

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

МЕДИЦИНСКАЯ РАДИОЛОГИЯ И РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

MEDICAL RADIOLOGY AND RADIATION SAFETY

Meditsinskaia Radiologiia i Radiatsionnaia Bezopasnost

2016

Том 61

№ 4

Периодический научный журнал. Издается с сентября 1956 года
Periodical scientific journal. Published since 1956

Журнал включен в перечень ВАК ведущих рецензируемых научных журналов,
рекомендованных для опубликования результатов диссертационных исследований
Журнал вошел в Перечень Russian Science Citation Index (RSCI),
размещенный на платформе Web of Science

Москва

МЕДИЦИНСКАЯ РАДИОЛОГИЯ И РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Журнал основан в январе 1956 года
(до 30 декабря 1990 года выходил под названием «Медицинская Радиология»)
Периодичность издания: шесть выпусков в год
ISSN : 1024-6177

Журнал выходит при поддержке Федерального медико-биологического агентства России (ФМБА России)

Главный редактор В.В. УЙБА

Редакционная коллегия:

Г.М. Аветисов, Р.М. Алексахин, Р.В. Арутюнян, А.В. Бойко, А.П. Бирюков, А.Ю. Бушманов,
А.А. Вайнсон (выпускающий редактор), И.А. Гусев, В.Ф. Демин, С.И. Иванов, И.П. Коренков,
А.Н. Котеров, М. Марков (США), В.Б. Назаров (заместитель главного редактора),
Б.Я. Наркевич (научный редактор), К.Н. Нурлыбаев, В.В. Романов, А.С. Самойлов (заместитель главного редактора), М.К. Сневе (Норвегия), С.И. Ткачев, И.Е. Тюрин, П. Урингтон (США),
Б.Н. Фаунтес (США), Н.К. Шандала, А.В. Шафиркин, С.М. Шинкарев

Редакционный совет:

С.С. Алексанин, М.И. Балонов, А.Х. Гонзалес (Аргентина), В.К. Иванов, Л.А. Ильин,
П.К. Казымбет (Казахстан), Н.М. Оганесян (Армения), А.В. Рожко (Белоруссия),
Г.М. Румянцева, В.А. Саенко

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

E-mail: medradiol@fromru.com, medradiol@yandex.ru
Сайт журнала: <http://www.medradiol.ru>
Годовой подписной индекс Агентства «Роспечать» — 71814
Подписано в печать 07.07.2016. Формат 60 × 88/8
Печать офсетная. 13,5 усл. печ. л. Тираж 1000 экз. Заказ №
Отпечатано в типографии ФМБЦ им. А.И. Бурназяна
123098, Москва, ул. Живописная, 46

MEDICAL RADILOGY AND RADIATION SAFETY

The journal was founded in January 1956
(30 December 1990 was published under the title «Medical Radiology»)
Frequency of publication: six issues per year
ISSN : 1024-6177

The journal is published with support of The Federal Medical-Biological Agency of Russia (FMBA of Russia)

Editor in chief Vladimir Uiba

Editorial Board:

G. M. Avetisov, R. M. Aleksakhin, R. V. Arutyunyan, A. V. Boiko, A. P. Biryukov, A. Y. Bushmanov,
A. A. Wainson (Production Editor), I. A. Gusev, V. F. Demin, S. I. Ivanov, I. P. Korenkov,
A. N. Koterov, M. Markov (USA), V. B. Nazarov (Deputy Chief Editor), B. J. Narkevich (Scientific Editor),
K. N. Nurlybaev, V. V. Romanov, A.S. Samoylov (Deputy Chief Editor), M. K. Sneve (Norway), S. I. Tkachev,
I. E. Tyurin, P. Urington (USA), B. N. Fountas (USA), N. K. Shandala, A. V. Shafirkin, S. M. Shinkarev

Editorial council:

S. S. Aleksanin, M. I. Balonov, A. H. Gonzalez (Argentina), V. K. Ivanov, L. A. Ilyin, P. K. Kazymbet (Kazakhstan),
N. M. Oganessian (Armenia), A. V. Rozhko (Belarus), G. M. Rumyantseva, V. A. Saenko

All articles in the journal are printed free of charge

Head of Editorial Office: E. S. Zubenkova
Computer-aided makeup: V. V. Kolesnichenko

Address of Editorial Board:

46, Zhivopisnaya st., 123098, Moscow, Russia
Phone: +7 (499) 190-95-51

E-mail: medradiol@fromru.com, medradiol@yandex.ru
The journal website: <http://www.medradiol.ru>
The annual subscription index Agency «Rospechat» — 71814
Signed to print 07.07.2016. Format 60 × 88/8
Offset printing. 13,5 conv. printed sheet. 1000 copies. Order #
Printed by SRC-FMBC
123098, Moscow, Zhivopisnaya st. 46

СОДЕРЖАНИЕ № 4 – 2016

РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ	5	Динамика радиационной обстановки в сельском населенном пункте, загрязненном цезием-137 в результате аварии на Чернобыльской АЭС в апреле 1986 г. <i>С.В. Панченко, А.А. Аракелян, Е.А. Гаврилина, А.М. Шведов</i>
	19	Дезактивация средств индивидуальной защиты при ликвидации последствий радиационной аварии: опыт Чернобыля и его применение в современных условиях <i>В.Н. Клочков, В.И. Рубцов</i>
	24	Особенности накопления, перераспределение и миграции урана в почве при газодинамических тестах <i>А.Л. Полюдин, Е.Н. Полюдина</i>
РАДИАЦИОННАЯ МЕДИЦИНА	29	Особенности психофизиологической адаптации кадровых военных и персонала ЧАЭС, участвовавших в ликвидации аварии на ЧАЭС в 1986–1987 гг. <i>Н.А. Метляева, А.Ю. Бушманов, В.И. Краснюк, Е.Э. Западинская, О.В. Щербатых, М.В. Болотнов</i>
	35	Цитогенетические исследования через 28–29 лет после аварии на Чернобыльской АЭС <i>В.Ю. Нугис, А.Ю. Бушманов, Е.Э. Западинская, М.Г. Козлова, О.А. Тихонова</i>
	43	«Горячие» частицы в легких участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС и жителей загрязненных территорий <i>Ю.Е. Квачева</i>
ЛУЧЕВАЯ ДИАГНОСТИКА	48	Оптимизация доз облучения пациентов при проведении рентгенодиагностических исследований <i>С.Е. Охрименко, И.П. Коренков, Н.А. Аكوпова, С.А. Рыжкин, С.И. Иванов</i>
РАДИАЦИОННАЯ ЭПИДЕМИОЛОГИЯ	52	Оценка риска заболевания раком щитовидной железы у населения при проживании вблизи ПО «Маяк» <i>И.А. Мартиненко, М.Э. Сокольников, Н.А. Кошурникова, Ю.Г. Мокров, Д.А. Берегич</i>
ЯДЕРНАЯ МЕДИЦИНА	59	Опыт применения ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ в диагностике рецидивов и метастазов дифференцированного рака щитовидной железы <i>Т.М. Гелиашвили, А.В. Важенин, Е.Б. Васильева, Н.Г. Афанасьева</i>
	64	Математическое моделирование обращения с жидкими радиоактивными отходами при радионуклидной терапии <i>Ю.В. Лысак, Б.Я. Наркевич, С.В. Ширяев, В.В. Крылов</i>
ОБЗОР	68	Позитронно-эмиссионная томография с кислородом-15 в неврологии. Часть 2. Клиническое применение <i>И.А. Знаменский, А.К. Кондаков, В.В. Милькин, Д.Ю. Мосин, А.В. Гречко</i>
В ПОМОЩЬ ПРАКТИЧЕСКОМУ ВРАЧУ	76	Уникальный случай гигантского солитарного экзофитного метастаза в печени при нейроэндокринном раке тонкой и толстой кишки <i>А.Н. Башков, Ж.В. Шейх, Е.А. Ионова, С.А. Мирзоянц, Н.С. Дребушевский, О.О. Григорьева, А.П. Дунаев</i>
НОВЫЕ КНИГИ	83	Гребенюк А.Н., Легеза В.И., Гладких В.Д. и соавт. «Практическое руководство по использованию медицинских средств противорадиационной защиты при чрезвычайных ситуациях и обеспечению ими аварийных медико-санитарных формирований и региональных аварийных центров». — М. 2015. 304 с.
	84	Особые радиоактивные отходы. Под общей редакцией И.И. Линге. — М. 2015. 240 с.

