т.е. отчуждение радиоцезия с надземной фитомассой после уборки урожая, при этом предполагалось использование видов растений, характеризующихся большой массой, с одной стороны, и высоким коэффициентом накопления ¹³⁷Cs, – с другой. Нерациональность такого способа очищения почвы была доказана в широких производственных условиях на следах после Кыштымской и Чернобыльской аварий. На загрязненных территориях в Японии были проведены на больших площадях посевы амаранта и подсолнечника с целью последующей фитомелиорации почв. При возделывании подсолнечника на почвах с концентрацией радиоцезия в почвах около 7,7 кБк/кг

(2,3 МБк/м²) вынос радионуклидов надземной фитомассой составил 52 Бк/кг (520 Бк/м²) в расчете на сырой вес, т.е. приблизительно 0,02 % от содержания в почве (отметим, что ежегодный радиоактивный распад ¹³⁴Cs и ¹³⁷Cs обеспечивает снижение содержания в почве соответственно на 28,6 и 2,28 %). В регионе Чернобыльской аварии средний вынос ¹³⁷Cs различными сельскохозяйственными культурами составил около 0,07 % [15].

К числу радиологически и экологически необоснованных методов деконтаминации относились снятие лесной подстилки в загрязненных лесах, удаление старых листьев, струйное обмывание стволов деревьев, а в ряде случаев (удаление лесной подстилки) эти приемы вели к ослаблению и даже гибели лесонасаждений. В последующем нерациональность этих способов деконтаминации, как и фитомелиорации была признана японскими специалистами.

Проблема обращения с радиоактивными отходами является ключевой при реабилитации загрязненных территорий, в том числе (и в первую очередь) для сельскохозяйственных угодий, активно обсуждалась в Японии. Ее решение затрагивает сокращение количества образующихся отходов, их повторного использования, рецикла отходов и, наконец, их захоронения.

Радиоактивные отходы, образующиеся при реабилитации загрязненных территорий, весьма разнообразны, концентрация радионуклидов в них колеблется в очень широких пределах — от нескольких единиц до десятков тысяч Бк/кг. Были просчитаны и описаны типы радиоактивных отходов (при деконтаминации земель сельскохозяйственного назначения, лесов, жилых зданий и т.п.) для 9 радиоэкологических сценариев ликвидации последствий аварии на ФДАЭС. Выделялись 4 дозовых предела, достижение которых ставилось при проведении защитных мер (годовые дозы), — 20 мЗв и более, 5 мЗв и более, 1 мЗв и более (в последнем случае рассматривались сплошная деконтаминация или очистка наиболее загрязненных участков). Анализировались случаи, когда лесистость территории составляла 10, 50 и 100 %. Как показали расчеты, в зависимости от лесистости территории и уровня сельскохозяйственного использования территории, а также степени деконтаминации возможные объемы загрязненной почвы (эквивалентные понятию радиоактивные отходы в этих расчетах) колебались в очень широких пределах — от 5 до 29 млн. м³. При удельной плотности отходов 1 т/м³ это означает, что объемы производимых отходов могут достичь 29 млн. т. Среди этих отходов преобладают отходы, связанные с деконтаминацией сельскохозяйственных угодий (60–90 % от общего количества), далее следуют отходы, образующиеся

при деконтаминации лесов, причем при наиболее высокой лесистости (100 %) они составляют около 50 % от отходов, сопряженных с землями сельскохозяйственного назначения.

Интересно сравнить количество радиоактивных отходов, образование которых можно ожидать при деконтаминации территории после аварии на ФДАЭС, с количеством отходов, возникающих при работе АЭС. На АЭС с мощностью 1000 МВт (эл.) количество операционных отходов составляет 250–400 м³/год, низкоактивных отходов в течение 60 лет — 15 тыс.—25 тыс. м³, при снятии с эксплуатации — 5 тыс.—10 тыс. м³. Таким образом, при работе АЭС идет оперирование тысячами — десятками тысяч м³ отходов, а при ликвидации последствий аварии на ФДАЭС — миллионами м³. Еще одно интересное сравнение — общее количество отходов, связанных с деконтаминацией территории после аварии на ФДАЭС, может стать примерно равным годовому количеству твердых бытовых городских отходов в целом по Японии [8]. Обсуждение этого вопроса выходит за рамки данной статьи.

При ликвидации последствий аварии на ФДАЭС основное внимание уделяется изучению переноса радионуклидов по трофическим (в первую очередь сельскохозяйственным) цепочкам в окружающей среде, существенно меньший интерес проявляется к анализу лучевых эффектов у биоты в зоне загрязнения. Обоснованность такой программы ликвидации последствий аварии базируется на главной парадигме, восходящей еще к классическим работам В.М. Ключковского [16], согласно которой ареал видимых радиационных изменений у биоты существенно меньше, чем площадь, где уровень радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных (и лесных) продуктов превышает предельно-допустимые концентрации, исключающие их использование человеком. Однако ряд выполненных исследований показал, что в первый год после аварии на ФДАЭС в ближней зоне мощности дозы могли превысить критическую величину 100 мкГр/ч (мощность дозы, при которой у большинства представителей биоты не ожидается значимых эффектов на популяционном уровне) [17]. Тем не менее, у некоторых наиболее радиочувствительных видов биоты, в первую очередь млекопитающих, такие незначительные радиационные изменения не исключаются (особенно при наиболее высоких плотностях загрязнения).

По данным Национального института радиологических наук Японии (NIRS), в первый период после аварии на ФДАЭС концентрации ¹³¹I, ¹³⁴Cs и ¹³⁷Cs в почвах, в которых находились дождевые черви, достигали 280–710 кБк/кг, что обеспечивало мощности дозы облучения 11 мГр/сут (по внешнему воздей-

ствию). Для сорной травянистой растительности в эти сроки содержание указанных радионуклидов равнялось около 2,5–2,7 МБк/кг, что приводило к мощности дозы 60 мГр/сут. Согласно Публикации МКРЗ 108 [18], предельно-допустимые мощности дозы для указанных представителей биоты составляли соответственно 10 и около 60 мГр/сут, т.е. в ближней аварийной зоне облучение растений и животных было близко к минимальному для проявления ранних лучевых эффектов.

Научно-практическое значение исследований по реабилитации загрязненных сельскохозяйственных и лесных угодий после аварии на ФДАЭС состоит в том, что появляется альтернативная (относительно Чернобыльской и Кыштымской аварий) оценка эффективности систем защитных мероприятий в сфере сельскохозяйственного производства после аварий, связанных с выбросом радионуклидов в окружающую среду. Это позволит международному сообществу разработать более обоснованную программу действий в потенциально возможных аварийных ситуациях, связанных с радиоактивным загрязнением природной среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексахин Р.М., Булдаков Л.А., Губанов В.А. и соавт.* Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры. Под ред. *Л.А. Ильина и В.А. Губанова*. – М., ИздАТ, 2001, 752 с.
2. *Remediation of Contaminated Environments*. Ed. *G. Voigt, S. Fesenko*. – Amsterdam, Elsevier, 2009, 477 p.
3. JFDMA. Situation Report 147, 26 March 2013. Japanese Fire and Disaster Management Agency of the Ministry of International Affairs and Communications. – Japan 2013.
4. *Akahana K., Yonai Sh., Fukuda S. et al.* The Fukushima Nuclear Power Plant Accident and Exposures in the Environment. // *Environmentalist*, 2012, **25**, No. 1.
5. MHLW. Foodsafety, <http://www.mhlw.go.jp/english/foodsafety/at/110318.pdf>. 2011.
6. *Agricultural Implications of the Fukushima Nuclear Accident*. Ed. *T. Nakanishi, K. Tanoi*. – Japan, Springer, 2013.
7. *Голиков В.Ю., Звонова И.А.* Оценка доз облучения жителей Японии. // В кн. “Авария на АЭС «Фукусима-1». Организация профилактических мероприятий, направленных на сохранение здоровья населения Российской Федерации”. Под ред. *Г.Г. Онищенко*. – СПб., Русское географическое общество. 2012, С. 281–318.
8. Final Report of the International Mission on Remediation of Large Contaminated Areas off-site the Fukushima Daiichi NPP. 7–15 October 2011. – IAEA, 2011, 79 pp.
9. *Miyashita K.* Contamination of farmland and agricultural products due to the accident at Fukushima Nuclear Power Station. // In: *Internat. Sci. Symp. on Combating Radionuclide Contamination in Agro-Soil Environment*, March 8–10, 2012, Tokyo, Japan, P. 237–251.
10. *Internat. Sci. Symposium on Combating Radionuclide Contamination in Agro-Soil Environ*, March 8–10, 2012, Tokyo, Japan.
11. *Алексахин Р.М.* Радиоэкологические уроки Чернобыля. // *Радиационная биология. Радиоэкология*, 1993, **33**, вып. 1, С. 3–14.
12. *Qualification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environment for Radiological Assessments*. International Atomic Energy Agency. – IAEA. Technical Report Series 1616, 2009.
13. *Panov A.V., Alexakhin R.M., Muzalevskaya A.A.* A change in efficiency of protective measures for reduction of ¹³⁷Cs accumulation by agricultural plants in various periods after the Chernobyl accident. // In: *The Lessons of Chernobyl. 25 Years Later*. Ed. *E.B. Burlakova, V.I. Naidich*. – Nova Science Publishers. Inc., New York, 2012, P. 245–271.
14. *Тепляков И.Г., Романов Г.Н., Спиринов Д.А.* Возвращение земель ВУРСа в сельскохозяйственное использование. // *Вопросы радиационной безопасности*, 1997, № 3, С. 33–42.
15. *Алексахин Р.М.* Радиоактивное загрязнение почв как тип их деградации. // *Почвоведение*, 2009, № 12, С. 1487–1498.
16. *О поведении радиоактивных продуктов деления, их поступлении в растения и накоплении в урожае*. Под ред. *В.М. Клечковского*. – М., АН СССР, 1956.
17. *Sources and Effects of Ionizing Radiation. Volume II: Effects, Scientific Annexes C, D and E*. UNSCEAR 2008 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. – New York, United Nations, 2011.
18. *Environmental Protection: the Concept and Use of Reference Animals and Plants*. ICRP. Publication 108. // *Annals of the ICRP*, 2009, **38**, No. 4–6.

Поступила: 14.05.2013.

Принята к публикации: 15.10.2013.

В.Ф. Степаненко¹, М. Хоши², М.Ю. Орлов¹, Д.В. Дубов¹,
ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ПРОДУКТОВ
ПИТАНИЯ РАДИОНУКЛИДАМИ И ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ
НАСЕЛЕНИЯ ПОСЛЕ АВАРИИ НА АЭС «ФУКУСИМА-1»:
Сообщение 1. ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

1

V.F. Stepanenko¹, M. Hoshi², M.Yu. Orlov¹, D.V. Dubov¹, A.F. Tsyb¹
Environmental and Food Products Contamination by Radionuclides
and Doses of Irradiation to Population Following Radiation Accident
on Fukushima-1 NPP:
Part 1. Environmental Contamination

СОДЕРЖАНИЕ

Введение
Причины и развитие аварии
Последовательность основных событий и масштабы аварии
Радиоактивное загрязнение окружающей среды
Заключение
Список литературы

CONTENT

Introduction
Causes and evolution of the accident
Sequence of main events and scale of the accident
Radioactive contamination of environment
Conclusion
List of references

Ключевые слова: радиационная авария, Фукусима-1, загрязнение радионуклидами

Key words: radiation accident, Fukushima-1, contamination by radionuclides

Введение

Авария на АЭС «Фукусима-1» вызвала резонанс глобального масштаба как среди специалистов, так и в средствах массовой информации. Задержка получения общедоступной информации со стороны владельца АЭС (Tokyo Electric Power Company – TEPCO) [1] и опубликования прогнозных данных о загрязнении территории и дозах облучения населения, рассчитанных с помощью системы SPEEDI (System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information [2]) привела в некоторых случаях к неправильным решениям при эвакуации населения, когда люди не были переселены с территорий с высоким уровнем загрязнения, находящихся на расстоянии более 30 км от АЭС [3, 4].

Возможно, такая задержка была связана с техническими проблемами, а также с «человеческим фактором» и проблемами в кризисной ситуации, обусловленной ударом землетрясения и гигантскими волнами цунами. Так, показательным является сообщение Yomiuri Shimbun от 12 марта 2012 г. [5]. В этом сообщении утверждается, что данные системы SPEEDI, находящейся в Токио, в Технологическом центре ядерной безопасности (Nuclear Safety Technology Center – NSTC), каждый час 11 марта

2011 г. посылались соответствующим министерствам и ведомствам. Из центра пытались передать данные системы SPEEDI в Фукусиму, однако специальная линия связи была нарушена и поэтому только поздно ночью данные из Токио удалось передать в Фукусимский центр по мониторингу радиоактивности окружающей среды (Fukushima Environmental Radioactivity Monitoring Center). В свою очередь, Фукусимский центр по мониторингу, начиная с ночи 12 марта, отсылал эти данные по электронной почте в Администрацию префектуры Фукусима. Однако из-за проблем со связью произошла большая задержка по доступности файлов с информацией SPEEDI, относящийся к периоду от 11 марта по 15 марта 2011 г. В результате данные SPEEDI впервые были опубликованы только 23 марта 2011 г. [4]. Такого рода обстоятельства приводили к искажениям в общественном мнении представлений о возможных последствиях аварии, как это нередко бывает в условиях дефицита объективной информации. Так, например, широкую огласку получили неразбериха и противоречия в оценках уровней облучения радиоактивным йодом беременных женщин и детей при употреблении водопроводной воды, сообщенных практически одновременно Японским обществом акушерства и гине-

¹ Медицинский радиологический научный центр МЗ РФ, Обнинск, Калужская обл. E-mail: mrrc@mrrc.obninsk.ru

² Хиросимский университет, Хиросима, Япония

¹ Medical Radiological Research Center, Obninsk, Russia. E-mail: mrrc@mrrc.obninsk.ru

² Hiroshima University, Hiroshima, Japan

кологии (JSOG) [6] и Японским радиологическим обществом (JRS) [7].

Несколько месяцев прошло от момента аварии до появления первых публикаций японских специалистов, относящихся к аварии. Большинство публикаций японских специалистов с результатами измерений радиационной обстановки и оценок доз облучения населения приходится на период с июня 2011 г. и далее. В июне 2011 г. на конференции МАГАТЭ по ядерной безопасности был представлен доклад Японского правительства об аварии на АЭС Фукусима-1 [8].

Ключевыми сведениями, определяющими экологические и медицинские последствия крупномасштабных радиационных аварий, являются объективные данные о радиоактивном загрязнении окружающей среды и уровнях облучения населения. Трудно при этом переоценить значимость непосредственных инструментальных измерений: расчетные оценки, несмотря на их оперативность, основаны на различного рода моделях, неизбежно включающих ряд предположений и упрощений. Следовательно, результаты натуральных измерений являются приоритетными в силу их большей доказательности, в том числе и для общественного мнения.

Принципиальным подходом при написании данного обзора являлась работа с первоисточниками (данными, опубликованными японскими специалистами и японскими официальными структурами, с отдельными ссылками на опыт ликвидации последствий аварии на ЧАЭС), относящимися к результатам инструментальных оценок загрязнения окружающей среды радионуклидами, равно как и имеющимся (хотя и немногочисленным) оценкам доз облучения населения, основанным на инструментальных измерениях. Уделено внимание методологии, аппаратуре, методам измерений, их организации, принятию решений, а также имевшим место проблемам. Все это и является основной целью настоящей публикации, и, как надеются авторы, это может быть полезным для широкого круга специалистов и для лиц, принимающих решения в кризисных ситуациях, связанных с радиационными авариями. Представлено первое сообщение: “Загрязнение окружающей среды”. В последующем сообщении будут приведены имеющиеся данные о радиоактивном загрязнении продуктов питания и дозах облучения населения.

Причины и развитие аварии

АЭС Фукусима, включающая 6 реакторных блоков, расположена на восточном побережье острова Хонсю, вблизи города Окума, уезд Футаба, префектура Фукусима, Япония. Частный владелец АЭС – компания ТЕРСО (Япония). Проектировала

реакторы компания General Electric (США). Блок 1 (439 МВт) находился в эксплуатации с 26.03.1971 г. остальные блоки были введены в строй в период с 1974 по 1979 гг. и имели мощности от 760 до 1067 МВт. На 11 марта 2011 г. блоки 1, 2, 3 находились в эксплуатации, а блоки 4, 5, 6 были в заглушенном состоянии. Как было указано выше, к моменту аварии имелось 6 реакторных блоков общей мощностью 4,7 ГВт(э). Все реакторы – это одноконтурные реакторы с кипящей водой. Непосредственно к реактору Фукусима-1 примыкает бассейн для выдержки облученного топлива. АЭС находится непосредственно на восточном побережье Японии (37°25'22,7" с.ш. 141°01'58,5" в.д.), на берегу океана, открытого в сторону США. Электростанция поставляла энергию в энергосистемы Футаба, Окума и Иваки через подстанцию Шин-Иваки [1, 8]

В реактор были загружены 400 топливных стержня с низкообогащенной окисью урана (около 4 %) и циркониевыми оболочками. К моменту аварии среднее выгорание топлива в реакторе первого блока составляло 17,6 МВт×сут/т, т.е. примерно вдвое выше, чем для аварийного реактора Чернобыльской АЭС [1, 8]

Реактор расположен в бетонном контейнере, внутри которого, соответственно, располагаются устройства (т.н. рекомбинаторы) для окисления водорода, образующегося в процессе работы реактора за счет радиолитиза воды. На случай аварии с потерей теплоносителя (т.н. Loss of Coolant Accident) реактор был снабжен системой аварийного отвода остаточного тепловыделения из активной зоны. Насосы этой системы имеют приводы от дизель-генераторов. На блоке Фукусима-1 эти генераторы были расположены в нижнем этаже здания реактора. Дамба, защищающая реактор от воздействия цунами, была рассчитана на высоту волны около 5,7–6,0 м. Однако при реальном цунами высота волны была около 14–15 м (волны были неоднократными), что привело к выходу из строя системы аварийного отвода тепла от активной зоны [1, 8].

В момент землетрясения сработала аварийная защита, и все работающие реакторы были остановлены. Однако приблизительно через час, когда волны цунами достигли станции, было прервано электропитание, что привело к потере водного охлаждения реакторов, которые активно выделяют тепло и в последующий длительный период времени после прекращения цепной реакции. Это тепловыделение продолжается за счет поглощения в веществе топливных элементов энергии гамма- и бета-излучения от оставшихся продуктов деления и активации. В результате произошел перегрев активной зоны реакторов и последовали взрывы водорода, образовавшегося в

результате высокотемпературной паро-циркониевой реакции, приведшие к разрушению активных зон на блоках 1, 2, 3 и выбросам радиоактивных веществ в окружающую среду [1, 8] (см. табл. 1).

Загрязнение окружающей среды

Согласно официальной японской оценке (от 12 апреля 2011 г.), радиационная авария в Фукусиме-1 была отнесена к уровню 7 по шкале INES (International Nuclear and Radiological Event Scale) [8]. Ранее такой уровень был принят только для аварии на ЧАЭС. Активность выброшенных в атмосферу радионуклидов после аварии на АЭС в Фукусиме все еще является предметом уточнения. Однако имеющиеся данные представлены на сайте МЕХТ [2] (со ссылками на ТЕРСО и Комиссию по ядерной безопасности Японии – JNSC), а также в докладе Правительства

Японии [8]. Эта информация представлена в табл. 2 по сравнению с соответствующими данными, относящимся к аварии на ЧАЭС.

В соответствии с результатами измерений активности в пробах почвы и аэрогамма съежек [2, 8] площадь радиоактивного загрязнения почвы ^{137}Cs после аварии на АЭС Фукусима-1 существенно меньше, чем площадь радиоактивного загрязнения после аварии в Чернобыле. Это объясняется тем, что весьма значимая часть радиоактивного выброса пришлась на ближайшую акваторию Тихого океана в восточном направлении (в сторону США). Информация о площади загрязненной почвы на территории Японии представлена в табл. 3 по сравнению с соответствующими данными, относящимся к аварии на ЧАЭС.

Оценки точного числа эвакуированных после аварии на АЭС Фукусима-1 затруднены вследствие того, что территории вблизи АЭС Фукусима-1 с высо-

Таблица 1

Последовательность основных событий и масштабы аварии [8, 3] (время местное – JST)

14:46, 11 марта 2011 г	Землетрясение в Тихом океане магнитудой 9,0 в точке с координатами 38°1' с.ш., 142°9' в.д., глубина 23,7 км, 163 км на северо-восток от АЭС
15:27–15:35, 11 марта	Последовательные волны цунами достигли АЭС, потеря охлаждения реакторов
15:42, 11 марта	Сообщение ТЕРСО правительству Японии об аварийной ситуации
19:03, 11 марта	Правительственное объявление ядерной опасности (nuclear emergency)
20:57, 11 марта	Распоряжение администрации префектуры Фукусима об эвакуации населения из зоны до 2 км вокруг АЭС
21:23, 11 марта	Распоряжение правительства об эвакуации населения из зоны до 3 км вокруг АЭС и укрытии населения в зданиях в радиусе от 3 до 10 км от АЭС
05:44, 12 марта:	Распоряжение правительства об эвакуации населения из зоны до 10 км вокруг АЭС
15:36, 12 марта	Взрыв водорода на реакторе 1 АЭС, нарушение герметичности
18:25, 12 марта	Распоряжение правительства об эвакуации населения из зоны до 20 км вокруг АЭС
11:01, 14 марта	Взрыв водорода на реакторе 3 АЭС; разрушение блока
06:10, 15 марта	Слышен взрыв на реакторе 2
06:14, 15 марта	Дым на реакторе 3 АЭС
08:25, 15 марта	Белый дым на реакторе 2 АЭС
09:38, 15 марта	Пожар на реакторе 4 АЭС
11:00, 15 марта	Распоряжение правительства об укрытии населения в помещениях (в зоне от 20 до 30 км вокруг АЭС)
16 марта	Рекомендация JNSC (Японская комиссия по ядерной безопасности) властям префектуры Фукусима проводить для эвакуируемых профилактику стабильным йодом. 1,51 миллиона таблеток и 6,1 кг порошка имелись в распоряжении администрации префектуры Фукусима, однако к этому моменту эвакуация практически была закончена.
17 марта	Министерство здравоохранения, труда и благосостояния Японии (MHLW) установило временные (сроком до 31 марта 2012 г.) предельно допустимые величины удельной активности ^{131}I и ^{137}Cs в питьевой воде, молоке и продуктах питания (5 апреля был введен расширенный список продуктов питания)
25 марта	Рекомендация правительства о добровольной эвакуации населения из зоны от 20 до 30 км вокруг АЭС
4 апреля	Сообщение о сбросе радиоактивных жидких отходов в океан (западное побережье Японии, сбросы произведены в воды, непосредственно примыкающие к АЭС)
21 апреля	Правительство установило зону с радиусом 20 км вокруг АЭС как запрещенную для доступа населения (no go area). В этой зоне ожидаемая годовая доза облучения населения (за первый год постоянного пребывания после аварии) могла превысить 20 мЗв (по весьма консервативным оценкам)
22 апреля	Зона от 20 до 30 км вокруг АЭС была обозначена как зона с плановой готовностью для эвакуации в случае чрезвычайной радиационной обстановки (deliberate evacuation zone)
23 апреля	Правительство объявило о критериях и процедурах временного нахождения желающих прибыть в зону 20 км (за исключением 3 км зоны) с целью обеспечить населению возможность взять там минимально необходимые личные вещи и документы. Критерии учитывают местные условия и требования радиационной безопасности
16 июня	После детализации радиационной обстановки за пределами 30 км зоны были установлены населенные территории, где жители могли получить, согласно консервативным оценкам, более 20 мЗв за первый год после аварии. Эти территории были обозначены как рекомендуемые к эвакуации (evacuation recommended spots)
1 апреля 2012 г	1 апреля 2012 г.: Министерство здравоохранения, труда и благосостояния Японии (MHLW) установило новые, более жесткие, временные предельно допустимые величины удельной активности ^{137}Cs в питьевой воде, молоке и продуктах питания (необходимости вводить нормативы для ^{131}I не было в силу короткого времени его полураспада – 8 суток)

Таблица 2

Активность некоторых выброшенных радионуклидов после аварии на АЭС Фукусима-1 [1, 2, 8]

Авария на АЭС Фукусима-1		Сравнение с аварией на ЧАЭС (по данным UNSEAR 2000 Report to the General Assembly, Annex J)	
Радионуклиды	Активность, Бк	Активность, Бк	
^{131}I ($T_{1/2} = 8,04$ сут)	$(130\div 160)\times 10^{15}$	1760×10^{15}	
^{133}I ($T_{1/2} = 20,8$ ч)	42×10^{15}	2500×10^{15}	
^{137}Cs ($T_{1/2} = 30$ лет)	$(11\div 15)\times 10^{15}$	85×10^{15}	
^{134}Cs ($T_{1/2} = 2,06$ г.)	18×10^{15}	54×10^{15}	
^{133}Xe ($T_{1/2} = 5,25$ сут)	11000×10^{15}	6500×10^{15}	
^{90}Sr ($T_{1/2} = 29,12$ г.)	$0,14\times 10^{15}$	10×10^{15}	
^{239}Pu ($T_{1/2} = 24065$ лет)	$3,2\times 10^9$	$0,03\times 10^{15}$	

ким уровнем радиоактивного загрязнения также подверглись удару землетрясения и воздействию гигантского цунами, приведшего к большому количеству погибших и раненых, к повреждению и разрушению жилищ, общественных зданий и дорог, нарушению телефонной связи. Согласно имеющимся японским оценкам [3], общее число лиц, эвакуированных и добровольно выехавших из радиоактивно загрязненных территорий, составляет около 140 тыс. человек.

Радиационная обстановка на площадке АЭС.

Исходная информация, поступившая от компании ТЕРСО [1], относится к измерениям мощности дозы в 16 различных точках на площадке АЭС, проведенных в разное время как с помощью передвижных средств, так и стационарных постов. Применяли передвижные средства измерений, так как часть стационарных постов была разрушена в результате землетрясения и цунами. Детальная информация опубликована на сайте ТЕРСО [1], при этом не для всех точек представлены непрерывные ряды измерений. Здесь достаточно отметить некоторые пиковые значения мощностей дозы (МД) на территории площадки АЭС. Так, например, в точке измерения, обозначенной как «вблизи МР-4» (near Measuring Post-4) в период 12–13 марта 2011 г. были отмечены резкие подъемы МД в воздухе до уровней около 1000 и 1600 мкЗв/ч. Затем с 14 по 17 марта у главного входа на АЭС последовала серия подъемов МД до максимумов от 750 до 11900 мкЗв/ч. Пики с максимумами от 3950 до 5050 мкЗв/ч были отмечены у северной части основного здания, а в период с 24 по 25 марта у южной ча-

сти административного здания были зафиксированы пики с максимумами около 4000 и 2100 мкЗв/ч. Пики МД в различных точках измерения характеризуется своим индивидуальным и быстрым спадом мощности дозы – от 1,5–2 до 10–20 раз от максимума за несколько часов.

Все это показывает, что пиковые значения МД обусловлены отдельными выбросами в воздушную среду короткоживущих и летучих радионуклидов. К концу марта 2011 г. МД на площадке АЭС стала монотонно (без наличия пиков) снижаться и в большинстве точек измерений достигла уровня 100–200 мкЗв/ч, что уже можно соотносить с излучением от выпавших на поверхность радионуклидов. Исключением являлась точка вблизи южной части административного здания, где МД составляла от 500 до 1000 мкЗв/ч. Наиболее интенсивные выбросы произошли в период до 16 марта (включительно), что явилось результатом последовательных взрывов в залах реакторных блоков 1, 2, 3 АЭС. Согласно проведенному нами обобщению метеорологических данных, представленных на сайте ТЕРСО [1], первоначальное движение радиоактивного облака над прилегающей к АЭС территорией Японии (суша) произошло в северном направлении от АЭС, затем на юго-юго-запад от станции, с быстрой сменой направления движения облака на северо-запад [1]. Кроме того, в этот период имели место направления ветровых потоков на восток и северо-восток, что обусловило весьма существенные переносы радиоактивных веществ в сторону океана [1].

Таблица 3

Площадь радиоактивного загрязнения почвы ^{137}Cs после аварии на АЭС Фукусима-1 [2, 8]

Авария на АЭС Фукусима-1		Сравнение с аварией на ЧАЭС (по данным UNSEAR 2000 Report to the General Assembly, Annex J)	
Плотность загрязнения почвы ^{137}Cs , кБк/м ²	Площадь загрязнения, км ²	Плотность загрязнения почвы ^{137}Cs , кБк/м ²	Площадь загрязнения Европейской части бывшего СССР, км ²
> 30	9 200	> 37	146 110
> 150	2 740	> 185	29 190
> 500	1 180	> 555	10 340

По информации ТЕРСО [1], радиационная обстановка в непосредственной близости от реакторных помещений и внутри них была более тяжелой — в этих местах МД были значительно выше, от единиц до 130 мЗв/ч (эти данные относятся к 20–23 марта 2011 г., в более ранний период МД должны быть еще выше). При таких уровнях мощности дозы облучения ликвидаторов аварии могли превышать предельно-допустимые дозы 250 мЗв (имеющиеся данные о дозах облучения персонала будут опубликованы в нашем втором сообщении). В марте 2011 г. в пробах почвы на площадке АЭС помимо загрязнения радионуклидами ^{134}Cs , ^{137}Cs и ^{131}I отмечено также наличие радиоизотопов плутония. Измерение активности ^{238}Pu , $^{239,240}\text{Pu}$ было проведено в пяти пробах почвы. В двух из них было установлено наличие всех указанных радиоизотопов плутония: $0,54 \pm 0,062$ и $0,18 \pm 0,033$ Бк/кг для ^{238}Pu , $0,27 \pm 0,042$ и $0,19 \pm 0,034$ Бк/кг для $^{239,240}\text{Pu}$. Эти активности близки по своей величине к глобальным уровням загрязнения типичных почв Японии, согласно базам данным МЕХТ, относящихся к доаварийному периоду [2]. Однако отношение активностей ^{238}Pu к активности $^{239,240}\text{Pu}$ в двух пробах, отобранных на площадке АЭС, было достоверно выше таковых в доаварийных пробах почвы. Поэтому японскими специалистами было сделано консервативное заключение, что в двух пробах из пяти отобранных на площадке АЭС, плутоний имеет аварийное происхождение [1]. Что касается активности радиоизотопов плутония в остальных пробах, отобранных в районе АЭС на расстоянии от 0,5 км до 1 км юго-запад от первого блока, то отличить их от уровней глобальных выпадений не удалось.

Сбросы радиоактивной воды в открытый океан по данным ТЕРСО [1] были следующие: с 1 по 6 апреля 2011 г. в океанскую акваторию, непосредственно примыкающую к АЭС, было сброшено 520 тонн воды содержащей $4,7 \times 10^{15}$ Бк активности (суммарно ^{131}I , ^{134}Cs и ^{137}Cs), с 4 по 10 апреля сброшенная в открытый океан суммарная активность радионуклидов составила 150×10^9 Бк (10393 тонн воды), а 11 мая 2011 г. было сброшено 250 тонн воды с активностью 20×10^{12} Бк.

Измерения мощности дозы в воздухе [2]. Согласно данным МЕХТ в периоды с 6 по 14 июня 2011 г. и с 27 июня по 8 июля 2011 г. были проведены измерения МД в воздухе приблизительно в 2200 точках в пределах территории с радиусом около 100 километров вокруг АЭС. Измерения производили специалисты многих институтов, исследовательских центров и университетов Японии (94 организации) и 6 частных компаний по единой методологии. В пределах 80-км радиуса вокруг АЭС выбирали по одной точке (location) для измерения в пределах каждого квадрата размером 2×2 км, а на расстояниях от 80 до 100 км вы-

бирали по одной точке измерения в пределах каждого квадрата размером 10×10 км. Измерения производили на высоте 1 м над уровнем почвы с сопутствующим применением системы определения географических координат (GPS). Проводили измерения двух видов — непосредственно в местах отбора проб почвы для последующего изучения радионуклидного загрязнения (см. ниже), а также с использованием передвижных дозиметрических лабораторий, курсирующих по национальным и префектурным дорогам (нужно отметить, что уже к этому периоду основные дорожные магистрали, разрушенные в результате землетрясения, были восстановлены). В первом случае каждое измерение дублировалось, как минимум, дважды; при этом при мощности дозы менее 30 мкЗв/ч применяли откалиброванные измерители МД со сцинтилляционными детекторами NaI(Tl), а при большей МД использовали калиброванные приборы с ионизационной камерой. При выборе точек измерений и отбора проб почвы использовали методологию, аналогичную той, что была применена и после аварии на ЧАЭС [9], причем выбирали плоские места, вдали от строений и иных крупных объектов, а также места с минимально густым травяным покрытием; выбирали места с почвенным покрытием, избегали мест, покрытых асфальтом или бетоном, а также лесных территорий и мест с большим количеством деревьев и кустов; избегали мест стоков и аккумуляции дождевой воды.

В случае применения передвижных лабораторий использовали систему KURAMA (Kyoto University Radiation Mapping System) со сцинтилляционным измерителем МД, оборудованной защитой от радиационного загрязнения техники и персонала (и с принятием соответствующих защитных и дезактивационных мер). Измерения проводили каждые 10 сек (приблизительно через каждые 100 м) с использованием системы определения географических координат (GPS). При измерениях учитывали коэффициент экранирования машиной показаний измерительного прибора. По результатам измерений построена карта пространственного распределения МД в воздухе. Эта карта представлена на сайте МЕХТ [2].

Публикация карты требует авторского разрешения, поэтому мы приводим общую картину распределения мощности дозы в воздухе. Ее можно охарактеризовать следующим образом. Прежде всего, реальная карта распределения МД в воздухе не совпадает с круговыми зонами 20 и 30 км, которые, очевидно, были срочно обозначены для принятия решений. В северо-западном направлении от АЭС наблюдается явно выраженный и узкий радиоактивный след, вплоть до расстояний несколько более 30 км (до 40 км) от АЭС (район расположения н.п. Иитате, Кавамата) с

МД в воздухе от 9,5 мкЗв/ч до более 19 мкЗв/ч (здесь, как выше, так и ниже, данные приведены на середину июня – начало июля 2011 г.). Кроме того, имеется след в юго-западном направлении на расстоянии до 30 км от АЭС с МД от 3,8 до 9,5 мкЗв/ч. Все это вполне совпадает с направлением доминирующих ветров в период аварии. Следует отметить особенности формирования следа за пределами зоны 30 км (но в пределах радиуса 80 км) в срединной части префектуры Фукусима и в направлении с северо-востока на юго-запад, где МД находилась в диапазоне от 1,0 до 3,8 мкЗв/ч. Это можно объяснить местными особенностями формирования воздушных потоков и осадков в горных, предгорных и долинных условиях. Такого рода особенности были отмечены и при анализе радиоактивного загрязнения после аварии на ЧАЭС [10]. Остальные территории в пределах радиуса 80 и 100 км вокруг станции обозначены с уровнями МД менее 1,0 мкЗв/ч (вплоть до уровня естественного фоновое излучения). Непосредственно в городе Фукусима, находящемся приблизительно в 60 км от АЭС, 16–17 марта 2011 г. была зарегистрирована мощность дозы более 100 мкЗв/ч, с последующим спадом МД в течение 2–3 недель до 1–2 мкЗв/ч [11].

Здесь следует также отметить, что, кроме того, силами МЕХТ совместно с Министерством энергетики США (U.S. DOE), в период с 6 по 29 апреля 2011 г. проведен аэро-гамма-мониторинг радиационной обстановки. Со стороны Японии был задействован частный вертолет (Bell 412), со стороны DOE были использованы небольшой самолет (C-12) и вертолет УН-1. Было проведено 42 полета на высотах от 150 до 700 м над поверхностью земли. МД усреднялась по площадям от 300 до 1500 м в диаметре. Территория измерений была ограничена радиусом 80 км вокруг АЭС. Помимо измерений МД, производились расчеты плотности загрязнения почвы ^{134}Cs и ^{137}Cs по данным спектрометрии. Полученные результаты в виде изолиний на карте представлены на сайте МЕХТ [2]. В целом, карта пространственного распределения МД в воздухе, полученная методом аэро-гамма-съемки, согласуется с данными, полученными японскими специалистами в результате наземного мониторинга (см. выше), отличие заключается в существенно большей детальности карты, полученной по данным наземного мониторинга (т.е. поквратно – 2×2 км).

Плотность загрязнения почвы радиоизотопами цезия [2]. Согласно данным МЕХТ, в периоды с 6 по 14 июня 2011 г. и с 27 июня по 8 июля 2011 г., одновременно с проведением наземных измерений МД в воздухе были отобраны пробы почвы приблизительно в 2200 точках в пределах территории с радиусом около 100 км вокруг АЭС. Так же как и измерения МД в воздухе, отбор проб почвы производили спе-

циалисты (404 человека) многих институтов, исследовательских центров и университетов Японии, а также частных компаний (всего 107 организаций) по единой методологии. В пределах радиуса 80 км вокруг АЭС выбирали по одной точке (location) в пределах квадратов размером 2×2 км, а на расстояниях от 80 до 100 км выбирали по одной точке для проб почвы в пределах квадратов размером 10×10 км. Критерии выбора точек пробоотбора описаны в разделе, относящемся к измерениям мощности дозы в воздухе в этих же точках (см. выше). В каждой такой точке отбирали от двух до пяти проб на глубину до 5 см от поверхности, в пределах трехметрового квадрата (там же производили измерения МД – см. выше). С помощью системы GPS определяли координаты пробоотбора. В последующем результаты измерений усредняли по всем отобранным пробам, хотя была отмечена существенная вариабельность результатов измерений даже в пределах одного и того же трехметрового квадрата. Всего было отобрано около 11 тыс. проб почвы для последующего анализа в лабораториях и для подготовки карт радиоактивного загрязнения. Анализ гамма-излучающих радионуклидов (^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{131}I , $^{129\text{m}}\text{Te}$, $^{110\text{m}}\text{Ag}$) проводили в 20 организациях, используя германиевые полупроводниковые детекторы. Анализ альфа-излучающих (^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$) и бета-излучающих радионуклидов (^{89}Sr , ^{90}Sr) проводили в Японском центре химического анализа (Japan Chemical Analysis Center). Общее количество специалистов, принявших участие в анализе, составило 291 чел.

По результатам измерений ^{134}Cs и ^{137}Cs , так же как и по результатам измерений указанных выше радионуклидов, были построены карты пространственного распределения плотности загрязнения почвы радионуклидами. Эти карты представлены на сайте МЕХТ [2]. Однако публикация карт требует авторского разрешения, поэтому здесь и ниже мы приводим их обобщенные характеристики.

Что касается карты радиоактивного загрязнения радиоизотопами цезия, то ее можно охарактеризовать следующим образом. Прежде всего, так же как и в ситуации с измерениями МД в воздухе, реальная карта пространственного распределения плотности загрязнения почвы радиоизотопами цезия не совпадает с круговыми зонами 20 и 30 км. В северо-западном направлении от АЭС наблюдается явно выраженный и узкий радиоактивный след, вплоть до расстояний несколько более 30 км (до 40 км) от станции (район расположения н.п. Иитате) с отдельными квадратами плотности загрязнения почвы как ^{134}Cs , так и ^{137}Cs (отдельно для каждого изотопа) на уровнях от 1000 до более чем 3000 кБк/м² (данные приведены в пересчете на 14 июня 2011 г. – максимальные значения равны $1,4 \times 10^7$ Бк/м² по ^{134}Cs и $1,5 \times 10^7$ Бк/м² по ^{137}Cs). Для

сравнения стоит отметить, что максимальная плотность загрязнения в населенных пунктах после аварии на ЧАЭС отмечена в Брянской области (Россия), а именно – в деревне Заборье, Красногорского района этой области – около 4300 кБк/м² по ¹³⁷Cs (в расчете на 1986 г.) [12].

Кроме того, в Японии имеется след в юго-западном направлении на расстояние до 30 км от АЭС с отдельными квадратами плотности загрязнения почвы как ¹³⁴Cs, так и ¹³⁷Cs (отдельно по каждому нуклиду) на уровнях от 600 до 1000 кБк/м², что совпадает с направлением доминирующих ветров в период аварии. Так же, как и в ситуации с результатами измерений МД в воздухе, следует отметить особенности формирования следа за пределами зоны 30 км (но в пределах радиуса 80 км) в срединной части префектуры Фукусима и в направлении с северо-востока на юго-запад: плотности загрязнения почвы как ¹³⁴Cs, так и ¹³⁷Cs находятся на уровнях 60–600 кБк/м². Аналогично данным по измерениям МД это можно объяснить местными особенностями формирования воздушных потоков и осадков в горных, предгорных и долинных условиях. На остальных территориях плотности загрязнения почвы как ¹³⁴Cs, так и ¹³⁷Cs (отдельно для каждого изотопа) находятся на уровне менее 60 кБк/м², вплоть до уровня менее 10 кБк/м². По состоянию на 14 июня 2011 г. линейная зависимость между суммарной плотностью загрязнения почвы ¹³⁴Cs и ¹³⁷Cs (А) и мощностью дозы в воздухе на высоте 1 метр (D) является следующей: $A(\text{Бк/м}^2) = 276008 \times D (\text{мкЗв/ч})$ при $R^2 = 0,7567$. Отношение плотности загрязнения почвы ¹³⁴Cs к плотности загрязнения почвы ¹³⁷Cs оценено как $0,873 \pm 0,033$ (в пересчете на 11 марта 2011 г., по результатам измерений 619 проб почвы в пределах радиуса 80 км вокруг АЭС и датированных 2011 г.) [2]. Для сравнения – в 1986 г., после аварии в Чернобыле это отношение было оценено как $0,525 \pm 0,07$, что объясняется разным выгоранием топлива в реакторах [13].

Плотность загрязнения почвы ¹³¹I [2]. Методология, территория отбора проб почвы и метод измерения гамма-излучающих радионуклидов описаны выше. Поскольку отбор проб почвы и последующие измерения производили в период с июня по июль 2011 г., то в силу короткого периода полураспада ¹³¹I (восемь суток) пригодными для построения карты радиоактивного загрязнения ¹³¹I оказалось только около 400 точек (locations). Все результаты измерений были пересчитаны к единой дате – 14 июня 2011 г., соответственно этой дате они и будут приведены ниже. Если соотнести эту дату с 11 марта 2011 г. (т.е. к дате начала аварии), то все измеренные активности ¹³¹I следует умножить на фактор 3756. Как уже было отмечено,

публикация карты, представленной на сайте МЕХТ, требует авторского разрешения, поэтому здесь мы приводим ее обобщенные характеристики.

Что касается карты радиоактивного загрязнения ¹³¹I, то ее можно охарактеризовать следующим образом. Прежде всего, так же как и в ситуации с измерениями МД в воздухе, реальная карта пространственного распределения плотности загрязнения почвы ¹³¹I не совпадает с круговыми зонами 20 и 30 км. В северо-западном направлении от АЭС наблюдается явно выраженный и узкий радиоактивный след, вплоть до расстояний несколько более 30 км (до 40 км) от станции (район расположения н.п. Иитате) с отдельными квадратами плотности загрязнения почвы ¹³¹I на уровнях от 2000 Бк/м² до более чем 5000 Бк/м² (данные приведены в пересчете на 14 июня 2011 г., максимальное значение равно $5,5 \times 10^4$ Бк/м², если же пересчитать эти величины на 11 марта, то интервал плотности загрязнения будет составлять 7500 – >18800 кБк/м²). След в юго-западном направлении менее выражен, но в пределах зоны 20 км (прибрежная территория) наблюдаются квадраты с плотностью загрязнения почвы по ¹³¹I от 1000 Бк/м² и до более 5000 Бк/м² (на 14 июня 2011 г.), а в пределах зоны 30 км обозначены плотности загрязнения по ¹³¹I от 500 до 1000 Бк/м². Так же, как и в ситуации с результатами измерений МД в воздухе, следует отметить особенности формирования следа за пределами зоны 30 км (но в пределах радиуса 80 км) в срединной части префектуры Фукусима и в направлении с северо-востока на юго-запад: плотности загрязнения почвы по ¹³¹I находятся на уровнях 100–500 Бк/м². Выделена также территория до 80 км на юг от АЭС (прибрежная зона) с плотностью загрязнения почвы от 100 до 500 Бк/м². Остальная территория характеризуется плотностью загрязнения почвы от 100 Бк/м² до уровней менее 20 Бк/м². Представляют интерес данные об отношениях плотности загрязнения почвы ¹³¹I к таковой по ¹³⁷Cs. Для северо-западного следа это отношение характеризуется величиной 0,059, для юго-западного следа (не далее 34 км от АЭС) – величиной 0,0082, а для южного прибрежного следа (в пределах 34 км расстояния от АЭС) – величиной 0,00244 (все данные приведены по состоянию 14 марта 2011 г.). Эти различия могут быть объяснены следующими причинами: а) разными химическими формами радионуклидов, выброшенных в атмосферу при каждом из последовавших друг за другом радиоактивных выбросов из аварийных реакторов; б) неодинаковыми погодными условиями при выпадениях радионуклидов на почву на разных территориях.

К сожалению, мониторинг загрязнения ¹³¹I не удалось провести в полном объеме из-за короткого периода полураспада этого радионуклида. Первые

результаты, полученные специалистами Японии в ходе работ, нацеленных на реализацию мониторинга ^{129}I , являющегося индикатором выпадений ^{131}I , весьма впечатляют и позволяют надеяться на восстановление утерянной информации; при этом важно отметить, что Правительство Японии планирует провести полномасштабный мониторинг территории Японии по измерениям плотности выпадений на почву долгоживущего ^{129}I , с тем, чтобы дополнить недостающий объем данных о загрязнении окружающей среды этим радионуклидом [8]. Здесь стоит упомянуть, что такого рода начальные попытки были предприняты с той же целью на территориях, загрязненных радионуклидами после аварии на ЧАЭС [14–17], однако до сих пор не получено адекватной финансовой поддержки.

Плотность загрязнения почвы ^{89}Sr и ^{90}Sr [2]. Методология и территория отбора проб почвы описаны выше. Измерения проведены Японским центром химического анализа. Применяли метод радиохимического выделения (навески 30 г от каждой пробы почвы) с последующими измерениями на низкофоновых бета-счетчиках. Минимально детектируемая поверхностная активность для ^{89}Sr равна 300 Бк/м², ^{90}Sr – 40 Бк/м² при времени счета каждой пробы 60 мин. Поскольку подготовка проб и их измерения требовали значительного времени, то из общего количества точек (2200 locations) для анализа было выбрано 100 проб из 100 точек: 59 точек в пределах территории 80 км вокруг АЭС из 59 муниципалитетов, в основном с большой плотностью населения и там, где была зафиксирована наибольшая мощность дозы в воздухе, и 41 точка в муниципалитетах в пределах закрытой для посещения зоны 20 км. Измерения будут продолжены в дальнейшем. Результаты измерений были приведены к 14 июня 2011 г. с учетом периодов полураспада ^{89}Sr и ^{90}Sr (50,53 суток и 28,8 лет соответственно). Не во всех пробах был зарегистрирован ^{89}Sr . Карту пространственного распределения измеренных плотностей загрязнения ^{89}Sr и ^{90}Sr можно охарактеризовать следующим образом.

Так же как и в ситуации с измерениями МД в воздухе, реальная карта пространственного распределения плотности загрязнения почвы ^{89}Sr и ^{90}Sr не совпадает с круговыми зонами 20 и 30 км. В северо-западном направлении от АЭС наблюдается явно выраженный и узкий радиоактивный след, вплоть до расстояний несколько более 30 км (до 40 км) от станции (район расположения н.п. Иитате) с отдельными местами загрязнения почвы ^{89}Sr в диапазоне от 330 до 22000 Бк/м² и ^{90}Sr – от 56 до 6300 Бк/м² (данные приведены в пересчете на 14 июня 2011 г., максимальные значения равны $2,2 \times 10^4$ Бк/м² для ^{89}Sr и $6,3 \times 10^3$ Бк/м² для ^{90}Sr). По следу в южном направлении (вблизи

АЭС и далее – по прибрежной территории) наблюдаются точки с загрязнением ^{89}Sr в диапазоне от 350 до 6300 Бк/м² и ^{90}Sr – от 56 до 1500 Бк/м². Так же, как и в ситуации с результатами измерений МД в воздухе, следует отметить особенности формирования следа за пределами зоны 30 км (но в пределах радиуса 80 км) в срединной части префектуры Фукусима и в направлении с северо-востока на юго-запад, где имеются точки с плотностью загрязнения в интервалах от 500 до 820 Бк/м² по ^{89}Sr и от 59 до 240 Бк/м² по ^{90}Sr . Здесь указаны точки, где было зафиксировано загрязнение обоими радиоизотопами стронция (насчитывается 44 таких точек). В тех же точках, где ^{89}Sr не удалось зарегистрировать, измеренные величины плотности загрязнения почвы ^{90}Sr находились в пределах результатов доаварийных измерений – от 2,3 Бк/м² до 950 Бк/м². Представляет интерес оценка отношения измеренных активностей ^{89}Sr к активностям ^{90}Sr в одних и тех же точках. Это отношение варьирует от 1,9 до 6,5 (в среднем 4,0). Что касается отношения активности ^{89}Sr к активности ^{137}Cs , то эта величина варьирует в значительно более широко – в интервале от $5,6 \times 10^{-4}$ до $1,9 \times 10^{-1}$ (в среднем – $9,8 \times 10^{-1}$). Отношение активности ^{90}Sr к активности ^{137}Cs находится в пределах от $1,6 \times 10^{-4}$ до $5,8 \times 10^{-2}$ (в среднем – $2,6 \times 10^{-3}$). В дальнейшем японские исследователи планируют исследовать причины такой вариабельности.

Данные об измерениях активности ^{238}Pu и $^{239,240}\text{Pu}$ [2]. Методология и территория отбора проб почвы описаны выше. Измерения проведены Японским центром химического анализа. Применяли метод радиохимического выделения (навески 50 г от каждой пробы почвы) с последующими измерениями на полупроводниковых детекторах. Минимально детектируемая поверхностная активность равна 0,5 Бк/м² для всех измеряемых изотопов плутония. Поскольку подготовка проб и их измерения требовали значительного времени, то из общего количества точек (2200 locations) для анализа было выбрано 100 проб из 100 точек: 59 точек в пределах 80 км территории вокруг АЭС из 59 муниципалитетов, в основном с большой плотностью населения и там, где была зафиксирована наибольшая мощность дозы в воздухе, и 41 точка в муниципалитетах в пределах закрытой для посещения 20-км зоны. Результаты измерений были приведены к 14 июня 2011 г. с учетом периода полураспада ^{238}Pu (87,7 лет). Следует отметить, что в период с 1999 по 2008 г. в Японии были проведены измерения доаварийных плотностей загрязнения почвы ^{238}Pu и $^{239,240}\text{Pu}$ (252 пробы). Средняя плотность загрязнения ^{238}Pu равна 0,498 Бк/м², а $^{239,240}\text{Pu}$ – 17,8 Бк/м². При этом установлена четкая корреляция между плотностями загрязнения почвы ^{238}Pu (A_{238}) и $^{239,240}\text{Pu}$ ($A_{239,240}$): $(A_{238} \text{ (Бк/м}^2) = 0,0261 \times A_{239,240} \text{ (Бк/м}^2)$, при

$R^2 = 0,7830$. В результате принято, что среднее по стране отношение активностей этих радионуклидов равно 0,0261. Именно с учетом этих данных и следует интерпретировать результаты послеаварийных измерений радиоизотопов плутония. Для послеаварийных измерений отношение активностей в диапазоне от 0,33 до 2,2 было установлено только для 5 точек на северо-западном следе, что и послужило основанием полагать их аварийное происхождение. Что касается абсолютных значений измеренных плотностей загрязнения, то они не превышали доаварийных уровней. Максимальные значения равны 4,0 Бк/м² для ²³⁸Pu и 15,0 Бк/м² для ^{239,240}Pu) Измерения остальных имеющихся проб почвы будут продолжены японскими специалистами в дальнейшем.

Данные об измерениях активности ^{129m}Te и ^{110m}Ag [2]. Методология отбора проб почв и методы гамма-спектрометрии описаны выше. В процессе гамма-спектрометрического анализа активностей радионуклидов йода и цезия было установлено наличие в спектрах излучений гамма-линий от ^{129m}Te (период полураспада 33,6 сут) и ^{110m}Ag (период полураспада 249,95 сут). Было принято решение провести соответствующие измерения активностей этих радионуклидов. Всего было проанализировано около 800 точек (locations) по ^{129m}Te и около 350 точек по ^{110m}Ag. Результаты измерений активности, приведенные к 14 июня 2011 г., были представлены в виде карт пространственного распределения плотности загрязнения почвы и имеются на сайте МЕХТ [2]. Так же как и в ситуации с измерениями мощности дозы в воздухе, реальная карта пространственного распределения плотности загрязнения почвы ^{129m}Te и ^{110m}Ag не совпадает с круговыми зонами 20 и 30 км.

Что касается пространственного распределения плотности загрязнения почвы ^{129m}Te, то его можно охарактеризовать следующим образом (данные приведены в пересчете на 14 июня 2011 г.). В северо-западном направлении, в пределах зоны 20 км, плотность загрязнения почвы находится в интервале от 500 до >1000 кБк/м² (максимальное значение равно $2,7 \times 10^6$ Бк/м²), а в северном направлении (вдоль побережья) на расстояниях до 30–40 км от АЭС уровни загрязнения составляют от 50 до 500 кБк/м². Юго-западное и южное направление, вплоть до расстояний 80 км от АЭС, характеризуются плотностями загрязнения почвы от 20 до > 1000 кБк/м² (максимальные значения — вблизи АЭС). Следует также охарактеризовать величины отношений активности ^{129m}Te к активности ¹³⁷Cs (данные в пересчете на 14 июня 2011 г.). Среднее отношение плотности загрязнения почвы ^{129m}Te к таковой по ¹³⁷Cs равно 0,19 на территориях, расположенных к северу от АЭС, а

на прибрежных территориях к югу от АЭС оно равно 0,88.

Пространственное распределение плотности загрязнения ^{110m}Ag характеризуется следующим образом (по состоянию на 14 июня 2011 г.). В северо-западном направлении, в пределах зоны 30 км, загрязнение находится в интервале от 5 до >10 кБк/м² (максимальное значение равно $8,3 \times 10^4$ Бк/м²). На юг, в пределах зоны 20 км, обозначены отдельные точки в пределах от 2 до >10 кБк/м². Так же, как и в ситуации с результатами измерений МД в воздухе, следует отметить особенности формирования следа за пределами зоны 30 км (но в пределах радиуса 80 км) в срединной части префектуры Фукусима и в направлении с северо-востока на юго-запад, где имеются точки с плотностью загрязнения ^{110m}Ag интервале 0,2 до 2 кБк/м². Остальная территория в пределах зоны 80 км характеризуется уровнями менее 0,2 кБк/м². Не установлено достоверной корреляции между плотностью загрязнения почвы ^{110m}Ag и таковой для ¹³⁷Cs.

Дополнительные данные о радиоактивном загрязнении территории Японии [2]. Начиная с 7 октября 2011 г. и в первой половине 2012 г. усилиями МЕХТ был проведен аэро-гамма-мониторинг практически всей территории Японии с целью уточнения данных о радиоактивном загрязнении радиоизотопами ¹³⁴Cs и ¹³⁷Cs. Использовали гамма-спектрометрические системы мониторинга Министерства энергетики США (U.S. DOE), МЕХТ, корпорации OYO (Япония) и австралийской компании FUGRO, установленные на борту частных вертолетов Bell412SP, Bell412, AS350B3, AS350B1 и Sikorsky S-76. Результаты мониторинга по данным спектрометрии пересчитывали на мощность дозы на высоте 1 м над поверхностью, а также на плотность загрязнения ¹³⁴Cs и ¹³⁷Cs. Высота полетов варьировала от 150 до 300 м. Данные усредняли по площади с диаметром от 300 до 600 м (в зависимости от высоты полета). Ширина трека мониторинга при каждом полете составляла приблизительно 3–5 км, а в высокогорных областях (более 2000 м над уровнем моря) мониторинг не производился. Все результаты были проанализированы Агентством по атомной энергии Японии (Japan Atomic Energy Agency). Подробные данные представлены на сайте МЕХТ [2] в виде карт радиоактивного загрязнения радиоизотопами ¹³⁴Cs и ¹³⁷Cs и карт пространственного распределения мощности дозы в воздухе на высоте 1 м. Здесь достаточно отметить следующее.

Данные мониторинга в префектурах Аичи, Аомори, Ишикава и Фукуи (Aichi, Aomori, Ishikawa, Fukui) были получены в период с 7 октября по 1 ноября 2011 г. (всего 48 полетов). Данные мониторинга в регионе Кюшу (Kyushu) и префектуре Окинава были получены в период с 30 января по 29 марта 2012 г.

(всего 56 полетов). Соответствующие данные в регионе Чугоку (Chugoku), включающий префектуры Симане, Хиросима, Ямагути и Окаяма, получены в период с 12 февраля по 14 марта 2012 г. (всего 20 полетов), в регионе Сикоку (Shikoku – западная часть) – в период с 10 февраля по 28 февраля 2012 г. (всего 43 полета), а на Хоккайдо – с 24 апреля по 31 мая 2012 г. (всего 71 полет). На всех указанных территориях плотность загрязнения радиоизотопами ^{134}Cs и ^{137}Cs не превышала 30 кБк/м^2 (при минимуме на уровне глобальных выпадений ^{137}Cs).

Загрязнение океанской воды. Известно, что одним из важнейших компонентов пищевого рациона в Японии являются морепродукты. Поэтому загрязнение океанской воды представляет особый интерес. Данное обстоятельство отличает ситуацию после аварии на Фукусиме-1 от ситуации после аварии в Чернобыле, поскольку для жителей загрязненных территорий Белоруссии, России и Украины характерен мясо-молочный и растительный рацион. Тем не менее, загрязнение океанской воды и морепродуктов может представлять интерес для их потребителей в России.

Поскольку АЭС находилась в прибрежной зоне, были определены уровни загрязнения океанской воды в районе АЭС. Это загрязнение могло иметь место не только и не столько за счет выпадения радионуклидов из атмосферы на воду, а из-за попадания в океан очень загрязненной воды из реакторных зданий и турбинных залов. Данные о сбросах в прибрежную акваторию радиоактивно загрязненной воды в острый период после аварии представлены выше. С радиозоологической точки зрения наибольший интерес представляют данные о загрязнении осадков на дне океана, поскольку они являются начальным звеном поступления активности в организм человека по пищевой цепочке морепродукты – человек. Важна также информация о загрязнении водорослей и моллюсков в прибрежной зоне океана, являющихся весьма популярными компонентами в рационе питания как в Японии, так и в некоторых регионах Российской Федерации. Все эти данные будут представлены во втором нашем сообщении.

Результаты измерений активности водных проб, представленные ТЕРСО (данные по состоянию до середины октября 2011 г. [1]) показывают следующее.

Вблизи сливной трубы от АЭС (в точках, находящихся на расстояниях 330 м на юг от станции и 30 м на север от станции) были зарегистрированы следующие максимумы удельной активности радионуклидов, приходящиеся на 30 марта 2011 г.: около 180 кБк/л для ^{131}I и около 47 кБк/л для ^{134}Cs и ^{137}Cs . В дальнейшем активность воды экспоненциально уменьшилась. К середине июня активность ^{131}I сни-

зилась до уровней 6 Бк/л , что является пределом детектируемости, а активность ^{134}Cs и ^{137}Cs достигла предела детектируемости к началу октября 2011 г. Для более удаленных точек от АЭС (10 км и 16 км на юг) активность ^{131}I снизилась до уровней 6 Бк/л к началу мая, а активность ^{134}Cs и ^{137}Cs снизилась до этого уровня к середине июля 2011 г. При этом следует отметить, что официально установленные после аварии предельные уровни загрязнения морской воды составляют 40 Бк/л для ^{131}I , 60 Бк/л для ^{134}Cs и 90 Бк/л для ^{137}Cs .

Данные для еще более удаленных точек от АЭС были представлены на сайте МЕХТ (сведения по состоянию до середины октября 2011 г.)

Измерения проводили начиная с 23 марта 2011 г. в 28 точках, отстоящих на расстояниях от 35 до 60 км от АЭС. Максимумы удельной активности ^{131}I (в пределах $35\text{--}160 \text{ Бк/л}$) были зарегистрированы в поверхностных пробах воды в середине апреля в трех точках, находящихся на расстояниях $35\text{--}40 \text{ км}$ прямо напротив АЭС. В тот же период времени в одной из этих точек максимальная зарегистрированная активность составляла 165 Бк/л для ^{134}Cs и ^{137}Cs . В дальнейшем, к 11 мая 2011 г., в точках, где ранее было зарегистрировано максимальное содержание радионуклидов цезия, их активность снизилась до 10 Бк/л , а к концу мая – началу июня активность всех радионуклидов в этих точках была ниже предела детектируемости. В остальных точках измерений активности всех радионуклидов также были ниже этого предела.

Что касается придонных вод, то на 28 марта 2011 г. удельная активность в этих точках не превышала 13 Бк/л для ^{137}Cs и 6 Бк/л для ^{131}I . К середине мая активности радионуклидов в придонных водах были ниже предела детектируемости (6 Бк/л).

Измерения донных осадков, которые в этих водах имеют песчаную основу, показывают следующее. 24 мая 2011 г. в точке, где были выявлены наибольшие активности радиоизотопов в водных пробах (на удалении 30 км на восток напротив АЭС) измеренная удельная активность донных осадков (глубина 126 м) составляла 160 Бк/кг и 210 Бк/кг для ^{134}Cs и ^{137}Cs соответственно. Активность ^{131}I была ниже 6 Бк/кг . К 6 июля активность радиоизотопов цезия уменьшилась до $90\text{--}110 \text{ Бк/кг}$. Здесь следует отметить для сравнения, что загрязнения почвы в точках, удаленных от станции на 30 км , значительно выше, чем загрязнение данных осадков, удаленных на такое же расстояние. Так, максимальная удельная активность ^{137}Cs в пробах почвы в районе населенного пункта Сукагава составляет около 40000 Бк/кг , а максимальная активность в пробах почвы вблизи н.п. Иитате достигает 140000 Бк/кг (эти измерения датируются 5 мая 2011 г.).

Заключение

1. Причиной радиационной аварии на АЭС Фукусима-1 являются не человеческие или техногенные факторы, а не имевшая прецедентов природная катастрофа – волны цунами высотой более 14 метров, образовавшиеся после землетрясения магнитудой 9,0 баллов, (предусмотренная защита АЭС проектировалась на волну высотой около 6,5 м). Последовавшее нарушение системы водного охлаждения реакторов блоков 1, 2, 3 АЭС, перегрев активной зоны реакторов и взрывы водорода, образовавшегося в результате высокотемпературной паро-циркониевой реакции, привели к разрушению активных зон и выбросам радиоактивных веществ в окружающую среду.
2. В течение первых месяцев после аварии японские специалисты провели беспрецедентные и очень детальные исследования радиационной обстановки вокруг аварийной АЭС. Эти данные являются чрезвычайно ценными для дальнейших работ по ликвидации последствий аварии. К сожалению, мониторинг загрязнения ^{131}I не удалось провести в полном объеме из-за короткого периода полураспада этого радионуклида. Планы, нацеленные на реализацию мониторинга ^{129}I , являющегося индикатором выпадений ^{131}I , весьма впечатляют и являются надеждой на восстановление утерянной информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. TEPCO (2011). Tokyo Electric Power Company, Radiation dose measured at monitoring post of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. 2011. // <http://www.tepco.co.jp/cc/press/index1103-j.html>
2. МЭХТ (2011). Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology. // <http://radioactivity.mext.go.jp/en/monitoring> around Fukusima NPP.
3. Hoshi M. Dosimetry study and its meanings – From the studies of Hiroshima and Nagasaki, Semipalatinsk, Chernobyl and Fukushima. // Proc. of the 17th Hiroshima Internat. Symp.: Lessons from unhappy events in the history of nuclear power development. Ed. by Hoshi M., Imanaka T. – Hiroshima: Hiroshima University, 2012, P. 1–10.
4. Imanaka T. An attempt to estimate early-satage radiation exposure dose at the location of every household in Iitate village, Fukushima. // Nuce Info Tokyo, 2013, No 153, P. 4–7.
5. Yomiuri Shimbun. Fukushima Govt deleted SPEEDI data. The Yomiuri Shimbun, March 22, 2012.
6. Japanese Society of Obstetrics and Gynecology. To those concerned with the safety of tap water: a notice to pregnant or breastfeeding women. // http://www.jsog.or.jp/news/pdf/announce_20110324.pdf
7. JRS (2011). Japan Radiological Society. A notice to those who are pregnant or who have children: health effects of tap water. // <http://www.radiology.jp/modules/news/article.php?storyid=912>
8. Government of Japan. The accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Station. Report of the Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety (with revisions). // Nuclear Emergency Response Headquarters. Government of Japan. June 2011. Transmitted by Permanent Mission of Japan to IAEA, 7 June 2011.
9. Израэль Ю.А. Инструкция по наземному обследованию радиационной обстановки на загрязненной территории. – Госкомгидромет СССР, М., 1989.
10. Степаненко В.Ф., Яськова Е.К., Кадиев А.Ю. и соавт. Загрязнение радионуклидами территории Республики Дагестан вследствие Чернобыльской аварии и оценка доз облучения населения. // Мед. радиол. и радиац. безопасность. 2011, **56**, № 2, С. 11–16.
11. Fukushima Prefecture // wwwcms.pref.fukushima.jp
12. Степаненко В.Ф., Орлов М.Ю., Петин Д.В. и соавт. Ретроспективная индивидуальная дозиметрия в населенном пункте с высоким радиоактивным загрязнением. // Атомная энергия. 2003, **95**, № 1, С. 60–67.
13. Вакуловский С.М., Орлов М.Ю., Сныков В.П. Оценка состояния аварийного реактора 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС по отношению активностей выброшенных радионуклидов. // Атомная энергия. 1991, **70**, № 4, С. 230–234.
14. Гаврилин Ю.И., Волков В.Я., Макаренко И.И. Ретроспективное восстановление интегральных выпадений йода-131 по населенным пунктам Брянской области России на основе результатов определения в 2008 г. содержания йода-129 в почве. // Радиационная гигиена, 2009, **2**, № 3, С 38–44.
15. Гаврилин Ю.И. Методы и результаты ретроспективного восстановления доз внутреннего облучения щитовидной железы для жителей загрязненных в результате аварии на ЧАЭС территорий. // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности, 2009, № 1, С. 25–34.
16. Straume T., Marchetti A.A., Anspaugh L.R. et al. The feasibility of using ^{129}I to reconstruct ^{131}I deposition from the Chernobyl reactor accident. // Health Phys., 1996, **71**, No. 5, P. 733–740.
17. Hoshi M., Stepanenko V.F., Gavrilin Yu.I. et al. I–129 and I–131 ground deposition densities are correlated in Belarusian settlements contaminated following the Chernobyl accident. // Chernobyl: message for the 21st Century. – Amsterdam: Elsevier Science, International Congress Series, 2002, P. 38–42.

Поступила: 21.05.2013.

Принята к публикации: 15.10.2013.

Ю.Е. Квачева¹, В.Н. Яценко¹, А.Г. Глазунов²

РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ МЕДИЦИНСКОГО ПЕРСОНАЛА ПАТОЛОГОАНАТОМИЧЕСКОЙ И СУДЕБНО-МЕДИЦИНСКОЙ СЛУЖБ ПРИ АУТОПСИЯХ ТРУПОВ ЛИЦ, ПОДВЕРГШИХСЯ ВОЗДЕЙСТВИЮ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Yu.E. Kvacheva¹, V.N. Yatsenko¹, A.G. Glazunov²

Radiation Safety of Medical Personnel in Pathology and Forensic Medicine Autopsies of Individuals Exposed to Ionizing Radiation

РЕФЕРАТ

Цель: Изучить актуальные вопросы обеспечения радиационной безопасности медицинского персонала патологоанатомической и судебно-медицинской служб при производстве аутопсий трупов лиц, подвергшихся аварийному или терапевтическому воздействию источников ионизирующего излучения.

Результаты и заключение: На основании обобщения личного опыта авторов и данных литературы представлен комплекс защитных мероприятий, включая использование средств и технологий коллективной и индивидуальной защиты, наличие и непрерывное функционирование системы дозиметрического контроля, планирование и проведение конкретных организационных мероприятий, а также обучение персонала танатологических отделений радиационно-безопасным приемам и методам работы. Сделано заключение о необходимости дополнения сложившегося на практике комплекса мер гигиеническими регламентами с разработкой типовой инструкции.

Ключевые слова: радиационная безопасность, медицинский персонал, аутопсия, патологоанатомы, судебно-медицинские эксперты

ABSTRACT

Purpose: To investigate the actual problem of radiation safety for medical personnel dealing with pathology and forensic medicine autopsies of those who were exposed to accidental or therapeutic irradiation.

Results and Conclusion: On the basis of author's experience and literature analysis it has been shown that radiation safety of prosectory staff could be achieved with a system of special measures including arrangements of collective and individual protection, radiation control, organizational matters, as well as, personnel training and needs to be supplemented with hygienic regulations and special instructive documents.

Key words: radiation safety, medical personnel, autopsy, pathologists, forensic medical experts

Введение

Случаи смерти пострадавших вследствие различного рода радиационных инцидентов и аварий относительно редки, однако с определенной регулярностью встречаются в практике работы медицинского персонала прозекторских служб, осуществляющих аутопсийные исследования тел погибших. В частности, согласно данным публикации [1], за годы, прошедшие после катастрофы на Чернобыльской АЭС, жертвами которой стали 29 человек, общее число летальных исходов аварийных переоблучений в разных странах мира составили 38 наблюдений. При этом, по прогнозам международных экспертов [2], очевидной остается вероятность их дальнейшего роста в резуль-

тате радиационных аварий различного типа, а также возможных террористических атак, в т.ч. по сценарию массовых поражений.

Помимо названных, в последние годы в работе прозекторов участились случаи вскрытий тел пациентов, прижизненно подвергавшихся диагностическим или лечебным процедурам с использованием открытых либо имплантированных в организм больного закрытых радионуклидных источников (т.н. «радиоактивные тела»). Так, по данным авторов работы [3], обобщивших опыт наблюдений за больными, получавшими лучевую терапию методом внутритканевого облучения ¹²⁵I по поводу злокачественных новообразований предстательной железы, число пациентов, скончавшихся в течение первых 12 месяцев после

¹ Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва.

² Бюро Главной судебно-медицинской экспертизы ФМБА России, Москва. E-mail: vlad-yatsenko@mail.ru

¹ Burnazyan Federal Medical Biophysical Center of FMBA, Moscow, Russia

² Central Bureau of Forensic Medical Expertise of FMBA, Moscow, Russia. E-mail: vlad-yatsenko@mail.ru

имплантации источников ионизирующего излучения (ИИИ), превысило сорок человек (44 случая).

Тела всех умерших при обозначенных выше обстоятельствах подлежат обязательному патологоанатомическому, а при возбуждении в установленном порядке уголовного дела – судебно-медицинскому секционному исследованию. При этом в функциональные обязанности прозектора входит не только установление причины смерти больного, но и изъятие на вскрытии имплантированных радионуклидных источников либо органов, содержащих наибольшую остаточную радиоактивность, для погребения тела покойного в соответствии с обычаями населения конкретного региона (захоронение, кремация) и предотвращения радиоактивного загрязнения окружающей среды.

Вместе с тем, вопросы обеспечения радиационной безопасности *per se* медицинского персонала названных служб здравоохранения при выполнении подобных аутопсий остаются пока вне фокуса внимания авторов современных руководств по радиационной гигиене [4] и секционной технике [5]. До настоящего времени для этой профессиональной группы медицинских работников не разработаны и типовые отраслевые инструкции [6]. Всё вышесказанное побудило нас обобщить собственный опыт работы, а также данные литературы по тематике, заявленной в названии настоящей статьи, что и явилось целью ее написания.

Результаты и обсуждение

Для своевременного принятия решения по обеспечению радиационной безопасности медицинского персонала прозекторских служб перед началом аутопсии необходимо иметь объективную и исчерпывающую информацию о характере и виде радиационного воздействия, имевшего место при жизни умершего пациента. С учетом этого обстоятельства все секционные исследования представляется возможным условно разделить на 2 категории: плановые и поставарийные (постакцидентальные) аутопсии, неравнозначные с позиций оценки степени потенциальной опасности.

Плановые аутопсии «радиоактивных тел», как правило, имеют меньшую потенциальную опасность ввиду того, что вся необходимая информация о радиационных параметрах прижизненных лечебно-диагностических процедур предоставляется (должна быть предоставлена) прозектору до начала вскрытия: сведения об использованных источниках излучения вносятся в персональный лист учета медицинского облучения, который является обязательным приложением к истории болезни / амбулаторной карте больного.

При аутопсиях, отнесенных ко второй категории, т.е. поставарийных, объективная исчерпывающая информация о характере прижизненного радиационного воздействия (от внешнего источника, инкорпорации радиоактивных веществ либо их сочетания) в значительной части случаев может отсутствовать, либо быть представленной весьма фрагментарно. В этой связи, перед началом секционного исследования обязательным является дозиметрический контроль трупа, осуществляемый службой радиационной безопасности медицинского учреждения или специально выделенным должностным лицом с применением соответствующих приборов, методик и расчетных методов.

Дозиметрические измерения интенсивности излучения проводят на рабочем месте персонала (у секционного стола) на уровне 0,01 и 0,5 м от тела покойного.

В случаях установленного аварийного внешнего облучения γ , β – излучением экспертизу трупа производят обычным порядком. При обнаружении поверхностного радиоактивного загрязнения трупа осуществляют его полную санитарную обработку, для чего загрязненные участки кожного покрова подвергают троекратной помывке с применением бытовых моющих средств (хозяйственного мыла и/или стирального порошка). Как свидетельствует собственный опыт работы, подобная процедура, как правило, снижает степень радиоактивного загрязнения на 80–85 %. Повысить эффективность дезактивации до 95–98 % позволяет дополнительная обработка кожного покрова трупа с помощью специальных средств очистки от радиоактивных загрязнений (препарат «Защита», паста «Радез»).

Загрязнение трупа радиоактивными веществами считается опасным для работы медицинского персонала, если мощность экспозиционной дозы на расстоянии 1–1,5 см от поверхности тела превышает 1–2 мЗв/ч [7]. В случаях, когда перечисленные выше мероприятия не обеспечивают соблюдения допустимых уровней облучения медицинского персонала (в отдельных наших поставарийных наблюдениях, представленных в табл. 1, отмечалось их многократное превышение), организация работ должна быть направлена на сокращение пребывания персонала в поле излучения источника (т.е. тела умершего человека). Для этого назначают контрольное время работы с трупом и формируют необходимое количество прозекторских бригад, в состав каждой из которых должны входить не менее двух врачей, лаборант и санитар.

Существенное место в системе обеспечения радиационной безопасности прозекторов занимают также вопросы индивидуального дозиметрического контроля. Все врачи и средний медицинский персонал,

Таблица 1

Мощности доз гамма-излучения (мкЗв/ч) на расстоянии 0,01 м от тел погибших в результате аварии на Чернобыльской АЭС (отдельные аутопсийные исследования)

Часть тела	Аутопсийные исследования					
	№ 5	№ 11	№ 15	№ 22	№ 23	№ 24
Голова	290	0,4	14400	0,35	0,25	0,6
Шея (область проекции щитовидной железы)	22–32	0,5	2900	–	0,25	4,0
Грудь	430	0,5	1800	0,5	0,2	4,0
Низ живота	470	0,4	1800	0,5	0,2	1,7
Кисти рук	–	–	15100	0,5	0,2	3,0
Стопы	43	–	1400	3,0	0,2	2,0

непосредственно участвующие в аутопсиях «радиоактивных тел», должны быть обеспечены индивидуальными дозиметрами с регистрацией индивидуальных доз в журнале и базе данных. При этом особое внимание необходимо уделять размещению индивидуальных дозиметров. Учитывая, что при проведении такого рода вскрытий медицинский персонал прозектур выполняет целый ряд последовательных операций, характеризующихся, во-первых, неоднородным облучением работающих и, во-вторых, значительной вариабельностью мощностей доз и продолжительности исследований на рабочих местах, наиболее целесообразным, как показывает опыт, является ношение двух индивидуальных дозиметров (сочетание грудь – пальцы рук).

Все работы по вскрытию проводят с использованием средств индивидуальной защиты (СИЗ). В соответствии с «Номенклатурой...» [8], разработанной в Федеральном медико-биологическом агентстве России, в состав комплекта СИЗ должны входить спецодежда (нательное белье, костюм, халат, медицинская шапочка), спецобувь (резиновые сапоги) и дополнительные средства защиты (пластиковый фартук и нарукавники). Ввиду возможного загрязнения воздуха рабочих помещений секционной радиоактивными веществами следует применять средства индивидуальной защиты органов дыхания – изолирующие (респираторы), а при необходимости – и фильтрующие СИЗ. Особое внимание, учитывая значительность объема рабочих операций, выполняемых вручную, а также высокую вероятность образования механических повреждений, необходимо уделять защите рук работающих. Как свидетельствует наш опыт, в поисках путей по повышению эффективности защитных мероприятий дополнительные преимущества предоставляет одновременное использование двух пар печаток (т.н. double-gloving) с разными значениями колор-индекса, что позволяет быстро обнаруживать возникшие повреждения и производить замену перчаток.

Одной из основных частей системы обеспечения радиационной безопасности являются мероприятия по организации секционных работ. Аутопсии «радиоактивных тел» следует проводить в помещениях специализированных прозектур или специально отведенных секционных комнатах патологоанатомических (судебно-медицинских) отделений обычных прозектур. В них пол, стены и потолок должны иметь влагостойкие, слабосорбирующие покрытия, допускающие проведение мероприятий по очистке и дезактивации и быть оборудованными санитарно-техническими устройствами спецканализации. При выполнении аутопсийных исследований во временно выделенных помещениях секционный стол и другие рабочие поверхности, а также пол покрывают прочным пленочным материалом, предусматривая простейшие варианты условного разделения на зоны, позволяющие изолировать наиболее опасные операции. Кроме того, перед началом работ следует предусмотреть наличие герметичных емкостей-контейнеров для сбора жидких и твердых радиоактивных биологических и иных отходов с последующей их отправкой на централизованные пункты захоронения.

По окончании процедуры вскрытия обязательными являются мероприятия по дезактивации секционных комнат, осуществляемые путем мытья поверхностей стен, потолка и пола с применением моющих средств бытового и специального назначения и последующим их струйным отмыванием. Такие же дезактивационные мероприятия проводят в подсобных помещениях и трупохранилищах. В течение всего времени нахождения трупов в морге до окончания дезактивационной обработки все задействованные помещения ограждаются стандартными предупредительными знаками «Радиационная опасность», посещение их строго контролируется и осуществляется по типу санпропускника. На выходе из секционного блока организуется пост дозиметрического контроля.