CONTENTS № 4 – 2016

RADIATION SAFETY	5 Dynamic of Radiological Situation in the Rural Settlements Contaminated by Cesium-137 caused by the Chernobyl Accident in April 1986 <i>S.V. Panchenko, A.A. Arakelyan, E.A. Gavrilina, A.M. Shvedov</i> 19 Decontamination of the Personal Protective Equipment at Rectification of the Radiation Accident Consequences: Use of Chernobyl Experience Today <i>V.N. Klochkov, V.I. Rubtsov</i> 24 Specific Features of Accumulation, Reallocation and Migration of Uranium in Soil after the Gas-Dynamic Tests <i>A.L. Polydin, E.N. Polydina</i>
RADIATION MEDICINE	29 Features of Psychophysiological Adaptation of Military Personnel and Personnel of ChNPP, Participated in the Liquidation of the ChNPP Accident in 1986–1987 <i>N.A. Metlyaeva, A.Yu. Bushmanov, V.I. Krasnuk, E.Eu. Zapadinskaya, O.V. Scherbatich, M.V. Bolotnov</i> 35 Cytogenetic Studies 28–29 Years after the Accident at the Chernobyl NPP <i>V.Yu. Nugis, A.Yu. Bushmanov, H.E. Zapadinskaya, M.G. Kozlova, O.A. Tyhonova</i> 43 Chernobyl Hot Particles in Lungs of the Participants of the Post-Accident Clean-up Operation and Residents of the Contaminated Regions <i>Yu.E. Kvacheva</i>
DIAGNOSTIC RADIOLOGY	48 Patient Dose Optimization during X-Ray Investigation <i>S.E. Okhrimenko, I.P. Korenkov, N.A. Akopova, S.A. Ryzhkin, S.I. Ivanov</i>
RADIATION EPIDEMIOLOGY	52 Risk Assessment of Thyroid Cancer Incidence among Population Due to the Residence Close to Mayak PA <i>I.A. Martinenko, M.E. Sokolnikov, N.A. Koshurnikova, Yu.G. Mokrov, D.A. Beregich</i>
NUCLEAR MEDICINE	59 Experience of Use ¹⁸F-FDG PET/CT in Detecting Tumor Recurrence and Metastasis of Differentiated Thyroid Cancer <i>T.M. Geliashvili, A.V. Vazhenin, E.B. Vasil'eva, N.G. Afanas'eva</i> 64 Mathematical Modeling of Liquid Radioactive Waste in Radionuclide Therapy <i>Yu.V. Lysak, B.Ya. Narkevich, S.V. Shiryayev, V.V. Krylov</i>
REVIEW	68 Positron Emission Tomography with Oxygen-15 in Neurological Practice. Part 2. Clinical Application <i>I.A. Znamenskiy, A.K. Kondakov, V.V. Mil'kin, D.Ju. Mosin, A.V. Grechko</i>
MEDICAL PRACTICE ISSUE	76 Unique Case of Giant Exophytic Solitary Liver Metastasis of Neuroendocrine Cancer of Small and Large Intestine <i>A.N. Bashkov, Z.V. Sheykh, E.A. Ionova, S.A. Mirzoyants, N.S. Drebushevskiy, O.O. Grigor'eva, A.P. Dunaev</i>
NEW BOOKS	83 Grebenyuk A.N., Legeza V.I., Gladkihk V.D. et al. Practical Guidance on the Use of Medical Devices for Radiation Protection in Emergency Situations and Their Provision of Emergency Health Units and Regional Emergency Centers. — M. 2015. 304 pp. 84 Specific radioactive waste. Edited by I.I. Linge. — M. 2015. 240 pp.

С.В. Панченко, А.А. Аракелян, Е.А. Гаврилина, А.М. Шведов**ДИНАМИКА РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ В СЕЛЬСКОМ НАСЕЛЕННОМ ПУНКТЕ, ЗАГРЯЗНЕННОМ ЦЕЗИЕМ-137 В РЕЗУЛЬТАТЕ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС В АПРЕЛЕ 1986 г.****S.V. Panchenko, A.A. Arakelyan, E.A. Gavriline, A.M. Shvedov****Dynamic of Radiological Situation in the Rural Settlements Contaminated by Cesium-137 caused by the Chernobyl Accident in April 1986**

РЕФЕРАТ

Цель: Изучение долговременной миграции ^{137}Cs в почве сельского населенного пункта для уточнения прогноза дозовых нагрузок на население, полученных в результате аварии на ЧАЭС и загрязнения территории радиоактивными выпадениями.

Материал и методы: Основной экспериментальной базой являются подворные измерения мощности дозы γ -излучения в селе (6473 замера), выполненные в ходе четырех экспедиций и охватывающие период в 24 года. Кроме того, анализировались данные по поверхностному загрязнению территории, приводятся результаты исследований по миграции ^{137}Cs вглубь почвенного покрова. Реконструкция дозовых нагрузок проводилась в соответствии с отечественными и международными рекомендациями.

Результаты: Получена нормализованная оценка средней эффективной дозы внешнего облучения за счет ^{137}Cs для населения, проживающего постоянно в сельском населенном пункте, расположенном в юго-западных районах Брянской области. Она составила 50 мЗв за 70 лет на 1 МБк/м² выпадений этого нуклида.

Выводы: Фактор миграции радиоактивного цезия, выпавшего в результате аварии, влиял на формирование дозовых нагрузок в течение первых 10–15 лет. В последующие годы определяющим стал радиоактивный распад изотопа.

Ключевые слова: радиационная обстановка, авария, ЧАЭС, дозы внешнего облучения, миграция, почва, цезий-137

ABSTRACT

Purpose: The study of the long-term migration of ^{137}Cs in the soil of rural settlement to improve prediction of radiation exposure to the population caused by the Chernobyl accident and contamination of the territory.

Material and methods: The main experimental techniques are homestead measuring of gamma radiation dose rate in the settlement (6473 measurements) performed during 4 expeditions and covering a period of 24 years. In addition, the data on surface ground contamination of the territory was analyzed; the results of studies on migration of cesium deep into soil are given. Reconstruction of radiation exposure was conducted in accordance with national and international recommendations.

Results: A normalized estimation of the average external dose due to ^{137}Cs for population residing permanently in the rural settlement located in the south-western district of the Bryansk Region was found out. It is in 50 mSv over 70 years at 1 MBq/m² of the fallout of this nuclide.

Conclusion: The migration factor of radioactive cesium precipitated after the accident affected the formation of radiation exposure during the first 10–15 years. In subsequent years the radioactive decay of the isotope became a more significant factor.

Key words: radiological situation, Chernobyl accident, external doses, migration, soil, cesium-137

Введение

Период полураспада ^{137}Cs почти в точности равен 30 годам, т.е. за 60 лет останется лишь четвертая часть этого радионуклида, появившегося в биосфере вместе с атомной отраслью. 60 лет — период, сопоставимый с продолжительностью жизни человека. Пожалуй, именно фактор долголетия определил биологическую значимость этого радионуклида, образующегося при делении ядер урана и плутония. В период активных ядерных испытаний большее внимание было привлечено к ^{90}Sr из-за его большей мобильности и опасности попадания этого нуклида в организм человека. Однако при инцидентах на ядерных реакторах начинает играть свою роль способность радионуклидов выходить за пределы защитных барьеров. Так, при аварии на Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС), сопровождавшейся фактическим

разрушением всех топливных элементов, выход ^{137}Cs в окружающую среду на порядок превысил выход ^{90}Sr при примерно равном количестве его накопления к моменту аварии. При аварии на японской АЭС «Фукусима-Дайичи» выброс ^{137}Cs более чем на три порядка величины превышал выброс ^{90}Sr . После этих двух крупных аварий внимание исследователей было приковано в основном к ^{137}Cs , поскольку именно от прогнозов поведения этого нуклида в окружающей среде зависели решения по возвращению населения к нормальной жизни на загрязненных территориях.

Кроме того, радионуклид ^{137}Cs относится к наиболее часто используемым радионуклидам в радиационной технологии. Так, только в США насчитывается более 300 тысяч аппаратов и приборов с цезиевыми источниками общей активностью примерно 23 ПБк

[1], что сопоставимо с активностью выброса этого нуклида при аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи» [2].

Наличие ^{137}Cs в окружающей среде обуславливает как внешнее облучение человека и биоты, так и возможность внутреннего облучения в основном за счет пищевых цепочек. Но, если на последнее человек может оказывать регулирующие действия, располагая для этого широкими возможностями (в частности, база данных по контрмерам, ограничивающим внутреннее облучение человека, превышает 5 тыс. наименований [3]), то с внешним облучением дело обстоит значительно сложнее. Повсеместное распространение радиоизотопа делает малоэффективными большинство контрмер, направленных на уменьшение внешнего облучения [4]. В этих условиях большое значение для прогноза дозовых нагрузок приобретает знание механизмов миграции радионуклида, а также наличие качественных экспериментальных данных, которые бы служили маркерами при моделировании.

Изучение миграции ^{137}Cs вглубь почвы, на которую выпадали радиоактивные осадки от испытаний ядерного оружия (1950-е и начало 60-х годов), позволило установить, что для получения прогнозных оценок дозовых нагрузок на человека почвенный профиль можно аппроксимировать функцией с одной экспонентой [5]:

$$I(z) = I_0 \cdot [1 - \exp(-dz)], \quad (1)$$

где

$I(z)$ — количество активности ^{137}Cs на глубине z , Бк/м²;

I_0 — полная активность ^{137}Cs , Бк/м²;

a — величина, обратная длине релаксации, см⁻¹;

z — глубина слоя, см.

Для оценки значения дозового фактора для ^{137}Cs от кумулятивных выпадений при ядерных испытаниях в середине 1960-х гг. Бек (Beck) использовал величину коэффициента релаксации $a^{-1} = 3$ см. При принятой средней плотности почвы в 1,6 г/см³ расчетное значение удельной мощности дозы в воздухе составило 1,02 нГр/ч на 1 кБк/м² [6]. Это приближение стало основой для оценки суммарной дозы внешнего облучения на человеческую популяцию от ядерных испытаний. В этих расчетах ожидаемая поглощенная доза в воздухе от ^{137}Cs оценивалась величиной в 0,39 Гр на 1 МБк/м² [7], причем за первые 100 лет реализовывалось 0,35 Гр.