Важная роль в системе обеспечения радиационной безопасности медицинского персонала прозек-

тур отводится радиационно-безопасным приемам и методам секционных исследований. Учитывая, что при инкорпорации радионуклидов многие из них избирательно накапливаются в т.н. критических органах, обуславливая наибольший уровень их излучения, положительную санитарно-гигиеническую оценку получил метод отдельной эвисцерации. Например, при инкорпорации ^{131}I на начальном этапе аутопсии целесообразно удалить из трупа щитовидную железу, поместив её в отдельную емкость-контейнер. Аналогичным образом поступают с печенью и сердцем при проникновении в кровь ^{241}Am , ^{239}Pu , ^{144}Ce и ^{137}Cs соответственно.

К использованию в работе рекомендуются также методические приемы, направленные на минимизацию распространения радиоактивного загрязнения. В частности, вскрытие позвоночного канала целесообразно производить спереди, что устраняет надобность в переворачивании трупа и тем самым исключает истекание вонне крови из разреза. Кроме того, особые предосторожности следует соблюдать при выполнении рабочих процедур, связанных с возможным образованием радиоактивных аэрозолей. Например, при распилах костей в случаях инкорпорации остеотропных радионуклидов необходимо обеспечивать герметизацию рабочего пространства зоны распила при помощи устройств специальной конструкции (тенты) [9] либо подручных средств (плотный изолирующий материал).

Аналогичные по своему характеру меры по исключению распространения радиоактивных веществ в окружающую среду и их попадания в организм работающих следует предусматривать в случаях плановых аутопсийных исследований, когда умершие пациенты прижизненно подвергались лечению с использованием открытых источников излучения. В отношении ряда наиболее широко используемых в медицинской практике радиоизотопов МАГАТЭ рекомендованы следующие уровни остаточной радиоактивности тел умерших, допустимые для производства аутопсий [10]: для ^{32}P – 100 МБк, ^{89}Sr – 50 МБк, ^{90}Y – 200 МБк, ^{131}I – 10 МБк. Определены также уровни остаточной радиоактивности трупов, не требующие получения специального разрешения на захоронение и кремацию тел покойных (табл. 2).

При аутопсийных исследованиях трупов лиц с имплантированными закрытыми источниками излучения врачи и средний медицинский персонал (при условии отсутствия нарушений в работе) могут подвергаться только внешнему фотонному облучению. Поэтому все защитные мероприятия проводятся с учетом этого обстоятельства. Основными радиационно-опасными операциями, при которых возникает риск переоблучения персонала, являются манипуля-

Таблица 2

Допустимые уровни остаточной радиоактивности (МБк) тел умерших людей при применении в медицинских целях отдельных радионуклидов (по данным публикации [10] МАГАТЭ)

Радионуклид	Допустимый уровень остаточной радиоактивности, МБк		
	Аутопсия	Захоронение	Кремация
^{32}P	100	2000	30
^{89}Sr	50	2000	20
^{90}Y	200	2000	70
^{131}I	10	400	400

ции по извлечению источников излучения (при использовании малоразмерных источников содержащий их орган извлекается целиком), перекладывание их в защитные контейнеры и передача источников в комплекс хранения до решения вопроса о захоронении в установленном порядке. Важно подчеркнуть, что при безаварийном извлечении закрытых источников из тела умершего пациента дозы тотального облучения медицинского персонала прозектуры, как правило, не превышают 15 % предела дозы профессионального облучения, хотя возможно переоблучение кистей рук, прежде всего концевых фаланг пальцев [11, 12].

Вместе с тем, от прозектора требуется обязательное знание технологических особенностей извлечения источников различной конфигурации (наибольшую потенциальную опасность представляют препараты в виде отрезков тонкой проволоки [11]), а также путей возможной миграции радионуклидных имплантатов. Так, при установке перманентных гранульных ^{125}I -источников в опухолевые ткани предстательной железы примерно у четверти (24,7 %) больных уже в первые две недели имеет место миграция части радиоактивных «зёрен», основными анатомическими мишенями которой становятся грудная, брюшная и тазовая полости тела [13]. Поиски радиоактивных гранул-мигрантов способны существенным образом увеличивать «активное» время работы с трупом, а, следовательно, и дозовые нагрузки медицинского персонала. Наконец, следует учитывать незначительную вероятность возникновения нештатных ситуаций, связанных с потерей источника излучения (особенно при работе с малоразмерными источниками) или его разгерметизацией, что может привести к радиоактивному загрязнению рабочих поверхностей секционных комнат, инструментов, спецодежды и кожи работающих, а также окружающей среды. Данное обстоятельство требует особой четкости действий персонала при выполнении не только секционных (макроскопических) процедур, но и при

рабочих операциях с кусочками тканей и органов трупа, когда таковые изымаются для гистологического (микроскопического) исследования.

Заключение

Медицинский персонал патологоанатомической и судебно-медицинской служб в случаях производства аутопсий трупов лиц, прижизненно подвергавшихся аварийному или терапевтическому воздействию открытых (закрытых) ИИИ, предлагается рассматривать как отдельную категорию медицинских работников по роду своей профессиональной деятельности контактирующих с источниками ионизирующих излучений.

Обеспечение радиационной безопасности персонала названных служб здравоохранения, как показывает практический опыт авторов исследования, достигается комплексом защитных мероприятий, включая использование средств и технологий коллективной и индивидуальной защиты, наличие и непрерывное функционирование системы дозиметрического контроля, планирование и проведение конкретных организационных мероприятий, а также обучение персонала радиационно-безопасным приемам и методам работы.

Для повышения эффективности системы сложившихся на практике защитных мер представляется целесообразным дополнение её необходимыми гигиеническими регламентами с разработкой типовой инструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Turai I., Veress K.* Radiation accidents: occurrence, types, consequences, medical management, and lessons to be learned. // CEJOEM, 2011, **7**, No. 1, P. 3–14.
2. *Weinstock D.M., Case C., Bader J.L. et al.* Radiological and nuclear events: contingency planning for hematologists / oncologists. // Blood, 2008, **111**, No. 12, P. 5440–5445.
3. *Satoh T., Yamanaka H., Yamashita T. et al.* Deaths within 12 months after ¹²⁵I implantation for brachytherapy of prostate cancer: an investigation of radiation safety issues in Japan (2003–2010). // Brachytherapy, 2012, **11**, No. 3, P. 192–196.
4. *Коренков И.П., Степанов С.В.* Гигиена труда при использовании источников ионизирующего излучения в медицине. // В кн. «Радиационная медицина». Под ред. Л.А. Ильина. – М.: ИздАТ, 2002, Т. 3, С. 157–171.
5. *Пальцев М.А., Коваленко В.Л., Аничков Н.М.* Руководство по биопсийно-секционному курсу, 2-е изд., стереотип. – М.: Медицина, 2004, 256 с.
6. *Михайлов Ю.М.* Охрана труда в медицинских учреждениях, 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство «Альфа-Пресс», 2011, 240 с.
7. *Иванов А.Е., Мудрецов Н.И., Куршакова Н.Н.* Патологическая анатомия острой лучевой болезни (практическое руководство для патологоанатомов и судебно-медицинских экспертов). – М.: Военное издательство, 1987, С. 157–158.
8. Нормативно-методический документ «Номенклатура аварийных комплектов медикаментов, средств индивидуальной защиты, приборов, средств дезактивации и средств связи для персонала ЦМСЧ (МСЧ), центров профессиональной патологии и ЦГСЭН Федерального управления «Медбиоэкстрем» на случай радиационных аварий». – М.: ФУ «Медбиоэкстрем», 2000.
9. *Towfighi J., Roberts A.F., Foster N.E., Abt A.B.* A protective device for performing cranial autopsies. // Hum. Pathol., 1989, **20**, No. 3, P. 288–289.
10. International Atomic Energy Agency (IAEA). Information for professionals – therapeutic nuclear medicine – accidents and incidents. http://rpop.iaea.org/RPOP/RPOP/Content/InformationFor/HealthProfessionals/3_NuclearMedicine/TNM_AccIncidents.htm.
11. *Singleton M., Start R.D., Tindale W. et al.* The radioactive autopsy: safe working practices. // Histopathology, 2007, **51**, No. 3, P. 289–304.
12. *Jankowski J., Olszewski J., Kluska K.* Distribution of equivalent doses to skin of the hands of nuclear medicine personnel. // Radiat. Protect. Dosimetry, 2003, **106**, No. 2, P. 177–180.
13. *Sugawara A., Nakashima J., Kunieda E. et al.* Incidence of seed migration to the chest, abdomen, and pelvis after transperineal interstitial prostate brachytherapy with loose ¹²⁵I seeds. // Radiat. Oncol., 2011, **6**, No. 10, P. 130–139.

Поступила: 13.06.2013.

Принята к публикации: 15.10.2013.

В.Ю. Соловьев, А.Е. Баранов, Т.М. Хамидулин, Н.В. Зиновьева
БАЗА ДАННЫХ ПО ОСТРЫМ ЛУЧЕВЫМ ПОРАЖЕНИЯМ
ЧЕЛОВЕКА. СООБЩЕНИЕ 3. ОСОБЕННОСТИ
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОСТРАДИАЦИОННОЙ ДИНАМИКИ
КОНЦЕНТРАЦИИ НЕЙТРОФИЛОВ В ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ
КРОВИ ПРИ КОСТНОМЗГОВОМ СИНДРОМЕ,
ОТЯГОЩЕННОМ ЛУЧЕВЫМИ ОЖОГАМИ, А ТАКЖЕ ПРИ
НЕРАВНОМЕРНОМ ПО ТЕЛУ ОБЛУЧЕНИИ

V.Yu. Soloviev, A.E. Baranov, T.M. Khamidulin, N.V. Zinovieva
Human Acute Radiation Injuries Database.
Report 3. Forecasting Specifics of Postradiation Peripheral Blood
Granulocyte Concentration Dynamics of Bone Marrow Syndrome,
Complicated by Radiation Burns and also of Nonuniform Body
Irradiation

РЕФЕРАТ

Цель: Исследование пострадиационной динамики концентрации нейтрофилов в периферической крови человека при отягощении костномозгового синдрома лучевыми ожогами кожных покровов и неравномерным облучением всего тела.

Материал и методы: Объектом исследования является информация по данным лабораторных анализов концентрации нейтрофилов в периферической крови 128 пострадавших при аварии на ЧАЭС 1986 г. (из которых у 54 имели место значимые лучевые ожоги кожных покровов) из базы данных по острым лучевым поражениям человека ФМБЦ им. А.И. Бурназяна.

Результаты: Построен профиль пострадиационной динамики концентрации нейтрофилов в периферической крови человека в зависимости от дозы внешнего относительно равномерного облучения гамма-излучением. Показано, в частности, что развитие агранулоцитоза ($<0,5 \times 10^9$ кл/л) имеет место при дозах более 1,2 Гр, а для более выраженной его формы ($<0,1 \times 10^9$ кл/л) – более 2,0 Гр. Длительность периода агранулоцитоза в диапазоне доз от 2 до 6 Гр слабо зависит от дозы и составляет, в среднем, 10–13 сут для пострадавших с лучевыми ожогами и 12–15 сут для пострадавших без лучевых ожогов кожных покровов и имеет некоторый тренд к увеличению в обеих группах с ростом дозы. На гипотетическом примере показано, что в диапазоне сублетальных доз применение локального экранирования отдельных участков тела человека (преимущественно в области крестца и таза) в качестве физической защиты может привести к существенному уменьшению радиационного поражения и «более мягкому» течению острого периода костномозгового синдрома вплоть до полного исключения периода агранулоцитоза.

Ключевые слова: доза, ионизирующее излучение, костномозговой синдром, нейтрофилы, периферическая кровь, база данных

ABSTRACT

Purpose: Study of the postradiation peripheral blood neutrophils concentration dynamics of bone marrow syndrome complicated by the radiation burns of the skin and nonuniform body irradiation.

Material and methods: The object of research is information obtained from laboratory analyzes of the peripheral blood granulocyte concentration of 128 victims of the Chernobyl accident of 1986 (of which 54 had significant radiation skin burns), contained in Burnasyan Federal Medical Biophysical Center human acute radiation injuries database.

Results: Human postradiation peripheral blood neutrophils concentration dynamics profile, dependent on the dose of external relatively uniform gamma rays irradiation has been constructed. It was shown, in particular, that the development of agranulocytosis ($<0.5 \times 10^9 / l$) occurs at doses greater than 1.2 Gy and is more pronounced ($<0.1 \times 10^9 / l$) at doses greater than 2.0 Gy. Agranulocytosis period duration dose-dependence is weak in the dose range of 2 to 6 Gy and is on average 10–13 days for patients with radiation skin burns and 12–15 days for patients without them and has some trend toward an increase with increasing dose in both groups. It was shown on a hypothetical example that the use of local shielding of the human body (mainly in the sacrum and pelvis area) as physical protection in sublethal dose range can substantially reduce radiation injuries and lead to a “softer” acute period of bone marrow syndrome including complete elimination of the agranulocytosis period.

Key words: ionizing radiation, acute radiation sickness, peripheral blood, data base

Введение

База данных по острым лучевым поражениям человека ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России содержит сведения практически обо всех пострадавших с серьезными клиническими последствиями в радиационных авариях и инцидентах, имевших

место на территории бывшего СССР и Российской Федерации. Подробное сообщение о базе данных приведено в работе [1] с описанием структуры, сведений о ее наполнении и технологии использования находящейся в ней информации для поддержки принятия решения при диагностике и лечении острых

Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва. E-mail: soloviev.fmbc@gmail.com

Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of FMBA, Moscow, Russia. E-mail: soloviev.fmbc@gmail.com

лучевых поражений. Настоящее сообщение является продолжением серии публикаций [2, 3] и посвящено описанию особенностей пострадиационной динамики концентрации нейтрофилов периферической крови человека в острый период развития костно-мозгового синдрома различной степени тяжести при наличии лучевых ожогов кожных покровов и в случае использования экранирования отдельных частей тела.

Известно, что время жизни нейтрофилов в периферической крови около 7 ч [4] и их пострадиационная динамика достаточно адекватно, с некоторым запаздыванием, отражает процессы, происходящие с пулом стволовых кроветворных клеток и их потомков гранулоцитарного ряда после острого облучения. Концентрация нейтрофилов в периферической крови в норме составляет $(2,04 - 6,6) \times 10^9$ кл/л. После острого тотального облучения, начиная с доз 2–3 Гр, их концентрация в периферической крови в период разгара острой лучевой болезни уменьшается на 2–3 порядка.

Уменьшение концентрации нейтрофилов в периферической крови до уровня $0,5 \times 10^9$ кл/л в клинической практике принято считать критическим, ниже которого риск тяжелых агранулоцитарных инфекций (в отсутствие лечения) существенно возрастает. А когда концентрация нейтрофилов в периферической крови оказывается ниже уровня $0,1 \times 10^9$ кл/л, наблюдается почти 100 %-я частота таких инфекций.

Впервые анализ дозовой зависимости пострадиационной динамики концентрации нейтрофилов в периферической крови при остром относительно равномерном облучении человека был выполнен А.Е. Барановым [5]. Отдельные закономерности этого процесса были проанализированы в ряде работ [3, 6–9]. Данная работа подводит итог подобным исследованиям и содержит некоторые новые аспекты, в частности, отдельные сведения о влиянии лучевых ожогов кожи и подлежащих тканей на пострадиационную динамику концентрации нейтрофилов в периферической крови, а также пример возможной модификации динамической картины поражения в случае использования локального экранирования участков тела.

Материал и методы

Проанализированы данные ежедневных лабораторных анализов концентрации нейтрофилов периферической крови 128 пострадавших при аварии на ЧАЭС 1986 г. с относительно равномерным по телу облучением (из которых у 54 имели место клинически значимые лучевые ожоги кожных покровов) из базы данных по острым лучевым поражениям человека ФМБЦ им. А.И.Бурназяна.

Использовались сервисные возможности пользовательского интерфейса базы данных, связанные с возможностью количественного анализа содержащейся в ней информации по определенным запросам, а также представлением результатов расчета в графическом виде [1]. Дозы облучения чернобыльских пациентов, оцененные по данным биологической дозиметрии и скорректированные с учетом всех возможных источников ошибок В.Ю. Нугисом с сотрудниками, взяты из публикации [10].

Результаты и обсуждение

При анализе зависимости пострадиационной динамики концентрации нейтрофилов в периферической крови от дозы облучения было использовано несколько методов. Первым приближением было получение такой зависимости на основе индивидуальных кривых пострадиационной динамики для пострадавших, обученных в разных дозах [5, 8]. Однако из-за вариабельности данных с помощью такого метода можно было получить только очень приближенную картину. При анализе данных для групп пациентов, у которых оцененная доза находилась в определенных границах, простое усреднение искажало реальную картину, т.к. из-за естественного разброса индивидуальных данных в области резкого изменения динамической кривой усредненные значения концентрации нейтрофилов в периферической крови искусственно завышались и искажали динамический профиль относительно индивидуальной динамики.

Более универсальным оказался метод временных срезов, когда анализировалась зависимость от дозы концентрации нейтрофилов в периферической крови на определенные моменты времени. При этом возможен анализ индивидуальных данных и подобная методика применима для анализа динамических профилей любых количественных и качественных лабораторных показателей в зависимости от дозы и/или других фиксируемых параметров. Такие зависимости для трех временных срезов представлены на рис. 1.

Однако для нейтрофилов периферической крови более приемлемым оказался метод характеристических точек, предложенный А.Е. Барановым [5]. Сущность этого метода заключалась в следующем. Типичная кривая пострадиационной динамики нейтрофилов в периферической крови содержит несколько характерных участков, отражающих процессы, происходящие в системе кроветворения на уровне стволовых клеток и их дифференцированных потомков гранулоцитарного ряда. На границах этих участков визуально можно выделить несколько характеристических точек, в которых наблюдается резкое изменение характера динамической кривой. Были проанализированы координаты таких точек

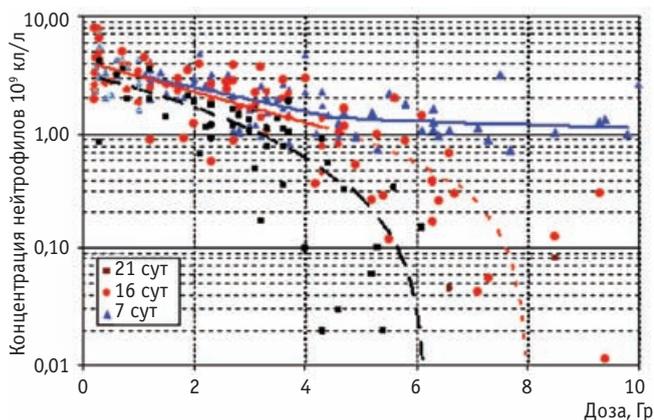


Рис. 1. Зависимость уровня концентрации нейтрофилов в периферической крови от дозы внешнего гамма-излучения на различные сроки (7, 16, 21 сут) после облучения (по материалам лабораторных анализов пострадавших в радиационной аварии на ЧАЭС 1986 г.)

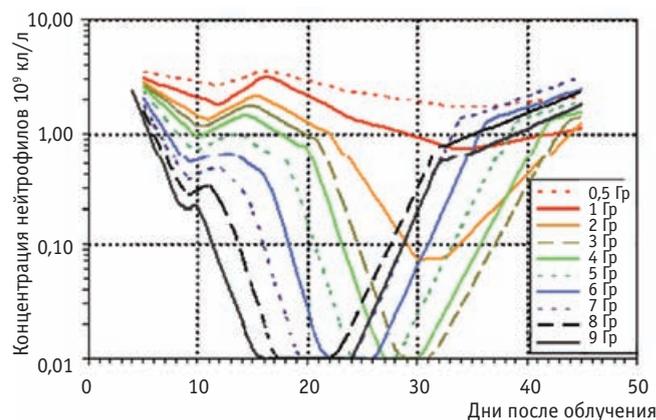


Рис. 2. Пострадиационная динамика концентрации нейтрофилов периферической крови, эмпирические дозовые кривые (по материалам лабораторных анализов пострадавших в радиационной аварии на ЧАЭС 1986 г.) [3, 7]

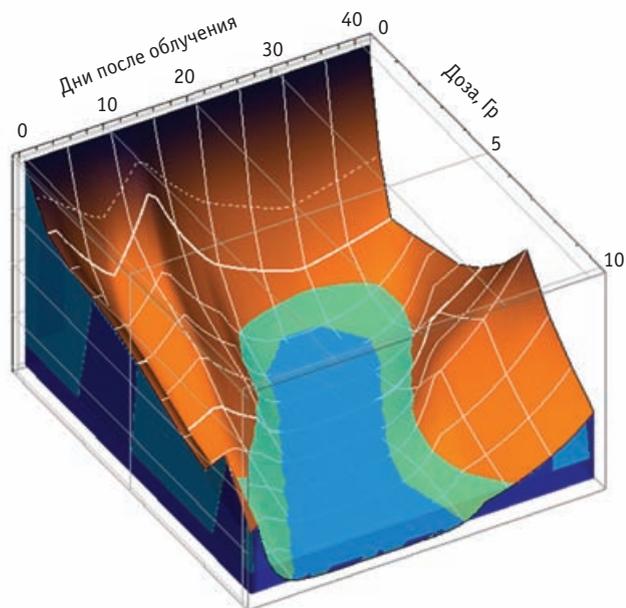


Рис. 3. Профиль пострадиационной динамики концентрации нейтрофилов периферической крови человека в координатах доза – дни после облучения – концентрация нейтрофилов. Цветом выделены области нейтропении ($< 0,5 \times 10^9$ кл/л) и ($< 0,1 \times 10^9$ кл/л)

(время – концентрация нейтрофилов), и их усредненная зависимость от дозы была взята за основу построения представленных на рис. 2 эмпирических дозовых кривых [5, 7]. Контуры такого профиля в сглаженном трехмерном виде в координатах доза–время–концентрация нейтрофилов представлены на рис. 3. В данном приближении (рис. 2, 3) не учитывались различия в фазе восстановления кроветворения для пациентов с лучевыми ожогами и без них.

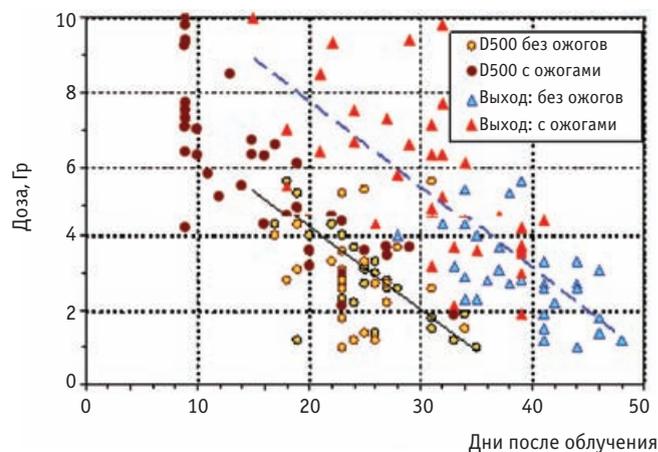


Рис. 4. Границы области агранулоцитоза ($< 0,5 \times 10^9$ кл/л) в пострадиационной динамике концентрации нейтрофилов периферической крови (по материалам лабораторных анализов пострадавших в радиационной аварии на ЧАЭС 1986 г.)

В прошлом в клинической практике более широко использовались единицы концентрации нейтрофилов [кл/мкл] и соответственно уровень нейтропении $0,5 \times 10^9$ кл/л соответствовал 500 кл/мкл. Вследствие этого широко используемый на практике критерий наступления агранулоцитоза был назван «день 500 нейтрофилов» (день снижения концентрации нейтрофилов в периферической крови до уровня 500 кл/мкл) [5, 7].

На рис. 4 представлены дозо-временные границы области агранулоцитоза (день начала и день окончания) на основе использования индивидуальных данных лабораторных анализов пострадавших при аварии на ЧАЭС. Отдельно выделены данные для пострадавших с клинически значимыми лучевыми ожогами кожных покровов и без них. Выделены линии тренда (без выделения ожогового фактора) в линейном приближении. Отчетливо можно видеть, что в среднем длительность агранулоцитоза слабо зависит от дозы. Наглядное представление такой области можно также видеть на рис. 3 (граница светло-коричневого и сине-зеленого цвета).

Время начала агранулоцитоза – «день 500 нейтрофилов» D500 коррелирует с дозой. Подробный анализ прогностической ценности данного критерия для оценки степени тяжести лучевого поражения приведен в работе [10]. Очевидно, что до определенного уровня доз значение концентрации нейтрофилов в периферической крови не опускается ниже критериального уровня $0,5 \times 10^9$ кл/л, т.е. при дозах ниже определенной границы агранулоцитоз отсутствует. Дозовые границы агранулоцитоза $0,5 \times 10^9$ кл/л (а также $0,1 \times 10^9$ кл/л) составляют 1,2 и 2,0 Гр соответственно.

Время же выхода из агранулоцитоза при восстановлении кроветворения зависит от наличия лучевых ожогов. Их наличие при диапазоне доз 2–6 Гр определенным образом стимулирует процесс восстановления и делает его в среднем более ранним. Вследствие этого длительность периода агранулоцитоза для пострадавших с наличием дополнительных лучевых ожогов кожи в среднем примерно на 2–3 сут меньше, чем соответствующая длительность для по-

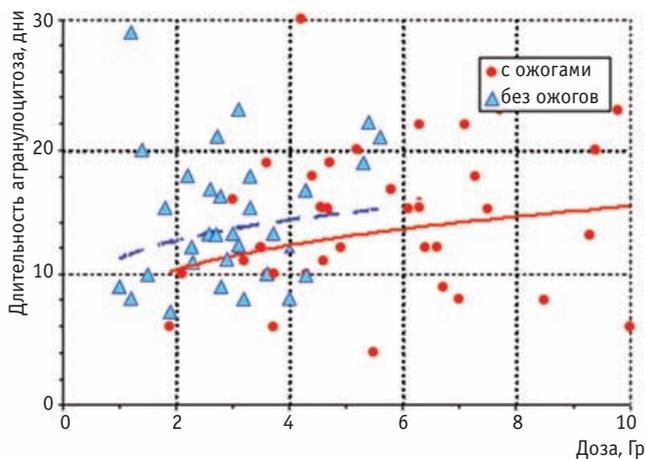


Рис. 5. Длительность периода агранулоцитоза ($<0,5 \times 10^9$ кл/л) в пострадиационной динамике концентрации нейтрофилов периферической крови (по материалам лабораторных анализов пострадавших в радиационной аварии на ЧАЭС 1986 г.)

страдавших без ожогов (рис. 5), имея лишь некоторый тренд к увеличению с возрастанием дозы, и составляет величину 10–13 сут для пострадавших с лучевыми ожогами и 12–15 сут без ожогов. Следует отметить также, что при дозах менее 3 Гр наблюдается значительная нерегулярность подобной зависимости, которая связана с тем, что характерная кривая пострадиационной динамики концентрации нейтрофилов в периферической крови имеет свою особенность на начальном участке, проходя фазы первичного опустошения, abortивного подъема и вторичного опустошения [5].

Отметим, что подобный характерный динамический профиль пострадиационной динамики концентрации нейтрофилов в периферической крови имеет место и у лабораторных животных. В работе [11] проведено подобное сравнение с соответствующими данными для человека и установлено, что характерные процессы реализации поражения и восстановления при костномозговом синдроме при одинаковой дозе острого тотального облучения у собак происходят примерно в 1,5–2 раза быстрее, чем у человека. И, следовательно, характерные времена развития нейтропении примерно в 1,5–2 раза меньше. Что касается мышей, то подобные процессы происходят еще в 1,5–2 раза быстрее, чем у собак. Подобная информация может быть полезной при переносе результатов отдельных радиобиологических экспериментов с животных на человека.

Модификация пострадиационной динамики концентрации нейтрофилов в периферической крови при неравномерном по телу облучении подробно рассмотрена в работах [3, 6]. Отметим только, что в этих работах имеется описание модели, основанной на гипотезе о мозаичной структуре костномозгового кроветворения и преимущественно независимого восстановления кроветворения в локальных участках («сайтах») костного мозга с косвенным ее доказательством. В работе [3] приведен, в частности, алгоритм использования данной модели для оценки пострадиационной динамики концентрации нейтрофилов в периферической крови при неравномерном по телу облучении с применением воксел-фантомной технологии расчета распределения дозы по костному мозгу.

В настоящей работе мы сочли целесообразным привести одного примера подобного расчета и возможности учета его результатов в клинической и инженерной практике. Для этого рассмотрен гипотетический случай облучения человека источником ^{137}Cs с энергией гамма-квантов 0,660 МэВ. Тело человека смоделировано воксельным фантомом МКРЗ стандартного человека (мужчины) [12], и его центр находится на расстоянии 2 м от источника, ориентация спиной к источнику. В примере рассмотрен

случай, когда доза от источника в воздухе в точке фантома ближайшей к источнику области спины составляет величину 3 Гр. Облучение в этом случае является односторонним, но близким к относительно равномерному.

В результате расчетов оценено распределение дозы по костному мозгу с дальнейшим инвертированием его к распределению костного мозга по дозе. Эти данные представлены на рис. 6.

Существенно изменить характер радиационного поражения и его клиническое течение в острый период костномозгового синдрома можно с использованием локального экранирования отдельных частей тела. Рассмотрим гипотетический случай. Пусть это будет свинцовый экран толщиной 5 см и высотой 1 м, расположенный на расстоянии 0,5 м от центра фантома. Теоретически можно предсказать, что существенно экранируется примерно половина костной ткани, содержащей красный костный мозг (примерно 31 % в области таза и крестца и по 9 % в нижних конечностях). Рассчитанные характеристики распределения костного мозга по дозе для случая использования локального экрана также приведены на рис. 6.

Вычисленный с помощью вышеуказанной технологии [3] прогноз пострадиационной динамики концентрации нейтрофилов для этих двух вариантов представлен на рис. 7. Анализ рис. 7 показывает, что в случае использования локального экранирования в прогнозируемой пострадиационной динамике концентрации нейтрофилов в периферической крови существенно уменьшаются длительность периода агранулоцитоза и глубина нейтропении. При этом участок динамической кривой с концентрацией нейтрофилов менее $0,1 \times 10^9$ кл/л вовсе отсутствует. Подобный пример наглядно показывает возмож-

ность оптимизации физической защиты по критерию минимизации уровня радиационного поражения в условиях массо-габаритных ограничений (например, при проектировании защиты космического корабля) и существенное снижение уровня радиационного поражения при сублетальных дозах с эффектом «более мягкого» течения острого периода костномозгового синдрома.

Заключение

Исследованы закономерности пострадиационной динамики концентрации нейтрофилов в периферической крови на материале 128 пострадавших при радиационной аварии на ЧАЭС (из которых у 54 имели место значимые лучевые ожоги кожных покровов) из базы данных по острым лучевым поражениям человека.

Показано, в частности, что развитие агранулоцитоза ($< 0,5 \times 10^9$ кл/л) имеет место при дозах более 1,2 Гр, а для более выраженной его формы ($< 0,1 \times 10^9$ кл/л) – более 2,0 Гр. Длительность периода агранулоцитоза в диапазоне доз от 2 до 6 Гр слабо зависит от дозы и составляет в среднем 10–13 сут для пострадавших с лучевыми ожогами и 12–15 сут для пострадавших без лучевых ожогов кожных покровов и имеет некоторый тренд к увеличению в обеих группах с ростом дозы.

Рассмотрен гипотетический пример использования локального экранирования, изменяющего характер распределения дозы по костному мозгу и модифицирующего таким образом течение острого периода костномозгового синдрома. Для данного примера проведены соответствующие вычисления с использованием воксел-фантома стандартного человека МКРЗ и оценена модифицированная постра-

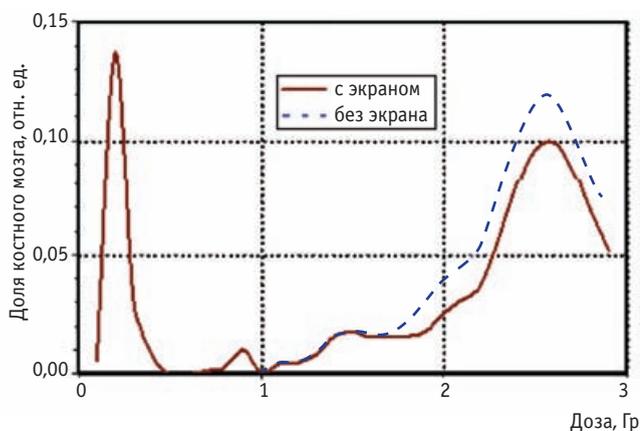


Рис. 6. Распределение костного мозга по дозе для двух гипотетических вариантов облучения человека: (—) – в поле источника ^{137}Cs в положении спиной к источнику на расстоянии 2 м, (---) – то же с локальным экраном

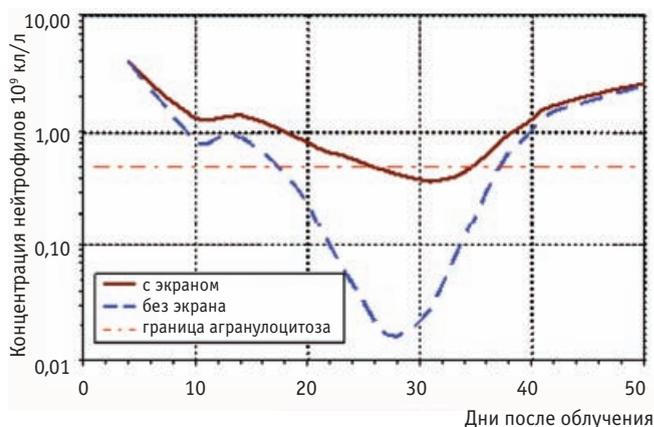


Рис. 7. Пострадиационная динамика концентрации нейтрофилов периферической крови для двух гипотетических вариантов облучения человека: (—) – в поле источника ^{137}Cs в положении спиной к источнику на расстоянии 2 м, (---) – то же с локальным экраном

диационная динамика концентрации нейтрофилов в периферической крови. Показано, что в отдельных случаях подобная модификация степени тяжести радиационного поражения может исключить вовсе или существенно уменьшить длительность периода агранулоцитоза, угрожающего жизни пострадавшего.

Полученные закономерности и предложенный методический аппарат могут оказать помощь врачам-специалистам, осуществляющим диагностику и лечение пострадавших в радиационных инцидентах. Кроме того, предлагается использовать воксел-фантомную технологию расчетов с последующим прогнозированием клинических эффектов для оптимизации физической противорадиационной защиты в различных практических применениях.

Авторы выражают благодарность В.Ю. Нугису за консультации по данным индивидуальной биологической дозиметрии при подготовке работы к публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Барабанова А.В., Зиновьева Н.В., Краснюк В.И., Соловьев В.Ю. Оценка значимости радиационного поражения кожи для прогноза исхода сочетанных лучевых поражений. Сообщение 1. // Мед. радиол. и радиац. безопасность, 2010, **55**, № 4, С. 37–40.
3. Соловьев В.Ю., Баранов А.Е., Хамидулин Т.М. База данных по острым лучевым поражениям человека. Сообщение 2. Прогнозирование пострадиационной динамики концентрации нейтрофилов периферической крови человека при неравномерном по телу аварийном облучении // Мед. радиол. и радиац. безопасность. 2011, **56**, № 4, С. 24–31.
4. Cartwright G.E., Athens J.W. and Wintrobe M.M. The kinetics of granulopoiesis in normal man. // Blood, 1964, **24**, No. 6, P. 781–803.
5. Пяткин Е.К., Баранов А.Е. Биологическая индикация дозы с помощью аббераций хромосом и количества клеток в периферической крови. Итоги науки и техники ВИНТИ АН СССР, Серия «Радиационная биология», 1980, № 3, С. 103–179.
6. Baranov A.E., Konchalovski M.V., Soloviev W.Ju., Guskova A.K. Use of blood cell count changes after radiation exposure in dose assessment and evaluation of bone marrow function. // In: The Medical Basis for Radiation Accident Preparedness II. Clinical Experience and Follow-up since 1979. Ed. R.C. Ricks, S.A. Fry, P. 427–443.
7. Соловьев В.Ю., Баранов А.Е., Кончаловский М.В., Чистопольский А.С. Прогнозирование пострадиационной динамики концентрации нейтрофилов в периферической крови человека при неравномерном облучении // Мед. радиол. и радиац. безопасность, 1997, **42**, № 3, С. 17–23.
8. Баранов А.Е. Острая лучевая болезнь: биологическая дозиметрия, ранняя диагностика и лечение, исходы и отдаленные последствия / В кн.: Радиационные поражения человека. Избранные клинические лекции, методическое пособие. Под ред. А.Ю. Бушманова, В.Д. Ревы. – М., Фирма «Слово», 2007, С. 53–84.
9. Пяткин Е.К., Чирков А.А., Соловьев В.Ю., Нугис В.Ю. Прямое использование цитогенетических данных для построения кривых динамики числа нейтрофилов после острого относительно равномерного гамма-облучения (на материале пострадавших при аварии на ЧАЭС). // Мед. радиология, 1990, **35**, № 2, С. 29–35.
10. Соловьев В.Ю., Нугис В.Ю., Хамидулин Т.М., Краснюк В.И. Исследование прогностической ценности гематологических критериев оценки степени тяжести лучевого поражения // Medline.ru: российский биомедицинский электронный журнал. 2011, Том 12, Ст. 35 (С. 420–430), <http://www.medline.ru/public/art/tom12/art35.html>
11. Даренская Н.Г., Насонова Т.А., Короткевич А.О. и соавт. Реакция кроветворной системы собак на острое радиационное воздействие (по материалам базы данных ГНЦ Института биофизики МЗ РФ) // Радиационная биология. Радиоэкология, 2003, **43**, № 4, С. 396–399.
12. ICRP Publication 110: Adult Reference Computational Phantoms. // Ann. ICRP, 2009, 137 pp.

Поступила: 28.08.2013.

Принята к публикации: 15.10.2013.

**Ю.А. Кураченко¹, Н.К. Вознесенский¹, Е.С. Матусевич¹,
Л.А. Лебедев², В.А. Левченко³, А.В. Левченко³**

**НЕЙТРОНОЗАХВАТНАЯ ТЕРАПИЯ ГЛУБОКО
РАСПОЛОЖЕННЫХ НОВООБРАЗОВАНИЙ
НА МОДИФИЦИРОВАННОМ ПУЧКЕ ПРОЕКТИРУЕМОГО
МЕДИЦИНСКОГО РЕАКТОРА МАРС**

**Yu.A. Kurachenko¹, N.K. Voznesensky¹, Eu.S. Matusевич¹,
L.A. Lebedev², V.A. Levchenko³, A.V. Levchenko³**

**Deep-Seated Neoplasm Neutron-Capture Therapy at the Modified
Beam of the MARS Medical Reactor**

РЕФЕРАТ

Теоретически проанализированы возможности применения пучка медицинского реактора МАРС для нейтронозахватной терапии глубоко расположенных новообразований. Рассмотрены условия реализации нового подхода, основанные на: а) адресной доставке и удержании в мишени фармакологического препарата, содержащего бор или гадолиний, и б) применении высокоэнергетического пучка нейтронов большой интенсивности, обеспечивающего глубокое проникновение нейтронов. Приведены результаты численного эксперимента по доставке необходимой дозы в глубоко расположенную мишень для сформированного пучка реактора МАРС. Показано, что новое качество ожидаемых результатов вполне достижимо при приемлемом времени экспозиции.

Ключевые слова: новая концепция НЗТ, адресная доставка бора/гадолиния, нейтронные высокоэнергетические пучки, оптимизация блока вывода пучка, Gd-нейтронозахватная терапия, модификация пучка реактора МАРС

ABSTRACT

The MARS medical reactor beam is analyzed for neutron capture therapy of deep neoplasm. Necessary conditions of the new approach are based on: a) precise delivery of the pharmaceutical with Boron or Gadolinium to a target and long-time confinement it, and b) using a high-energy & high fluence rate neutron beam, which provides neutron deep penetration. Results of the numerical experiment for administered dose delivery to a deep seated target for the modified MARS reactor beam are presented. It is shown, that new quality of results is quite achievable in acceptable time of an exposure.

Key words: NCT new concept, precise B/Gd delivery, high-energy neutron beam, removal block optimization, Gd-capture therapy, MARS reactor beam modification

Введение

Медицинский реактор МАРС, проект которого успешно развивается в течение десяти лет [1–5] и находится в высокой степени готовности, предполагает использование двух каналов вывода нейтронных пучков (рис. 1). Один из этих каналов предназначен для проведения нейтронозахватной терапии (НЗТ), другой – для радиобиологических экспериментов и, возможно, для терапии на быстрых нейтронах, или нейтроноударной дистанционной терапии (НСТ).

Пучок нейтронов для НЗТ (пучок № 1) имеет вполне определенные характеристики, соответствующие известным критериям in air и in phantom, принятым мировым сообществом в результате много-



Рис. 1. Аксиальное сечение расчетной осесимметричной модели блока вывода пучков реактора МАРС: 1 – активная зона; 2 – стальной отражатель; 3 – модификатор спектра канала НЗТ; 4 – полый канал вывода пучка № 2; 5 – защита из борированного полиэтилена; 6 – защита из обедненного урана; (фрагмент; получено визуализатором входных данных для программы MCNP [6])

¹ Институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, Обнинск. E-mail: ykurachenko@mail.ru

² Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», Москва

³ Экспериментальный научно-исследовательский и методический центр «Моделирующие системы», Обнинск

¹ Institute of Nuclear Power Engineering in National Research Nuclear University «MEPhI», Obninsk, Russia. E-mail: ykurachenko@mail.ru

² Rosatom Nuclear Energy State Corporation, Moscow, Russia

³ Simulation Systems Ltd, Obninsk, Russia

летних исследований (см., напр. [3]). Эти критерии предписывают значения плотности потока пучка, его спектральных характеристик, углового распределения, степени «загрязнения» быстрыми нейтронами и гамма-излучением, а также взаимодействия нейтронов пучка с тканями. Кроме того, блок вывода пучка должен быть организован таким образом, чтобы минимизировать как дозовые нагрузки на персонал, так и излишнее облучение пациента как во время работы установки, так и при ее выключенном состоянии. Пучок нейтронов установки МАРС, предназначенный для НЗТ, в высокой степени удовлетворяет принятым критериям, и по совокупности качеств как пучок, так и установка могут явиться уникальным средством для проведения радикальной нейтронозахватной терапии.

На рис. 1 представлена конфигурация блока вывода пучков реактора МАРС, включающая полый канал для вывода пучка № 2, предназначенного для НСТ.

Для реализации нового подхода к НЗТ на пучке реактора МАРС, предполагающего а) адресную доставку в опухоль туморотропного препарата (ТП), содержащего бор или гадолиний, и б) применение высокоэнергетического пучка нейтронов с большой плотностью потока для обеспечения глубокого проникновения нейтронов, необходимо:

1. Создать в объекте облучения (мишени) заданную концентрацию ТП, позволяющую использовать терапевтические¹ реакции захвата нейтронов, а также удерживать эту концентрацию в течение облучения.
2. Подвести к мишени пучок нейтронов с достаточно высокой мощностью флюенса и оптимальным спектральным распределением.
3. Обеспечить непревышение толерантного уровня облучения здоровых тканей и органов пациента.

В рамках традиционной бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ) выполнение условий 1 и 3 невозможно.

Расчет на избирательное накопление борсодержащего препарата в опухолевых клетках при высоком градиенте концентрации опухоль/ткань с удержанием достаточно длительный период времени при внутривенном введении препарата пока не оправдался. Несмотря на интенсивные поиски путей повышения концентрации бора в опухоли, в т.ч. совместного использования борсодержащих соединений и модифицирующих агентов (напр., гипертермии, электрических импульсов, соединений с сосудорасширяющими свойствами или влияющих на проницаемость гемато-

¹ Мировым сообществом рассматриваются для НЗТ только две значимые реакции: $^{10}\text{B}(n,\alpha)$ и $\text{Gd}(n,\gamma)$

энцефалического барьера² и т.п.), реальных успехов достигнуто не было.

Для повышения конкурентоспособности НЗТ необходимо увеличивать интенсивность пучка при селективной доставке ТП и его удержании в мишени.

Доставка и фиксация туморотропного препарата

Рассмотрим в качестве терапевтических реакций реакцию радиационного захвата нейтронов ядрами ^{157}Gd и реакцию $^{10}\text{B}(n,\alpha)$, предполагая существование средств селективной малоинвазивной³ доставки фармакологического препарата – носителя гадолиния (или бора) в очаг опухолевого роста с фиксацией ТП при требуемой его концентрации.

Эти средства должны удовлетворять определенным требованиям:

- быть удобными в применении, обладать высокой текучестью;
- равномерно и быстро заполнять требуемый объем тканей;
- достаточно быстро (доли секунды – до десяти секунд в зависимости от поставленных задач) осуществлять фазовый переход *in situ*⁴;
- в минимальный срок, определенный конкретными лечебными задачами, вызывать полное прекращение капиллярного потока;
- не оказывать раздражающего действия на окружающие ткани;
- не подвергаться биотрансформации либо не оказывать нежелательного действия на организм в процессе биотрансформации и др.

Все существующие на сегодняшний день средства локального применения, перспективные в качестве носителей Gd/B, относятся к полимерным материалам. Условно их можно разделить на химические полимеры и биологические полимеры (химические и биологические препараты). Весьма перспективными для применения в НЗТ являются полимерные материалы с фазовым переходом из жидкого состояния в состояние заданной эластичности, упругости и относительной плотности. Исследования в этом направлении интенсивно развиваются, созданы растворы, меняющие фазовое состояние при изменении темпе-

² Гематоэнцефалический барьер (от гемо... кровь и греч. *enkephalos* – мозг) – физиологический механизм, регулирующий обмен веществ между кровью, спинномозговой жидкостью и мозгом. Защищает центральную нервную систему от проникновения чужеродных веществ, введенных в кровь, или продуктов нарушенного обмена веществ. Следует пояснить, что в своей исходной версии НЗТ предназначалась для терапии опухолей мозга.

³ Малоинвазивными процедурами (англ. *minimally invasive procedure*) называются любые процедуры (хирургические и не только), которые обеспечивают меньшее вмешательство в организм, чем применяемые для той же цели открытые операции.

⁴ *In situ* – на своем месте (лат.), в данном случае в мишени.

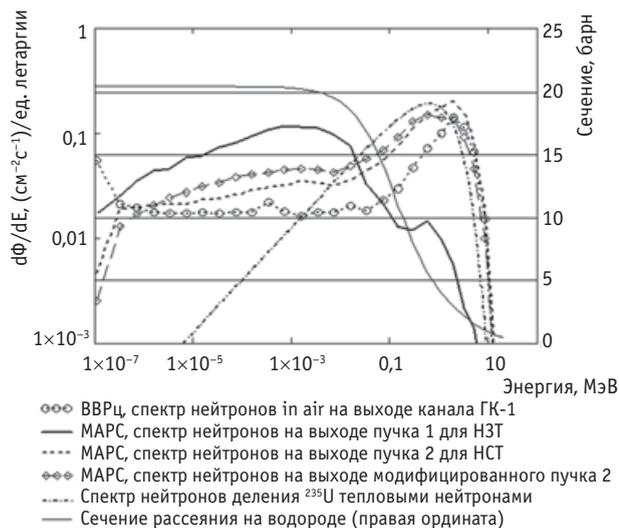


Рис. 2. Спектры нейтронов на выходе реакторных пучков в сопоставлении со спектром нейтронов деления (представлено также сечение рассеяния на водороде; интеграл по энергии под каждым графиком, кроме графика сечения, равен единице)

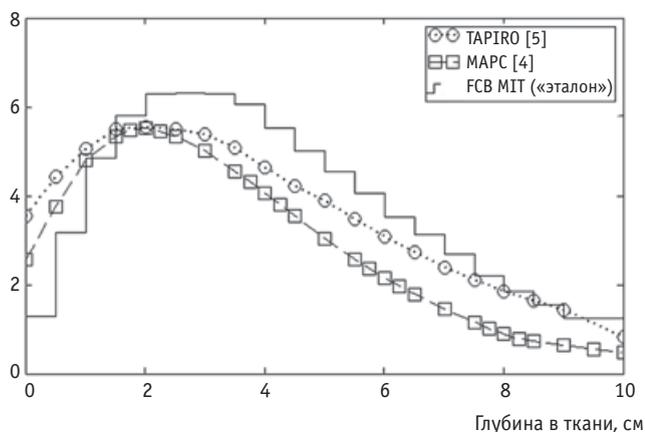


Рис. 3. Терапевтическое отношение для БНЗТ-пучков

ратуры в пределах десятых долей градуса в диапазоне температур 30–40 °С.

Для Gd, в частности, уже существуют препараты, используемые как контрастные вещества при МРТ. При внутривенном введении они легко попадают в межклеточное пространство, не задерживаясь в сосудистом русле. Разработаны технологии соединения Gd со средними (по молекулярной массе) полимерными цепями, а также технологии получения препаратов Gd в виде жировых эмульсий.

В качестве носителей ТП возможны коллоидные растворы с высокой молекулярной массой, например, поливинилпирролидон [7]. Важной особенностью высокомолекулярного поливинилпирролидона является его высокая адсорбирующая

способность и склонность к комплексообразованию. Высокомолекулярный поливинилпирролидон связывает многие вещества, в том числе лекарственные препараты, токсины, органические и неорганические красители и т.д. Сорбционные и комплексообразующие свойства высокомолекулярного поливинилпирролидона обуславливают его практически неограниченные возможности для применения [7].

Модификация пучка № 2 реактора МАРС

Генезис современной концепции НЗТ определил ее недостатки, в частности, фиксировал «реакторо-ориентированную» парадигму требуемого качества пучков нейтронов. Все критерии in air для пучка НЗТ несут в себе следы «борьбы» с недостатками реакторных пучков.

Приведем общепринятые значения основных критериев, формулируемых для пучка на выходе:

1. Плотность потока эпитепловых ($0,4 \text{ эВ} < E < 10 \text{ кэВ}$) нейтронов

$$\Phi_{epi} \geq 10^9 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}. \quad (1)$$

2. Отношение мощности поглощенной дозы гамма-излучения к плотности потока эпитепловых нейтронов

$$D_{\gamma}/\Phi_{epi} < (2\div 5) \times 10^{-11} \text{ сГр} \times \text{см}^2. \quad (2)$$

3. Отношение мощности поглощенной дозы быстрых ($E > 10 \text{ кэВ}$) нейтронов к плотности потока эпитепловых нейтронов

$$D_{fast}/\Phi_{epi} < (2\div 5) \times 10^{-11} \text{ сГр} \times \text{см}^2. \quad (3)$$

4. Отношение аксиального тока эпитепловых нейтронов к потоку

$$J_{epi}/\Phi_{epi} > 0,7. \quad (4)$$

Итак, желательно, чтобы все нейтроны (или подавляющая часть их) на выходе пучка имели энергию в диапазоне $0,4 \text{ эВ} < E < 10 \text{ кэВ}$, причем плотность потока этих эпитепловых нейтронов должна быть не менее определенной величины $\Phi_{epi} \geq 10^9 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Меньшая плотность потока in air обусловит, при прочих равных условиях, меньшую скорость терапевтических реакций в мишени и, следовательно, приведет к увеличению длительности необходимой экспозиции, что может сделаться практически неприемлемым (напр., требуемые времена экспозиции $\gg 1$ час).

На рис. 2 представлены спектры in air нейтронных пучков, предназначенных для БНЗТ, в сопоставлении с типичным спектром нейтронов на выходе канала исследовательского реактора и со спектром нейтронов деления. На рис. 3 представлена основная «потребительская» характеристика in phantom для пучков НЗТ – терапевтический выигрыш, или

терапевтическое отношение TR^5 (см., напр., [8]) – отношение «полезной» дозы в мишени на глубине x к максимальной «вредной» дозе в ткани на оси пучка:

$$TR(x) = \frac{D_{tumor}(x)}{D_{tissue}^{max}}, \quad (5)$$

причем дозы в опухоли (D_{tumor}) и в ткани (D_{tissue}) определяются в соответствии с (6):

$$D_{tumor} = CBЭ_{B,tumor} \times D_{B,tumor} + ОБЭ_N \times D_N + ОБЭ_O \times D_O + ОБЭ_{fast} \times D_{fast} + ОБЭ_\gamma \times D_\gamma;$$

$$D_{tissue} = CBЭ_{B,tissue} \times D_{B,tissue} + ОБЭ_N \times D_N + ОБЭ_O \times D_O + ОБЭ_{fast} \times D_{fast} + ОБЭ_\gamma \times D_\gamma; \quad (6)$$

- где $ОБЭ$ – относительная биологическая эффективность излучений, $CBЭ$ – составная (сочетанная) биологическая эффективность⁶ реакции $^{10}B(n, \alpha)^7Li$, а D – мощность поглощенной дозы
- $D_{B,tumor}$, $D_{B,tissue}$ – мощность поглощенной дозы в результате реакции $^{10}B(n, \alpha)^7Li$ в опухоли и ткани соответственно;
- D_N – компонента, обусловленная взаимодействиями нейтронов с ядрами азота;
- D_O – компонента, определяемая реакциями на изотопах кислорода;
- D_{fast} – компонента, обусловленная замедлением нейтронов на ядрах водорода;
- D_γ – мощность поглощенной дозы, формируемая гамма-квантами пучка, а также вторичными гамма-квантами, сопровождающими перенос нейтронов в ткани.

На рис. 3 сопоставлены характеристики трех пучков: два из них – для реакторов ТАПИРО и МАРС, третий пучок – «эталонный» пучок реактора FCB MIT⁷ (см. далее). Реактор ТАПИРО [5] в течение длительного времени был своего рода «полигоном» мирового сообщества для расчетно-экспериментальных исследований в области НЗТ.

Отметим, что дозам при БНЗТ, рассчитанным в соответствии с (6), в англоязычной литературе присваивается размерность Гр-экв, т.е. грей-эквивалент. Это сделано для того, чтобы отличать дозы при НЗТ от доз, нормируемых для профессионального облучения и облучения населения (размерность зиверт) и от поглощенной дозы (размерность грей). Результаты, представленные на рис. 3, нормированы на конкретное содержание ^{10}B в опухоли и ткани: 60 ppm (опухоль) и 18 ppm (ткань). Эти, весьма условные, значения приняты мировым сообществом для возможности однозначного сопоставления результатов в расчетах качества различных пучков.

⁵ Therapeutic Ratio

⁶ Compound Biological Effectiveness (CBE, [13], P. 34).

⁷ Fission Converter Based beam, Massachusetts Institute of Technology research reactor

Фиксация нейтронов внутри ограниченного диапазона в соответствии с критериями in air 1–3 является вынужденной. Для уяснения этого обстоятельства обратимся к спектральному распределению нейтронов на выходе горизонтального канала ГК-1 [9] реактора ВВРц (Обнинск), ориентированного на применение в нейтронной лучевой терапии [10]. Это распределение (рис. 2) типично для протяженных каналов исследовательских реакторов бассейнового типа: «уши» в области тепловых и быстрых нейтронов (т.е. ниже и выше указанного диапазона энергии эпитепловых нейтронов) и «провал» в диапазоне энергий нейтронов, требуемых для НЗТ. Эти «уши» при формировании спектра следует убрать, увеличив тем самым долю промежуточных нейтронов. Очевидно, что в данном случае при фиксированной конфигурации канала задача формирования пучка для НЗТ практически безнадежна. Расчеты (см., напр. [9]) показывают, что формирование спектра, пригодного для НЗТ, приведет к потере не только в интегральном потоке нейтронов, что неизбежно, но и к существенным потерям «ценных» нейтронов эпитепловой области.

Из рис. 3 следует, что оптимальная глубина расположения мишени для традиционных пучков НЗТ составляет ~ 2–4 см, далее с глубиной в ткани выигрыш уменьшается и на глубине ~ 10 см сходит на нет для всех пучков.

Предлагаемая взамен предписываемой парадигмой НЗТ форма спектра нейтронов «горб» (график «МАРС, канал 1» на рис. 2) «куполообразная» (график «МАРС, канал 2» там же) уясняется из следующих соображений. Для любого спектра нейтронов необходимость подавления тепловых нейтронов определяется особенностями дозобразования при входе нейтронного пучка в ткани, где возникает избыточно высокое облучение их поверхностных слоев. Тепловые нейтроны захватываются ядрами материалов ткани (прежде всего, водорода) с генерацией проникающего гамма-излучения (на водороде $E_\gamma = 2,22$ МэВ). С другой стороны, быстрые нейтроны на входе в ткань резко сбрасывают энергию в упругих столкновениях, в основном с ядрами того же водорода. В результате описанных двух однонаправленных (для дозы) процессов формируется относительно большая поверхностная доза. Именно она обычно определяет максимально возможную терапевтическую дозу, которая может быть подведена к мишени на данной глубине. Терапевтическое отношение для пучков МАРС и ТАПИРО для глубин залегания мишени ≥ 4 см составляет менее 4, т.е. к мишени в данном случае не может быть подведена доза бо-

лее 50 Гр-экв⁸. Из рис. 2 следует, что у идеального спектра, сформированного для НЗТ в соответствии с традиционными критериями *in air*, отсутствуют перспективы подпитки быстрыми нейтронами: их практически не будет на входе в ткань. Тем самым у пучка отсутствует возможность глубокого проникновения и доставки замедлившихся тепловых нейтронов для захвата в глубокорасположенной мишени. Поэтому очевидно, что в пучке *in air* с необходимостью должна присутствовать определенная доля быстрых ($E > 10$ кэВ) нейтронов, «перекачиваемых» при транспорте в биологической ткани в тепловую область по мере движения нейтронов к мишени.

В этом отношении для глубоко расположенных мишеней пучок № 2 реактора МАРС, ориентированный на проведение радиобиологических экспериментов и, возможно, для применения в НСТ, имеет существенное преимущество перед пучками исследовательских реакторов: на стадии рабочего проектирования блок вывода пучка № 2 может быть достаточно просто модифицирован.

Итак, решение задачи увеличения глубины проникновения нейтронов в ткань возможно на основе двух подходов: а) «ужесточение» спектра *in air* и б) увеличение интенсивности потока нейтронов на выходе канала. Для рассматриваемого канала реактора МАРС следует попытаться:

- разместить объект облучения максимально близко от активной зоны;
- подобрать материалы блока вывода, обеспечивающие максимально жесткий для данного случая спектр нейтронов;

⁸ 12,5 Гр-экв (толерантная доза для здоровой ткани) × 4 (терапевтическое отношение) = 50 Гр-экв

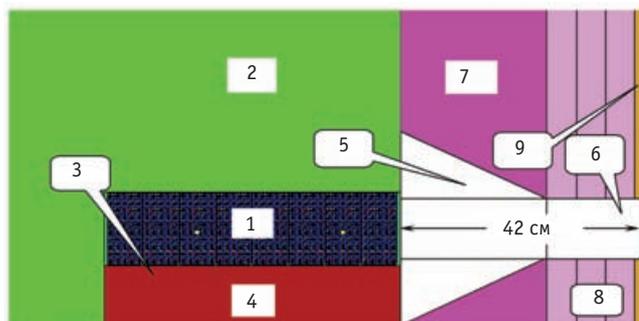


Рис. 4. Расчетная модель модифицированного блока вывода пучка № 2 реактора МАРС

1 – активная зона; 2 – стальной отражатель; 3 – фрагмент блока вывода пучка для НЗТ; 4 – модификатор спектра канала НЗТ; 5 – конический канал; 6 – цилиндрический канал; 7 – свинцовый отражатель; 8 – защита из гидрида циркония; 9 – защита из обедненного урана; (фрагмент, получено визуализатором входных данных для программы MCNP)

- при этом должна быть обеспечена защита пациента, т.е. достаточный радиальный градиент дозы на выходе пучка.

Очевидно, что естественным ограничением приближения к источнику является неприемлемый уровень интенсивности излучений в окрестности выхода пучка, т.е. невозможность организации должной защиты пациента. Предлагаемая в качестве первого приближения композиция (рис. 4), полученная в оптимизационных расчетах, обеспечивает радиальный градиент на выходе пучка, сопоставимый с таковым для НЗТ-ориентированных реакторных пучков (см. далее подраздел «Защита пациента»). Блок вывода пучка, представленный на рис. 4, включает в себя конический коллиматор, основание которого примыкает непосредственно к активной зоне, и цилиндрическое колено с внутренним диаметром 10 см.

Опыт оптимизации каналов для вывода нейтронных пучков позволил выявить две основные характеристики коллиматора:

- наилучшим материалом коллиматора в данном («реакторном») диапазоне энергий нейтронов является свинец, имеющий удачное сочетание сечений (рис. 5): в диапазоне энергии эпитепловых нейтронов отсутствует захват и абсолютно доминирует упругое замедление с незначительным сбросом энергии; свинец прозрачен для нейтронов, которые «текут» в коллиматоре;
- коллиматор, наряду с конической воронкой для сбора нейтронов, должен иметь полое цилиндрическое колено для собственно коллимации; материал стенок цилиндрического колена – также свинец, рассеивающий нейтроны в канал. Задача коллимации нейтронов, т.е. максимизация отношения тока к потоку нейтронов вдоль оси канала, вступает в

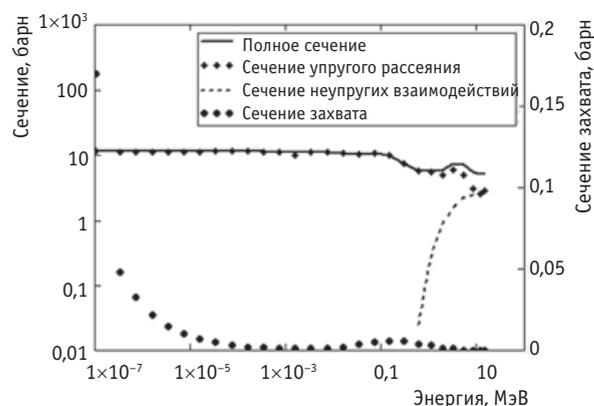


Рис. 5. Основные сечения взаимодействия на свинце

противоречие с задачей максимизации плотности потока пучка на выходе: решение задачи коллимации требует увеличения протяженности канала, при этом мощность флюенса пучка уменьшается. Очевидными критериями для максимизации плотности потока посредством уменьшения протяженности канала является а) распределение нейтронов по радиусу канала внутри него и б) радиальное распределение нейтронов вне канала, т.е. радиальный градиент дозы, определяющий качество защиты пациента и персонала. Выполненные оптимизационные расчеты позволили посредством вариации состава материалов и конфигурации блока вывода в достаточной степени выровнять радиальное распределение нейтронов внутри пучка (см. рис. 6).

Защита пациента

Проблема в данном случае — не минимизировать радиальный градиент флюенса/дозы на выходе пучка внутри канала на выходе, как отмечено выше в задаче выравнивания характеристик поля нейтронов в пучке, а, напротив, максимизировать радиальный градиент дозы вне пучка. Решение задачи максимизации внешнего градиента достигается также оптимизацией блока вывода, т.е. его конфигурации и состава материалов. Особенно остро проблема максимизации градиента возникает для конических незаполненных каналов, они являются «слабым местом» в защите выхода пучка. Все эти обстоятельства были учтены при получении композиции, представленной на рис. 4. На рис. 6 защитные характеристики модифицированного блока вывода пучка № 2 реактора МАРС сопоставлены с характеристиками других пучков. Из представленных данных следует, что градиент дозы,

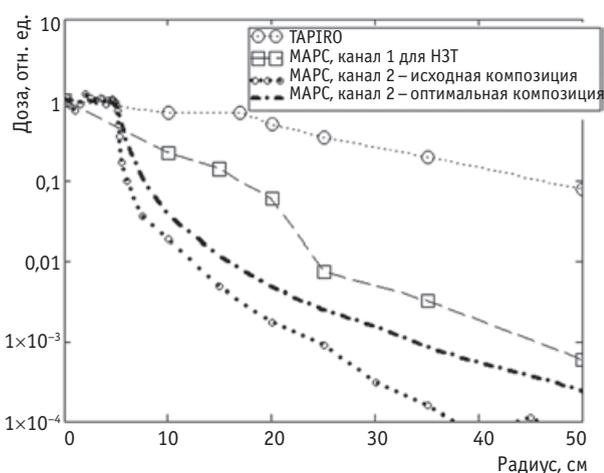


Рис. 6. Радиальное распределение дозы на выходе рассматриваемых пучков (для каждого графика значение при $r = 0$ равно 1)

который обеспечивается модифицированным блоком вывода, достаточно близок к градиенту дозы для полого цилиндрического канала № 2, принятого в существующем проекте установки. Защита пациента при использовании модифицированного пучка № 2 не уступает по уровню безопасности защите при применении пучка № 1 для НЗТ.

НЗТ для глубоко расположенной мишени

В табл. суммированы характеристики реакторных пучков на выходе как оптимизированных в традиционной парадигме НЗТ, так и для а) «голового» пучка ГК-1 реактора ВВРц и б) предлагаемого в настоящей работе модифицированного пучка № 2 специализированного реактора МАРС. Для данного пучка выполнен численный эксперимент, условия которого состоят в следующем (см. также рис. 7):

- в большом объеме мягкой ткани МКРЕ [13] по оси пучка перемещается сферическая мишень из той же ткани (диаметр 3 см), в которой равномерно по объему распределен ТП;
- в качестве ТП поочередно используются два «конкурента» — ^{157}Gd и ^{10}B , распределенные в мишени равномерно по объему;
- в качестве характеристики эффекта облучения используется поглощенная доза;
- для каждого положения мишени рассчитывается отношение средней поглощенной дозы в мишени к дозе в контрольной точке здоровой ткани (терапевтический эффект);
- для каждого положения мишени рассчитывается продолжительность экспозиции, при котором в мишени набирается средняя доза 100 Гр.

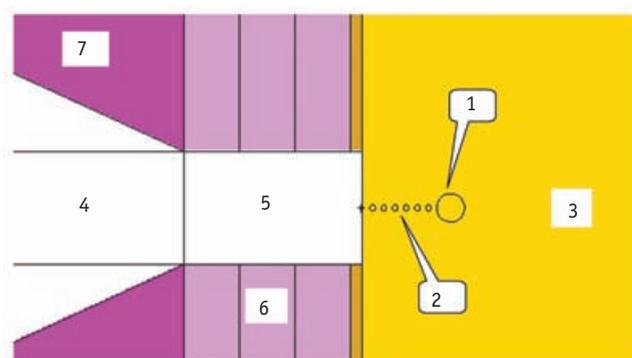


Рис. 7. Фрагмент расчетной модели в задаче с глубоко расположенной мишенью
1 — мишень; 2 — детекторы; 3 — ткань МКРЕ [13]; 4 — конический канал; 5 — цилиндрический канал; 6 — защита из гидрида циркония; 7 — свинцовый отражатель; (получено визуализатором входных данных для программы MCNP)

Таблица

Характеристики пучков нейтронов in air в сопоставлении со спектром деления

	Плотность потока см ⁻² с ⁻¹ , 10 ⁹	Средняя энергия, МэВ	Доля нейтронов, %			
			Эпитепловых	Тепловых E < 0.4 эВ	Быстрых	
					E < 100 кэВ	E > 100 кэВ
Парадигма НЗТ	≥ 1	—	~ 100	→ 0	→ 0	→ 0
ТАПИРО	1,07	0,00858	73,8	20,0	5,49	0,666
МАРС, пучок № 1	1,05	0,0446	81,8	3,39	10,0	4,81
ГК-1 ВВРц	5,39	0,678	18,1	43,6	4,78	33,5
МАРС, пучок № 2	0,481	0,991	26,7	5,07	10,3	57,9
Модифицированный пучок № 2	6,33	0,650	34,6	2,95	13,5	48,9
Спектр деления ²³⁵ U	—	1,9	~ 0	0	~ 5·10 ⁻²	~ 100

Примечание:

Данные для номинальной мощности реакторов: ТАПИРО – 5 кВт; МАРС – 10 кВт; ВВРц – 10 МВт; представлена плотность потока на оси пучка, т.е. максимум

Постановка численного эксперимента нуждается в комментарии.

1. Выбор поглощенной дозы в качестве критерия объясняется стремлением к чистоте эксперимента – т.е. исключением неоднозначных параметров, влияющих на рассчитываемую величину. Идеология БНЗТ весьма «нагружена» исторически и субъективно: анализ литературы, трактующей проблемы ОБЭ и, особенно, СБЭ (см. выше выражение (б)) исчерпывающе об этом свидетельствует.
2. Выбор средней по мишени дозы в качестве критерия обусловлен, с одной стороны, существенной экранировкой сечений ¹⁵⁷Gd/¹⁰B в глубоко расположенных слоях мишени конечных размеров (Ø3 см), и с другой стороны – малоинформативностью «точечной» малой мишени, поскольку продукты захвата на ¹⁵⁷Gd имеют достаточно большой пробег.
3. Второй критерий – доза в критической точке здоровой ткани также может быть неоднозначной. Для определенности выбрана величина дозы непосредственно на входе в ткань. Ясно, что для таких критериев (средняя доза в мишени и доза на входе пучка) контролируемое отношение не может счи-

таться истинным терапевтическим эффектом: в отличие от продуктов захвата на ¹⁰B (при этом самый длиннопробежный продукт – гамма-квант с энергией ~ 0,5 МэВ) гамма-кванты захвата на ¹⁵⁷Gd имеют среднюю энергию ~ 2 МэВ. Из этого следует, что в непосредственной близости к поверхности мишени с ГП, содержащим ¹⁵⁷Gd, доза будет больше, чем доза на входе в ткань. Ясно, что при акценте на дозу вблизи мишени однозначный выбор контрольной точки невозможен.

Представляется, что описанная постановка численного эксперимента дает возможность однозначной интерпретации как исходных данных, так и результатов расчета.

Результаты и обсуждение

Результаты численного эксперимента представлены на рис. 8, 9. Эти результаты свидетельствуют о значительном потенциале НЗТ на канале № 2 реактора МАРС при отказе от традиционной парадигмы. Это заключение относится как к увеличению глубины возможного расположения мишени, так и к возможному сокращению времени экспозиции.

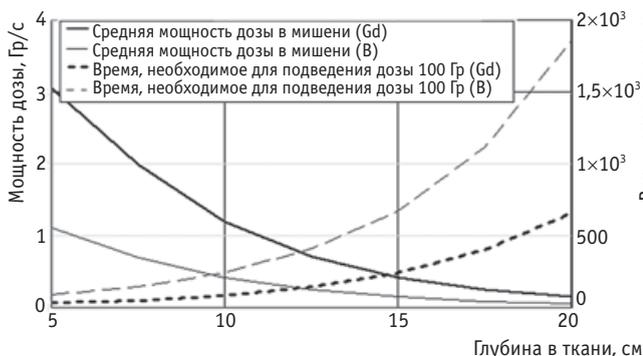


Рис. 8. Результаты численного эксперимента: мощность дозы (левая ордината) и время экспозиции (правая ордината)

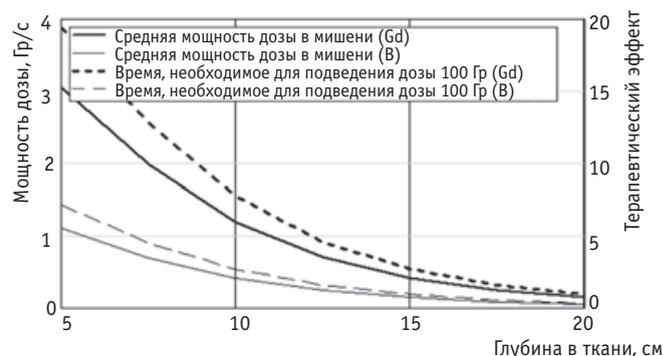


Рис. 9. Результаты численного эксперимента: мощность дозы (левая ордината) и терапевтический эффект (правая ордината)

Сопоставление данных по эффективности НЗТ, представленных на рис. 3 и 9 (при некоторых различиях сопоставляемых величин) также говорит о значительном потенциале нового подхода. На глубине ~ 5 см при традиционном подходе эффект ~ 5, при новом подходе соответствующая величина уже ~ 20. На глубине 9–10 см прежний подход абсолютно неработоспособен, в то время как предложенный обеспечивает эффект ~ 10.

В численном эксперименте «шансы» двух ТП были выровнены следующим образом: их ядерные плотности выбирались так, чтобы в мишени, центр которой расположен на фиксированной глубине (5 см) в ткани, плотность полного нейтронного потока от периферии к центру мишени ослаблялась (из-за экранировки сечений) вдвое. Оказалось, что соответствующее удельное содержание нуклидов должно составлять 1000 мкг/г и 5000 мкг/г для ^{157}Gd и ^{10}B соответственно.

Выводы

Результаты выполненных исследований позволяют сделать следующие основные выводы.

1. Вынужденное использование немодифицируемых пучков неспециализированных исследовательских реакторов обусловило такие спектральные характеристики нейтронных пучков для НЗТ, которые ограничивают возможную для терапии глубину расположения мишени.
2. Пересмотр традиционных требований к пучкам для НЗТ, опирающийся на применение высокоэнергетических мощных нейтронных пучков в сочетании с развитыми средствами селективной доставки и фиксации активного материала, эффективно захватывающего нейтроны, позволяет существенно расширить возможности НЗТ.
3. Оказалось, что для новой парадигмы НЗТ применение ^{157}Gd гораздо предпочтительнее, чем применение традиционного ^{10}B .
4. Медицинский реактор МАРС с модифицируемым пучком дает возможность, при ревизии традиционных требований к пучку для НЗТ, обеспечить поражение глубоко расположенных мишеней за вполне приемлемую продолжительность экспозиции.
5. Новый подход в задачах терапии глубоко залегающих новообразований может быть реализован на пучке № 2 установки МАРС без значительных изменений существующего проекта (напр., посредством использования сменного – откатного блока вывода пучка для работы при новом подходе).
6. Выполненное расчетное исследование дает возможность расширить номенклатуру и увеличить

глубину расположения новообразований, доступных нейтронной терапии на установке МАРС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левченко В.А., Балакин И.П., Белугин В.А. и соавт. Основные характеристики америциевого реактора для нейтронной терапии. Реактор МАРС. // Известия вузов. Ядерная энергетика, 2003, № 3, С. 72–82.
2. Кураченко Ю.А., Казанский Ю.А., Левченко В.А., Матусевич Е.С. Вывод нейтронных пучков и защита медицинского реактора МАРС. // Известия вузов, Ядерная энергетика, 2006, № 4, С. 36–48.
3. Кураченко Ю.А., Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. Критерии качества нейтронных пучков для лучевой терапии. // Известия вузов. Ядерная энергетика, 2008, № 1, С. 139–149.
4. Кураченко Ю.А. Оптимизация блока вывода пучка медицинского реактора «МАРС» // Альманах клинической медицины, XVII, ч. 1, 2008, С. 334–337.
5. Кураченко Ю.А., Моисеенко Д.Н. МАРС и ТАПИРО: реакторы малой мощности для нейтроно-захватной терапии. // Известия вузов. Ядерная энергетика, 2010, № 1, С. 153–163.
6. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. Volume I: Overview and Theory. Authors: X-5 Monte Carlo Team. //LA-UR-03-1987. April 24, 2003.
7. Оргполимерсинтез. Материалы полимерные серии «Полидон» / <http://orgpol.ru/polidon.html>
8. Current Status of Neutron Capture Therapy. Report of International Atomic Energy Agency No. 1223. Vienna, 2001, 289 pp.
9. Кураченко Ю.А., Матусевич Е.С., Ульяненко С.Е. Перспективы реактора ВВРц для нейтронной терапии. // Альманах клинической медицины. XII. 2006, С. 86–87.
10. Цыб А.Ф., Ульяненко С.Е., Мардынский Ю.С. и соавт. Нейтроны в лечении злокачественных новообразований. Научно-методическое пособие. – Обнинск: БИСТ, 2003, 112 с.
11. Brookhaven Medical Research Reactor. <http://www.bnl.gov/bnlweb/history/BMRR.asp>
12. Harling O.K., Riley K.J., Newton T.H. et al. The New Fission Converter Based Epithermal Neutron Irradiation Facility at MIT. Nuclear Reactor Laboratory, MIT. http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/36/026/36026570.pdf
13. Photon, Electron, Proton and Neutron Interaction Data for Body Tissues. ICRU Report 46; 1992

Поступила: 14.06.2013.

Принята к публикации: 15.10.2013.

Ю.Г. Григорьев^{1,2}, А.П. Бирюков¹

МОБИЛЬНАЯ СВЯЗЬ И ЗДОРОВЬЕ НАСЕЛЕНИЯ: К ОЦЕНКЕ РИСКА ПРИ ТЕХНОГЕННОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ЗАГРЯЗНЕНИИ ЭКОСРЕДЫ*

Y.G. Grigoriev^{1,2}, A.P. Birukov¹

Mobile Communications and Public Health: a Risk Assessment of the Man-Caused Electromagnetic Ecological Pollution on Environmental Quality

РЕФЕРАТ

Бурное развитие сотовой связи принципиально изменило условия облучения населения за последние годы и стало основным экспозиционным фактором формирования условий облучения населения в радиочастотном диапазоне. Облучение населения электромагнитными полями сотового телефона является качественно новым для человека физическим фактором воздействия, не имеющим аналогов в природной среде.

Рассмотрены и проанализированы результаты экспериментальных, клинических и эпидемиологических исследований реакций головного мозга в условиях облучения электромагнитными полями нетепловых уровней радиочастотного диапазона.

Ключевые слова: электромагнитное поле, сотовый телефон, дети, подростки, риск воздействия, непосредственные и отдаленные последствия, рекомендации

ABSTRACT

Rapid development of mobile communications changed the terms of public exposure fundamentally in recent years and has become a major factor in shaping the conditions for the public exposure to radio waves. Population exposure with mobile phone electromagnetic fields is a new physical factor that has no analogues in the nature.

The article reviews and analyzes the results of experimental, clinical and epidemiological studies of the brain reactions on irradiation of non-thermal electromagnetic field of radio frequency levels.

Key words: electromagnetic field, cell phone, children, adolescents, risk of exposure, immediate and long-term effects, recommendations

При работе сотового телефона (СТ) обязательно подвергаются воздействию электромагнитных полей радиочастот (ЭМП РЧ) нервные структуры головного мозга и рецепторы слухового и вестибулярно-

го анализаторов, расположенные во внутреннем ухе (рис. 1, 2). В этих условиях головной мозг становится критическим органом.

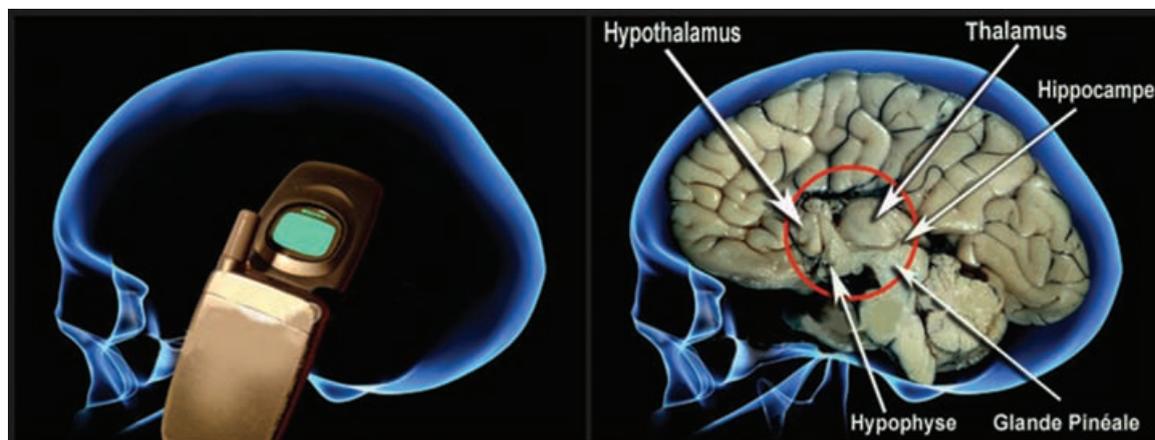


Рис. 1. Локализация поглощения ЭМП сотового телефона в мозге при пользовании сотовой связью

* Это первая опубликованная в журнале обзорная статья по оценке опасности для здоровья населения техногенного электромагнитного загрязнения окружающей среды. Редакция будет благодарна читателям за мнение о возможности публикации подобных материалов в соответствующих разделах нашего журнала.