Для первичных оценок доз внешнего облучения, обусловленных выпадениями ^{137}Cs при аварии на ЧАЭС, использовали три величины коэффициента релаксации: 0,1 см для первого месяца, 1 см для первого года и 3 см для последующего периода [8]. В работе 1989 г. Бек определил для начальных вы-

падений значения дозового фактора для ^{137}Cs (Γ_{137})*: 2,89 нГр/ч на 1 кБк/м² — для абсолютно плоской поверхности и 2,51 нГр/ч на 1 кБк/м² — при коэффициенте релаксации 0,1 см [9]. Близкое к последнему значение дозового фактора приведено и в действующих в РФ методических указаниях [10–12] — 2,55 нГр/ч на 1 кБк/м². В широко известном руководстве США (ЕРА-402-R-93-081) приводятся нормированные на плотность загрязнения почвы ^{137}Cs значения эффективной дозы [13]. Используя соотношение между эффективной дозой и мощностью поглощенной в воздухе дозой, равное 0,75 Зв/Гр, можно получить значения Γ_{137} для абсолютно плоской поверхности 2,81 нГр/ч и 1,80 нГр/ч на 1 кБк/м² для значения коэффициента релаксации в 1 см.

При аварии на японской АЭС оценка эффективных доз внешнего облучения в первые месяцы после выпадений оценивалась с помощью экспериментально определенного дозового фактора, который определялся в ближней 30-км зоне совместно для двух изотопов цезия: ^{134}Cs и ^{137}Cs [14]. Анализ этих экспериментально полученных значений позволил оценить величину Γ_{137} для первого месяца после выпадений, равную 2,87 нГр/ч на 1 кБк/м².

Очевидно, что с течением времени в силу радиоактивного распада, возможного уноса с почвенного покрова, а также в связи с заглублением цезия в нижние почвенные горизонты мощность дозы внешнего облучения в зависимости от интегральной плотности начального загрязнения будет постепенно снижаться. Эти естественные физические процессы в практике расчета дозовых нагрузок на организм человека учитываются снижением значения дозового фактора (CF), определяемого как отношение мощности эффективной дозы к плотности радиоактивного загрязнения, (нЗв/ч)/(кБк/м²). В рекомендациях МАГАТЭ [15] приводятся усредненные значения дозового фактора (CF₄) для трех периодов времени после начального загрязнения, табл. 1 (1-я строка).

Таблица 1

Средние значения дозового фактора CF₄ для ^{137}Cs в различные периоды времени после загрязнения земной поверхности, нЗв/ч·(кБк/м²)⁻¹ [15]

Условия, влияющие на динамику	1 мес.	2 мес.	50 лет
с учетом всех факторов	1,38	1,31	0,30
то же, но без учета радиоактивного распада	1,38	1,31	0,50

Переходя от средних значений мощности эффективной дозы (табл. 1) к значениям Γ_{137} , можно видеть, что уже в первый месяц после выпадений рекомендованные значения $\Gamma_{137} = 1,83$ нГр/ч на 1 кБк/м² заметно ниже значений при длине релаксации 0,1 см,

* Такое обозначение этого фактора введено в работе [5].

полученных Беком [9], и практически совпадают с данными, приведенными в [13] для коэффициента релаксации в 1 см.

В дальнейшем значения Γ_{137} продолжают снижаться. По мнению большинства экспериментаторов, основным фактором, обуславливающим такой спад, является дальнейшее заглубление изотопа и экранирование почвой, а зимой еще и снегом. Роль радиоактивного распада может быть рассчитана на произвольный период времени, поэтому, на наш взгляд, при изучении динамики значений дозовых факторов удобно радиоактивный распад исключить из анализа. Во второй строке табл. 1 приведены значения дозового фактора без учета распада радионуклида. Как видим, в начальный период это не вносит коррективы, а среднее значение дозового фактора за 50 лет заметно подросло.

В практике отечественных оценок дозовых нагрузок на взрослых жителей населенных пунктов, загрязненных вследствие аварии на ЧАЭС, использовались различные коэффициенты, позволяющие рассчитывать эффективную дозу за соответствующий год после аварии [10–12, 16–20]. Динамику доз внешнего облучения на раннем этапе прогнозирования пытались оценить по модели экспоненциального спада с периодом снижения мощности дозы в воздухе от ^{137}Cs в 14 лет (опыт ИБФ) или 7,5 лет со ссылкой на неназванные источники [16]. В работе [17] авторы, отталкиваясь от оценки дозы внешнего облучения за 1988 г., предполагали, что спад за счет радиоактивного распада и заглубления изотопов цезия будет происходить за счет быстрой (период 1,5 года) и медленной (период 50 лет) компонент. В этом случае суммарная ожидаемая доза внешнего облучения (от ^{134}Cs + ^{137}Cs) за период с 1990 по 2060 гг. составила бы 86 мЗв на 1 МБк/м² выпадений ^{137}Cs . Здесь учтены и защитные свойства жилых и производственных зданий и характер поведения жителей. Оценка прогнозируемой поглощенной в воздухе дозы от ^{137}Cs за 70 лет после аварии составит в этом случае примерно 200 мГр на 1 МБк/м² первоначальных выпадений этого нуклида.

В более поздних руководствах по оценкам дозы внешнего облучения населения предлагается использовать соотношение [19]:

$$E_{\gamma} = k_{\gamma} \cdot \sigma_{137}, \quad (2)$$

где

E_{γ} — эффективная доза внешнего γ -облучения взрослых жителей за год, мЗв;

k_{γ} — эффективной дозы в текущем году, нормированное на плотность загрязнения почвы цезием-137 в том же году мкЗв×м²/кБк;

σ_{137} — плотность загрязнения почвы цезием-137 в том же году, кБк/м².

Значения коэффициента k_{γ} за соответствующие годы устанавливались на основании результатов нескольких тысяч прямых измерений индивидуальных доз у жителей населенных пунктов (НП) России различных типов с плотностью загрязнения почвы ^{137}Cs от 400 до 4000 кБк/м², а также на основании результатов обследований нескольких десятков НП России, включающих измерение мощности дозы γ -излучения внутри и вокруг НП и опрос жителей о времени их пребывания в различных точках внутри и вне НП [19]. Погрешности для значений k_{γ} за разные годы не указывались.

Анализ многочисленных данных, полученных на загрязненных территориях Украины, Белоруссии, России и ряда европейских стран в первые годы после аварии был также выполнен в ходе реализации международного проекта Европейской комиссии в период с 1991 по 1995 гг. [21].

Обобщая результаты наблюдений за миграцией ^{137}Cs за первые семь лет после аварии, авторы предложили следующее выражение, учитывающее снижение реальной мощности поглощенной дозы в воздухе $\dot{D}_j(t)$ в НП j по сравнению с мощностью поглощенной дозы в точке с референсным распределением ^{137}Cs в почве [21]:

$$\dot{D}_j(t) = A g e^{-\lambda t} r(t) f_j, \quad (3)$$

где

A — активность ^{137}Cs на единичной площади референсного места, кБк/м²;

g — мощность поглощенной дозы внешнего облучения в воздухе от загрязнения единичной плотности на высоте 1 м для референсного распределения ^{137}Cs в почве, нГр/ч×(кБк/м²)⁻¹;

λ — константа радиоактивного распада, t^{-1} ;

f_j — мощность дозы в воздухе в локализации j , отнесенная к мощности дозы в воздухе для референсного места;

$r(t)$ — функция, учитывающая снижение реальной мощности дозы по сравнению с мощностью дозы в точке с референсным распределением ^{137}Cs в почве:

$$r(t) = a_1 \cdot \exp\left(-\ln 2 \cdot \frac{t}{T_1}\right) + a_2 \cdot \exp\left(-\ln 2 \cdot \frac{t}{T_2}\right), \quad (4)$$

где $T_1 = 1,5$ года, а $T_2 = 50$ лет; величины коэффициентов a_1 и a_2 были получены для трех ситуаций, связанных с физико-химическими формами существования и переноса изотопов цезия (табл. 2). Кроме того были учтены результаты обобщенных наблюдений за скоростью заглубления изотопов цезия в почвах трех типов [21].

Таблица 2

Значения параметров для уравнения (4) для различных удалений от места аварии, R [21]

Параметр	$r \leq 100$ км	$100 \text{ км} < r \leq 1000$ км	$r > 1000$ км
a_1	0,48	0,60	0,53
a_2	0,81	0,63	0,51

Под референсным местом рассматривался незаросший кустами и деревьями луг с неповреждённым после аварии почвенным покровом. Предполагалось, что радиоактивное вещество в этом месте представляет из себя плоский источник, заглублённый на величину $0,5 \text{ г/см}^2$, что соответствует при плотности верхнего слоя почвы $1,6 \text{ г/см}^3$ заглублению примерно на $0,3 \text{ см}$. Значение референсной поглощенной дозы в воздухе Γ_{137} в этом случае оценивалось величиной $1,7 \text{ (нГр/ч)/(кБк/м}^2\text{)}$ для ^{137}Cs и $4,7 \text{ (нГр/ч)/(кБк/м}^2\text{)}$ для ^{134}Cs [22].