¹ Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва. E-mail: profgrig@gmail.com; abirukov@fmbcfmba.ru

² Консультативный комитет ВОЗ по Международной программе «ЭМП и здоровье»

¹ Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of FMBA, Moscow, Russia. E-mail: profgrig@gmail.com; abirukov@fmbcfmba.ru

² Scientific Advisory Committee of the World Health Organization “EMF and Health”

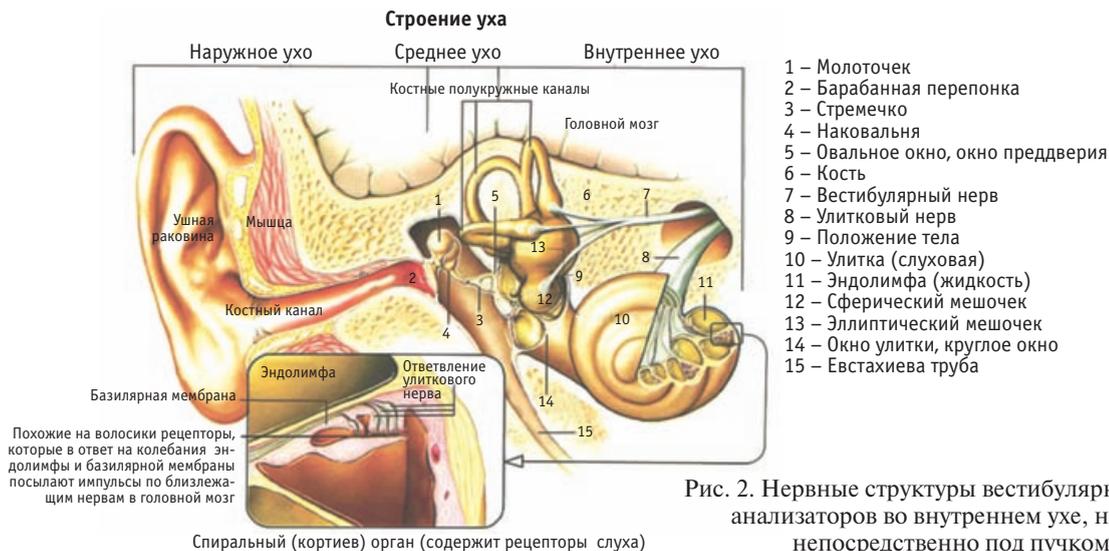


Рис. 2. Нервные структуры вестибулярного и слухового анализаторов во внутреннем ухе, находящиеся непосредственно под пучком ЭМП

Воздействие ЭМП РЧ на мозг при использовании СТ может происходить с различной периодичностью, с отсутствием прогноза суммарного времени его использования в суточном и во всем жизненном циклах. Таким образом, условия воздействия на головной мозг пользователя СТ не могут быть предсказуемыми и полностью зависят от многих обстоятельств и, прежде всего, от самого пользователя. Учитывая это, мы относим сотовые телефоны к открытым (без защиты) и не контролируемым источникам электромагнитного излучения, т.е. к источникам значимого воздействия и повышенной опасности.

Между тем, для оценки риска для пользователя СТ необходимо выделение групп пользователей как по возрасту, так и по профессии, чтобы получить достаточно презентабельные данные о величинах поглощенной энергии, которая может привести к нарушению здоровья пользователя, и, прежде всего, функции головного мозга. Конечно, приоритетным в настоящей ситуации является критерий достоверного нарушения функции головного мозга. Однако имеется мнение, что риски надо считать только тогда, когда имеется вероятность неблагоприятных последствий. По весомости доказательств по критериям GHS [1] риски могут подразделяться на категории: подозреваемый, предполагаемый и доказательный.

В настоящее время имеется ряд нормативных и рекомендующих документов, обязывающих информировать человека о риске опасности при использовании источника с опасным видом излучения. Например, в документе МАГАТЭ (2011) в п. 3.150 отмечается, что «ни один пациент... не должен подвергаться медицинскому облучению, если ... он не информирован... о рисках, связанных с воздействием излучения» [1]. Это требование также отражено в принятых в России

Нормах радиационной безопасности (НРБ-99/2009) [2]. ВОЗ издало руководство «Построение диалога о рисках от электромагнитных полей» [3], в котором констатируется, что «Потенциальный риск для здоровья человека от воздействия ЭМП, возникающий от линий электропередач, базовых станций мобильной телефонной связи и других источников, создает круг трудных задач для людей, ответственных за принятие решений. Круг этих задач включает: определение опасности для здоровья человека от воздействия ЭМП и потенциального влияния ЭМП на здоровье, т.е. оценка риска».

На актуальность этой проблемы было обращено внимание научным Комитетом Евросоюза. В феврале 2013 г. в Брюсселе Европейской комиссией здравоохранения и защиты потребителей (DG SANCO) было проведено рабочее совещание EMF Workshop on Risk Communication, на котором обсуждалась проблема доведения до пользователей мобильной связи данных о возможной опасности для их здоровья. Фактически, в результате более 15-летних дискуссий и споров, не были определены бесспорные аргументы, позволяющие говорить об опасности мобильной связи для населения. В основном внимание уделялось ситуациям/условиям, когда воздействие было хроническим и имело небольшую интенсивность. В этих условиях было трудно прийти к согласию о наличии бесспорной патологии. Это устраивало и профильную промышленность.

Один из авторов этой статьи был специально приглашен на этот Европейский форум и предложил выделить четыре постулата, или аксиомы, абсолютной истины, которые безапелляционно указывают на опасность для здоровья пользователей [4]. Эти четыре постулата имеют значение для обеспечения

полного понимания населением электромагнитной опасности, связанной с мобильной связью.

Первый постулат: в мобильной связи используется ЭМП РЧ. Этот вид электромагнитного излучения относится к вредным видам излучения. Во всех странах этот вид излучения нормируется. Превышение допустимых уровней ЭМП может привести к патологии. Мы все должны согласиться, что использование ЭМП требует ограничения и гигиенического контроля.

Второй постулат: ЭМП и мозг. Мобильный телефон является открытым источником ЭМП и не имеет защиты. ЭМП РЧ непосредственно воздействует на головной мозг при использовании мобильного телефона. Нервные системы внутреннего уха (слуховой и вестибулярные аппараты) непосредственно находятся под пучком ЭМП.

Третий постулат: ЭМП РЧ и дети. Дети впервые за весь период цивилизации подвергают свой головной мозг воздействию ЭМП. Риск повреждения мозга ребенка по сравнению с взрослым мозгом намного больше. Мозг ребенка поглощает энергии больше и, как следствие, воздействие ЭМП происходит на большей глубине и на большее количество жизненно важных структур головного мозга (рис. 3). Кроме того, дети более уязвимы к внешним факторам окружающей среды и с этим согласна ВОЗ [5].

Четвертый постулат: отсутствие адекватных рекомендаций/стандартов. Фактически отсутствуют материалы о возможных патологических эффектах после длительного воздействия ЭМП на мозг взрослых и детей. Как следствие, нет научной базы для соответствующих стандартов.

По нашему мнению, эти четыре постулата являются бесспорными и их достаточно, чтобы проинформировать население, что мобильная связь требует особого внимания, требует гигиенического сопровождения и может быть опасна для здоровья. Уже наступил период, когда необходимо проинформировать население о возможной электромагнитной опасности при использовании мобильной связи. Конечно, мы должны напомнить людям, что все тело человека также постоянно дополнительно подвергается круглосуточному воздействию ЭМП базовых станций и Wi-Fi [4].

Таким образом, в настоящее время мы можем с уверенностью утверждать, что бесконтрольное использование мобильной связи имеет потенциальную опасность для здоровья населения, в этой ситуации мы считаем, что надо считать риски, даже если сохраняется только вероятность таких последствий. Однако конкретные риски этой опасности для населения до сих пор не установлены, хотя проведены

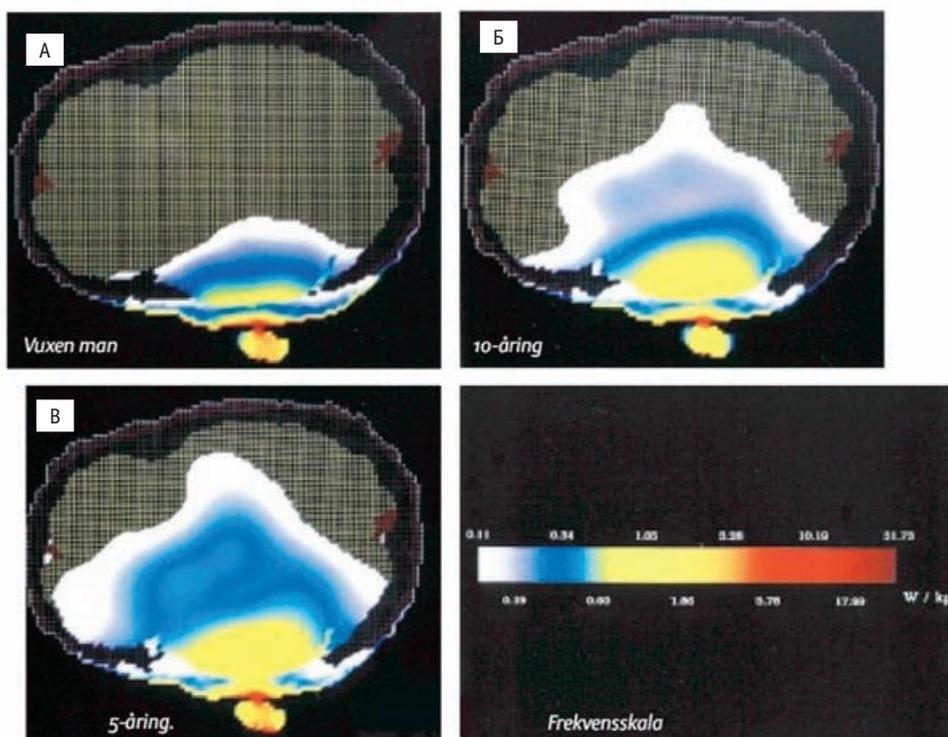


Рис. 3. Распределение поглощенной энергии в мозге взрослого и у детей разного возраста (5 и 10 лет) при использовании мобильного телефона (Gandhi O. et al., 1996).
Примечание: А – взрослый; Б – ребенок 10 лет; В – ребенок 5 лет

как экспериментальные, так и эпидемиологические исследования большого объема.

Для понимания необходимости проведения исследований по определению рисков для здоровья населения при использовании мобильной связи мы считаем необходимым, во-первых, сделать достаточно краткое обобщение полученных основных результатов при воздействии ЭМП РЧ СТ на мозг и, во-вторых, попытаться выявить среди многочисленных результатов бесспорный значимый патологический эффект для оценки риска.

Прежде всего, нами будут рассмотрены и проанализированы результаты экспериментальных исследований реакций головного мозга в условиях облучения ЭМП РЧ нетепловых уровней у лабораторных животных зрелого возраста.

Первые работы по исследованию возможных реакций головного мозга на острое и хроническое воздействие относятся к 60–70 гг. прошлого столетия. В 1959 г. в лаборатории академика М.Н. Ливанова при изучении влияния рентгеновского излучения на ЦНС кроликов мы встретились со следующим фактом. Проводя контрольное исследование в условиях, когда напряжение накала в трубку рентгеновского аппарата не подавалось, т.е. в это время рентгеновское излучение не генерировалось, а давалось лишь высокое напряжение на анод, мы обнаружили, что электроэнцефалограмма (ЭЭГ) кролика отчетливо изменяется. Очевидно, в основе этих изменений могли лежать только две причины: во-первых, влияние звука, возникающего при работе трансформатора; во-вторых, действие электромагнитных колебаний, возникающих при высоком напряжении на трубке и в подводящем кабеле. Полное хирургическое двустороннее выключение слуха не устранило наблюдаемого эффекта. Кроме того, при «мнимом» воздействии, воспроизводящем обстановку опыта, но без включения высокого напряжения, биоэлектрическая активность мозга совершенно не изменялась. Следовательно, наше первое предположение не могло быть причиной зарегистрированного явления. Оставалась вторая возможность, т.е. влияние ЭМП. В связи с этим, в дальнейшем нами, под руководством академика М.Н. Ливанова, были проведены эксперименты, уже целенаправленные на изучение действия ЭМП на ЦНС [6].

Реакцию ЦНС при действии ЭМП мы зарегистрировали у 84 из 98 кроликов. Почти во всех случаях развивалась отчетливая депрессия биопотенциалов коры головного мозга, причем амплитуда снижалась в 2–4 раза. Только у 3 кроликов было отмечено усиление электрической активности мозга за счет появления высокоамплитудных быстрых коле-

баний. Реакция в коре наступала вскоре после начала воздействия и была зарегистрирована в большинстве случаев уже в первые секунды. Депрессия колебаний биопотенциалов чаще всего длилась 2–8 с. Однако у отдельных животных эта реакция была более продолжительной и держалась в течение всего периода воздействия, а иногда и после его окончания. Изменение биоритма мозга наблюдалось у всех кроликов. Как показал частотный анализ ЭЭГ, произведенный по методу Бернштейна–Ливанова, эти изменения сводились чаще всего к ослаблению колебаний с частотой от 1,3 до 8 Гц. В пользу того, что эти изменения являются ответной биологической реакцией мозга на воздействие ЭМП, говорят следующие факты: во-первых, реакции, как правило, имели латентный период 1–2 с, а иногда и более; во-вторых, при длительном воздействии ЭМП первоначально резко измененная ЭЭГ в большинстве случаев приближалась к исходной; в-третьих, у наркотизированных животных реакции, ранее отчетливо наблюдавшиеся, не регистрировались.

Для определения зоны действия ЭМП мы поставили опыты с поочередным выключением некоторых анализаторов. При этом обнаружилось, что одновременное перерезание зрительных нервов и выключение обоняния, а также разрушение вестибулярного аппарата и слуха не устранили действие ЭМП. Следовательно, указанные анализаторы, очевидно, не играют существенной роли в восприятии ЭМП. Возможно, в реализации этого биоэффекта могут принимать участие и другие рецепторные системы.

Естественно, мы предположили, что ЭМП влияет непосредственно и на структуры головного мозга. На это предположение указывали следующие полученные нами результаты. При отведении биопотенциалов через кость, т.е. когда трепанация черепа не производилась, изменения были выражены гораздо слабее и не всегда регистрировались. Правда, в этом случае мы не могли исключить, что в результате трепанации повышалась чувствительность мозга к ЭМП. Кроме того, можно было предположить, что изменения ЭЭГ происходят благодаря наведенному напряжению на проводниках отводящих электродов с последующим прямым воздействием на ткани мозга. Однако специально поставленные в дальнейшем опыты полностью исключили это предположение. Так, эксперименты, в которых отводящие электроды были шунтированы на землю конденсаторами различной емкости (до 1,0 мкФ), показали, что в этих условиях действие ЭМП сохранялось. Кроме того, оказалось, что размещение кролика в экранирующий контейнер, представляющий собой герметический железный ящик с толщиной стенки, равной 3,5 мм, исключало наблюдаемый эффект, несмотря на то, что отводящие про-

вода проходили вне экрана. Мы пришли к выводу, что в наших опытах ЭМП действовало непосредственно на головной мозг животного [6].

Frey A. (1975) [7] высказал предположение, что ЭМП РЧ малой интенсивности могут оказывать прямое воздействие на клетки головного мозга. Эта гипотеза стала известна как эффект Фрая. Следует отметить, что уже тогда это утверждение вызвало бурю негодования в сообществе ученых, имеющих отношение к разработке стандартов ЭМП РЧ, а также в промышленности и в военном ведомстве США. В противоположность мнению Фрая, в то время господствовала точка зрения, что только воздействие теплового уровня ЭМП РЧ может привести к неблагоприятным последствиям для здоровья, а ЭМП нетеплового уровня безвредны.

А.С. Пресман (1968) выдвинул гипотезу о нетепловом информационном действии ЭМП на головной мозг [8]. Он высказал предположение, что при определенных условиях ЭМП нетеплового уровня может привести к неблагоприятным проявлениям со стороны психики человека. Ю.А. Холодовым был проведен большой цикл исследований по влиянию ЭМП различных частот на головной мозг [9, 10]. На основании полученных данных им была высказана гипотеза о кумуляции нарушений при повторных воздействиях ЭМП, о развитии судорожного синдрома в условиях комбинированного действия ЭМП и других физических факторов внешней среды, о наличии прямого действия ЭМП на мозг.

Признано, что критерием воздействия ЭМП на головной мозг являются изменения поведенческих реакций экспериментальных животных. В России было проведено большое число работ по изучению поведенческих реакций и двигательной активности у различных экспериментальных животных под влиянием ЭМП [9, 11–13, 15]. К.В. Судаков и соавт. исследовали реакции у животных в условиях кратковременных воздействий модулированных ЭМП малой интенсивности [9, 10]. Было показано влияние ЭМП на эмоциональную сферу животных, эпилептическое и гипногенное действие, вплоть до развития каталепсии.

В последующие годы, признавая, что головной мозг является критическим органом, коллективом отдела неионизирующих излучений Института биофизики Минздрава СССР (РФ) под руководством Ю.Г. Григорьева и С.Н. Лукьяновой был выполнен большой объем исследований влияния ЭМП РЧ низкой интенсивности на головной мозг. В экспериментах на кроликах были показаны достоверные изменения суммарной биоэлектрической активности гиппокампа при тотальном воздействии ЭМП 1,5 ГГц с плотностью потока энергии (ППЭ) 300 мкВт/см²

в импульсном и пачечно-импульсном режимах [14]. Во всех сериях сдвиги в биотоках мозга определялись исходным фоном и не выходили за пределы нормального уровня функционирования. Незначительные изменения были получены только в гиппокампе. Они проявлялись в виде модификации θ -активности, но в пределах физиологической нормы, причем реакции зависели от исходного фона. Эти данные позволили предположить подпороговый характер микроволнового воздействия с данной интенсивностью в условиях острого кратковременного облучения. Тем не менее, хорошо известна способность θ -активности распространяться из гиппокампа на другие структуры мозга и синхронизировать их деятельность в условиях повторных предъявлений раздражителя. Такие же изменения энергии θ -диапазона описаны в отечественной и зарубежной литературе как ЭЭГ-корреляты эмоциональных и поведенческих проявлений, а также различных форм памяти. На этом основании можно предположить, что хроническое электромагнитное облучение с теми же параметрами может привести к более значимым изменениям.

В экспериментах с преимущественным облучением головного мозга кроликов ЭМП с частотой 6 ГГц в непрерывном режиме в широком нетепловом диапазоне ППЭ от 30 до 400 мкВт/см² была поставлена задача получить дозозависимость по критерию изменений биоэлектрической активности мозга [16]. Был получен неожиданный результат: интенсивность регистрируемых изменений биоэлектрической активности мозга не зависела прямо пропорционально от величины интенсивности электромагнитного воздействия. Оптимальные изменения были зарегистрированы при воздействии определенных ППЭ: 70, 180 и 280 мкВт/см². Эти данные позволили авторам сделать вывод, что в этих экспериментах был получен эффект «энергетических окон» [17].

Р.А. Чиженкова [18, 19] показала, что при кратковременных воздействиях ЭМП РЧ возникающие изменения в ЭЭГ носят генерализованный характер, при этом изменения биотоков мозга происходит не только в коре, но и в подкорковых структурах мозга. Были получены отчетливые изменения импульсации корковых нейронов на основе пачечной активности популяций корковых нейронов под влиянием микроволнового облучения нетепловой интенсивности. Показано как наличие структурных перестроек импульсных потоков корковых нейронов, так и влияние ЭМП СВЧ-диапазона на межспайковые интервалы. Проведенные исследования с использованием ряда моделей, таких как перерезание ствола мозга, локальное разрушение ретикулярной формации среднего мозга или заднего вентролатерального ядра таламуса, позволило Р.А. Чиженковой сделать заключение,

что «полученные ранее изменения биоэлектрической активности мозга являются результатом непосредственного действия СВЧ облучения на кору больших полушарий, что может привести к нарушению передающей информации в более сложные структуры мозга».

С.Н. Лукьянова, обобщая результаты ранее проведенных собственных исследований, а также результаты, полученные другими авторами, пришла к выводу, что ЭМП РЧ малой интенсивности оказывают синхронизирующее действие на биоэлектрические процессы в мозге при формировании ответных реакций в мозге, что «может быть причиной судорожных проявлений эпилептического типа» [20].

У лиц, имеющих постоянный контакт с ЭМП в производственных условиях, несмотря на гигиенические меры защиты, регистрировали различные формы судорожной активности мозга, чаще возникающие при сенсорных провокациях [21]. Известный специалист в США по оценке биологического действия ЭМП РЧ С. Майкелсон еще в 1975 г. писал, что «наиболее типичными явлениями биологического действия микроволн были мышечные спазмы, появление тремора и клонических судорог» [22].

С. Smith в 1984 г. [23] опубликовал клинические наблюдения, показав, что при определенных условиях и некоторых режимах модуляции однократное воздействие ЭМП очень низкой интенсивности (4 мВт/см²) может привести к развитию судорожного синдрома.

Высказано предположение, что при использовании мобильной связи TETRA, в которой используется модуляция 17,6 Гц, что соответствует бета-ритму ЭЭГ, у пользователей могут возникнуть приступы эпилепсии [24]. Были зарегистрированы эпилептиформные разряды на ЭЭГ у кроликов и крыс непосредственно после воздействия модулированных ЭМП [25]. При этом авторы не использовали каких-либо дополнительных воздействий.

К настоящему времени опубликовано несколько статей, в которых было показано, что кроме модуляции несущей частоты и сложного режима электромагнитного воздействия, усиление биоэффекта может быть обусловлено одновременным воздействием нескольких несущих частот с различной модуляцией. При этом важно ответить, что в случае одновременного действия ЭМП различного диапазона происходит не простое суммирование их действий, а совместное синергическое воздействие на биологические ткани, причем они взаимно усиливают эти процессы [26].

Ю.А. Холодов (1964) зарегистрировал судорожные разряды в ЭЭГ у обезьян и конвульсивные сокращения мышц после воздействия импульсных магнитных полей 0,3 Тл. Однако эти реакции возникали

у животных, ранее облученных ионизирующим излучением или после механического повреждения мозга (вживление электродов). Автор, исходя из предположения о наибольшей чувствительности к ЭМП гипоталамуса, считает, что подобное состояние может возникнуть у человека после магнитной стимуляции мозга [27].

В 1986–1987 гг. Ю.Г. Григорьевым и соавт. был воспроизведен судорожный синдром у кроликов вследствие острого однократного их облучения ЭМП РЧ нетеплового уровня при использовании нескольких несущих частот со сложным режимом сигнала воздействия. Данный эффект был устойчивым [28]. Однако этот патологический синдром возникает при более сложных условиях электромагнитного воздействия и пока не может быть критерием оценки риска для пользователей СТ.

Большое внимание было уделено оценке возможного влияния ЭМП РЧ на память. Были проведены исследования по влиянию ЭМП на формирование памяти при облучении ЭМП в эксперименте на цыплятах [29–31]. Для этого впервые была использована модель импринтинга. Под запечатлением/импринтингом понимают реакции, образующиеся у животных в самый ранний период жизни (сразу после рождения). Проведенные исследования показали, что кратковременное воздействие немодулированным ЭМП в период эмбрионального развития может привести к нарушению процесса импринтинга. Наибольшие изменения в виде отсутствия запечатлечения у 100 % цыплят отмечались при воздействии ЭМП с ППЭ 10 и 8 мВт/см². При меньших интенсивностях ЭМП (1 и 0,4 мВт/см²) наблюдалась лишь частичная потеря способности к запечатлению. В итоге авторы получили дозозависимую зависимость в диапазоне низких нетепловых уровней ЭМП РЧ по критерию нарушений нервной деятельности головного мозга в модельном эксперименте.

В 1989 г. Lai et al. [32] опубликовали результаты эксперимента, проведенного на крысах по оценке когнитивных функций после кратковременного однократного воздействия ЭМП 2450 МГц низкого уровня (ППЭ 1 мВт/см², SAR 0,6 Вт/кг). Животные находились под облучением в течение 45 мин. Опыты проводили с использованием классической методики – водного лабиринта Мориса. Облученные животные плохо ориентировались в лабиринте, совершали больше ошибок, возникал дефицит пространственной памяти. Авторы предположили, что ЭМП РЧ низких уровней активируют эндогенные опиаты, которые, в свою очередь, приводят к снижению холинергической активности в гиппокампе и в коре головного мозга.

Хорошо известно, что холинергическая система играет важную роль в функции памяти и, в частности, в реализации у животных поискового рефлекса (пространственной памяти). Для подтверждения этого возможного механизма влияния ЭМП РЧ низкого уровня на пространственную память была поставлена другая серия экспериментов [32]. В результате были получены данные, указывающие на блокировку холинергической системы в гиппокампе и в коре головного мозга при воздействии ЭМП (налоксон уменьшал эффект электромагнитного воздействия). Результаты этого эксперимента подтвердили, по мнению авторов, их гипотезу, что ответственным за ухудшение пространственной памяти после однократного импульсного воздействия ЭМП РЧ является уменьшение холинергической деятельности в гиппокампе и фронтальной области коры головного мозга.

Были опубликованы данные и с отрицательным результатом, которые были получены на мышах [33]. В работах Cobb, Jauchem, Adair (2004), Dubreuil et al. (2003), Cassel et al. (2004), Cosquer et al. (2005), выполненных на крысах, также был получен отрицательный результат [34–36].

При проведении дальнейших исследований вновь были получены данные, указывающие на нарушение когнитивных функций. Шведские специалисты Nittby H. et al. (2008) нашли ухудшение памяти у крыс после длительного воздействия ЭМП СТ [37].

Были поставлены эксперименты на мышах (Fragoroulou A. et al., [38]). В качестве источника ЭМП авторы использовали коммерчески доступный СТ. Воздействие ЭМП GSM с частотой 900 МГц (ППЭ 0,05–0,2 мВт/см², удельная мощность поглощения SAR 0,41–0,98 Вт/кг) было ежедневным по 2–4 ч в течение 4 сут (общее время воздействия 9,5 ч). В работе использовалась методика водяного бассейна Мориса. В результате четырехдневных дробных облучений облученные мыши имели трудности в консолидации памяти или исправления запасенной информации в отношении положения скрытой платформы.

О нарушениях в поведении животных при хронических воздействиях ЭМП РЧ с низкими уровнями SAR (менее 4 Вт/кг) было сообщено в ряде других публикаций (De Witt J et al., 1987, 0,14 Вт/кг [39]; Gage M., 1979, 3 Вт/кг [40]; King N., 1971, 2,4 Вт/кг [41]; Lai H., 1989, 0,6 Вт/кг [42]; Mitchell D., 1977, 2,3 Вт/кг [43]; Navakatikian M., Tomashevskaya L., 1994, 0,027 Вт/кг [44]; Schrot J., Tomas J., Banvard R., 1980, 0,7 Вт/кг [45]; Thomas J. et al., 1975, от 1,5 до 2,7 Вт/кг [46]; Wang B., Lai H., 2000, 1,2 Вт/кг [47]).

Позднее были исследованы адаптивное поведение и нейрохимические реакции ЦНС у мелких лабораторных животных (мышей и крыс разного возраста) при воздействии модулированным ЭМП очень

низкой интенсивности – ППЭ 15 мкВт/см² [48]. В первых экспериментах была исследована структура спонтанного поведения при различной продолжительности воздействия – от 15 и до 120 мин. При всех режимах воздействия прослеживалась тенденция к снижению/торможению ориентировочно-исследовательской активности, наблюдалось угнетение ориентировочного рефлекса. У контрольных животных («ложное облучение») наблюдалась стереотипная двухволновая картина динамики активности в открытом поле, которая характеризовалась сменой начальной реакции страха исследовательской активностью с последующим ее угасанием. У облученных животных доминирование реакции страха сохранялось в течение всего опыта, угнетая ориентировочно-исследовательскую активность и замедляя процессы адаптации к экспериментальной обстановке. Четкой зависимости от времени воздействия не было получено. Принимая во внимание, что эффекты воздействия ЭМП выявлялись уже при 15-минутной экспозиции, а статистически значимые изменения основных показателей поведения были зарегистрированы при продолжительности воздействия 30 мин, в последующих опытах авторы использовали только время 30 мин. Полученные эффекты не зависели от вида животных, их характер был одинаков как у мышей, так и у крыс.

В работе А.С. Штенберга и соавт., 2000 [48] было исследовано содержание моноаминов норадреналина, дофамина и серотонина и некоторых их метаболитов – диоксифенилуксусной (ДОФУК) и 5-оксииндолуксусной (5-ОИУК) кислот в двигательной коре мозга крыс после воздействия ЭМП 970 МГц. У облученных животных было отмечено достоверное 4-кратное снижение уровня норадреналина по сравнению с контролем (опыт 0,131 ± 0,014; контроль 0,484 ± 0,047; $p < 0,01$). Это коррелирует с ранее зарегистрированным снижением двигательной активности у облученных животных. Изменение содержания дофамина, серотонина и их метаболитов было недостоверно.

Однако мы хотим обратить внимание на то, что ранее, в начале 1980-х гг., по решению Советско-Американской комиссии по проблеме «Изучение биологического действия физических факторов окружающей среды», был проведен синхронный эксперимент в США и СССР по оценке возможного влияния однократного воздействия ЭМП РЧ на ЦНС [49]. Опыт проводился на крысах, которые подвергались однократному облучению ЭМП 2,45 ГГц с ППЭ 10 мВт/см² в течение 7 часов. Оценивали поведение животных в тесте «открытое поле» и процесс обучения – выработка условного рефлекса избегания. Как в эксперименте, проведенном в США (Национальный

институт гигиены окружающей среды), так и в СССР (Киевский НИИ общей и коммунальной гигиены им. А.Н. Марзеева) не было получено каких-либо отклонений от показателей контрольных животных.

Имеют важное значение исследования возможных когнитивных функций при длительном хроническом воздействии ЭМП РЧ с использованием нескольких различных значений интенсивности.

Авторы работ [15, 44] при исследовании когнитивных функций использовали в своих опытах пять величин ППЭ: 1, 5, 10, 50 и 500 мкВт/см². Облучение ЭМП 2375 МГц осуществлялось по 7 ч в день. В первой серии экспериментов воздействие длилось 2 мес. с ППЭ 500 мкВт/см². Обследование животных проводили в процессе облучения на 10, 20, 30, 60 и 90 сут, а также после воздействия на 15, 30, 45, 60, 75 и 90 сут. В процессе двухмесячного облучения отмечено угнетение исследовательской активности крыс в тесте «открытое поле» и ухудшение консолидации оборонительных условных рефлексов в челночной камере. Однако исследовательская активность после прекращения последнего облучения резко увеличилась. Во второй серии экспериментов при трехмесячном облучении с ППЭ 50 и 10 мкВт/см² также имело место угнетение исследовательской активности животных в период воздействия. На третьем месяце облучения обнаружено резкое нарушение процесса выработки условного оборонительного рефлекса. Отмечено не только снижение количества межсигнальных реакций, но и нарушение консолидации следа памяти в этих облученных группах. Важно отметить, что ухудшение показателей условно-рефлекторной деятельности (УРД) сохранялось спустя 2 месяца после окончания воздействия ЭМП с ППЭ 50 и 10 мкВт/см². В третьей серии экспериментов при облучении животных ЭМП с ППЭ 1 и 5 мкВт/см² в течение 3 мес. изменения УРД были слабо выражены.

Е.А. Лобанова [50] исследовала характер изменения условнорефлекторной деятельности крыс в зависимости от интенсивности и длительности воздействия микроволнового излучения. Автор использовал как однократные острые, так и хронические воздействия, длительностью до 4,5 мес. с ППЭ от 1 до 10 мВт/см². Ежедневные экспозиции были различны — от 15 мин до 4 ч. Во всех сериях хронического облучения было получено изменение условнорефлекторной деятельности крыс. Характер этих изменений зависел, прежде всего, от величины ППЭ. Например, при ППЭ 1 мВт/см² первые признаки изменения условнорефлекторной деятельности крыс (удлинение латентного периода положительного условного рефлекса, уменьшение условной двигательной реакции и ее прочности) были зарегистрированы только после 48 облучений. При ППЭ 10 мВт/см² перечисленные

изменения были отмечены уже после первого воздействия у отдельных крыс, а после 6 облучений — у 83 % опытных животных.

В.Н. Никитина и соавт. [51] исследовали влияние ЭМП РЧ 1765 МГц, создаваемого судовой радиолокационной станцией, на самцов крыс при воздействии по 2 ч в день в течение 4 мес. с ППМ 100 мкВт/см². Было установлено, что хроническое СВЧ-облучение вызывает изменения в поведении животных, приводит к стойким нарушениям механизмов памяти, не восстанавливающимся в период последействия.

В некоторых работах не было получено каких-либо изменений со стороны поведения животных, их когнитивных функций. Dubreuil D. et al. [52] регистрировали в эксперименте только незначительные изменения памяти под влиянием ЭМП в течение до одной недели. Отрицательный результат был получен также в [53, 54].

Использованные методы для оценки когнитивных функций достаточно сложны, и на результаты их применения может повлиять несколько факторов, особенно в условиях хронических экспериментов при низких уровнях воздействующего фактора. Рассмотрение факторов, которые могут влиять на эти результаты, достаточно полно изложены в работах [55, 56]. Исследования по изучению когнитивных функций у животных после длительных и повторных облучений только головного мозга с последующим наблюдением за развитием возможных отдаленных последствий отсутствуют. Однако рассмотренные выше результаты исследований, с нашей точки зрения, исключительно важны, т.к. дают возможность подойти к оценке чувствительности ЦНС к ЭМП РЧ при достаточно длительном воздействии, оценить возможное развитие неблагоприятных изменений в деятельности мозга даже при относительно непродолжительном облучении, сделать прогноз как о развитии клинической патологии, так и о возможности компенсации нарушенных функций.

На протяжении последних более 20 лет, начиная с 1988 г., профессор L. Salford с коллегами проводили исследования по влиянию ЭМП сотового телефона на головной мозг крыс, оценивая состояние гематоэнцефалического барьера (ГЭБ). Все эти опыты были проведены на крысах, которых подвергали воздействию ЭМП в специальных безэховых камерах (TEM-cells). Первое обобщение этих результатов было сделано в четырех публикациях Salford L. et al. [57–60]

Результаты проведенных экспериментов показали, что под влиянием однократного воздействия ЭМП СТ нетермального уровня уже в течение 2 ч после облучения происходит повышение проницаемости ГЭБ для альбумина, которое сохраняется более

одного месяца. Альбумин проникает в ткани головного мозга и аккумулируется в нейронах, вокруг их, в клетках глии, вокруг кровеносных капилляров.

Имеются публикации, подтверждающие выводы Salford L. [61]. Tore et al. были получены данные об увеличении проницаемости ГЭБ у крыс через 2 ч после их облучения ЭМП РЧ SAR 0,5 и 2 Вт/кг. Более выраженный эффект был при воздействии ЭМП SAR 2 Вт/кг. По мнению Salford L. et al., повышенная проницаемость глобулина через ГЭБ и его попадание в мозговую ткань может привести в последующем к повреждению нейронов [59].

Однако до сих пор существуют и противоположные точки зрения по этой проблеме. Finnie J. et al. [62, 63] не получили повышения проницаемости ГЭБ у мышей после их облучения ЭМП стандарта GSM в течение 104 нед. с различными величинами SAR — 0,25, 1,0, 2,0 и 4,0 Вт/кг. Отрицательные результаты были опубликованы также в работах других авторов [64–68].

Таким образом, полученные очень важные результаты по изменению функции ГЭБ вызывают сомнения и не подтверждаются в смежных лабораториях, т.е. описанные эффекты не являются бесспорными.

За последние 17 лет было проведено около 40 исследований по оценке возможного неблагоприятного влияния ЭМП СТ преимущественно на головной мозг пользователей. Информация об этих исследованиях представлена в работе [69]. Осуществлялись только кратковременные однократные или повторные воздействия ЭМП РЧ на протяжении короткого интервала времени. Длительность каждого воздействия, как правило, не превышала одного часа. Однако в большинстве наблюдений создавались реальные условия воздействия ЭМП сотового телефона на пользователя. Исследовали широкий спектр функций организма. Безусловно, эти исследования важны для понимания непосредственных реакций организма, прежде всего головного мозга, на электромагнитное облучение. Однако, по нашему мнению, результаты этих исследований не позволяют оценить опасность длительного ежедневного электромагнитного облучения головного мозга пользователя в течение нескольких лет и определить симптомокомплекс, характеризующий нарушение здоровья у пользователя СТ. Конечно, результаты этих исследований позволяют сделать важный вывод, что головной мозг воспринимает электромагнитное излучение мобильного телефона, как правило, во время каждого его использования. Проявление этого восприятия может находить свое выражение в различной форме: изменяются биопотенциалы головного мозга, кровотоков мозга, гормональные реакции, отмечаются когнитивные

нарушения и ряд других проявлений. Необходимо отметить, что эти проявления не имеют закономерного характера, они могут иметь различную степень выраженности и быть нестойкими. Часть из этих проявлений может приводить к дополнительному включению компенсаторных реакций. Однако условия этих исследований (отсутствие длительного хронического воздействия) не позволяют зарегистрировать уровень срыва компенсаторных/адаптивных реакций.

Мы хотим еще раз обратить внимание читателя, что перечисленные исследования на добровольцах не позволяют оценить возможные последствия для функции мозга при условии его ежедневного многолетнего непосредственного облучения. Соответствующие функциональные продолжительные наблюдения на добровольцах до сих пор не проводились ни отечественными, ни зарубежными учеными.

Естественно, возникает вопрос о состоянии здоровья у пользователей сотовыми телефонами.

В течение 1995–1996 гг. в Швеции и Норвегии большое число пользователей сотовых телефонов так же начали предъявлять жалобы на головные боли, плохое самочувствие, на трудность концентрации внимания, чувство жара в некоторых областях кожи, а также на состояние гиперчувствительности к электромагнитным полям [70–72].

Практически аналогичные исследования были проведены в Австралии [73]. При опросе пользователи жаловались на неприятные симптомы в области головы, причем большинство из них — в темпоральной и затылочной областях и в области уха. Значительная часть опрошенных это ощущали уже через 5 мин от начала разговора. Однако эти ощущения нарастали, если разговор длился около часа. Эти неприятные симптомы сохранялись примерно у половины опрошенных. 75 % опрошенных отметили, что интенсивность этих проявлений зависела от длительности использования СТ. Если пользователи переходили на гарнитуру «свободные руки», то интенсивность неблагоприятных проявлений снижалась.

Имеется и другая точка зрения, в соответствии с которой нет оснований считать, что жалобы на ухудшение здоровья связаны с использованием СТ. Безусловно, ряд перечисленных жалоб являются результатом воздействия ЭМП на головной мозг. Однако жалобы пользователей не могут быть самостоятельным критерием для оценки опасности ЭМП СТ, хотя они являются хорошим дополнением к соответствующей оценке при наличии объективных данных.

На основании большинства представленных отечественных и зарубежных материалов можно сделать вывод о возможном изменении деятельности головного мозга у пользователей СТ в результате регуляр-

ных ежедневных воздействий ЭМП РЧ в течение длительного периода времени (годы). Однако остается неясным вопрос о значимости этих функциональных изменений, приведут ли они к неблагоприятным эффектам, влияющим на жизнедеятельность пользователя. Это ограничивает возможности в получении оценки риска.

С учетом значимости возможного развития отдаленных последствий в настоящее время наиболее активно проводятся весьма трудоемкие эпидемиологические исследования по оценке возможного развития опухолей мозга при долговременном ЭМП СТ.

До 2003 г. было опубликовано несколько эпидемиологических исследований о возможной зависимости между использованием сотовых телефонов и развитием опухоли мозга, в которых были получены отрицательные результаты [75–78]. Шведские ученые, которые начали свои эпидемиологические исследования с 1997 г., получили первые результаты, указывающие на возможную корреляцию между воздействием ЭМП РЧ на мозг и развитием злокачественных опухолей соответствующих локализаций [79–80].

Hardell et al. [81] провели оценку развития опухолей головного мозга у жителей Швеции с 1997 по 2000 гг., используя анкетный опрос. Выводы авторов были основаны на 1303 случаях. Анализ был сделан с учетом типа телефонов (аналоговые, цифровые или переносные), продолжительности и регулярности пользования, вида и локализации опухоли и др. В этом исследовании был отмечен статистически значимый риск развития различных опухолей мозга при использовании аналоговых телефонов. Относительный риск (ОР) повышался с 1,3 (95 % доверительный интервал ДИ 1,02–1,6) до 1,4 при 5 годах ожидания развития опухоли, и до 1,8 при 10 и более лет ожидания. Для цифровых телефонов не было увеличения риска как при 5, так и после 10 лет ожидания. Никаких различий не было получено и для переносных телефонов (ОР – 1,0; 95 % ДИ 0,8–1,2). При использовании аналоговых телефонов наиболее высокий риск был отмечен для опухолей височной доли мозга (ОР 2,0; 95 % ДИ 1,3–3,1) для 5 лет ожидания и ОР 2,6 для 10 лет ожидания. Для цифровых телефонов не были получены данные об увеличении риска (ОР 1,0; 95 % ДИ 0,7–1,4). При расположении опухоли в височной области мозга на стороне использования СТ риски были выше – 1,8; 1,3 и 1,3 для аналоговых, цифровых и переносных телефонов соответственно. Риски для противоположной стороны были 0,9; 0,8 и 0,7 соответственно.

В 2003 г. на Международной конференции в Будапеште «Мобильная связь и головной мозг» Hardell и Mild [82] доложили результаты своих много-

летних исследований в 1997–2000 гг. [82]. Они провели дополнительный анализ материала эпидемиологических исследований 1617 пациентов в возрасте 20–80 лет, которые были разделены на 5 групп с интервалом по 10 лет. Анализ различий между этими возрастными группами показал повышенный риск развития опухолей мозга в группе пользователей СТ возраста 20–29 лет (ОР 5,91; 95 % ДИ 0,63–55). При использовании аналоговых телефонов в течение 5–10 лет риск развития опухоли в возрастной группе 20–29 лет 8,17 (95 % ДИ 0,94–71), а для беспроводных телефонов – ОР 4,30 (95 % ДИ 1,22–15). Для других возрастных категорий такой зависимости не было обнаружено. Дополнительный анализ этих данных показал, что лица группы 20–29 лет уже в детском возрасте начали пользоваться СТ. Эти результаты показывают, что использование СТ в детском и юношеском возрасте, начиная с 10 и более лет, может увеличить риск развития опухоли мозга у пользователей по сравнению с группой, где СТ начали использовать в более старшем возрасте.

В более поздних публикациях делается заключение о возможности развития глиомы мозга на стороне использования СТ по длительности более 10 лет [83]. Авторы пришли к такому выводу на основе обобщения результатов эпидемиологических исследований, проведенных в 5 северных европейских странах: Дании, Норвегии, Финляндии, Швеции и Юго-Восточной Англии, где СТ использовались населением более 10 лет.

Дальнейшее широкое использование сотовых и безшнуровых телефонов, конечно, явилось предпосылкой для предположений о повышении риска развития злокачественных опухолей мозга [84]. В работах Hardell et al. [85–87] были подтверждены ранее полученные данные о высоком риске развития опухоли акустической невриномы, хотя некоторые авторы отрицают возможность повышения риска развития акустических невром [88–90].

Позднее были приведены в весьма убедительные данные о развитии опухолей мозга у пользователей СТ на основании анализа установленных диагнозов за 1997–2007 гг. [91–96]. Кроме того, сделано предварительное сообщение о развитии опухолей головного мозга у лиц различных возрастных групп с начала использования СТ с 1997–2000 гг. [97]. Хотим отметить, что все эти исследования не финансировались соответствующей промышленностью.

По итогам эпидемиологических исследований, проведенных L. Hardell et al., можно сделать следующие основные выводы:

1. Обнаружено увеличение риска развития астроцитомы и акустической невромы на ипсилатеральной стороне головного мозга пользователей сотовыми

и переносными телефонами. Самый высокий риск был отмечен при латентном периоде свыше 10 лет, при этом риск повышался с 1,3 до 1,8.

2. Особенно высокий риск развития опухоли мозга был получен для людей, которые начали использовать сотовые и переносные телефоны в возрасте 8–10 лет – риск возникновения опухоли мозга может увеличиться до 5 раз.
3. Увеличение риска развития опухоли зависит от общей длительности пользования сотовыми и беспроводными телефонами.

В 2010 г. были опубликованы итоги многолетнего эпидемиологического исследования возможного развития опухолей мозга у лиц, пользовавшихся сотовыми телефонами более 10 лет [98]. Работа была проведена в рамках международной программы Interphone под эгидой ВОЗ и при координации Международного агентства по изучению рака (МАИР).

Результаты проведенного эпидемиологического исследования по программе Interphone были отрицательными: «В целом, не было повышения риска развития глиомы или менингиомы, связанного с использованием сотовых телефонов, к 10 годам после начала использования СТ». Однако были предложения допустить возможное увеличение риска для глиомы, и в гораздо меньшей степени для менингиомы, при самых высоких уровнях воздействия ЭМИ СТ для ипсилатеральной стороне облучения височной доли (высокий уровень воздействия – суммарное время разговора около 1640 ч). Авторы сразу же оговариваются, что предубеждения и возможные допущенные ошибки ограничивают значимость этого дополнения к заключению. Между тем, авторы делают важный вывод, что возможные эффекты долгосрочного интенсивного использования мобильных телефонов требуют дальнейшего исследования.

По поводу итоговой публикации по результатам международной программы Interphone была открыта в Интернете широкая дискуссия, главным мотивом которой был тезис «недооценки реальной опасности» по причине допущенных ряда недостатков при проведении этого исследования.

Важны и точки зрения руководителей программы Interphone в отношении значимости полученных результатов (WHO, Press release, No. 200, 17 May 2010). Мнение директора МАИР К. Вилда: «Увеличение риска развития рака головного мозга не установлено по данным исследования Interphone. Однако наблюдения для высокого уровня совокупного времени разговора и изменяющихся образцов использованных сотовых телефонов, начиная с периода начала данного исследования, особенно в отношении молодых людей, подразумевают, что дальнейшее исследование использования сотового телефона и риска развития

рака мозга должно продолжиться». Научный руководитель программы Э. Кардис считает, что «исследования Interphone должны продолжаться с дополнительной оценкой риска для опухолей акустического нерва и околоушной железы». Она добавила, «что из-за существующих беспокойств о быстром увеличении числа молодых людей, пользователей СТ, будет открыт новый проект MobiKids “Исследование риска развития опухолей мозга от использования сотовых телефонов в детстве и юности”», финансируемый Европейским Союзом. Она высказала предположение, что у тех, кто использует сотовый телефон каждый день в течение 15 минут на протяжении семи лет, риск возникновения рака мозга может вырасти до 72 %. М. Feuchting считает, что на современном уровне наших знаний, нельзя категорично отрицать возможность развития опухолей головного мозга у пользователей СТ [99].

Учитывая подобную неоднозначность приведенных результатов исследований, следует абстрагироваться от многочисленных причинно-следственных моделей канцерогенного эффекта радиочастотных электромагнитных полей и попытаться оценить ситуацию с чисто эпидемиологических позиций.

По результатам эпидемиологических исследований, проводимых в экономически развитых странах, рост заболеваемости опухолями мозга наблюдается повсеместно. Удельный вес злокачественных опухолей головного мозга (ОГМ) среди всех злокачественных новообразований варьирует от 4 до 8 % [100–106]. Согласно официальной статистике, стандартизованные по возрасту уровни заболеваемости ОГМ наиболее высоки в развитых индустриальных странах. В Западной Европе, Северной Америке, Австралии заболеваемость ОГМ, включая менингиомы, составляет 6–19 случаев на 100 тыс. мужского и 4–18 случаев на 100 тыс. женского населения [107].

Лечение этих больных является одним из самых затратных из-за высокой инвалидизации, малой продолжительности и низкого качества жизни пациентов. При этом летальность, даже при своевременном проведении оперативного лечения, остается высокой по сравнению с результатами хирургического лечения новообразований иных локализаций [109–111].

С учетом социальной значимости патологии, исследования заболеваемости первичными ОГМ проводились в разное время как в Российской Федерации, так и за рубежом [112–117]. Поэтому в открытой печати можно легко найти результаты этих исследований и оценить динамику процесса заболеваемости в развитых странах. Именно динамика процесса, ее основные тенденции и периоды представляют особый интерес для эпидемиологической диагностики, т.е. процесса постановки эпидемиологического заключе-

ния путем анализа эпидемиологических данных, их обобщения и истолкования (в нашем случае, раскрытия значения и взаимосвязей заболеваемости ОГМ).

McKinley et al. [118] установили, что в течение 20-летнего периода, с 1976 по 1995 г., заболеваемость глиобластомами в штате Нью-Йорк у мужчин возросла на 33 %, у женщин – на 65 %, а заболеваемость анапластическими астроцитомами за 10-летний период, с 1984 по 1995 г., у мужчин – на 150 %, у женщин – на 160 %. Сравнительный анализ заболеваемости первичными ОГМ в Австралии в периоды 1978–1985 и 1986–1992 гг. показал достоверный рост заболеваемости во всех возрастных группах взрослого населения, особенно старше 75 лет, причем у мужчин в этом возрасте показатель увеличился с 16,3 до 26,2, а у женщин – с 9,7 до 18,0 на 100 тыс. населения. По данным Н. Christensen et al., в Дании показатель заболеваемости глиомами мозга в 1993–1997 гг. по сравнению с периодом 1943–1947 гг. увеличился в 1,7 раза [119].

В целом, общую картину динамики заболеваемости ОГМ в США и странах Западной Европы можно охарактеризовать как ежегодное повышение уровней заболеваемости на 1–2 % в год за период 1980–90 гг., в особенности среди пожилых и детей [120–121].

Значимая тенденция к возрастанию уровней заболеваемости опухолями ЦНС (С71–72) отмечена и в Российской Федерации. За 11 лет стандартизованный показатель заболеваемости вырос с 3,2 на 100 тыс. населения в 2000 г. до 4,2 на 100 тыс. населения в 2010 г. Среднегодовой темп прироста опередил все другие основные локализации и составил 2,9 % [101].

Большинство авторов придерживается достаточно оптимистической трактовки данных эпидемиологических исследований ОГМ: основное влияние на статистические показатели частоты выявления опухолей головного мозга оказало повышение общей культуры и санитарного просвещения населения, а также применение передовых медицинских технологий и более совершенных методов диагностики и лечения. И хотя те же авторы подчеркивают неизученность целого ряда эпидемиологических аспектов развития ОГМ, можно отметить основные, на наш взгляд, черты развития динамики заболеваемости ОГМ. Это неуклонный рост уровня заболеваемости, характеризующийся достаточно четко локализованным началом подъема, который в США и странах Западной Европы соответствует 1980–1990 гг., а в России – на 10–20 лет позже. Это наблюдение, с учетом результатов экспериментальных и клинических подтверждений потенциальной канцерогенности радиочастотных ЭМП, свидетельствует о несомненной актуальности дальнейшего изучения ситуации, необходимости совершенствования медико-технологиче-

ских стандартов и научно-обоснованных рекомендаций по повышению эффективности профилактики и лечения ОГМ.

Таким образом, на сегодня пока имеются противоречивые результаты по канцерогенному действию ЭМП СТ. Однако проведенные исследования не дают право сделать категорический вывод об отсутствии такого рода опасности. Мы имеем большое основание ожидать повышения риска развития опухолей мозга у пользователей СТ. Этот вывод был в 2011 г. подкреплен Решением МАИР [122].

МАИР классифицировало радиочастотные электромагнитные поля по группе 2В, как возможное канцерогенное излучение для людей, основываясь на увеличенном риске для глиомы, которая относится к очень злокачественной опухоли мозга. При этом МАИР особо отметило, что данное решение имеет большое значение для здравоохранения, особенно для пользователей сотовых телефонов, поскольку число пользователей постоянно растет, особенно среди молодежи и детей. Решение МАИР обуславливает необходимость дальнейших расчетов риска, открывает новый этап проведения соответствующих исследований и ставит новые серьезные задачи по профилактике возможного развития рака мозга у пользователей сотовыми телефонами, включая все группы населения.

В последнее время появились публикации, в которых ставится под сомнение решение МАИР [123]. Однако, по нашему мнению, после решения МАИР возникла ситуация, когда от ряда ученых и соответствующей промышленности, которые ранее отрицали и отрицают в настоящее время возможность развития рака у пользователей СТ, теперь требуется получение абсолютно достоверных конкретных результатов, доказывающих, что развитие опухолей мозга при длительном использовании СТ невозможно.

Конечно, решение МАИР ставит перед обществом социальные и этические проблемы, а перед учеными – необходимость определения степени риска для населения при воздействии ЭМП РЧ от всех источников, в том числе от источников мобильной связи. Возникают непреодолимые трудности в оценке дозовых нагрузок от различных одновременно присутствующих источников ЭМП РЧ, учета фактора времени, локального и общего облучения тела, возрастной группы выбранной когорты. Пока предельно ясным и достоверным критерием для оценки риска является постулат, что под постоянным и дополнительным периодическим воздействием ЭМП РЧ находятся все группы населения.

Требуется принципиально новый подход к организации и проведению соответствующих исследований, включая оценку развития всего комплекса от-

даленных последствий, и в том числе дегенеративных процессов. По мнению членов Российского национального комитета по защите от неионизирующих излучений (РНКЗНИ), мы можем ожидать дополнительно следующих клинических проявлений дегенеративных процессов у пользователей сотовыми телефонами: приобретенное слабоумие, депрессивный синдром и другие проявления дегенерации нервных структур головного мозга в возрасте 50–60 лет [124].

К сожалению, следует отметить, что в России до сих пор не проводились соответствующие эпидемиологические исследования, а также непосредственные эксперименты по проблеме «Мобильная связь и отдаленные последствия».

Таким образом, элементы мобильной связи являются для всего населения новыми источниками воздействия ЭМП РЧ и это воздействие прогнозируется как опасное для здоровья. Однако до сих пор нет конкретных данных о величинах риска этого воздействия для населения.

С.В. Двоглазова, С.И. Савельев [125] провели длительные исследования (более 15 лет) по комплексной оценке физических факторов неионизирующей природы с попыткой оценить риск для здоровья и экологический риск. Они оценивали антропогенную нагрузку по известному критерию безопасности, а именно по отношению фактического уровня измеряемого фактора к нормируемому значению или ПДУ. Несмотря на длительный период работы над этой проблемой, авторы пришли к выводу, что на сегодня нельзя получить достаточно полного представления об условиях, в которых формируется современный или будет формироваться прогнозируемый уровень здоровья населения под влиянием как физических факторов, так и антропогенных нагрузок в целом. Вполне логично, что данная проблема, по мнению авторов, может быть решена при помощи «оценки величины, длительности и частоты воздействия на человека и числа людей, подвергающихся воздействию физических факторов неионизирующей природы»

Учитывая сложность электромагнитной радиационной обстановки в окружающей среде, по нашему мнению, на сегодня основным фактором риска можно считать развитие опухолей мозга у пользователей мобильными телефонами, где можно более или менее конкретизировать условия облучения и подобрать соответствующую когорту населения для оценки риска.

Заключение

1. Проведенные за последние 20 лет исследования указывают на возможное неблагоприятное влияние ЭМП мобильной связи на здоровье населения.

2. Несмотря на существующие оценки об опасности для здоровья ЭМП мобильной связи, продолжается массовое и бесконтрольное использование этой связи всеми группами населения, включая детей. Учитывая это, мы считаем необходимым проинформировать население о возможной опасности. При этом характер и объем использования мобильной связи должны временно стать для населения фактором самостоятельного выбора, т.е. перейти в категорию добровольного риска.
3. Из-за опасности, присущей микроволновой технологии связи и отсутствия соответствующей нормативной базы и гигиенического сопровождения, предлагаемый нами вариант самостоятельного выбора должен иметь ограниченный по времени срок, носить временный характер до неотложного решения всех проблем, связанных с электромагнитной безопасностью населения, что поможет сохранить здоровье нынешнего и последующих поколений.
4. Международное агентство по изучению рака классифицировало радиочастотные электромагнитные поля по группе 2В как возможно канцерогенное излучение для людей, основываясь на увеличенном риске для глиомы, которая относится к злокачественным опухолям мозга. Это решение МАИР, основанное на изучении последствий использования сотовых телефонов, создает условия для расширения исследований оценки риска развития заболеваний головного мозга у пользователей СТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IAEA Safety Standards. International Basic Safety Standards, General Safety Requirements, Part 3. — Vienna: IAEA, 2011.
2. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). — М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009, 100 с.
3. Построение диалога о рисках от электромагнитных полей. — Женева: ВОЗ, 2004, 66 стр.
4. *Grigoriev Yu.* Four indisputable postulate / truth to the risk assessment of mobile communications for public health (our opinion). Speech workshop on risk communication. — Brussels: SANCO, 2013.
5. WHO. Healthy environments for children. // Background, 2003, No. 3, April 3 p.
6. *Ливанов М.Н., Цыпин А.Б., Григорьев Ю.Г. и соавт.* К вопросу о действии электромагнитного поля на биологическую активность коры головного мозга кролика. // Бюлл. эксперим. биологии и медицины, 1960, **49**, No. 5, С. 63–67.
7. *Frey A., Feld S., Frey B.* Neural function and behavior: defining the relationship. — Ann NY Acad Sci, 1975, **247**, P. 433–439.
8. *Пресман А.С.* Электромагнитные поля и живая природа. — М.: Наука, 1968, 288 с.

9. Холодов Ю.А. Реакции нервной системы на ЭМП. — М.: Наука, 1975, 284 с.
10. Холодов Ю.А. Влияние электромагнитных и магнитных полей на центральную нервную систему. — М.: Наука, 1996, 284 с.
11. Судаков К.В., Антимоний Г.Д. Центральные механизмы действия электромагнитных полей. // Успехи физиологических наук, 1973, **4**, № 2, С. 101–135.
12. Судаков К.В. Модулированное электромагнитное поле как фактор избранного воздействия на механизм целенаправленного поведения животных. // Журнал высшей нервной деятельности, 1976, № 5, С. 899–108.
13. Судаков К.В., Антимоний Г.Д. О гипногенном действии модулированного электромагнитного поля. // Бюлл. эксперим. биологии и медицины, 1977, **66**, № 8, С. 146–149.
14. Григорьев Ю.Г., Лукьянова С.Н., Макаров В.П., Рынсков В.В. Суммарная биоэлектрическая активность различных структур головного мозга в условиях низкоинтенсивных МКВ-облучений. // Радиационная биология. Радиоэкология, 1995, **35**, № 1, С. 29–35.
15. Наватикян М.А. Изменение активности и условно-рефлекторной деятельности белых крыс в период микроволнового облучения и после него. // Радиобиология, 1988, **28**, № 1, С. 121–125.
16. Лукьянова С.Н., Макаров В.П., Рынсков И.И. Зависимость изменений суммарной биоэлектрической активности головного мозга на низкоинтенсивное МКВ-облучение от плотности потока энергии. // Радиационная биология. Радиоэкология, 1996, **36**, № 5, С. 706–713.
17. Adey R. Частотные и энергетические окна при воздействии слабых электромагнитных полей на живую ткань. // ТИИЭР, 1980, **68**, № 1, С. 140–148.
18. Чиженкова Р.А. Биопотенциалы головного мозга кролика при воздействии электромагнитным полем. // Физиол. журнал СССР, 1967, **53**, № 5, С. 514–519.
19. Чиженкова Р.А. Влияние СВЧ облучения низкой интенсивности на импульсные потоки нейронов коры больших полушарий. // В сб. «Проблемы электромагнитной нейробиологии». Под ред. Ю.А. Холодова, Н.Н. Лебедевой. — М.: Наука, 1988. С. 24–31.
20. Чиженкова Р.А. Импульсные потоки популяций корковых нейронов коры больших полушарий кроликов при сверхвысокочастотном облучении низкой интенсивности: пачечная активность. // Нейрофизиология, 2008, **40**, № 5–6, С. 417–425.
21. Лукьянова С.Н. Феноменология и генез изменений в суммарной биоэлектрической активности головного мозга на электромагнитное излучение. // Радиационная биология. Радиоэкология, 2002, **42**, № 3, С. 308–314.
22. Гордон З.В. Вопросы гигиены труда и биологическое действие электромагнитных полей СВЧ диапазона. — М.: Медицина, 1966, С. 47–56.
23. Майкелсон С. Радиоизлучения. Магнитные и электрические поля. // В кн. «Основы космической биологии и медицины». Совместное советско-американское издание в трех томах. — М.: Наука, 1975, **2**, С. 9–58.
24. Smith C.W. Electromagnetic Phenomena in Living Biomedical Systems. IEEE Frontiers of Engineering and Computing in Health Care, CH2058-6/84/0000-0176, 1984, P. 176–180.
25. Pedersen G., Andersen J. RF and ELF exposure from cellular phone handsets: TD MA and CDMA systems. // Radiat. Protect. Dosimetry, 1999, **83**, P. 131–138.
26. Baransky S., Edekwejn Z. In: Biol. Effects and Health Hazards of Microwave Radiation. — Warsaw: Pol. Med. Publ., 1973, P. 36–42.
27. Терлецкий Н.А. О пользе и вреде излучения для жизни. — М.: УРСС, 2001, 64 с.
28. Холодов Ю.А. Судорожная электрическая активность мозга при воздействии различных электромагнитных полей. // В кн. «Гигиена населенных мест». Вып. 34, Киев, 1999, С. 137–139.
29. Григорьев Ю.Г., Григорьев О.А. Мобильная связь и здоровье населения: оценка опасности, социальные и этические проблемы. // В сб. «VI съезд по радиационным исследованиям (радиобиология, радиоэкология, радиационная безопасность)», 25–28 октября 2010 г. — М.: РУДН, 2010, том 1, С. 6.
30. Григорьев Ю.Г., Степанов В.С. Формирование памяти (импринтинг) у цыплят после предварительного воздействия электромагнитных полей низких уровней. // Радиационная биология. Радиоэкология, 1998, **38**, № 2, С. 223–231.
31. Григорьев Ю.Г., Бесхлебнова Л.И., Митяева З.Я. Влияние микроволн на импринтинг цыплят. // Радиобиология, 1984, **24**, № 2, С. 204–207.
32. Grigoriev Yu., Stepanov V. Microwave effect on embryo brain: dose dependence and the effect of modulation. // In: Radio Frequency Radiation Dosimetry. Ed by B. Klauenberg. Kluwer Academic Publishers., 2000, P. 31–37.
33. Lai H., Horita A., Guy W. Microwave irradiation affects radial-arm maze performance in the rat. // Bioelectromagnetics, 1994, **15**, P. 95–104.
34. Sienkiewicz Z., Blackwell R., Haylock R. et al. Low-level exposure to pulsed 900 MHz microwave radiation does not cause deficits in the performance of a spatial learning task in mice. // Bioelectromagnetics, 2000, **21**, P. 151–158.

34. Cobb B., Jauchem J., Adair E. Radial arm maze performance of rats following repeated low level microwave radiation exposure. // *Bioelectromagnetics*, 2004, **25**, No. 1, P. 49–57.
35. Dubreuil D., Yay T., Edeline J. Head-only exposure to GSM 900 MHz electromagnetic fields does not affect rat's memory in spatial and non-spatial tasks. // *Behav. Brain Res.*, 2003, **145**, P. 51–61.
36. Cassel J., Cosquer B., Galani et al. Whole-body exposure to 2,45 GHz electromagnetic fields does not alter radial-maze performance in rats. // *Behav. Brain Res.*, 2004, **155**, P. 37–43.
37. Nitby H., Grafstrom G., Tian D. et al. Cognitive impairment in rats after long-term exposure to GSM-900 mobile phone radiation. // *Bioelectromagnetics*, 2008, **29**, P. 219–232.
38. Frangopoulou A., Miltiadous P., Stamatakis A. et al. Whole body exposure with GSM 900 MHz affects spatial memory in mice. // *Bioelectromagnetics*, 1987, **8**, P. 149–157.
39. De Witt, D'Andrea J., Emmerson R., Gandhi O. Behavioral effects of chronic exposure to 0.5 mW/cm² of 2450 MHz microwaves. // *Pathophysiology*, 2010a, **17**, P. 1179–1187.
40. Gage M. Behavior in rats after exposure to various power densities of 2450 MHz microwaves. // *Neurobehav. Toxicol.*, 1979, **1**, P. 137–148.
41. King N., Justesen D., Clarke R. Behavioral sensitivity to microwave irradiation. // *Science*, 1971, **172**, P. 398–401.
42. Lai H., Carino M.A., Horita A., Guy A.W. Low-level microwave irradiation and central cholinergic systems. // *Pharmacol. Biochem. Behav.*, 1989 May, **33**, No. 1, P. 131–138.
43. Mitchel D.S., Swizer W.G., Bronaugh E.L. Hyperactivity and disruption of operant behavior in rats after multiple exposures to microwave radiation. // *Radio Sci.*, 1977, **12**, P. 263–271.
44. Navakatikian M., Tomashevskaya L. Phasic behavioral and endocrine effects of microwaves of nonthermal intensity. // In: *Biological effects of electric and magnetic fields*. Ed. by D. Carpenter. – San Diego: Academic Press, C.A., 1994, 358 pp.
45. Schrott J., Thomas J.R., Banvard R.A. Modification of the repeated acquisition of response sequences in rats by low-level microwave exposure. // *Bioelectromagnetics*, 1980, **1**, P. 89–99.
46. Thomas J., Finch E., Fulk D. et al. Effects of low level microwave radiation on behavioral baselines. // *Ann. NY Acad.*, 1975, **247**, P. 425–432.
47. Wang B., Lai H. Acute exposure to pulsed 2450-MHz microwaves affects water-maze performance of rats. // *Bioelectromagnetics*, 2000, **21**, P. 52–56.
48. Штенберг А.С., Узбеков М.Г., Шихов С.Н. и соавт. Видовые, возрастные особенности и некоторые нейрхимические корреляты спонтанного поведения животных после воздействия электромагнитных полей сверхнизкой интенсивности. // *Журнал высшей нервной деятельности*, 2000, **50**, № 4, С. 703–714.
49. Mitchell C.L., McRee D.I., Peterson J. et al. Some behavioral effects of short-term exposure of rats to 2.45 GHz microwave radiation. // *Bioelectromagnetics*, 1988, **9**, P. 259–268.
50. Лобанова Е.А. Изменения условнорефлекторной деятельности крыс в зависимости от интенсивности и длительности воздействия микроволнового излучения. // *Гигиена труда и проф. забол.*, 1979, № 12, С. 30–34.
51. Никитина В.Н., Каляда Т.В. Экспериментальное изучение воздействия микроволн малой интенсивности на сердечно-сосудистую систему. // В кн. «Физические факторы производственной среды и их влияние на состояние здоровья работающих». – М.: Мир, 1980, С. 55–59.
52. Dubreuil D., Yay T., Edeline J. Head-only exposure to GSM 900 MHz electromagnetic fields does not affect rat's memory in spatial and non-spatial tasks. // *Behav. Brain Res.*, 2003, **145**, P. 51–61.
53. Finnie J., Blumbergs P., Cai J. et al. Effect of mobile telephony on blood-brain barrier permeability in the fetal mouse brain. // *Pathology*, 2006, **38**, P. 63–65.
54. Yamaguchi H., Tsurita G., Ueno S. et al. 1439 MHz pulsed TDMA fields after performance of rats in a T-maze task only when body temperature is elevated. // *Bioelectromagnetics*, 2003, **24**, P. 223–230.
55. Лифшиц Н.Н. О причинах разногласий в оценке радиочувствительности ЦНС между исследователями, применяющими условнорефлекторный и лабиринтный методы. // *Радиобиология*, 1967, **5**, С. 790–800.
56. Бинги В.Н. Два типа магнитных биологических эффектов: индивидуальный и групповой. // *Биофизика*, 2012, **57**, № 2, С. 338–345.
57. Salford L., Brun A., Eberhardt J., Malmgren I., Persson B. Nerve cells damage in mammalian brain after exposure to microwaves from GSM mobile phones. // *Environmental Health Perspectives*, 2003, **111**, No. 71, P. 881–883.
58. Salford L., Nitby H., Brun A. et al. Effects of microwave radiation upon the mammalian blood-brain barrier. Non-thermal effects and mechanism of interaction between electromagnetic fields and living matter. // *Eur. J. Oncol.*, 2010, **5**, P. 333–356.
59. Salford L.G., Brun A., Stureson K. et al. Permeability of the blood-brain-barrier induced by 915 MHz electromagnetic-radiation, continuous wave and modu-

- lated at 8, 16, 50 and 200 Hz. // *Microsc. Res. Tech.*, 1994, **27**, P. 535–542.
60. Eberhardt J., Grafstrum G., Malmgren L. et al. Blood-brain barrier permeability and nerve cell damage in the rat brain 14 and 28 days after exposure to microwaves from GM mobile phones // *Electromagn. Biol. Med.*, 2008, **27**, P. 215–229.
 61. Fritze K., Sommer C., Schmitz B. et al. Effect of global system for mobile communication (GSM) microwave exposure on blood-brain barrier permeability in rat. // *Acta Neuropathol. (Berl.)*, 1997, **94**, P. 465–470.
 62. Finnie J., Blumbergs P., Manavis J. et al. Effect of long-term mobile communication microwave exposure on vascular permeability in mouse brain. // *Pathology*, 2002, **34**, P. 244–347.
 63. Finnie J., Blumbergs P., Manavis J. et al. Effect of global system for mobile communication (GSM) like radiofrequency fields on vascular permeability in mouse brain. // *Pathology*, 2001, **33**, P. 338–340.
 64. Kuribayashi M., Wang J., Fujiwara O. et al. Lack of effects of 1439 MHz electromagnetic near field exposure on the BBB in immature and young rats. // *Bioelectromagnetics*, 2005, **26**, P. 578–588.
 65. Tsurita G., Nagawa H., Ueni S. et al. Biological and morphological effects on the brain after exposure of rats to a 1439 MHz TDMA field. // *Bioelectromagnetics*, 2000, **21**, P. 364–371.
 66. Mc Quade J., Merritt J., Miller S. et al. Radiofrequency-radiation exposure does not induce detectable leakage of albumin across the blood-brain barrier. // *Radiat. Res.*, 2009; **171**, P. 615–621.
 67. Masuda H., Ushiyama A., Wang J. et al. Effects of 925 MHz electromagnetic field radiation in TEM cell on the blood-brain barrier and neurons in the rat brain. // *Rad. Res.*, 2009, **172**, P. 66–71.
 68. Poullietier de Gannes F., Billaudel B., Taxile M. et al. Effects of head-only exposure of rats to GSM-900 on blood-brain barrier permeability and neuronal degeneration. // *Rad. Res.*, 2009, **172**, P. 359–367.
 69. Григорьев Ю.Г., Григорьев О.А. Сотовая связь и здоровье: электромагнитная обстановка, радиобиологические и гигиенические проблемы, прогноз опасности. — М.: Экономика, 2013, 567 с.
 70. Hansson Mild K., Oftedal G., Sandstrum M. et al. Comparison of symptoms experienced by users of analogue and digital mobile phones. A Swedish-Norwegian epidemiological study. // *Arbetslivsrapport*, 1998, **23**, P. 47–54.
 71. Oftedal G., Sandstrum M., Hansson Mild K., Wilen J. Symptoms experienced in connection with use of mobile phones. A Swedish-Norwegian epidemiological study. // BEMS, 20th Annual Meeting, St Pete Beach, Florida, 1998, June 7–11, P. 99.
 72. Sandstrum M., Wilen X., Oftedal G., Hansson Mild K. Mobile phone use и subjective symptoms. Comparison of symptoms experienced by users of analogue and digital mobile phones. // *Occup. Med.*, 2001, **51**, № 1, P. 25–32.
 73. Hocking B. Preliminary report: Symptoms associated with mobile phone use. // *Occup. Med.*, 1998, **48**, P. 357–360.
 74. Cosquer B., Kuster N., Cassel J. Head-only exposure to GSM 900 MHz electromagnetic fields does not affect 12-arm radial-maze with reduced access to spatial cues in rats. // *Behav. Brain Res.*, 2005, **161**, P. 331–334.
 75. Muscat J., Malkin M., Thompson S. et al. Handheld cellular telephone use and the risk of brain cancer. // *JAMA*, 2000, **284**, P. 3001–3007.
 76. Jnskip P., Tarone R., Hatch E. et al. Cellular-telephone use and brain tumors. // *N. Engl. J. Med.*, 2001, **344**, P. 79–86.
 77. Johansen C., Boice J., McLaughlin J. et al. Cellular telephones and cancer — a nationwide cohort study in Denmark. // *J. Nat. Cancer Inst.*, 2001, **93**, P. 203–207.
 78. Auvinen A., Hietanen M., Luukkonen R. et al. Brain tumors and salivary gland cancers among cellular telephone users. // *Epidemiology*, 2002, **13**, P. 356–359.
 79. Hardell L., Nasman A., Pahison A. et al. Use of cellular telephones and the risk for brain tumours: a case-control study. // *Int. J. Oncol.*, 1999, **15**, P. 113–116.
 80. Hardell L., Hansson Mild K., Pahlson A., Hallquist A. Ionizing radiation, cellular telephones and the risk for brain tumours. // *Eur. J. Cancer Prevention*, 2001, **10**, P. 523–529.
 81. Hardell L., Hallquist A., Hansson Mild K. et al. Cellular and cordless telephones and the risk for brain tumors. // *Eur. J. Cancer Prev.*, 2002, **11**, P. 377–386.
 82. Hardell L., Hansson Mild K. Mobile and cordless telephones and association with brain tumours in different age groups. // Abstract book. 5-th COST 281 MCM and Workshop «Mobile telecommunications and the brain». — Budapest: 15–16 Nov., 2003, P. 13.
 83. Lahkola A., Auvinen A., Raitanen J. et al. Mobile phone use and risk of glioma in 5 north European countries. // *Int. J. Cancer*, 2007, **120**, P. 1769–1775.
 84. Hardell L., Sage C. Biological effects from electromagnetic field exposure and public exposure standards. // *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2008, **62**, 104–109.
 85. Hardell L., Hallquist A., Hansson Mild K. et al. Cellular and cordless telephones and the risk for brain tumours. // *Eur. J. Cancer Prev.*, 2002a, **11**, P. 377–386.
 86. Hardell L., Hansson Mild K. Mobile phone use and acoustic neuromas. // *Epidemiology*, 2003, **16**, P. 415–418.
 87. Hardell L., Carlberg M., Hansson Mild K. Case-control study on cellular and cordless telephones and the risk for acoustic neuroma or meningioma in patients di-

- agnosed 2000–2003. // *Neuroepidemiology*, 2005, **25**, P. 120–128.
88. *Muscat J., Malkin M., Shore R. et al.* Handheld cellular telephones and risk of acoustic neuroma. // *Neurology*, 2002, **58**, P. 1304–1306.
 89. *Jnskip P., Tarone R., Hatch E. et al.* Cellular-telephone use and brain tumors. // *N. Engl. J. Med.*, 2001, **344**, P. 79–86.
 90. *Ahlbom A., Feychting M., Green A. et al.* Epidemiologic evidence on mobile phones and tumor risk: a review. // *Epidemiology*, 2009, **20**, P. 639–652.
 91. *Hardell L., Carlberg M., Hansson Mild K.* Pooled analysis of two case-control studies on the use of cellular and cordless telephones and the risk of benign brain tumors diagnosed during 1997–2003. // *Int. J. Oncol.*, 2006, **28**, P. 509–518.
 92. *Hardell L., Carlberg M., Hansson Mild K.* Pooled analysis of two case-control studies on the use of cellular and cordless telephones and the risk for malignant brain tumors diagnosed during 1997–2003. // *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 2006, **79**, P. 630–639.
 93. *Hardell L. et al.* Case-control study of the association between the use of cellular and cordless telephones and malignant brain tumors diagnosed during 2000–2003. // *Environ. Res.*, 2006, **100**, P. 232–234.
 94. *Hardell L., Carlberg M., Soderqvist F. et al.* Long-term use of cellular phones and brain tumours: increased risk associated with use for >10 years. // *Occup. Environ. Med.*, 2007, **64**, P. 626–632.
 95. *Hardell L., Carlberg M., Soderqvist F., Hansson Mild K.* Meta-analysis of long-term mobile phone use and the association with brain tumours. // *Int. J. Oncol.*, 2008, **32**, P. 1097–1103.
 96. *Hardell L., Carlberg M.* Mobile phones, cordless phones and the risk for brain tumours. // *Int. J. Oncol.*, 2009, **35**, P. 5–17.
 97. *Hardell L., Hansson Mild K., Carlberg M., Hallquist A.* Cellular and cordless telephones and the association with brain tumours in different age group. // *Arch. Environ Health*, 2004, **59**, P. 132–137.
 98. *Cardis E. et al.* Brain tumor risk in relation to mobile telephone use: results of the INTERPHONE international case-control study. // *Int. J. Epidemiol.*, 2010, **3**, P. 1–20.
 99. *Feychting M.* Current mobile phone studies. // *Int. Joint Conference “Non-Ionizing Radiation and Children’s Health”*. – Slovenia, May 2011, P. 4.
 100. *Давыдов М.И., Аксель Е.М.* Статистика злокачественных новообразований в России и странах СНГ в 2009. // *Вестник РОНЦ им. Н.Н. Блохина РАМН*. – М., 2012, С. 9.
 101. *Чиссов В.И., Старинский В.В., Петрова Г.В.* Злокачественные новообразования в России в 2010 г. (заболеваемость и смертность), – М.: ФГБУ «МНИОИ им. П.А. Герцена» Минздравсоцразвития России, 2012, 260 с.
 102. *Сафин Ш.М.* Структурный анализ опухолей центральной нервной системы в Республике Башкортостан. // *Материалы IV съезда нейрохирургов России*, Москва, 18–22 июня 2006 г. – М., 2006, С. 214.
 103. *Ковалев Г., Музлаев Г.* Эпидемиология первичных опухолей головного мозга на территории Краснодарского края // *Материалы IV съезда нейрохирургов России*, Москва, 18–22 июня 2006 г. – М., 2006, С. 178–179.
 104. *CBTRUS Statistical Report: Primary Brain and Central Nervous System Tumors Diagnosed in the United States in 2004–2008.* // URL http://www.cbtrus.org/2012-NPCR-SEER/CBTRUS_Report_2004-2008_3-23-2012.pdf
 105. *Burkhard C., Di Patre P.L., Schüller D. et al.* A population-based study on the incidence an survival of patients with pilocytic astrocytoma. // *J. Neurosurg.*, **98**, 1170–1174.
 106. *NORDCAN. Association of the Nordic Cancer Registries.* // URL: <http://www-dep.iarc.fr/NORDCAN/english>.
 107. *Curado M.P., Edwards, B., Shin H.R. et al.* Cancer Incidence in Five Continents, IARC Scientific Publications No. 160, 2007.
 108. *Parkin D.M., Whelan S.L., Ferlay J., Storm H.* Cancer Incidence in Five Continents. IARC Cancer Base No. 7, Lyon, 2005.
 109. *Сафин Ш.М., Хачатрян В.А., Валеева К.Г.* // В кн.: «Современные методы диагностики и лечения заболеваний нервной системы». – Уфа, 1996, С. 168–171.
 110. *Олюшин В.Е.* Глиальные опухоли головного мозга: краткий обзор литературы и протокол лечения больных. // *Нейрохирургия*, 2005, № 4, С. 41–47.
 111. *Legler J.M. et al.* Brain and other central nervous system cancers: Recent trends in incidence and mortality. // *J. Nat. Canc.*, **91**, 1999, P. 1382–1390.
 112. *Савченко Ю.Н.* Опухоли нервной системы по материалам клиник нервных болезней и нейрохирургии. // *Науч. тр. Омск. мед. ин-та, Омск*, 1972, № 112, С. 3–15.
 113. *Кустов В.И., Косых Н.Э., Киселева С.М. и соавт.* Распространённость опухолей ЦНС у детей на Дальнем Востоке. // *Вопр. нейрохир. им. Н.Н. Бурденко*, 1990, № 5, С. 36–38.
 114. *Черняк Ю.С.* Диагностика опухолей головного мозга на догоспитальном и госпитальном этапах в условиях отдельного региона России. – Краснодар: Автореф. дисс. докт. мед. наук, 1994, 23 с.
 115. *Алексеев А.Г., Данилов В.И.* Социально-гигиенические характеристики заболеваемости первичными

- ми опухолями ЦНС в Республике Татарстан // Материалы IV съезда нейрохирургов России, Москва, 18–22 июня 2006 г. – М., 2006, С. 141–142.
116. *Preston-Martin S.* An international case-control study of adult glioma and meningioma: the role of head trauma. // *Int. J. Epidemiol.*, 1998, **27**, P. 579–586.
117. *Wrensch M.* Epidemiology of primary brain tumors: current concepts and review of the literature. // *Neurooncology*, 2002, **4**, P. 278–279.
118. *McKinley B.P.* The impact of age and sex on the incidence of glial tumors in New York state from 1976 to 1995 // *J. Neurosurg.*, 2000, **93**, No. 6, P. 932–939.
119. *Christensen H.C., Kosteljanetz M., Johansen C.* Incidences of gliomas and meningiomas in Denmark, 1943 to 1997. // *Neurosurgery*, 2003, **52**, P. 1333–1334.
120. *Parkin D.M. et al.* Global cancer statistics 2002. // *CA Cancer J. Clin.*, 2005, **55**, P. 74–108.
121. *Pobereskin L.H., Chadduck J.B.* Incidence of brain tumors in two English counties: a population based study. // *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry*, 2000, **69**, P. 464–471.
122. IARC. Carcinogenicity of radiofrequency electromagnetic fields. // *Lancet Oncology*, 2011, **12**, P. 624–625.
123. *Repacholi M. et al.* Systematic review of wireless phone use and brain cancer and other head tumors. // *Bioelectromagnetics*, 2012, **33**, P. 187–206.
124. Children and mobile phones: the health of the following generation is in danger. // Ежегодник РНКЗНИ, 2008, – М., 2008, С. 118–119.
125. *Двоеглазова С.В., Савельев С.И.* Комплексная оценка физических факторов неионизирующей природы. // В кн. «Материалы Пленума научного совета по экологии человека и гигиене окружающей среды». – М., 2012, С. 100–103.