Величина поглощенной дозы над неповрежденной поверхностью в воздухе от ^{137}Cs , рассчитанная по соотношению (3) за 70 лет, составит $325 \text{ мГр на } 1 \text{ МБк/м}^2$. Авторы отмечают недостаточность временного ряда наблюдений, высказывая надежду, что последующие исследования внесут коррективы для значений эмпирических коэффициентов в выражении (4).

Схожее по форме и содержанию формул (3) и (4) соотношение для $r(t)$ вошло в отечественные методические указания МУ 2.6.1.579-96, в которых рассчитывалась средняя накопленная эффективная доза внешнего облучения за период 1986–1995 гг. Значения коэффициентов были едиными для всех российских НП: $a_1 = 0,4$; $a_2 = 0,42$; а $T_1 = 1,5$ года и $T_2 = 50$ лет. Значение коэффициента g в $(\frac{\text{нГр}}{\text{ч}} / \frac{\text{кБк}}{\text{м}^2})$ изменялось во времени в соответствии с физическим распадом ^{137}Cs по соотношению [23]:

$$g = 2,54 \exp(-6,3 \cdot 10^{-5} \cdot t), \quad (5)$$

где t выражено в сутках.

Вычисленная величина поглощенной дозы в воздухе от ^{137}Cs , рассчитанная в соответствии с [11] (при сохранении тенденций заглубления и с учетом снежного покрова) за 70 лет, составила $305 \text{ мГр на } 1 \text{ МБк/м}^2$.

Долговременные наблюдения за ранее загрязненными ^{137}Cs территориями не многочисленны, хотя динамика дозового фактора используется для реконструкции дозовых нагрузок на население. Так, в работах Робисона (Robison) с коллегами оценивались дозовые нагрузки за 45-летний период проживания на атолле Бикини, где в 1954 г. в результате испытаний ядерного оружия произошло заметное радиоактивное загрязнение почвенного покрова. Для расчетов

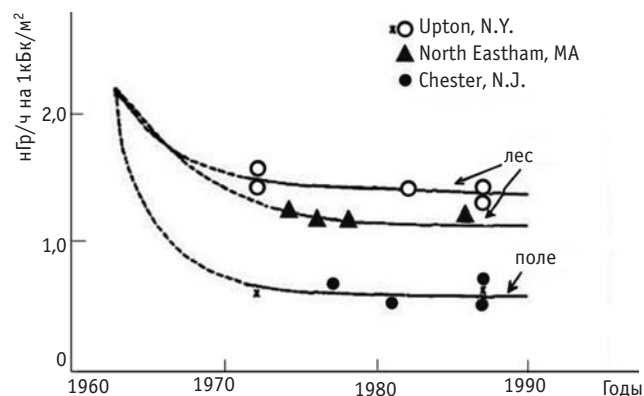


Рис. 1. Реконструкция мощности дозы, приведенной к единичной плотности загрязнения ^{137}Cs , для двух типов ландшафта [24]

эффективных доз от выпавшего на поверхность земли ^{137}Cs использовался эффективный период в 8,5 лет [23]. При этом среднее значение дозового фактора с учетом радиоактивного распада за 50 лет составило по оценкам авторов $0,24 \text{ нЗв/ч} \cdot (\text{кБк/м}^2)^{-1}$, а без радиоактивного распада — $0,32 \text{ нЗв/ч} \cdot (\text{кБк/м}^2)^{-1}$. Таким образом за 50 лет оценка поглощенной в воздухе дозы от ^{137}Cs составила $105 \text{ мГр на } 1 \text{ МБк/м}^2$. Следует добавить, что на Маршалловых островах годовой уровень осадков изменяется от 1000 до 4300 мм.

Для мест с количеством годовых осадков около 1100 мм в США было выполнено исследование по снижению мощности дозы со временем [24]. Изучалось различие в характере и скорости заглубления для двух типичных ландшафтных форм: лес и естественный луг за период с 1963 г. по 1987 г. Иллюстрацией полученных результатов может служить рис. 1, где экспериментальные результаты аппроксимировались кривыми на основе общих представлений. Авторы получили аналитические выражения, позволяющие определять уровень среднегодовых дозовых нагрузок на рассматриваемых ландшафтах, а также интегральные значения дозы для ситуаций облучения на различных территориях. В табл. 3 приведены результаты расчетов поглощенной дозы в воздухе за 30 и 70 лет ($D_{70}^{\text{инт}}$) по соотношениям, предложенным авторами [24]. Фактически диапазон этих оценок включает в себя значения всех приведенных выше расчетов.

Таблица 3

Предсказанные интегральные поглощенные дозы в воздухе за 30 и 70 лет для различных форм ландшафта при начальной плотности загрязнения территории ^{137}Cs в 1 МБк/м^2 , мГр [24]

Период облучения	Пахота, 30 см	Пахота, 15 см	Естественный луг	Лес
30 лет	60	90	160	260
70 лет	90	150	230	380

Интересные исследования по изучению скорости заглубления цезия чернобыльского происхождения были выполнены на луговой неповрежденной поверхности в 6 точках территории Швеции [25]. В этой работе на разных типах почвы и значительном экспериментальном материале было показано, что вертикальная миграция в период 1986 и 2007 гг. протекала медленно, и большая часть активности по-прежнему находится в верхних слоях почвы, причем заглубление цезия во второй половине рассматриваемого периода значительно замедлилось, что частично может быть обусловлено действием факторов биологического характера.

До настоящего времени ощущается недостаток в урбоэкологических исследованиях, заключающийся, в частности, в систематизации экспериментальных данных, полученных на территориях населенных пунктов за продолжительный период времени.

Материал и методы

В основу настоящего исследования положены материалы подворных обследований с. Новые Бобовичи, которые проводились в 1990 г. специалистами НПО «Тайфун» (М.Ю. Орлов, В.Н. Сныков и др.) в соответствии с методическими рекомендациями по оценке радиационной обстановки в населённых пунктах [26] и были продолжены сотрудниками ИБРАЭ РАН в 2001 г. в рамках международного проекта «Радиоэкология» франко-германской инициативы [3,27]. В дальнейшем, сохраняя преемственность методических приемов и точек контроля, обследования были продолжены в 2008 и 2014 гг. [28].

Географически Новые Бобовичи расположены в северо-западной части Новозыбковского района на удалении 16 км по прямой линии от райцентра и примерно в 240 км от областного центра Брянска, на правом берегу реки Ипуть. Удаление от ЧАЭС по прямой составляет 176 км. Численность населения на момент аварии составляла 1150 чел. (на 01.01.2014 – 559 чел.). Площадь НП Новые Бобовичи составляет – 1,9 км², площадь хозяйства – 62,44 км². На момент начала обследований в селе было 401 личное подворье и 39 административных зданий. Среднегодовая норма осадков по району около 600 мм в год.

До аварии на ЧАЭС результаты эпизодических (или случайных) измерений радиационного фона в районе данного НП в письменных источниках не найдены. После аварии на ЧАЭС этому вопросу стали уделять внимание. Специалисты из Ленинградского института радиационной гигиены провели исследования по пяти НП Брянской области. Реконструкция средних значений мощности поглощённой дозы в воздухе, обусловленных примордиальными радионуклидами в почве и строениях НП Старые Бобовичи (в

настоящее время Старые и Новые Бобовичи объединены в один сельсовет), дала следующие результаты [29], выраженные в нГр/ч;

целина	– 38;
улица	– 44;
двор	– 37;
огород	– 44;
деревянный 1-этажный дом	– 39;
кирпичный 1-этажный дом	– 70;
кирпичный 2-этажный дом	– 49.

Кроме излучения от естественных радионуклидов, рассеянных в земной коре, воздухе и других объектах внешней среды, вклад в измеряемую мощность дозы даёт ионизирующее излучение космических лучей. Оценка средней величины поглощенной в воздухе дозы составляет на уровне моря примерно 32 нГр/ч [30]. Эти значения могут варьироваться в зависимости от высоты исследуемой местности над уровнем моря. Однако для альтитуды с. Новые Бобовичи 145–155 м это изменение будет в районе 1 %, т.е. практически не изменит среднее значение. В дальнейших расчетах для выделения вклада в мощность дозы только ¹³⁷Cs нами было использовано фоновое значение 80 нГр/ч.

Радиоактивное загрязнение территории с. определялось различными организациями в первые годы после аварии. Результаты 94 измерений по пробам грунта, отобранному в соответствии с действующей инструкцией [31], приводились в специальных выпусках НПО «Тайфун». В частности, данные за 1986–2013 гг. взяты из ежегодника [32]. Подробное рассмотрение данных по сложившейся радиационной обстановке в Новых Бобовичах выполнено в работе [28]. В целом можно говорить о достаточно равномерном загрязнении территории села ¹³⁷Cs и с хорошей точностью можно полагать, что среднее значение для данного НП находится в интервале 1050–1140 кБк/м². В наших дальнейших оценках было использовано значение первоначальной плотности загрязнения территории НП Новые Бобовичи как 1095 кБк/м² на 28 апреля 1986 г.