Поступила: 19.09.2013.

Принята к публикации: 15.10.2013.

О.В. Терехов, В.В. Пасов**СЛУЧАЙ НЕТИПИЧНОГО ОБРАЗОВАНИЯ КАМНЯ В НИЖНИХ МОЧЕВЫХ ПУТЯХ У БОЛЬНОГО С ПОЗДНИМ ЛУЧЕВЫМ ЦИСТИТОМ****O.V. Terekhov, V.V. Pasov****A Case Report on Late Radiation Cystitis Complicated with a Large Stone Formed in the Posterior Urethra**

РЕФЕРАТ

Представлен клинический случай позднего лучевого цистита, осложнённого образованием большого камня в задней уретре. Особенности данного случая являются длительность заболевания (около года), размер и место расположения конкремента на фоне сохранённого самостоятельного мочеиспускания.

Ключевые слова: лучевой цистит, лучевые повреждения, камень в уретре

ABSTRACT

This study presents a case report on late radiation cystitis complicated with a large stone that had been formed in the posterior urethra. The peculiarities of this case are the long course of the disease (about one year), the size and location of the calculus and, despite this, self-dependent urination.

Key words: radiation cystitis, radiation-induced damages, urethra stone

В настоящее время для лечения различных злокачественных новообразований органов малого таза у большинства больных с успехом используется лучевая терапия. К сожалению, впоследствии у части больных (до 20 %) возникают поздние лучевые повреждения со стороны смежных органов, попавших в поля облучения [1, 4]. При этом наиболее часто встречающимися осложнениями являются лучевые циститы и проктиты [2, 3]. В редких случаях поздние лучевые циститы осложняются образованием камней в мочевом пузыре. Случаев образования больших камней в уретре у мужчин после проведения облучения в литературе нам не встречалось. В нашем сообщении приводим клиническое наблюдение больного с поздним лучевым циститом, осложнённым нетипичным образованием камня заднего отдела уретры и развившимся микроциститом.

Больной П., 50 лет, диагноз: поздний лучевой цистит, мочекаменная болезнь (камень простатического отдела уретры), микроцистит. Болен с 2003 г., когда установлен диагноз рака предстательной железы T₃N₀M₀. Проведён курс дистанционной лучевой терапии (РОД 1+1,5 Гр; СОД 65 Гр). Была достигнута ремиссия заболевания. Явления цистита развились через полгода после проведения основного лечения. Возникла выраженная дизурия, проявлявшаяся учащённым мочеиспусканием (никтурия 3–4 раза) и бо-

лями в надлобковой области. Пациент неоднократно в течение года обращался в различные медицинские учреждения по месту жительства, где ему проводили антибактериальную, противовоспалительную и симптоматическую терапию. Следует отметить, что больному неоднократно устанавливался уретральный катетер. Максимальная длительность нахождения катетера составляла 1 мес.

Через год у больного развилась выраженная дизурия (никтурия 6–7 раз), затруднённое мочеиспускание и явления недержания мочи. При очередном обследовании по месту жительства установлен диагноз позднего лучевого геморрагического цистита и после проведения симптоматического и антибактериального лечения больной направлен в отделение лучевых повреждений МРНЦ.

В отделение пациент поступил с жалобами на значительное учащение мочеиспускания (никтурия до 20 раз) с выраженным болевым синдромом и обильным недержанием мочи.

При обследовании выявлена незначительная анемия (гемоглобин 100 г/л), по данным анализов мочи: лейкоцитурия и бактериурия. Ультразвуковое исследование почек и органов малого таза выявило двустороннюю пиелокаликотэктазию, фиброзные изменения малого таза, камень шейки мочевого пузыря и снижение объёма мочевого пузыря до 90 мл. Обзорная

Рис. 1. Камень
заднего отдела уретры
(полубоковой снимок)



Рис. 2. Камень
заднего отдела уретры
(прямой снимок)



рентгенография малого таза подтвердила наличие конкремента размерами 5,5 на 2,5 см. Снимки представлены на рис.1 и рис. 2. Оставалось непонятным, каким образом наличие такого большого камня в шейке позволяло свободно вводить уретральный катетер в мочевой пузырь.

Больному была проведена открытая цистотомия. При ревизии мочевого пузыря было выявлено, что большая часть камня находилась в задней уретре. С помощью пулевых щипцов конкремент с небольшим затруднением и кровотечением был эвакуирован. После тщательного гемостаза установлена эпицистостома и проведено послойное ушивание раны. При визуальном осмотре камня в его центральной зоне обнаружено сквозное отверстие диаметром около 4 мм, которое и позволяло вводить катетер в мочевой пузырь. Послеоперационный период протекал без осложнений и через 2 недели с незначительным недержанием мочи больной был выписан.

В заключение следует отметить, что описанное нами клиническое наблюдение представляет собой определённый интерес для специалистов ввиду нетипичного расположения и больших размеров камня с наличием сквозного канала, позволявшего сохранять естественное мочеиспускание.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бардычев М.С.* Лечение местных лучевых повреждений. // *Лечащий врач*, 2003, № 5, С. 78–79.
2. *Жаринов Г.М., Винокуров В.Л., Заикин Г.В.* Лучевые повреждения прямой кишки и мочевого пузыря у больных раком шейки матки. // *Мир медицины*, 2000, № 7, С. 8–11.
3. *Костромина К.Н., Титова В.А., Демидова Л.Д.* Достижения и направления развития лучевой терапии гинекологического рака. // Доклад на IV сессии общего собрания РАМН. – М., 1995.
4. *Терехов О.В., Бардычев М.С., Пасов В.В.* Принципы лечения поздних лучевых повреждений мочевыводящей системы. // *Мат. VI ежегодной Российской онкологической конференции*. – М., 2002, С. 206.

Поступила: 24.06.2013.

Принята к публикации: 15.10.2013.

10-Е ЗАСЕДАНИЕ ОБЪЕДИНЕННОГО КООРДИНАЦИОННОГО КОМИТЕТА ПО ИЗУЧЕНИЮ ПОСЛЕДСТВИЙ РАДИАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ (ОККИРВ) Санкт-Петербург.**11–12 сентября 2013 г.****The Tenth International Russian-U.S. Meeting of the Joint Coordinating Committee For Radiation Effects Research (JCCRER), St. Petersburg, September 11–12, 2013**

В Санкт-Петербурге 11–12 сентября 2013 г. состоялось очередное, 10-е заседание Объединенного координационного комитета по изучению последствий радиационных воздействий (ОККИРВ) в рамках Соглашения между Правительством Российской Федерации и Правительством Соединенных Штатов Америки о сотрудничестве в области изучения радиационных воздействий с целью минимизации влияния последствий радиоактивного загрязнения на здоровье человека и окружающую среду, подписанного 14 января 1994 г. За прошедший период действия Соглашения российскими и американскими учеными выполнены уникальные исследования эффектов пролонгированного воздействия ионизирующего излучения низкой и средней мощности на

персонал ПО «Маяк» с начала работы предприятия (с 1948 г.) и на население, которое проживало на радиоактивно загрязненных территориях Южного Урала. В 10-м заседании ОККИРВ приняли участие почти 60 специалистов, в том числе более 20 из США.

Благодаря усилиям ОККИРВ программа имеет богатую историю выполненных работ, внесших значительный вклад в получение международным научным сообществом новой научной информации о последствиях воздействия ионизирующего излучения на здоровье человека. К настоящему времени, знаменующему почти 20-летний период российско-американского сотрудничества, его участники подготовили и опубликовали 258 научных работ в ведущих



Слева сопредседатель ОККИРВ с российской стороны – М.Ф. Киселев, заместитель руководителя Федерального медико-биологического агентства (ФМБА России), справа сопредседатель ОККИРВ с американской стороны – Г. Подонски (G. Podonsky), руководитель отдела по вопросам здравоохранения, безопасности и охраны труда Министерства энергетики США

рецензируемых научных журналах США, России и других стран.

Цель проведения 10-го заседания ОККИРВ заключалась в содействии дальнейшей реализации задач ОККИРВ путем: (1) информирования об основных достижениях программы, включая и официальное продление Соглашения; (2) определения общих целей и задач на будущий год; (3) активизации обмена научной информацией и результатами исследований, проводимых на Южном Урале совместно Российской Федерацией и Соединенными Штатами Америки, и (4) определения приоритетов в будущих программах.

Следует отметить, что исполнительными органами по Соглашению являются: с российской стороны – Федеральное медико-биологическое агентство (ФМБА России), с американской стороны – Министерство энергетики США (МЭ США). Возглавляют работу два сопредседателя ОККИРВ: с российской стороны – М.Ф. Киселев, заместитель руководителя ФМБА России, с американской стороны – Г. Подонски (G. Podonsky), руководитель отдела по вопросам здравоохранения, безопасности и охраны труда МЭ США.

Во время проведения 10-го заседания ОККИРВ его участники отметили важность успешного завершения многолетних усилий российских и американских организаторов, приведших, в конечном счете, к подписанию 13 июля 2011 г. Министром иностранных дел России Сергеем Лавровым и Госсекретарем США Хиллари Клинтон протокола № 3 между Правительством Российской Федерации и Правительством Соединенных Штатов Америки о продлении срока действия и внесении изменений в упомянутое выше Соглашение между Правительством Российской Федерации и Правительством Соединенных Штатов Америки от 14 января 1994 г. Подписание Протокола явилось итогом длившихся почти три года интенсивных обсуждений и переговоров с участием большого числа государственных служащих Российской Федерации и Соединенных Штатов Америки. Протокол № 3 продлевает Соглашение ОККИРВ до 14 января 2014 г. Кроме того, согласно новой редакции отдельных разделов, Соглашение ОККИРВ в дальнейшем будет автоматически пролонгироваться каждые 5 лет, если ни одна из сторон не выразит желание прекратить его действие, что, несомненно, придаст дополнительную устойчивость проведению текущих и планированию перспективных научно-исследовательских работ.

Во время проведения 10-го заседания ОККИРВ состоялось обсуждение результатов текущих со-

вместных проектов по Южному Уралу, выполняемых по трем направлениям. Ученые Уральского научно-практического центра радиационной медицины (УНПЦ РМ) ФМБА России (Челябинск), совместно с американскими специалистами ведут исследования по направлению 1 «Медицинские аспекты воздействия радиационного облучения на население». Ученые Южно-Уральского института биофизики (ЮУриБФ) ФМБА России (Озерск), проводят совместные исследования по направлению 2 «Исследование медицинских последствий радиационного облучения персонала». В работах по направлениям 1 и 2 принимают также участие специалисты ПО «Маяк». По направлению 3 «Информационные технологии и поддержка принятия решений при радиационных авариях и радиационном воздействии на здоровье человека» в работах принимают участие ученые Института проблем безопасного развития атомной энергетики (ИБРАЭ) РАН.

Работу 10-го заседания ОККИРВ, проходившего в течение двух дней, открыли М.Ф. Киселев и Г. Подонски. В своих выступлениях они кратко охарактеризовали развитие совместных российско-американских научных работ по линии ОККИРВ за почти 20-летнюю историю, и обозначили дальнейшее направление исследований. В первый день работы 10-го заседания ОККИРВ выступили научные руководители и ответственные исполнители проектов, проводимых в рамках ОККИРВ. Во второй день на заседании ОККИРВ состоялась специальная научная сессия, на которой были представлены доклады приглашенных специалистов по ряду актуальных направлений исследований.

В рамках направления 1 в настоящее время выполняются три проекта. Проект 1.1 «Усовершенствование системы реконструкции доз для населения, облучившегося в результате деятельности ПО «Маяк»» (научный руководитель М.О. Дегтева, УНПЦ РМ), был представлен на 10-м заседании ОККИРВ руководителем с американской стороны Б. Непье (B.Napier) (Тихоокеанская северо-западная национальная лаборатория, Ричланд). Л.Ю. Крестинина (УНПЦ РМ) и Ф. Дэвис (F.Davis) (Университет Иллинойса, Чикаго) сделали сообщение о проекте 1.2б «Стохастические эффекты техногенного радиационного воздействия у населения, проживающего вблизи ПО «Маяк»». Ю.Г. Мокров (ПО «Маяк») и Б. Непье доложили результаты по проекту 1.4 «Реконструкция дозы облучения жителей Озерска, обусловленной атмосферными выбросами ПО «Маяк»».

По направлению 2 также ведутся три проекта. Проект 2.2 «Оценка риска стохастических (канце-

рогенных) эффектов профессионального облучения» представил М.Э. Сокольников (ЮУрИБФ). А.В. Ефимов (ЮУрИБФ), М.В. Горелов (ПО «Маяк») и Б. Непье дали подробную информацию о выполнении проекта 2.4 «Разработка усовершенствованной дозиметрической системы для работников ПО «Маяк». Е.Н. Кириллова (ЮУрИБФ) доложила о проекте 2.8 «Создание радиобиологического хранилища тканей работников ПО «Маяк», подвергавшихся радиационному воздействию».

Направление 3 было представлено докладом Л.Г. Шпиньковой (ИБРАЭ).

Вопросы расширения обследуемой когорты за счет возможного вовлечения в эпидемиологическое исследование лиц из персонала Сибирского химкомбината были рассмотрены в сообщении А.Б. Карпова (СБНЦ ФМБА России) «Информационные ресурсы Северского Биофизического научного центра по изучению влияния пролонгированного действия малых доз радиации».

Н.К. Шандала (ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России) и Н. Хертел (N. Hertel) (Технологический институт Джорджии), как сопредседатели российской и американской групп научного рецензирования, выступили с отчетами о проводимой членами групп работе по регулярному рецензированию отчетных материалов и оценке хода выполнения исследований по каждому проекту.

В рамках специальной научной сессии выступили приглашенные специалисты со следующими докладами:

- А. Бувиль (A. Bouville) (Национальный институт рака) «Исследования когорты, включающей миллион профессиональных работников и ветеранов: Обзор и методы реконструкции доз облучения».
- М. Сневе (M. Sneve) (Норвежское агентство по радиационной защите) «Сотрудничество Норвежского агентства по радиационной защите с ФМБА России, ГК «Росатом», ПО «Маяк» в рамках проектов, касающихся изучения состояния здоровья населения, длительное время проживающего на загрязненной территории».
- Т. Колган (T. Colgan) (МАГАТЭ) «Стандарты безопасности МАГАТЭ – международная гармонизация в области радиационной безопасности».
- М.И. Балонов (С-Пб. НИИ РГ им. профессора П.В. Рамзаева Роспотребнадзора) «Фукусима-2011 и Чернобыль-1986: Сравнение радиологических последствий двух самых крупных аварий на АЭС».
- Д.А. Базыка (НЦРМ НАМН Украины) «Действие Чернобыльской аварии на здоровье: опыт Украины».

- В.Ю. Рыбников (ВЦЭРМ им. А.М. Никифорова МЧС России) «Социально-психологический статус ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС».

- А.П. Бирюков (ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России) «Эпидемиологические исследования заболеваемости злокачественными новообразованиями у работников атомной промышленности, принимавших участие в ликвидации последствий аварии на ЧАЭС».

- И.Б. Колядо (НИИ региональных медико-экологических проблем, Барнаул) «Современная радиационно-гигиеническая и эпидемиологическая ситуация на территориях Алтайского края, подвергшихся радиационному воздействию вследствие ядерных испытаний на Семипалатинском полигоне».

Сопредседатели ОККИРВ М.Ф. Киселев и Г. Подонски в конце первого дня работы 10-го заседания в торжественной обстановке подписали Меморандум, подготовка которого была завершена накануне на совместном российско-американском заседании исполнительного комитета ОККИРВ, проведенном его сопредседателями С.М. Шинкаревым (ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России) и П. Уорингтон (P. Worthington) (МЭ США).

В Меморандуме 10-го заседания изложены цели и задачи Соглашения, кратко приведены основные достижения почти 20-летней работы в рамках Соглашения. Отмечено, что результаты научных исследований, выполненных в рамках российско-американского Соглашения, планируется использовать в текущем проекте НКДАР ООН «Эпидемиологические исследования воздействия на население природного и техногенного облучения при низких мощностях доз», инициированном российской и японской делегациями и получившем одобрение на 58-й сессии НКДАР ООН (май 2011 г.). Подчеркнуто, что результаты, полученные по выполняемым проектам, реализуются при взаимодействии с МАГАТЭ в рамках работ, направленных на совершенствование регулирующего надзора за реабилитацией на объектах ядерного наследия (RSLs). Программы выполняются в соответствии с решением, принятым на рабочем заседании Форума МАГАТЭ RSLs, председателем которого является представитель Норвегии. С удовлетворением констатировано, что научные исследования, проводимые под эгидой ОККИРВ по минимизации радиационного риска, получили свое развитие в рамках ряда других проектов Европейской Комиссии (SOLO, EpiRadBio). С учетом актуальности этих ра-



Участники заседания ОККИРВ.

бот в Меморандуме подтверждается необходимость их координации в форме обмена результатами исследований и совместного участия в заседаниях ОККИРВ. Отмечен тот факт, что результаты проведения учений по аварийному реагированию и аварийной готовности, а также планы будущих работ по направлению 3, были представлены и обсуждены представителями России и США, работающими по данному направлению.

В Меморандуме подтверждена важность изучения последствий воздействия на здоровье человека пролонгированного облучения в малых и средних дозах при низких мощностях доз. Признано целесообразным предоставить японским специалистам, участвующим в работах по минимизации последствий радиационной аварии на АЭС «Фукусима-1», научную информацию в области воздействия ^{131}I , ^{137}Cs (^{134}Cs), ^{90}Sr на человека и при необходимости установить контакты путем приглашения специалистов на заседания ОККИРВ. Также обращено внимание на сохраняющуюся острую необходимость инициирования совместных исследований

в области планирования, обеспечения готовности, проведения учений по аварийному реагированию в случае радиационной аварии.

В Меморандуме отмечено, что в соответствии с резолюцией предыдущего, 9-го заседания ОККИРВ, состоявшегося в Сан-Франциско, российская и американская группы научного рецензирования разработали критерии оценки предложений по новым научным проектам. Накануне 10-го заседания ОККИРВ (8 сентября 2013г.) было проведено совместное заседание российской и американской групп научного рецензирования, на котором обсудили концепции 11 предложений. По итогам обсуждения рекомендованы для дальнейшего более подробного рассмотрения 4 предложения:

- Исследования, направленные на совершенствование оценок индивидуальных доз облучения населения, проживающего в прибрежных районах реки Течи (УНПЦРМ).
- Эпидемиологические исследования, направленные на оценку эффектов радиации на здоровье

людей, проживающих на Южном Урале вдоль реки Течи (УНПЦРМ).

- Оценка риска рака щитовидной железы у населения г. Озёрска при техногенном облучении радиоактивным йодом (ЮУриБФ).
- Заболеваемость катарактой в когорте работников ПО «Маяк» (ЮУриБФ).

В Меморандуме подчеркнута актуальность привлечения международных организаций к дальнейшему ознакомлению с результатами научных

исследований, полученных в рамках российско-американского Соглашения, и их широкому практическому использованию.

В завершающей части Меморандума сформулированы конкретные поручения исполнительному комитету ОККИРВ на следующий период работы до проведения очередного, 11-го заседания ОККИРВ.

М.Ф. Киселев, С.М. Шинкарев
Поступила: 28.10.2013.

**ДОКЛАД НАУЧНОГО КОМИТЕТА ОРГАНИЗАЦИИ
ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ ПО ДЕЙСТВИЮ АТОМНОЙ
РАДИАЦИИ. 60-я сессия. Нью-Йорк, 27–31 мая 2013 г.**

**Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects
of Atomic Radiation.
60-th session. New-York, 27–31 May, 2013**

Научные выводы

**А. Уровни и воздействие ионизирующего
излучения в результате ядерной аварии,
вызванной Великим восточно-японским
землетрясением и цунами 2011 г.**

**1. Авария и выброс радиоактивных веществ
в окружающую среду**

11 марта 2011 г. в 14:46 по местному времени недалеко от Хонсю, Япония, произошло землетрясение магнитудой 9,0, которое вызвало катастрофическое цунами, оставившее за собой следы смерти и разрушений. Землетрясение и последовавшее за ним цунами, в результате которого была затоплена территория площадью более 500 квадратных километров, привели к гибели более 20 тыс. человек и уничтожению имущества, инфраструктуры и природных ресурсов. Они также стали причиной самой страшной из ядерных катастроф на гражданских объектах со времени аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. Из-за отключения электропитания на объекте и за его пределами и сбоев в работе систем безопасности на АЭС Фукусима-Дайичи возникли серьезные повреждения в активной зоне трех из шести ядерных реакторов на станции, и это привело к выбросу в окружающую среду в течение достаточно длительного времени очень большого количества радиоактивных веществ.

В порядке неотложной ответной меры правительство Японии рекомендовало эвакуировать около 78 тыс. человек, проживавших в радиусе 20 км от электростанции, а около 62 тыс. человек, проживавших в радиусе от 20 до 30 км от станции, укрылись в своих домах. Позже, в апреле 2011 г., правительство рекомендовало эвакуировать еще около 10 тыс. человек, живущих дальше в северо-западном направлении от станции (этот район получил название зоны эвакуации в целях предосторожности), в связи с повышенным уровнем содержания радиоактив-

ных веществ в почве. Такая эвакуация позволила существенно сократить (иногда в 10 раз) уровни облучения, которые в противном случае получили бы те, кто проживают в этих районах. Однако и сама эвакуация имела определенные последствия для переселяемых людей, включая целый ряд связанных с нею смертей, а также последующее воздействие на психическое состояние и социальное благополучие (например, вследствие того, что эвакуированные оказались оторванными от своих домов и привычной обстановки, и многие из них лишились средств к существованию).

В информации, рассмотренной Комитетом, говорится о выбросах в атмосферу йода-131 и цезия-137 (два из наиболее значимых радионуклидов с точки зрения воздействия на людей и окружающую среду) в диапазонах от 100 до 500 петабеккерелей (ПБк) и от 6 до 20 ПБк соответственно; в своей дальнейшей работе Комитет использовал оценки, которые лежат в этих пределах. Эти оценки ниже примерно в 10 и 5 раз соответственно по сравнению с соответствующими оценками выбросов в атмосферу в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Значительная часть выбросов в атмосферу была перенесена ветрами в сторону Тихого океана. Кроме того, произошел выброс жидких веществ непосредственно в прилегающие морские воды. Непосредственные выбросы составили примерно 10 и 50 % от соответствующих выбросов в атмосферу йода-131 и цезия-137; в мае 2013 г. в небольших объемах выбросы в океан все еще продолжались.

2. Оценка доз

Йод-131 (с коротким периодом полураспада, составляющим 8 суток) и цезий-137 (с более продолжительным периодом полураспада, составляющим 30 лет), как было установлено, являются двумя наиболее важными радионуклидами при оценке доз. У этих двух радионуклидов поражаемые ткани и временной интервал воздействия облучения совершен-

но различные. Йод-131, как правило, накапливается в щитовидной железе в течение нескольких недель после выброса, и соответствующую дозу получает в первую очередь этот орган. Цезий-137 осаждается на почву; соответствующую дозу получает весь организм в течение многих лет после выброса.

Комитет произвел оценки воздействия ионизирующего излучения на различные категории людей, а именно: на лиц из населения, подвергшихся облучению в результате выброса радиоактивных веществ в окружающую среду; лиц, работавших на АЭС Фукусима-Дайичи и подвергшихся облучению во время аварии, а также лиц, которые впоследствии участвовали в спасательных работах на объекте; сотрудников подразделений по чрезвычайным ситуациям, которые были заняты в работах на объекте и/или за его пределами. Если это было практически возможно, то Комитет основывал свои оценки на результатах индивидуального мониторинга. Лиц, подвергшихся облучению на работе, и сотрудников подразделений по чрезвычайным ситуациям, как правило, проверяли на предмет воздействия внешних источников излучения (внешнее воздействие) и облучения, полученного в результате попадания радиоактивных веществ в организм (внутреннее воздействие), если их объемы могли быть значительными.

В то время, когда Комитет начал проводить оценки, по лицам из населения имелись результаты нескольких прямых измерений внутреннего воздействия излучения. Комитету этого было недостаточно для оценки доз в тех районах Японии, которые больше всего пострадали в результате аварии. Поэтому Комитету пришлось прибегнуть к использованию различных моделей для оценки доз на основе измеренных или прогнозируемых уровней содержания радиоактивных веществ в окружающей среде и их перехода по путям поступления человеку. В силу необходимости моделирование приходилось использовать для прогнозирования потенциальных доз в будущем.

Расчетные эффективные дозы, вызванные аварией на АЭС Фукусима-Дайичи, можно рассматривать в перспективе путем сопоставления их с дозами, полученными в результате воздействия источников излучения природного происхождения (как, например, космические лучи и природные радиоактивные вещества в продуктах питания, воздухе, воде и в других элементах окружающей среды). Из природных источников японцы получают эффективную дозу облучения, составляющую в среднем около 2,1 мЗв в год и в целом около 170 мЗв

в течение всей своей жизни. По последним оценкам Комитета, глобальная среднегодовая доза облучения из природных источников составляет 2,4 мЗв и колеблется примерно от 1 до 13 мЗв, в то время как значительные группы населения получают ежегодно 10–20 мЗв. Дозы, поглощенные отдельными органами, выражаются в мГр. Среднегодовая поглощенная доза, полученная щитовидной железой из природных источников излучения, составляет обычно порядка 1 мГр.

а) Лица из населения

Районы с самой высокой средней дозой, подсчитанной для лиц из населения, находились в пределах 20-километровой зоны эвакуации и зоны эвакуации в целях предосторожности. У взрослых эффективная доза, которая, по оценкам, была получена до и во время эвакуации, составила в среднем менее 10 мЗв и около половины от этого уровня у тех, кто были эвакуированы 12 марта 2011 г. Соответствующая оценка средней поглощенной дозы в щитовидной железе составляла до 30 мГр. У младенцев в возрасте одного года эффективная доза, по оценкам, была примерно в два раза выше, чем у взрослых, а поглощенная доза в щитовидной железе оценивалась до 70 мГр, половина этой дозы была обусловлена поступлением радиоактивных веществ с пищей. Однако у разных людей были значительные отклонения от этого показателя в зависимости от того, где они находились и какую пищу они употребляли.

Взрослые, проживавшие в городе Фукусима, в среднем получили, по оценкам, эффективную дозу в размере около 4 мЗв в течение первого года после аварии; расчетные дозы для младенцев в возрасте одного года были в два раза выше. Те, кто проживали в других районах в префектуре Фукусима и в соседних префектурах, получили, по оценкам, сопоставимые или более низкие дозы; еще более низкие дозы, по оценкам, получили лица, проживающие в других районах Японии. Средние эффективные дозы, которые в течение всей своей жизни могут получить (в результате аварии) лица, по-прежнему проживающие в префектуре Фукусима, составляют, по оценкам, немногим более 10 мЗв; эта оценка основана на предположении, что в будущем не будет принято никаких мер, направленных на снижение доз облучения, и, следовательно, эту оценку можно считать завышенной. Наиболее важный вклад в эти оценки доз вносит внешнее облучение от выпавших радиоактивных веществ.

Более высокие или более низкие дозы по сравнению с приведенными выше средними значениями могут быть, по оценкам, получены людьми, привычки или поведение которых существенно отличаются от обычных, и/или людьми, проживающими в районах, где уровни содержания радиоактивных веществ отличались или существенно отличаются от среднего показателя для данного района или префектуры. В пределах одного района индивидуальные дозы, полученные при вдыхании воздуха и под воздействием внешнего излучения, обычно составляют примерно от одной трети до трехкратного размера средней дозы. Для некоторых людей нельзя полностью исключать и более высокие дозы, особенно если они, вопреки рекомендациям правительства, употребляют после аварии некоторые продукты питания местного производства или продолжают жить в районах, из которых была произведена эвакуация, в течение длительного периода. Дозы, полученные щитовидной железой у некоторых младенцев, могли составлять порядка 100 мГр или более.

Вскоре после аварии появилась некоторая информация о дозах внутреннего облучения, основанная на прямых измерениях радиоактивности у людей, однако дополнительная информация стала доступна после того, как Комитет завершил свои оценки доз. В совокупности эти измерения радиоактивности в щитовидной железе и организме в целом свидетельствуют о наличии доз, вызванных внутренним облучением, которые ниже оценок Комитета в 3–5 раз для дозы в щитовидной железе и порой примерно в 10 раз для доз во всем организме. Поэтому Комитет считает, что его оценки доз, возможно, выше фактических уровней облучения.

Воздействие радиации в соседних странах и остальном мире в результате аварии было намного ниже, чем в Японии; эффективные дозы были менее 0,01 мЗв, а дозы, полученные щитовидной железой, были меньше 0,01 мГр; эти уровни не будут иметь никаких последствий для здоровья людей.

б) Работники АЭС Фукусима-Дайичи, сотрудники подразделений по чрезвычайным ситуациям, муниципальные работники и добровольцы

К концу октября 2012 г. в ликвидации последствий и других операциях в месте расположения АЭС Фукусима-Дайичи были задействованы около 25 тыс. человек; около 15 % из них были привлечены непосредственно оператором станции (Токийской энергетической компанией ТЕРСО), а остальные

были наняты подрядчиками или субподрядчиками. Судя по их данным, средняя эффективная доза тыс. работников в течение первых 19 месяцев после аварии составляла примерно 12 мЗв. Около 35 % работников получили за этот период суммарные дозы, которые превышали 10 мЗв, а 0,7 % работников получили дозы более 100 мЗв.

Комитет рассмотрел данные о внутреннем облучении 12 работников, подвергшихся наибольшему воздействию, и подтвердил, что поглощенные дозы в их щитовидной железе составили от 2 до 12 Гр, в основном в результате вдыхания йода-131. Комитет также установил факт определенного совпадения его независимых оценок эффективных доз, полученных в результате внутреннего облучения, и показателей, приведенных ТЕРСО по тем работникам, у которых были поддающиеся измерению уровни содержания йода-131 в организме. В расчете не учитывались потенциальные вклады в облучение короткоживущих изотопов йода, в частности йода-133; поэтому оценочные дозы, вызванные внутренним облучением, возможно, были занижены примерно на 20 %. У многих работников из-за длительных задержек с началом мониторинга йод-131 в щитовидной железе обнаружен не был; по этим работникам данных о внутренних дозах, определяемых ТЕРСО и ее подрядчиками, нет.

Помимо этих групп в период с 11 марта по 31 августа 2011 г. осуществлялся мониторинг содержания радионуклидов в организме 8 380 сотрудников, работавших на министерство обороны Соединенных Штатов. Примерно у 3 % лиц, ставших объектом мониторинга, был поддающийся измерению уровень активности с максимальной эффективной дозой в 0,4 мЗв и максимальной дозой, поглощенной щитовидной железой, в размере 6,5 мГр.

3. Последствия для здоровья

Ни одного случая смерти или возникновения острых заболеваний в связи с воздействием радиации среди работников и населения в целом, подвергшихся облучению в результате аварии, отмечено не было.

Дозы – и те, что получены населением в течение первого года, и те, что, по оценкам, будут получены на протяжении всей жизни, – как правило, низкие или очень низкие. Среди жителей, подвергшихся облучению, или их потомков не ожидается сколь угодно заметного роста числа осложнений со здоровьем, вызванных воздействием радиации. Самыми серьезными последствиями в плане здоровья стали психическое состояние и социальное благополучие, обусловленные тем огромным воздействием, кото-

рое оказали землетрясение, цунами и ядерная авария, а также страх и распространение негативных стереотипов, связанных с предполагаемой опасностью подвергнуться действию ионизирующего излучения. Уже сообщалось о таких проявлениях, как депрессия и симптомы посттравматического стресса. Оценка вероятности возникновения и тяжести таких последствий для здоровья не входит в сферу компетенции Комитета.

У взрослых в префектуре Фукусима средние эффективные дозы на протяжении всей жизни составят, по оценкам Комитета, порядка 10 мЗв или менее, а дозы, полученные в течение первого года, составят от одной трети до половины этой величины. Хотя модели рисков свидетельствуют о подразумеваемой повышенной вероятности возникновения рака, на данный момент раковые заболевания, вызванные действием радиации, неотличимы от тех, которые вызваны другими факторами. Поэтому заметного роста заболеваемости раком в этой группе населения, который может быть связан с радиационным облучением в результате аварии, не ожидается. Повышенный риск возникновения рака щитовидной железы, в частности, можно допустить у младенцев и детей. Число младенцев, которые могли получить дозы облучения щитовидной железы порядка 100 мГр, точно неизвестно; количество случаев, когда этот показатель превышает норму, оценивалось лишь на основании модельных расчетов, и на практике проверить эти цифры с помощью измерений трудно.

У 12 работников, данные об облучении которых рассматривались Комитетом и которые, по оценкам, получили поглощенные дозы облучения щитовидной железы только от йода-131 в диапазоне от 2 до 12 Гр, можно предположить повышенный риск развития рака щитовидной железы и других заболеваний этого органа. Еще более 160 работников получили эффективные дозы в размере более 100 мЗв, преимущественно из внешних источников. В будущем в этой группе можно ожидать повышенного риска заболеваемости раком. Однако выявление какого-либо повышенного уровня заболеваемости раком в этой группе не представляется возможным из-за трудностей, связанных с подтверждением столь невысокого уровня заболеваемости по сравнению с обычными колебаниями статистических показателей онкологической заболеваемости. Работники, получившие дозы свыше 100 мЗв, будут наблюдаться особо, в том числе путем проведения ежегодных обследований щитовидной железы, желудка, толстой кишки и легких на предмет выявления более поздних потенциальных осложнений со здоровьем,

вызванных воздействием ионизирующего излучения.

В июне 2011 г. было организовано обследование состояния здоровья местного населения (обследование системы здравоохранения в префектуре Фукусима). Это обследование, которое началось в октябре 2011 г. и должно по плану продолжаться в течение 30 лет, охватывает все 2,05 млн жителей, проживавших в префектуре Фукусима в момент землетрясения и аварии на АЭС. Оно включает в себя ультразвуковое исследование щитовидной железы 360 тыс. детей, которым на момент аварии было не больше 18 лет, с использованием современной высокоэффективной ультразвукографии, что повышает вероятность выявления небольших отклонений. В ходе первого этапа обследования чаще, чем обычно, выявлялись узелки, кисты и раковые образования; однако это было связано с высокой эффективностью используемых методов. Данные аналогичных обследований в районах, не пострадавших от аварии, свидетельствуют о том, что явный рост выявленных отклонений у детей в префектуре Фукусима не связан с воздействием ионизирующего излучения.

4. Ионизирующее излучение и его воздействие на флору и фауну

Была также проведена оценка воздействия ионизирующего излучения на отдельные виды флоры и фауны в естественных природных условиях. Оценка доз и соответствующего воздействия радиации на флору и фауну после аварии производилась с учетом прежних оценок Комитетом такого воздействия. Интенсивность облучения как морских, так и наземных видов флоры и фауны после аварии была, как правило, слишком низкой для того, чтобы можно было зарегистрировать существенные последствия, хотя, возможно, и были некоторые исключения, вызванные местными особенностями:

- a) воздействие радиации на флору и фауну в морской среде ограничивается районами, находящимися недалеко от мест сброса высокорadioактивной воды в океан;
- b) нельзя исключать продолжающиеся изменения биомаркеров для некоторых земных организмов, в частности млекопитающих, но их значение для всей популяции этих организмов неясно. Любое воздействие ионизирующего излучения будет ограничиваться небольшим районом, в котором отмечаются наибольшие отложения радиоактивных веществ; за пределами этого района по-

тенциальное воздействие на флору и фауну будет незначительным.

Хотя это и не входит в проводимую Комитетом оценку, важно отметить, что защитные меры и любые действия, осуществляемые с целью снижения облучения людей, серьезно сказываются, в частности, на экологических товарах и услугах, ресурсах, используемых в сфере сельского и лесного хозяйства, рыболовства и туризма, и удобствах, используемых в рамках духовных, культурных и развлекательных мероприятий.