Измерения мощности экспозиционной дозы проводились в 1990–2008 гг. поверенными приборами ДРГ-01Т для всех подворий и строений в населенном пункте в заранее установленных точках (внутри дома, во дворе, перед домом и пр.) на высоте 1 м от поверхности. Методической основой таких измерений являлась «Инструкция по обследованию радиационной обстановки на загрязненных территориях», утвержденная Межведомственной комиссией по радиационному контролю природной среды при Госкомгидромете СССР в 1988 г., а также «Инструкция по наземному обследованию радиационной обстановки на загрязненной территории», одобренная той же комиссией 17.03.89 [33, 34]. Предел основной по-

грешности измерения данным прибором составляет не более $\pm 15\%$. Дополнительные статистические погрешности, возникающие в ходе измерений, не превышали 5% .

Для пересчета мощности экспозиционной дозы (мкР/ч) в поглощенную дозу в воздухе (нГр/ч) использовали коэффициент $8,7 \frac{\text{нГр}}{\text{мкР}}$.

В 2014 г. для измерения мощности эквивалентной дозы (МАЭД) использовались поверенные приборы ДКС-96 с диапазоном измерения МАЭД от $0,1 \text{ мкЗв/ч}$ до $1,0 \text{ Зв/ч}$. Предел основной погрешности измерения данным прибором составляет не более $\pm 15\%$. Дополнительные статистические погрешности, возникающие в ходе измерений, не превышали 5% . Для пересчета результатов измерений ДКС-96 в мощность поглощенной дозы в воздухе от γ -излучения ^{137}Cs использовали коэффициент $0,92 \text{ Гр/Зв}$.

Непрерывные измерения мощности эквивалентной дозы (МЭД), регистрируемые индивидуальными дозиметрами рентгеновского и гамма-излучения ДКГ-PM1610 (диапазон измерения МЭД от $0,1 \text{ мкЗв/ч}$ до $10,0 \text{ Зв/ч}$ с погрешностью $\pm (15 + K/H)\%$, где K – коэффициент, равный $1,5 \text{ мкЗв/ч}$, H – значение измеряемой МЭД, мкЗв/ч) у двух участников экспедиции с усреднением каждые три минуты записывались в файл в течение всего экспедиционного периода. Эти результаты использовались нами для дополнительной верификации измеренных в 2014 г. значений и всего диапазона МЭД в НП [28].

Для определения интегральной плотности загрязнения территории ^{137}Cs в 2014 г. использовались специальные пробоотборники почвы, разработанные в техническом кризисном центре ИБРАЭ РАН. Отбор проб почвы производился с площади $36,3 \text{ см}^2$ на глубине примерно $23\text{--}24 \text{ см}$ в следующих точках, рис. 2:

- в одном из огородов села (Б5, ул. Гагарина, 9);
- на заливном луге поймы р. Ипуть в районе, где отмечалась наибольшая мощность дозы (точка Б1);
- в смешанном лесу на окраине нового деревенского кладбища (Б4, точка отбора пробы также определялась в ходе поиска максимальной мощности дозы);
- в сквере в центре села у памятника воину-освободителю (Б2);
- в хвойном лесу на севере села (Б6, первая надпойменная терраса р. Ипуть).

В точке Б1 было отобрано три керны почвы для повышения точности измерений и для отработки методологии гибридного мониторинга [35], развиваемого в ИБРАЭ РАН для определения уровней радиоактивного загрязнения почвы. В современной интерпретации методология предполагает применение наряду с послойным отбором почвы полевую спектрометрию и измерения с помощью гамма-спектрометрического аэрокомплекса на базе беспилотного летательного аппарата MD4-1000 [36–38]. Одновременно в т. Б1 проводилась верификация оценки первоначальной плотности выпадений ^{137}Cs по многолетним собственным исследованиям и измерениям, выполненными специалистами НПО «Тайфун», а также по результатам комплексных геоландшафтных работ, выполненных в этой же точке под руководством В.Г. Линника [39]. Сравнение результатов различных исследований, а также использование разных методов оценки интегрального содержания ^{137}Cs в почве позволило авторам убедиться в отсутствии значимых систематических погрешностей, которые непросто выявить в случае использования только одного метода измерений.

Краткая характеристика мест отбора проб в 2014 г. приведена в табл. 4.

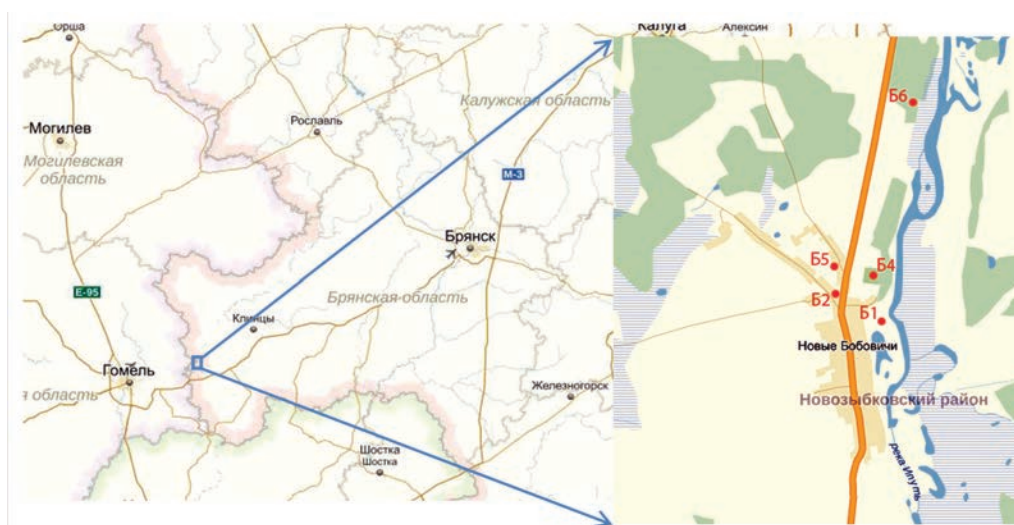


Рис. 2. Схема отбора проб почвы в населенном пункте Новые Бобовичи и в его ареале в июле 2014 г.

Таблица 4

Описание отобранных проб почвы в с. Новые Бобовичи и ареале

№ пробы	Вид пробы	Место отбора	Широта/Долгота ("My GPS Coordinates" TAPPIAPPS)		Дата замера	p_r , нЗв/ч	Вес, г	Площадь, см ²
Б1	кern	заливной луг	52,625578	31,741021	02.07.2014	740	1419	36,3
П1	кern	заливной луг			07.08.2014	900	1302	36,3
П2	кern	заливной луг			07.08.2014	700	1464	36,3
Б2	кern	сквер у памятника	52,628482	31,732989	03.07.2014	660	1450	36,3
Б4	кern	кладбище, смешанный лес	52,630571	31,739539	05.07.2014	870	1610	36,3
Б5	кern	пашня в огороде	52,631142	31,732331	05.07.2014	330	1422	36,3
Б6	кern	сосновый лес	52,647732	31,746724	05.07.2014	720	1330	36,3

Таблица 5

Некоторые параметры статистических выборок из базы данных НПО «Тайфун» по значениям мощности поглощенной дозы в воздухе в различных локализациях с. Новые Бобовичи, полученных в августе 1990 г., нГр/ч

Местоположение	Покрытие или защита	Кол-во измерений	Мин.	Среднее	Среднее геометр.	Макс.	Стандарт. отклонение	Коэффици. вариации
Улица	гравий	23	339	468	456	861	118	0,25
	грунт	129	287	612	576	1131	217	0,36
	трава	626	278	955	910	2149	287	0,30
	асфальт	65	165	408	389	696	125	0,31
	бетон	2	183	191	191	200	12	0,06
	скамейка	806	165	893	856	1618	242	0,27
Двор	грунт	265	209	672	628	1488	241	0,36
	трава	572	261	878	842	1775	245	0,28
	асфальт	29	148	403	364	1061	195	0,48
	бетон	55	191	573	530	1636	240	0,42
	огород	883	392	771	759	1801	136	0,18
Дом	сад	331	583	982	968	1496	168	0,17
	деревянный	554	122	248	240	809	70	0,28
	кирпичный	153	87	216	199	757	105	0,49

Керны почвы были разделены послойно на примерно равнозначные слои (6 слоев для огорода и по 8÷10 слоев для остальных кернов). Затем каждый слой перемешивался и помещался в стандартный сосуд для измерения на спектрометре с блоком детектирования УДС-Г-485 на основе кристалла NaI(Tl) с размерами 63×63 см. Все пробы измерялись в стандартной геометрии, время измерения составляло 1000 с. Чувствительность метода оценена примерно в 3 Бк/пробу по ¹³⁷Cs. Измерение активности контрольной пробы грунта также проводилось в 2014 г. в специализированном подразделении ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России (руководитель В.Н. Яценко).

Результаты и обсуждение

Подворные обследования села в 1990 г. были наиболее подробными. Всего было проведено 4493 измерения мощности дозы, которые охватывали не только дома сельских жителей, но и производственные, социально-бытовые сооружения и примыкающие к ним территории. Основные параметры распределе-

ний мощностей доз в различных точках обитания человека представлены в табл. 5.

Из табл. 5 видно, что средние значения мощности дозы в различных точках близки к среднегеометрическим значениям. Хотя следует заметить, что около отдельных домов организовано*, а порою по инициативе хозяев были проведены такие защитные мероприятия, как удаление верхнего слоя грунта, засыпка чистым грунтом (обычно песком). Именно по этой причине минимальные значения мощности дозы на траве у дома и «у скамейки» заметно отличаются от максимальных значений для разных частных домов.

Следующее по времени подворное обследование села производилось силами двух сотрудников ИБРАЭ РАН (С.В. Панченко и О.С. Биленко) в июле 2001 г. Было обследовано 660 точек села, в каждой точке производился замер мощности дозы от 1 до 10 раз. Результаты этого обследования и их анализ вошли в серию отчетов по проекту «Жилая среда и контрмеры» проекта франко-германской инициативы (ФГИ)

* В с. Новые Бобовичи инженерная дезактивация проводилась в 1986, 1987 и 1989 гг. В частности, 1-я рота 652-го полка ГО РСФСР работала в Н. Бобовичах с 28 июня до 4 июля 1989 г.

Таблица 6

Некоторые параметры статистических выборок из базы данных ИБРАЭ РАН по значениям мощности поглощенной дозы в воздухе в различных локализациях с. Новые Бобовичи, полученных в июле 2001 г., нГр/ч

Местоположение	Покрытие или защита	Кол-во измерений	Мин.	Среднее	Среднее геометр.	Макс.	Стандарт. отклонение	Коэфф. вариации
Улица	грунт	14	122	251	239	392	78	0,31
	трава	229	157	365	352	638	92	0,25
	асфальт	24	122	182	177	392	32	0,18
	скамейка	218	139	298	284	557	94	0,31
Двор	трава	35	148	286	278	413	70	0,24
	огород	65	261	370	366	509	52	0,14
	сад	14	287	385	382	496	54	0,14
Дом	деревянный	17	97	165	157	322	62	0,37

Таблица 7

Некоторые параметры статистических выборок из базы данных ИБРАЭ РАН по значениям мощности поглощенной дозы в воздухе в различных локализациях с. Новые Бобовичи, полученных в августе 2008 г., нГр/ч

Местоположение	Покрытие или защита	Кол-во измерений	Мин.	Среднее	Среднее геометр.	Макс.	Стандарт. отклонение	Коэфф. вариации
Улица	грунт	1	513	513	513	513		
	асфальт	16	122	173	172	218	24	0,14
	скамейка	241	139	275	265	522	74	0,27
Двор	трава	18	226	344	338	461	61	0,18
	огород	29	218	322	318	418	47	0,15
	сад	14	261	373	369	461	57	0,15
Дом	деревянный	4	131	154	153	174	19	0,12
	кирпичный	3	122	133	133	148	13	0,10

Таблица 8

Некоторые параметры статистических выборок из базы данных по значениям мощности поглощенной дозы в воздухе в различных локализациях с. Новые Бобовичи, полученных в июле 2014 г., нЗв/ч

Местоположение	Покрытие или защита	Кол-во измерений	Мин.	Среднее	Среднее геометр.	Макс.	Стандарт. отклонение	Коэфф. вариации
Улица	грунт	18	147	232	225	450	66	0,28
	трава	369	92	302	288	642	93	0,31
	асфальт	38	101	172	168	284	39	0,23
	бетон	7	119	186	179	284	58	0,31
	скамейка	166	119	263	250	532	81	0,31
Двор	грунт	25	110	249	233	486	96	0,39
	трава	37	147	311	296	587	99	0,32
	асфальт	6	128	180	178	220	32	0,18
	бетон	8	110	180	171	275	59	0,33
	огород	110	202	338	333	505	60	0,18
	сад	70	211	341	334	486	68	0,20
Дом	деревянный	37	92	140	137	211	29	0,21
	кирпичный	27	73	140	135	284	43	0,30

«Радиоэкология» [3, 40]. Основные параметры распределения мощности дозы в различных точках обитания человека представлены в табл. 6. Как было показано в этих работах, снижение мощности дозы от выпавшего ^{137}Cs шло значительно быстрее в селитебной зоне, чем на луговых пастбищах и в лесах, что объяснялось на тот момент человеческой деятельно-

стью, в большинстве своём не связанной со специальными работами по дезактивации.

Целью фрагментарного подворного обследования села в 2008 г. была необходимость удостовериться в сохранении ранее отмеченной тенденции поведения ^{137}Cs на различных ландшафтах.

Таблица 9

Измерения мощности поглощенной дозы в воздухе в точках с. Новые Бобовичи над неповрежденной поверхностью в 2008 и в 2014 гг.

Место измерения	Характеристика	2008		2014	
		Число точек	Среднее значение, нГр/ч	Число точек	Среднее значение, нГр/ч
Конец ул. Советской	у трансформатора	3	464	3	439
Север по ул. Гагарина	при входе, деревья	1	444	2	413
Памятник воинам на стыке ул. Советская и Гагарина	старые деревья	5	531	3	548
Новое кладбище	сосновый лес	4	468		
Пойма со стороны деревни	луг	13	562	33	475
Трансформатор	юг ул. Советской	1	409	3	456
Юг села	яблоневый сад	5	510	5	494
Среднее значение			484		471

Всего в 2008 г. было выполнено 402 измерения мощности дозы: 47 измерений в 15 точках, где, по внешним признакам и опросам жителей, не происходило нарушения поверхности почвы за 22 года с начала загрязнения, и 355 измерений, относящихся собственно к подворным обследованиям. Основные параметры распределения мощности дозы в различных точках села представлены в табл. 7.

Подворные обследования 2014 г. ставили перед собою задачу анализа радиационной обстановки в НП в объеме, сопоставимом с обследованиями 1990 г.

Всего было выполнено 918 локальных измерений мощности дозы прибором ДКС-96. Каждое измерение длилось 30 с*. Основные параметры распределения мощности дозы в воздухе в различных точках с. Новые Бобовичи представлены в табл. 8.

Как видно из табл. 8, вариабельность значений мощности дозы над различными точками слабо зависит от числа измерений во всем селе над однотипными поверхностями. Напомним, что вся площадь села была сравнительно равномерно загрязнена ^{137}Cs в 1986 г.

В ходе выполнения работ внимание уделялось и тем точкам села (в пределах видимой его границы и 0,5 км от нее [26]), которые по многолетним наблюдениям не подвергались механической или иной обработке и которые хорошо идентифицировались. При такой оценке помимо визуального изучения местности использовались и сведения, полученные от местных жителей.

Первые измерения в этих точках нами были выполнены в 2001 г., а в 2008 и в 2014 гг. их повторили. Результаты измерений в 2008 и 2014 гг. представлены в табл. 9. В 2001 г. среднее значение мощности поглощенной дозы в воздухе составило 615 ± 84 нГр/ч, в 2008 г. — 484 ± 49 нГр/ч, а в 2014 г. — 471 ± 49 нГр/ч при доверительной вероятности 0,95.

* Во всех предыдущих экспедициях использовался прибор ДРГ-01Т и отдельное измерение продолжалось 20 с.

В целом было отмечено, что значительных изменений в параметрах радиационной обстановки по сравнению с 2001 г. не произошло, если не считать радиоактивного распада ^{137}Cs .

Измерения послойного содержания ^{137}Cs в почве показали типичную картину миграции радионуклида с тенденцией понижения концентрации в одном из слоев почвы (с максимальной концентрацией радионуклида) на неповрежденной поверхности и ожидаемое равномерное распределение цезия по глубине на частных огородах (рис. 3).

Результаты расчетов мощности дозы от каждого слоя с учетом экранирования вышележащими слоями почвы, выполненных с помощью модуля MicroShield 5 [40], показали удовлетворительное совпадение с измеренными значениями (рис. 4). Расчетная мощность поглощенной дозы в воздухе на высоте 1 м от поверхности от радионуклида ^{137}Cs , накопленного в различных почвенных горизонтах, составила 655 нГр/ч, а измеренная мощность дозы в воздухе над точкой Б1 — 740 ± 60 нГр/ч. Это означает, что на долю фоновой составляющей в данной точке приходится примерно 85 нГр/ч, что вполне отвечает ранее выполненной реконструкции [29]. Из рис. 4 также отчетливо видно, что вклад ^{137}Cs из слоев почвы ниже 5 см в мощность дозы над поверхностью почвы ничтожно мал (меньше погрешности измерений).

То что в различных локализациях населенного пункта мощность дозы внешнего облучения значимо различается, было установлено вскоре после аварии и затем неоднократно подчеркивалось различными исследователями, в том числе и применительно к населённым пунктам Новозыбковского района [21]. Динамика отношения мощности поглощенной дозы в воздухе к плотности загрязнения ^{137}Cs (параметр Γ_{137}) для ряда исследуемых локализаций с. Новые Бобовичи представлена на рис. 5.