В. Воздействие ионизирующего излучения на детей

Эпидемиологические исследования, о которых сообщалось в опубликованных материалах, варьируются в плане рассматриваемых в них конкретных возрастных групп. Для целей проводимой Комитетом оценки воздействия ионизирующего излучения на детей термин «дети» используется в отличие от термина «взрослые» и включает в себя младенцев, детей и подростков. Оценка конкретно не затрагивает последствия внутриутробного облучения, поскольку такие сведения содержатся в других всеобъемлющих докладах. В оценке не рассматриваются и многие полезные применения ионизирующего излучения для детей, такие как медицинская диагностика и терапия, которые не входят в мандат Комитета.

При рассмотрении источников воздействия радиации на детей особый интерес представляют аварийное облучение и конкретные регионы с повышенным уровнем естественной фоновой радиации, а также диагностические и терапевтические процедуры. Рассмотренные Комитетом данные были получены в результате исследований, охватывающих широкий диапазон доз, различные мощности дозы, полное и частичное облучение организма и детей разных возрастов.

На своей шестидесятой сессии Комитет рассмотрел последствия радиационного облучения детей и пришел к следующим выводам:

а) при данной дозе облучения дети, как правило, подвержены большему риску возникновения новообразований, чем взрослые. Раковые заболевания, потенциально индуцированные воздействием ионизирующего излучения в юном возрасте, могут проявиться как через несколько лет, так и спустя десятилетия. В докладе о работе своей пятьдесят четвертой сессии Комитет заявил, что оценки сохраняющегося на протяжении всей жизни риска развития рака у тех, кто под-

вергся облучению в детском возрасте, являются весьма неопределенными и могут быть в два—три раза выше, чем у облученной популяции во всех возрастных группах. Этот вывод был основан на модели прогнозирования пожизненного риска, сочетающей риски возникновения всех типов новообразований;

б) Комитет рассмотрел новые научные материалы и отмечает, что показатель возникновения новообразований радиационного происхождения у детей более изменчив по сравнению со взрослыми и зависит от типа опухоли, возраста и пола. Термин «радиационная чувствительность» в связи с индуцированием рака означает скорость возникновения новообразований радиационного происхождения. Комитет рассмотрел 23 различных вида раковых заболеваний. В целом примерно в 25 % случаев возникновения этих видов заболеваний, включая лейкозы и рак щитовидной железы, кожи, молочной железы и мозга, у детей явно проявлялась большая радиационная чувствительность. Для некоторых из этих видов, в зависимости от обстоятельств, риски у детей могут быть гораздо выше, чем у взрослых. Некоторые из этих видов раковых заболеваний имеют самое непосредственное отношение к оценке радиологических последствий аварий и некоторых медицинских процедур;

с) примерно по 15 % видов раковых заболеваний (например, в случае рака толстой кишки) у детей, похоже, приблизительно такая же радиационная чувствительность, что и у взрослых. Примерно по 10 % видов раковых заболеваний (например, в случае рака легких) дети, как представляется, менее чувствительны к внешнему воздействию радиации, чем взрослые. Примерно по 20 % видов раковых заболеваний (например, по раку пищевода) данные слишком поверхностны, для того чтобы можно было сделать вывод о каких-либо различиях в рисках. И наконец, примерно по 30 % видов раковых заболеваний (например, хронический злокачественный лимфоматоз и рак предстательной железы, прямой кишки и матки) прослеживается только слабая связь между воздействием ионизирующего излучения и соответствующим риском в любом возрасте, когда происходит облучение, или же такая связь вообще отсутствует;

д) в настоящее время статистически обоснованных прогнозов в отношении пожизненного риска возникновения конкретных видов раковых заболеваний после облучения в раннем возрасте недо-

статочно. Текущие оценки не отражают должным образом известные отклонения, и необходимы дополнительные исследования;

- e) что касается непосредственных последствий, которые имеют место после получения высоких (в случае острого или фракционированного облучения) доз (так называемые детерминированные последствия для здоровья), то различия в результатах между воздействием в детские годы и в зрелом возрасте носят сложный характер и могут объясняться взаимодействием различных тканей и механизмов. Эти последствия можно наблюдать после лучевой терапии или после сильного облучения при аварии. Различия в радиационной чувствительности у детей и у взрослых в плане детерминированных эффектов в конкретном органе зачастую отличаются от различий в индуцировании рака. Есть примеры того, что воздействие радиации в детские годы несет в себе больше риска, чем воздействие во взрослом возрасте (например, риск возникновения нарушений познавательной способности, катаракты и узлов в щитовидной железе). Есть и другие примеры, когда риск представляется одинаковым (например, в случае нейроэндокринных расстройств), и есть также несколько примеров, когда детские ткани проявляют большую устойчивость (например, легкие и яичники);
- f) ввиду всех вышеизложенных соображений Комитет рекомендует избегать обобщений в отношении рисков, связанных с последствиями радиационного облучения в детском возрасте. Внимание следует уделять специфике воздействия, возрасту на момент облучения, дозе, поглощенной определенными тканями, и конкретным последствиям, представляющим тот или иной интерес;
- g) проведено множество исследований возможных наследственных эффектов в результате воздействия ионизирующего излучения; эти исследования были рассмотрены Комитетом в 2001 г. Сделан общий вывод, что у человека не выявлено наследственных эффектов при облучении (прежде всего в исследованиях потомков лиц, подвергшихся атомной бомбардировке). В последние десять лет были проведены дополнительные исследования, посвященные людям, пережившим рак в детском и юношеском возрасте после лучевой терапии, когда гонадная доза зачастую очень высока. Практически нет никаких свидетельств возросшей нестабильности генома, минисателлитной мутации ДНК, трансгенерационной нестабильности генома, изменений в соотношении

полов у потомков, врожденных аномалий или повышенного риска возникновения раковых заболеваний у потомков родителей, подвергшихся воздействию радиации. Одной из причин этого являются значительные колебания частоты спонтанного возникновения таких эффектов;

- h) последствия и риски для здоровья зависят от ряда физических факторов. Поскольку толщина тела у детей меньше, и защита внутренних органов прикрывающими их тканями ниже, доза, получаемая этими органами, будет больше, чем у взрослых, подвергшихся такому же внешнему воздействию. Поскольку дети также ниже взрослых, они могут получить более высокую дозу от радиоактивных веществ, рассеянных и отложившихся в почве. Эти факторы имеют важное значение при изучении доз, полученных населением в некоторых районах с повышенными уровнями содержания радионуклидов в почве и на поверхности. При медицинском облучении в диагностических целях дети могут получать значительно большие дозы, чем взрослые, проходящие такое же обследование, если технические параметры облучающего оборудования не были специально скорректированы;
- i) что касается внутреннего облучения, то из-за меньшего размера тела младенцев и детей и, следовательно, из-за более близкого расположения их органов друг к другу радионуклиды, сконцентрированные в одном органе, облучают другие органы в теле детей сильнее, чем это бывает у взрослых. Есть также много и других возрастных факторов, связанных с метаболизмом и физиологией, которые являются причиной значительных различий в дозах, получаемых в разном возрасте. Несколько радионуклидов вызывают особую озабоченность в связи с внутренним облучением детей. Аварии, которые приводят к выбросу радиоактивного йода (например, аварии на атомных электростанциях), могут быть существенными источниками облучения щитовидной железы и, следовательно, потенциально могут вызвать рак этого органа. При одинаковом потреблении доза, полученная щитовидной железой у младенцев, в восемь или девять раз больше, чем у взрослых. При попадании в организм цезия-137 разница в дозе, получаемой детьми и взрослыми, весьма велика. Внутреннее облучение детей также происходит при использовании радионуклидов в медицинских целях. Диапазон процедур, которым обычно подвергаются дети, отличается от процедур, получаемых взрослыми.

Потенциально более высокие дозы у детей на практике компенсируются благодаря использованию меньшего количества применяемых радиоактивных веществ.

Комитет признает, что необходимы дальнейшие исследования для определения всего объема и проявления различий в последствиях, механизмах и рисках, связанных с воздействием ионизирующего излучения на детей и на взрослых. Это необходимо потому, что по ряду исследований (как, например, исследования, посвященные людям, пережившим атомные бомбардировки, детям, подвергшимся воздействию радиоактивного йода после аварии на Чернобыльской АЭС, и лицам, которым делали компьютерную томографию) результаты оценки пожизненного риска остаются неполными. В будущих долгосрочных исследованиях последствий воздействия облучения в детском возрасте возникнут значительные трудности, обусловленные наличием не связанных между собой материалов медицинских наблюдений, административных и политических

барьеров, а также соображений этического характера и конфиденциальности.

Важным направлением будущих исследований и работы является также оценка потенциального воздействия ионизирующего излучения на детей: а) в районах с высоким уровнем естественной фоновой радиации; б) после получения больших доз в ходе медицинских процедур, связанных с интервенционной рентгеноскопией; в) после лучевой терапии рака (включая оценку потенциальной взаимосвязи с другими видами терапии). Комитет также определил следующие направления для будущих исследований: разработка баз данных по дозам радиационного облучения у детей, которых можно будет наблюдать на протяжении длительных периодов времени; оценка воздействия после полного и частичного облучения органов у подростков. Потенциально информативными являются исследования, проводимые на молекулярном, клеточном, тканевом уровнях и на молодых животных.

М.Ф. Киселев

**НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ
«НЕЙТРОННАЯ ТЕРАПИЯ В ОНКОЛОГИИ:
ПРОБЛЕМЫ, УСПЕХИ, ПЕРСПЕКТИВЫ».
Томск, 3–4 октября 2013 г.**

**Scientific-practical Conference with International Participation
“Neutron Therapy in Oncology: Problems, Progresses, Perspectives”
Tomsk, October 3–4, 2013**

3–4 октября 2013 г. в Томске в Научно-исследовательском институте онкологии Сибирского отделения Российской академии медицинских наук проводилась научно-практическая конференция с международным участием «НЕЙТРОННАЯ ТЕРАПИЯ В ОНКОЛОГИИ: ПРОБЛЕМЫ, УСПЕХИ, ПЕРСПЕКТИВЫ». Конференция была посвящена 30-летию применения нейтронной терапии злокачественных новообразований в НИИ онкологии СО РАМН г. Томска.

С приветственным словом выступил директор НИИ онкологии академик РАМН, проф. Е.Л. Чойнзонов, который отметил значимость для страны создания в г. Томске первого в Российской Федерации Центра нейтронной терапии. Он отметил также, что создание Центра нейтронной терапии осуществлено по заданию государственного комитета по науке и технике СССР (1980–1985 гг.) и в рамках межотраслевой научно-технической программы «Использование исследовательских ядерных реакторов и ускорителей в биологии и медицине» (1986–1990 гг.). Важным фактором в становлении Центра явилось тесное сотрудничество НИИ онкологии с Томским политехническим университетом, на циклотроне которого и создан терапевтический канал для нейтронной терапии.

Нейтронная терапия проводится, в основном, у контингента больных с радиорезистентными злокачественными новообразованиями в плане самостоятельной нейтронной терапии, смешанного нейтронно-фотонного курса облучения и комбинированного лечения быстрыми нейтронами 6,3 МэВ до или после проведения операции. В основе всех разработанных режимов как нейтронной, так и нейтронно-фотонной терапии лежат данные дозиметрических и радиобиологических исследований, полученные главным научным сотрудником отделения радиологии д.т.н. профессором В.А. Лисиным.

На конференции клиницистами были представлены результаты и особенности проведения нейтронной и нейтронно-фотонной терапии у больных с различными локализациями злокачественных новообразований.

В конференции приняли участие зарубежные гости: Ф.М. Вагнер, физик, Технический университет г. Мюнхена (Германия), который выступил с обзорным докладом: «Терапия быстрыми нейтронами: данные о текущем состоянии», основные положения которого будут опубликованы в «Сибирском онкологическом журнале», и профессор Я. Слабберт, руководитель iThemba LABS (Южно-Африканская Республика) с докладом «Применение нейтронов с энергией 29 МэВ в лучевой терапии».

На конференцию прибыли ведущие радиологи России: Ю.С. Мардынский, д.м.н., профессор, член-корр. РАМН, заведующий отделом лучевой терапии Медицинского радиологического научного центра МЗРФ, Обнинск. Он выступил с докладом «Лечение рака молочной железы реакторными нейтронами». С.И. Ткачев, д.м.н., вице-президент Российской ассоциации радиационных терапевтических онкологов (РАТРО) сделал сообщение о стандартах проведения лучевой терапии при метастатическом поражении головного мозга. Гости из Челябинска во главе с А.В. Важениным, член-корр. РАМН, д.м.н., профессором, главным врачом ЧОКОД, приняли самое активное участие с докладом по радиобиологии: Е.Ю. Кандакова, к.м.н. «Биологическая дозиметрия излучения генератора нейтронов НГ-12 и 15» и с клиническими докладами – А.И. Кузнецова, к.м.н., радиолог «Непосредственные и отдаленные результаты лечения больных в Уральском нейтронном центре», где одной из распространенных злокачественных опухолей, используемых в качестве клинической модели при лечении быстрыми

нейтронами и фотонами, является рак гортани и гортаноглотки.

В докладе профессора В.А. Лисина были изложены основные принципы дозиметрического и радиобиологического планирования нейтронной терапии с учетом энергетического спектра нейтронного пучка циклотрона U-120. Показано, что разработанная специально для нейтронной терапии модель ВДФ и полученная зависимость ОБЭ нейтронов от дозы, хотя и нуждаются в дальнейшем уточнении, позволяют выбирать адекватные режимы облучения, исключая возникновение серьезных лучевых осложнений.

С обзорным докладом о результатах клинических исследований выступила д.м.н., профессор, главный научный сотрудник отделения радиологии Л.И. Мусабаева, которая характеризовала пройденный путь за 30-летний период освоения лучевой терапии быстрыми нейтронами 6,3 МэВ на циклотроне U-120 ТПУ. В результате исследований явилось достоверное повышение 5- и 10-летних показателей общей и безрецидивной выживаемости при комбинированном, нейтронном и нейтронно-фотонном лечении больных местнораспространенными формами злокачественных новообразований. Нейтронная терапия в предоперационном плане проводилась у больных раком в/ч пазухи и полости носа (д.м.н. В.А. Новиков). Впоследствии чаще использовали послеоперационный курс нейтронной и нейтронно-фотонной терапии у больных с опухолями слюнных желез, щитовидной железы с неблагоприятными прогностическими признаками (к.м.н. О.В. Грибова). О функциональных нарушениях и качестве жизни больных злокачественными опухолями околоушной слюнной железы после комбинированного лечения с нейтронной терапией свидетельствовал доклад к.м.н. М.В. Авдеенко. В сообщениях исследователей фигурировали случаи полной регрессии опухолей в результате эффективной нейтронной терапии у больных с рецидивами опухолей, метастазами в сравнении с группой контроля.

Клинический материал о результатах комплексного применения химиотерапии и предоперационного курса нейтронной терапии местно-распро-

страненного рака молочной железы на циклотроне U-120 и качестве жизни больных в отдаленные сроки наблюдения представила зав. отд. радиологии д.м.н. Ж.А. Старцева. Научный сотрудник к.м.н. В.В. Великая в докладе «Эффективность применения быстрых нейтронов 6,3 МэВ для профилактики и комплексного лечения местных рецидивов рака молочной железы» сообщила результаты лечения сложного контингента больных, а также о решении вопросов профилактики местных рецидивов при воздействии нейтронной терапии на послеоперационный рубец. А.А. Мельников, м.н.с., сотрудник лаборатории вирусологии с большой группой авторов выполнили исследование по изучению цитогенетических эффектов нейтронной терапии у больных опухолями области головы и шеи и с рецидивами рака молочной железы. Доклад А.Н. Моисеева, к.ф.м.н. из НИЯУ МИФИ, клиника лучевой хирургии «Онкостоп», был посвящен «Сравнению методов расчета дозы для дистанционной нейтронной и фотонной терапии у больных злокачественными новообразованиями».

Ведущий научный сотрудник П.В. Ижевский из лаборатории разработки новых методов лучевой терапии Федерального медицинского биофизического центра им. А.И. Бурназяна сделал доклады о разработке бинарных технологий лучевой терапии злокачественных новообразований.

В заключение профессор Л.И. Мусабаева сообщила о разработанных способах лечения лучевых реакций и поздних лучевых повреждений кожи у больных после нейтронной терапии. В дискуссии приняли непосредственное участие сотрудники НИИ онкологии СО РАМН и гости конференции. Выступающие выразили общее мнение, что необходимо продолжать использовать излучение быстрых нейтронов циклотронов и реакторов для лечения определенной категории онкологических больных. Высокая степень организации была отмечена всеми участниками конференции.

*Главный научный сотрудник отделения радиологии НИИ онкологии СО РАМН профессор, д.м.н.
Л.И. Мусабаева
Поступила: 18.10.2013.*

Памяти А.Ф. Цыба



8 ноября 2013 года на 80-м году ушел из жизни директор Медицинского радиологического научного центра АМН СССР, затем Минздрава РФ с 1978 по 2013 гг., почётный гражданин города Обнинска, заслуженный деятель науки Российской Федерации, лауреат Государственной премии СССР и премии Правительства РФ в области науки и техники, крупный ученый в области медицинской радиологии и радиационной медицине академик РАМН, профессор Анатолий Фёдорович Цыб.

Анатолий Фёдорович родился 21 января 1934 г. в Украине. Его детство прошло в годы Великой Отечественной войны на территории Миргородского района Полтавской области. После окончания с серебряной медалью средней школы, он поступил на медицинский факультет Ужгородского государственного университета, который в 1957 г. окончил с красным дипломом и приступил к работе главным врачом сельской больницы, получив там практические медицинские и управленческие навыки.

В 1961 г. он был принят в аспирантуру Института медицинской радиологии АМН СССР

в городе Обнинске Калужской области, где начал осваивать новый раздел рентгенологии – лимфографию и возглавил соответствующее отделение в составе отдела рентгенологии. Широкую известность получили результаты исследований А.Ф. Цыба по ангио- и лимфографической оценке местных лучевых повреждений. Под его руководством созданы новые технологии диагностики и лечения онкологических заболеваний, основанные, в частности, на применении высокоэнергетических ускорителей, современных источников ионизирующих излучений.

В 1978 г. Анатолий Фёдорович, совсем еще молодой, но уже стремительно идущий к вершинам науки, возглавил НИИМР АМН СССР. В девяностые годы он сумел сохранить не только стабильность работы, но и работоспособный коллектив единомышленников. «Оглядываясь назад, я только сегодня могу осознать всю сложность и масштабность пути, приведшего к возникновению мощного научного коллектива, в котором трудятся порядка тысячи семисот человек», – подчеркивал в своих выступлениях Анатолий Фёдорович.

А.Ф. Цыбом была определена диагностическая значимость лучевых методов и обосновано их применение при различных злокачественных новообразованиях. Будучи истинным учёным, он активно изучал и внедрял в практику новые методы лучевой и комбинированной терапии опухолей, в том числе с использованием новых принципов получения изображения и обработки информации с помощью новейших технологий, включая КТ, МРТ и ультразвуковые исследования.

Академик А.Ф. Цыб внес весомый вклад в ликвидацию медицинских последствий аварии на Чернобыльской АЭС. Он непосредственно участвовал в организации диспансерного обследования детского и взрослого населения загрязнённых территорий. На базе Центра был создан Национальный радиационно-эпидемиологический регистр, где теперь собраны данные порядка 800 тысяч человек, подвергшихся лучевому воздействию.

В течение 20 лет А.Ф. Цыб возглавлял Российскую научную комиссию по радиологической защите. На основании концепции, разработанной А.Ф. Цыбом, функционирует программа социальной защиты и реабилитации людей, пострадавших от последствий радиационных аварий.

Анатолий Фёдорович Цыб стал седьмым лауреатом Мемориальной премии мира доктора Такаси Нагаи (Япония), ему была вручена оригинальная бронзовая статуэтка «Свет жизни». Анатолий Фёдорович награжден орденами «За заслуги перед Отечеством» IV и III степеней, орденом «Знак Почета», орденом «Мужества» а также он удостоен именной медали к 100-летию выдающегося русского генетика Н.В. Тимофеева-Ресовского.

Большое внимание Анатолий Фёдорович уделял воспитанию молодых кадров. Им подготовлено 29 докторов и 38 кандидатов медицинских наук. Можно смело констатировать, что за 34 года его руководства Центр стал зрелым и признанным учреждением в мировом медицинском сообществе.

Коллектив Медицинского радиологического научного центра Министерства здравоохранения Российской Федерации скорбит о тяжелейшей утрате и выражает родным Анатолия Фёдоровича свои глубокие соболезнования. Наши сердца наполнены скорбью, вечная память дорогому, любимому Учителю.

*Медицинский радиологический научный
центр Министерства здравоохранения
Российской Федерации*

*Редакционная коллегия журнала «Медицинская
радиология и радиационная безопасность»*

**УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ
«МЕДИЦИНСКАЯ РАДИОЛОГИЯ И РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ»
В 2013 ГОДУ**

РАДИАЦИОННАЯ БИОЛОГИЯ

Е.С. Евстратова, Н.М. Кабакова, В.Г. Петин. Восстановление клеток от потенциально летальных повреждений после повторных воздействий ионизирующим излучением. **58**, № 5, С. 5–10.

А.Н. Котеров. От очень малых до очень больших доз радиации: новые данные по установлению диапазонов и их экспериментально-эпидемиологические обоснование. **58**, № 2, С. 5–21.

РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Р.М. Алексахин, В.Г. Сычев. Радиэкологические аспекты реабилитации сельского хозяйства после аварии на АЭС «Фукусима-1». **58**, № 6, С. 5–13

Ю.И. Гаврилин. Ретроспективная оценка интегральных выпадений ¹³¹I с учетом пролонгированного загрязнения местности. **58**, № 5, С. 11–25.

А.К. Гуськова. Формирование баз данных и регистров как основы рациональной организации медицинского наблюдения и оценки здоровья. **58**, № 2, С. 22–29.

В.Ф. Демин, В.В. Романов, В.Ю. Соловьев, И.Е. Захарченко. Гармонизированный подход к регулированию безопасности в разных областях деятельности человека. **58**, № 5, С. 26–34.

J.A. Jones, M. Epperly, J. Law, R. Scheuring, C. Montesinos, D. Popov, V. Maliev, K. Prasad, J. Greenberg. Space Radiation Hazards and Strategist for Astronaut/Cosmonaut Protection. **58**, № 4, С. 5–23.

Ю.Е. Квачева, В.Н. Яценко, А.Г. Глазунов. Радиационная безопасность медицинского персонала патологоанатомической и судебно-медицинской служб при аутопсиях трупов лиц, подвергшихся воздействию ионизирующих излучений. **58**, № 6, С. 25–29.

К.В. Котенко, А.Ю. Бушманов, И.Е. Тюрин, В.А. Костылев, С.И. Ткачев, Б.И. Долгушин, А.А. Бойко, Б.Я. Наркевич. К вопросу о вредных условиях труда в радиологических подразделениях медицинских учреждений. **58**, № 4, С. 17–22.

Е.М. Мелихова, Е.М. Быркина, Ю.А. Першина. О некоторых механизмах социального усиления риска при освещении в СМИ аварии на Фукусима. **58**, № 4, С. 5–16.

Б.А. Напье, М.О. Дегтева, Н.Б. Шагина, Л.Р. Анспо. Анализ неопределенностей в дозиметрической системе реки Течи. **58**, № 1, С. 5–28.

В.Ф. Степаненко, М. Хоши, М.Ю. Орлов, Д.В. Дубов, А.Ф. Цыб. Загрязнение окружающей среды и продуктов питания радионуклидами, дозы облучения населения после аварии на Фукусима-1. Сообщение 1. Загрязнение окружающей среды. **58**, № 6, С. 14–24

В.А. Тараненко, М.И. Воробьева, М.О. Дегтева, Н.Г. Бугров, Е.И. Черепанова, Э.С. Куропатенко. Верификация уровней внешнего облучения в верховье реки Течи (Метлино) измерениями люминесценции. **58**, № 1, С. 29–35.

А.А. Удалова, С.Е. Гераськин, Р.М. Алексахин, С.М. Киселев. Современные подходы к оценке радиационного воздействия на окружающую среду. **58**, № 4, С. 23–33.

РАДИАЦИОННАЯ МЕДИЦИНА

Н.Г. Власова. Методический подход к реконструкции индивидуализированных доз лиц, подвергшихся воздействию радиации в результате аварии на ЧАЭС. **58**, № 3, С. 24–33.

И.А. Галстян, Н.М. Надежина. Продолжительность жизни, выживаемость и основные причины смерти в отдаленные сроки после перенесенной острой лучевой болезни. **58**, № 4, С. 55–63.

Н.А. Исаева, Ф.С. Торубаров, З.Ф. Зверева. Оценка риска сосудистых заболеваний головного мозга у работников Билибинской АЭС. **58**, № 2, С. 39–45.

Н.А. Исаева, Ф.С. Торубаров, З.Ф. Зверева. Биоэлектрическая активность мозга у работников Билибинской атомной электростанции, имеющих различную степень риска ишемического инсульта. **58**, № 4, С. 48–54.

Е.М. Мелихова. Изменения в статистике искусственных аборт в 1986 г. не связаны с психологическими последствиями Чернобыля. **58**, № 2, С. 35–50.

Н.А. Метляева. Особенности социально-психологической адаптации трех больных, перенесших острую лучевую болезнь III–IV степени тяжести

и местные лучевые поражения I–IV степени тяжести при аварии ЧАЭС. **58**, № 2, С. 30–38.

Н.А. Метляева. Клинико-психофизиологическая адаптация больного в периоде отдаленных последствий острой лучевой болезни. **58**, № 4, С. 34–41.

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 им. А.И. Бурназяна ФМБА России). **58**, № 1, С. 36–42.

V.Yu. Soloviev, A.V. Barabanova, A.Yu. Bushmanov, A.K. Guskova, L.A. Ilyin. Review of the Radiation Accidents Consequences in the Former USSR Territory (Burnasyan FMBC of FMBA of Russia Register Data). **58**, № 4, С. 42–47.

В.Ю. Соловьев, А.Е. Баранов, Т.М. Хамидулин, Н.В. Зиновьева. База данных по острым лучевым поражениям человека. Сообщение 3. Особенности прогнозирования пострадиационной динамики концентрации нейтрофилов в периферической крови при костномозговом синдроме, отягощенном лучевыми ожогами, а также при неравномерном по телу облучении **58**, № 6, С. 30–35.

ЛУЧЕВАЯ ДИАГНОСТИКА

А.А. Левитов, В.И. Краснюк, Е.В. Ситникова, А.П. Дунаев. Эффективность рентгеновского цифрового линейного томосинтеза в визуализации очаговых образований легких, подозрительных на метастатическое поражение, в сравнении с цифровой рентгенографией у больных раком молочной железы. **58**, № 2, С. 46–52.

А.П. Дунаев, Ж.В. Шейх, В.Н. Яковлев, В.Г. Алексеев, Е.В. Есин, Н.С. Дребушевская, В.И. Дога, Г.Г. Федченко, А.Н. Башков, О.О. Григорьева, В.Г. Жуховский, С.А. Ульянов. Компьютерная томография в диагностике абсцессов легких. **58**, №4, С. 64–71.

ЛУЧЕВАЯ ТЕРАПИЯ

Н.В. Белозор, Т.В. Сегеда, В.П. Старенький, Н.А. Митряева. Сфингомиелиназа в мониторинге эффективности химиолучевого лечения нелкоклеточного рака легкого (клинико-экспериментальные исследования). **58**, № 3, С. 34–38.

А.П. Дмитриенко, Н.А. Толмачев. Влияние временных интервалов между лучевой терапией и хирургическим лечением на выживаемость больных раком молочной железы. **58**, № 5, С. 51–53.

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. Храмцова. Методические аспекты конформной дистанционной

лучевой терапии у молодых женщин с транспозицией яичников при раке шейки матки. **58**, № 1, С. 43–49.

Ю.А. Кураченко, Н.К. Вознесенский, Е.С. Матусевич, Л.А. Лебедев, В.А. Левченко, А.В. Левченко. Нейтронозахватная терапия глубоко расположенных новообразований на модифицированном пучке проектируемого медицинского реактора МАРС. **58**, № 6, С. 36–43

Л.И. Мусабаева, В.А. Лисин, Ж.А. Старцева, О.В. Грибова, В.В. Великая, А.А. Мельников. Нейтронная терапия на циклотроне U-120. К 30-летию применения нейтронной терапии – обзор результатов научных исследований. **58**, № 2, С. 53–61.

О.П. Трофимова, С.И. Ткачев, З.П. Михина, Ю.И. Прямикова, Н.П. Шипилина, О.С. Зайченко, И.В. Колядина, А.М. Малышев. Дополнительное лучевое воздействие на ложе удаленной опухоли у больных раком молочной железы, получающих комплексное лечение с органосохраняющей операцией. **58**, № 2, С. 62–68.

ЯДЕРНАЯ МЕДИЦИНА

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. **58**, № 1, С. 50–58.

А.Б. Блудов, Я.А. Замогильная, А.С. Неред, С.В. Ширяев, Н.В. Кочергина, Л.Е. Ротобельская. Остеосцинтиграфия в оценке эффективности предоперационной химиотерапии у больных с саркомами костей. **58**, № 2, С. 69–78.

Ю.Б. Лишманов, К.В. Завадовская, В.В. Саушкин, С.В. Попов. Сцинтиграфическая семиотика аритмогенной дисфункции сердца при наличии желудочковых экстрасистол у детей и подростков. **58**, № 3, С. 39–44.

Д.К. Фомин, О.О. Люгай, О.Б. Тарарухина. Опыт применения комбинированного ОФЭКТ/КТ исследования в оценке распространенности заболевания и определения дальнейшей тактики лечения больных раком щитовидной железы. **58**, № 5 С. 54–58.

РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА, ТЕХНИКА И ДОЗИМЕТРИЯ

В.В. Калашников, Е.П. Павлов, И.И. Самойленко, В.Н. Корсунский. Возможность индивидуализации сроков испытаний на стерильность облучаемой продукции медицинского назначения. **58**, № 3, С. 45–47.

Л.Я. Клеппер. Приближенное определение параметров радиобиологической модели плоскоклеточного рака гортани. **58**, № 4, С. 72–79.

ОБЗОР

И.К. Беляев, Е.С. Жорова, В.С. Калистратова, П.Г. Нисимов, И.М. Парфенова, Г.С. Тищенко. Радиоактивный цезий. Сообщение 2: Ускорение выведения. **58**, № 3, С. 56–70.

Ю.Г. Григорьев, А.П. Бирюков. Мобильная связь и здоровье населения (к оценке риска при техногенном электромагнитном загрязнении среды). **58**, № 6, С. 44–61.

А.К. Гуськова. Современная организация медицинского сопровождения лиц, подвергающихся воздействию ионизирующего излучения. **58**, № 1, С. 59–67.

А.Ф. Цыб, Е.В. Абакушина, Д.Н. Абакушин, Ю.С. Романенко. Настоящее и будущее радиоиммунотерапии. **58**, № 3, С. 48–55.

РЕЦЕНЗИИ

А.К. Гуськова. Рецензия на книгу Е.Ф. Лушниковой, А.Ю. Абросимова «Современная лучевая патология человека: проблемы методологии исследований, этиологии, патогенеза и классификации». — Обнинск: ФГБУ МРНЦ Минздравсоцразвития России, 2012, 236 с. **58**, № 1, С. 79–80.

А.К. Гуськова. Рецензия на книгу У.Я. Маргулиса «Вспоминая былое. Штрихи к биографии». — М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2012, 190 с. **58**, № 5, С. 59–61.

С.И. Ткачев, О.П. Трофимова. Рецензия на книгу Л.И. Мусабаевой, Е.М. Слонимской, В.А. Лисина, А.В. Дорошенко. «Интраоперационная электронная и дистанционная гамма-терапия больных раком молочной железы». — Томск: Изд-во НТЛ, 2012, 180 с. **58**, № 3, С. 71–75.

ХРОНИКА

В.А. Голиков, Л.И. Мусабаева. Совещание, посвященное перспективам применения нейтронной терапии, Майнц, Германия, 1–4 июля 2013 г. **58**, № 5, С. 73–74.

О.В. Илюшина. 8-я Международная научно-практическая конференция «Клиническая онкорadiология». Москва, РОНЦ им. Н.Н. Блохина РАМН, 15–17 марта 2013 г. **58**, № 3, С. 76–79.

М.Ф. Киселев, Т.В. Азизова, А.В. Аклеев, Р.М. Алексахин, В.К. Иванов, А.Н. Котеров, И.И. Крышев, Б.К. Лобач, О.А. Павловский, С.А. Романов, А.В. Сажин, С.М. Шинкарев. О работе 60-й сессии научного комитета по действию атомной радиации ООН (НКДАР ООН). Вена, 27–31 мая 2013 г. **58**, № 5, С. 62–72.

М.Ф. Киселев, С.М. Шинкарев. Информация о проведении 10-го заседания Объединенного координационного комитета по изучению последствий радиационных воздействий (ОККИРВ). 11–12 сен-

тября 2013 г., Санкт-Петербург, Россия. **58**, № 6, С. 65–69.

М.Ф. Киселев. Доклад Научного комитета Организации Объединенных Наций по действию атомной радиации. 60-я сессия, 27–31 мая 2013 г., Нью-Йорк. **58**, № 6, С. 70–76.

М.И. Мусабаева. Научно-практическая конференция «Нейтронная терапия в онкологии: проблемы, успехи, перспективы». 3–4 октября 2013 г., Томск. **58**, № 6, С. 77–78.

Основные итоги работы и перспективы исследований в области радиобиологии инкорпорированных радионуклидов в ФМБЦ им. А.И. Бурназяна. К 50-летию лаборатории токсикологии радиоактивных веществ. **58**, № 4, С. 80–84.

Л.А. Рождественский. Информация о Российской конференции «Острые проблемы разработки противолучевых средств: консерватизм или модернизация». **58**, № 1, С. 68–70.

В.И. Рубцов, В.Н. Клочков. К шестидесятилетию лаборатории средств индивидуальной защиты персонала опасных производств. **58**, № 5, С. 75–81.

В ПОМОЩЬ ПРАКТИЧЕСКОМУ ВРАЧУ

Н.И. Рожкова, Т.В. Шерстнева, О.Н. Авилов, М.А. Шершнева, О.Б. Тарарухина. Экстраабдоминальная форма десмоидной опухоли молочной железы. **58**, № 1, С. 71–77.

О.В. Терехов, В.В. Пасов. Случай нетипичного образования камня в нижних мочевых путях у больного с поздним лучевым циститом. **58**, № 6, С. 62–64.

ЮБИЛЕЙ

К 85-летию со дня рождения Л.А. Ильина. **58**, № 1, С. 78–80.

К 50-летию со дня рождения Р.М. Тахаюова. **58**, № 2, С. 81–82.

К 55-летию со дня рождения А.В. Важенина. **58**, № 5, С. 82–83.

НЕКРОЛОГИ

Памяти Ю.В. Сивинцева. **58**, № 2, С. 83–84.

Памяти Б.М. Алиева. **58**, № 5, С. 84

Памяти А.Ф. Цыба. **58**, № 6, С. 79–80

БИБЛИОГРАФИЯ

Правила оформления статей для опубликования в журнала «Медицинская радиология и радиационная безопасность» (на русском и английском языках). **58**, № 1, С. 81–88.

Указатель статей, опубликованных в журнале «Медицинская радиология и радиационная безопасность» в 2013 году. **58**, № 6, С. 81–84.

**Ю.Г. ГРИГОРЬЕВ, О.А. ГРИГОРЬЕВ.
«СОТОВАЯ СВЯЗЬ И ЗДОРОВЬЕ». – М.: Экономика, 2013.**

Впервые дан подробный и всесторонний анализ сотовой связи как значимого для населения источника электромагнитного поля. Особенность настоящей монографии – сочетание современных научных данных, в том числе зарубежных, и результатов фундаментальных и прикладных исследований биологических эффектов ЭМП, проведенных в России и СССР в «домобильную эпоху».

В книге дана подробная характеристика условий электромагнитной обстановки, представлены закономерности формирования индивидуальной энергетической нагрузки для пользователей абонентских терминалов (сотовых телефонов) и населения. Рассмотрены фундаментальные базовые механизмы формирования ответной биологической реакции и условия возможного перехода ее в патологическое состояние. Выделены критические органы и системы к воздействию электромагнитного поля сотовой связи, к которым отнесены прежде всего головной мозг и иммунная система. Детально рассмотрены возможные биоэффекты при воздействии ЭМП малой интенсивности, модуляции, сложных режимов электромагнитного сигнала. Авторами проанализированы научные данные, позволяющие отнести детей и подростков к группе риска.

Подробно рассмотрены научные принципы формирования нормативной базы, лежащей в основе обеспечения безопасности как в нашей стране, так и за рубежом.

Проанализированы применимость и достаточность имеющейся информации для оценки риска нанесения вреда здоровью при продолжительном контакте с источниками ЭМП сотовой связи.

Авторы оценивают сложившуюся в настоящее время ситуацию, как требующую особого внимания всех уровней исполнительной власти, здравоохранения и научного сообщества. Монография не претендует на то, чтобы полностью и окончательно дать категоричное заключение по принципу «вредно – не вредно», а представляет вклад в формирование культуры безопасного использования и развития как сотовой связи, так и последующих технологических достижений, сопряженных с формированием условий контакта человека с источниками физических факторов воздействия электромагнитной природы.



Григорьев Юрий Григорьевич

профессор, доктор медицинских наук, Лауреат Государственной премии СССР, ведущий научный сотрудник Федерального медицинского биофизического центра им. А.И. Бурназяна, Академик Академии электротехнических наук РФ.

Профиль научных исследований: биологическое действие ионизирующей и неионизирующей радиации, оценка опасности действия физических факторов на население, включая детей и подростков; радиационная безопасность пилотируемых космических полетов, экстремальная физиология, нормирование физических факторов среды. Более 50 лет ведет работы, связанные с биологическим действием электромагнитного сверхвысокочастотного излучения, с оценкой неблагоприятного влияния на население.

Председатель Российского национального Комитета по защите от неионизирующих излучений, постоянный член Консультативного Комитета ВОЗ по международной программе «Электромагнитные поля и здоровье населения», член правления Научного Совета по проблеме радиологии РАН, член Международной Комиссии по электромагнитной безопасности (ICEM5), член редколлегии журнала РАН «Радиационная биология. Радиобиология».

Автор 19 монографий и более 330 публикаций в научных отечественных и зарубежных журналах.



Григорьев Олег Александрович

кандидат биологических наук, заведующий отделом неионизирующих излучений, Федерального медицинского биофизического центра им. А.И. Бурназяна.

Профиль научных исследований: биологическое действие электромагнитного поля, био- и электромагнитная совместимость, изучение биологического действия физических факторов неионизирующей природы в экстремальных условиях, нормирование физических факторов окружающей среды.

Заместитель председателя Российского национального комитета по защите от неионизирующих излучений, постоянный член Консультативного комитета ВОЗ по международной программе «Электромагнитные поля и здоровье населения», доцент и руководитель курса «Гигиена неионизирующих излучений» кафедры медицины труда, гигиены и профилактиологии Института профессионального последипломного образования ФМБЦ им. А.И. Бурназяна, член международного Биоэлектромагнитного общества (BEMS).

Ю.Г. Григорьев
О.А. Григорьев

СОТОВАЯ СВЯЗЬ И ЗДОРОВЬЕ

Ю.Г. Григорьев, О.А. Григорьев

СОТОВАЯ СВЯЗЬ И ЗДОРОВЬЕ

Электромагнитная обстановка
Радиобиологические и гигиенические проблемы
Прогноз опасности