Полученные экспериментальные результаты позволяют оценить интегральные величины поглощенной дозы в воздухе за длительный промежуток време-

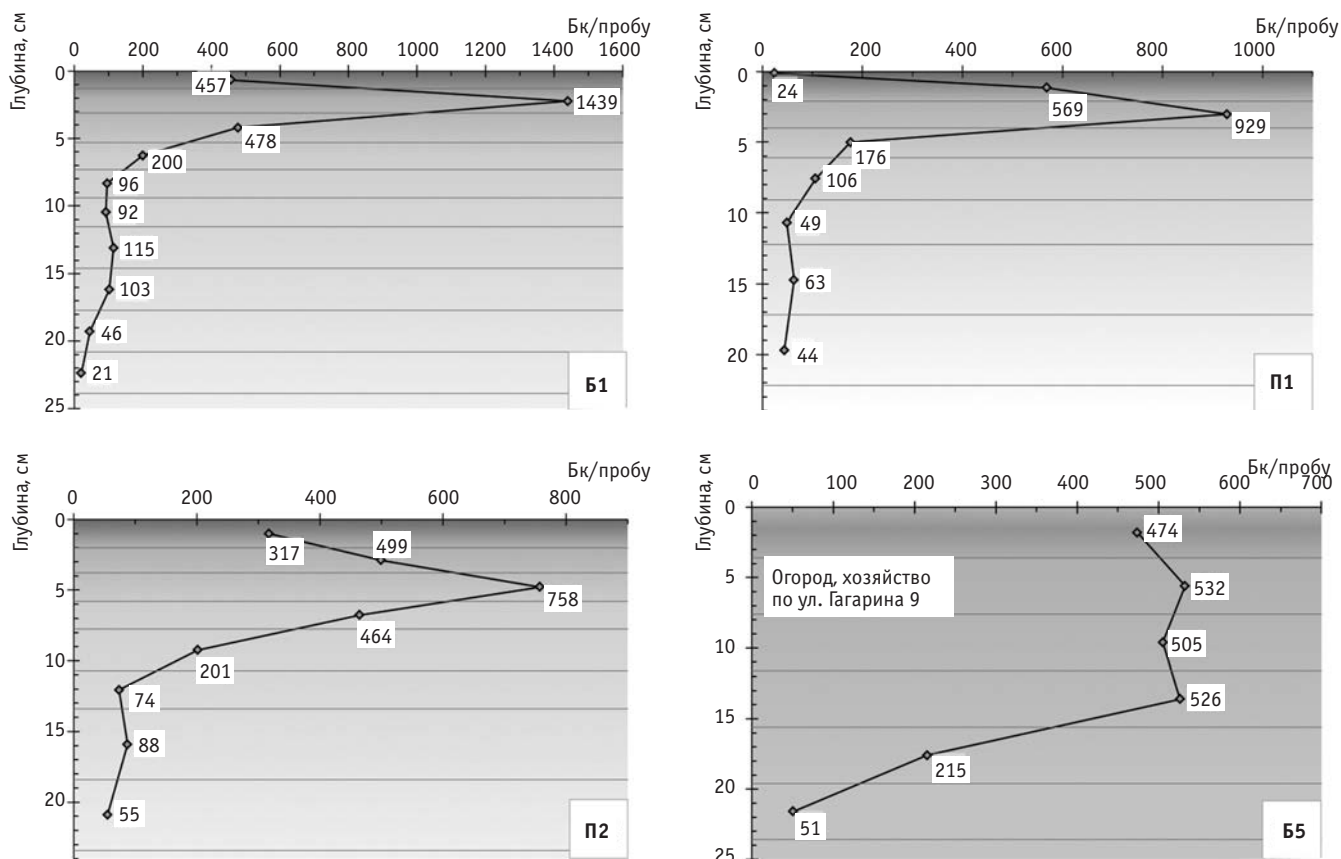


Рис. 3. Профили заглублиения ^{137}Cs в почвенных горизонтах на пойменной террасе (Б1, П1, П2) и в частном огороде (Б5) в 2014 г.

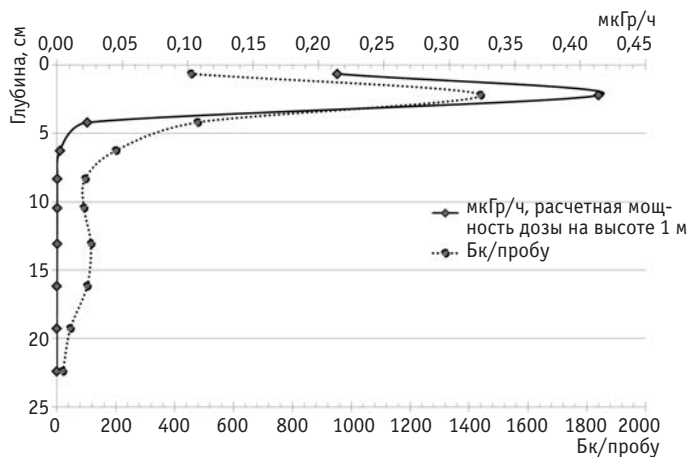


Рис. 4. Расчет мощности дозы на высоте 1 м от поверхности земли в точке Б1 от ^{137}Cs , накопленного в различных почвенных горизонтах

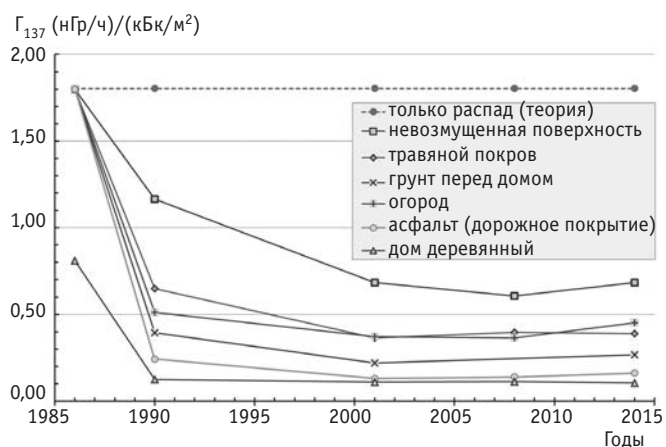


Рис. 5. Динамика параметра Γ_{137} для различных локализаций с. Новые Бобовичи, обусловленная миграцией ^{137}Cs

ни. Для сравнения с результатами, представленными в табл. 3, были вычислены интегралы за 30 и 70 лет для пахоты (15 см) и ненарушенной поверхности (табл. 10). Величина интегральной дозы за 70 лет выше оцененной нами по соотношению (2) в 2 раза и

в 1,5 раза выше полученной в работе [24]. Ожидаемая поглощенная доза в воздухе от ^{137}Cs в наших оценках составила для неповрежденной поверхности 0,27 Гр на 1 МБк/м².

Таблица 10

Реконструкция интегральных поглощенных доз в воздухе за 30 и 70 лет для различных форм ландшафта в сравнении с результатами работы [24] при начальной плотности загрязнения территории ^{137}Cs в 1 МБк/м², мГр

Период облучения	Пахота, 15 см		Естественный луг	
	Наша оценка	[24]	Наша оценка	[24]
30 лет	94	90	167	160
70 лет	139	150	242	230

Таблица 11

Значения коэффициентов f_j для с. Новые Бобовичи в сравнении с обобщенными данными по НП Брянской области, полученными в работе [9]

Локализация	Новые Бобовичи		JSP № 5	
	1990	1990–2014	1989	1992–1994
Невозмущенная поверхность, референсная территория	1,0	1,0	1,0	1,0
Огород	0,44	0,60	0,53	0,53
Двор (с различным покрытием)	0,34	0,37	0,58	0,55
Улица (скамейка)	0,52	0,45	0,58	0,55
Деревянный дом	0,11	0,16	0,11	0,13

Таблица 12

Средняя продолжительность пребывания условного жителя сельской местности на различных участках территории в течение жизни, в долях суток

Участки территории	Месяцы/дни			Год
	11÷3	4, 5, 9, 10	6÷8	
	151	122	92	
Дом	0,61	0,53	0,46	0,54
Двор	0,05	0,03	0,03	0,03
Хозяйственные постройки	0,05	0,02	0,03	0,03
Приусадебный участок, огород	0,01	0,13	0,13	0,08
Улица	0,05	0,08	0,13	0,08
Работа	0,23	0,23	0,23	0,23
Всего	1,00	1,00	1,00	1,00

Реконструкция поглощенных доз в воздухе над различными поверхностями за 30 и 70 лет дает значения, близкие к предсказанным величинам в работе [24]. Представляется важным, чтобы еще 2–3 обследования радиационной обстановки были выполнены за последующие 40 лет. Инструментальные возможности позволяют это сделать.

Другой результат, который может быть получен из обработанных измерений мощности дозы в населенном пункте, связан с оценкой динамики коэффициентов f_j (фактор локализации, см. формулу 3).

Для Новых Бобовичей в табл. 11 представлены наши оценки значений f_j за 1990 г. и средние за период 1990–2014 гг. В этой же таблице представлены значения, полученные в проекте JSP № 5 [9].

Значения f_j за 1990 г., оцененные в настоящем исследовании, коррелируют со средними значениями, полученными в проекте JSP № 5 для всех исследуемых НП, кроме дворов. Это можно связать с засыпкой чистым грунтом двора, асфальтированием или укладкой бетонных плиток (возле крыльца на удалении до 2 м, где собственно и производились измерения мощности дозы). Такая работа проводилась в селе как силами специализированных инженерных войск, так и в значительной степени в порядке личной инициативы хозяев.

Для оценки дозовых нагрузок на население за продолжительный период времени можно воспользоваться соотношением [9]:

$$\dot{E}_i(t) = A e^{-\lambda t} \sum_j g_j(t) p_{ij}(t) k_{ij}, \quad (6)$$

где

$\dot{E}_i(t)$ — мощность эффективной дозы внешнего облучения, полученная взрослым представителем i -ой группы населения в момент времени t ;

$g_j(t)$ — мощность поглощенной дозы в воздухе на высоте 1 м от загрязнения ^{137}Cs единичной плотности в почве для локализации j , нГр/ч×(кБк/м²)⁻¹;

$p_{ij}(t)$ — относительная частота пребывания людей из i -ой группы в локализации j ;

j — индекс, указывающий на тип локализации, например, жилая площадь, в доме; производственная площадь, на улице; вспаханное поле; лес; естественный луг и т.п.;

k_{ij} — фактор конверсии от мощности дозы в воздухе к мощности эффективной дозы.

Индекс i , указывающий на группу населения, обычно применим для вычисления дозы за некоторый сравнительно небольшой период времени.

Для периода в 70 лет трудно найти человека, который бы не поменял, живя постоянно в селе, ряд профессиональных групп. В этом случае, видимо, целесообразно рассматривать некоторого условного человека с характерным набором возрастных и профессиональных признаков. Мы для своих оценок использовали данные, собранные частично сотрудниками Новозыбковского филиала ЛИРГ и частично международной командой, работавшей в рамках проекта «Радиоэкология» ФГИ. Такие экспертные данные по распределению времени пребывания в различных локализациях j для условного человека,

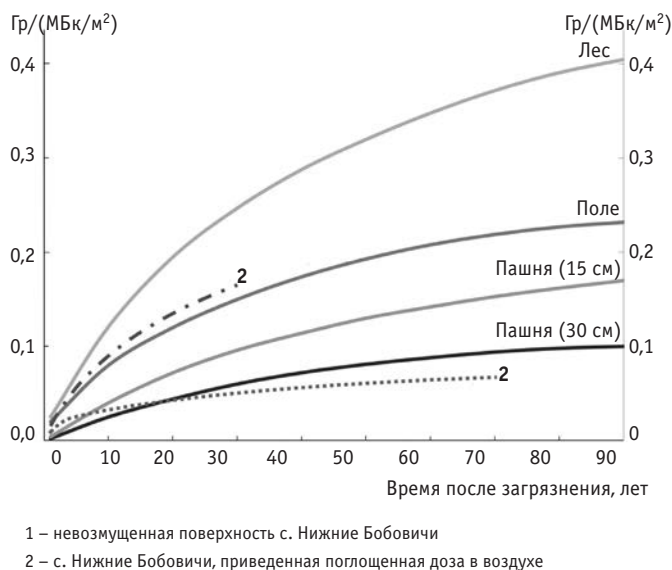


Рис. 6. Накопленная поглощенная доза в воздухе для различных ландшафтов по данным работы [24] в сравнении с оценками приведенной поглощенной дозы в воздухе для с. Новые Бобовичи (1) и поглощенной дозы в воздухе над невозмущенной поверхностью (2)

постоянно проживающего в сельском населенном пункте, представлены в табл. 12.

Используя значения из табл. 12, можно получить для условного человека, прожившего непрерывно в селе 70 лет, величину дозы, выраженной либо в единицах приведенной поглощенной дозы в воздухе* (рис. 6), либо в единицах эффективной дозы. Для получения последнего значения достаточно воспользоваться значением фактора конверсии $k = 0,75$. Тогда при начальной плотности загрязнения территории ^{137}Cs в 1 МБк/м^2 накопленная за 70 лет приведенная поглощенная доза в воздухе составит 67 мГр , а эффективная доза жителя при условии постоянного его проживания в селе в деревянном доме составит 50 мЗв . Этот результат совпадает с оценкой, полученной в работе [21], в которой авторы оценивают величину эффективной дозы для лиц, работающих преимущественно на улице и проживающих в деревянных домах, за период 1991–2056 гг. в 32 мЗв на 1 МБк/м^2 для сельского населенного пункта, расположенного на расстоянии от 100 до 1000 км от места аварии. Поскольку за начальный период (1986–1990 гг.) эффективная доза от ^{137}Cs , оцененная по соотношению (6), составляет 19 мЗв , то в сумме получается 51 мЗв .

В консервативных оценках, приведенных выше, за 50 лет эффективная доза оценивалась примерно в 130 мЗв на 1 МБк/м^2 выпадений ^{137}Cs (табл. 1 [15]).

* Под приведенной поглощенной дозой в воздухе мы понимаем выражение $H_i(t) = Ae^{-\lambda t} \sum_j g_j(t) p_{ij}(t)$

Выводы

1. Многолетние измерения мощности дозы в различных точках сельского населенного пункта позволили установить, что непосредственно после выпадений динамика снижения в разных локализациях имеет различную скорость. По истечении примерно 15 лет наступает квазистойчивое состояние, когда дальнейшее уменьшение мощности дозы над поверхностью земли в основном определяется распадом ^{137}Cs . Такое положение дел характерно для юго-западных районов Брянской области, в которых преобладают песчаные и супесчаные почвы. При этом ожидаемая поглощенная доза в воздухе в наших оценках составила для неповрежденной поверхности $0,27 \text{ Гр}$ на 1 МБк/м^2 , в то время как средняя мировая оценка, приведенная в докладе UNSCEAR, составила $0,39 \text{ Гр}$ на 1 МБк/м^2 [7].

2. В целом для сельского населенного пункта Новые Бобовичи, в котором мероприятия по дезактивации проводились в ограниченном объеме, ожидаемая приведенная поглощенная доза в воздухе по результатам наших исследований составила $0,067 \text{ Гр}$ на 1 МБк/м^2 . Оценка эффективной дозы внешнего облучения населения, постоянно проживающего в сельском населенном пункте в деревянных одноэтажных домах в течение 70 лет безвыездно, составила 50 мЗв на 1 МБк/м^2 первоначального загрязнения территории ^{137}Cs .

Благодарности

Проведение долговременных исследований в настоящее время трудно осуществлять без дружеской поддержки коллектива ИБРАЭ РАН и его руководства. Нам хочется выразить благодарность за моральную поддержку, оказываемую нам на протяжении многих лет, И.И. Линге и Р.В. Арутюняну. Также хочется поблагодарить А.М. Скоробогатова и Т.А. Буланцеву за помощь в подборе материалов из ведомственных баз данных и полезные обсуждения результатов работы.

Особую признательность за многолетнюю организационную помощь в проведении исследований и получении необходимой информации выражаем главе Новобобовического сельсовета М.М. Заболоцкому, а также М.Н. Савкину, давшему ряд ценных замечаний и советов в ходе обработки полученного материала и при подготовке данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алой А.С., Баранов С.В., Логунов М.В. Источники гамма-излучения с цезием-137 (свойства, производство, применение).— Озерск: РИЦ ИРБ ФГУП «ПО Маяк», 2013, 232 с.
2. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Киселев А.Е. и соавт. Оперативный анализ аварии на АЭС «Фукусима-1» и прогнозирование ее последствий // Труды ИБРАЭ РАН под ред. Л.А. Большова. ИБРАЭ РАН. — М.: Наука, 2007. Вып. 13: Авария на АЭС «Фукусима-1»: опыт реагирования и уроки. Науч. ред. Р.В. Арутюнян. 2013. 246 с.
3. FrenchGerman Initiative for Chernobyl — The Radioecology Project: Main Results. G. Deville Cavelin, H. Biesold, V. Chabanyuk, C. Brun Yaba, N. Rutschowsky // 3rd Congress On Radiation Research (Radiobiology And Radioecology), Kiev Ukraine. 21—25 may 2004.
4. Балонов М.И., Голиков В.Ю., Пархоменко В.И. и соавт. Дезактивация населенных пунктов Брянской области после аварии на Чернобыльской АЭС. // Радиационная гигиена. 2014. 7. № 1. С.5—15.
5. Miller K.M., Kuiper I.L., Helfer I.K. Cs-137 fallout depth distributions in forest versus field sites: implication for external dose rates. // J. Environ. Radioact. 1990. Vol. 12. P. 23—47.
6. Beck H.L. Environmental gamma radiation from deposited fission products, 1960—1964. // Health Phys., 1966. Vol. 12. P. 313—322.
7. Ионизирующее излучение: Источники и биологические эффекты. НКДАРООН. Доклад за 1982 год, т.1 . Приложение Е.1982. С. 451—527.
8. UNSCEAR. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. Report to the General Assembly, with annexes. Annex D. — New York, 1988, 646 pp.
9. Beck H.L. Exposure rate conversion factors for radionuclides deposited on the ground. 1980. EHL-378.
10. Методические указания МУ 2.6.1.547-96. Определение средней годовой эффективной дозы облучения жителей населенных пунктов Российской Федерации в 1996—1998 гг. вследствие аварии на Чернобыльской АЭС. — М. 1996.
11. Методические указания МУ 26.1.579-96. Реконструкция средней накопленной в 1986—1995 гг. эффективной дозы облучения жителей населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году. — М. 1996.
12. Методические указания МУ 2.6.1.2153-06. Оперативная оценка доз облучения населения при радиоактивном загрязнении территории воздушным путем. — М. 2006.
13. Eckerman Keith F., Ryman Jeffrey C. External Exposure to Radionuclides in Air, Water, and Soil. // Federal Guidance Report, № 12. EPA-402-R-93-081. September 1993.
14. http://radioactivity.mext.go.jp/old/ja/distribution_map_around_FukushimaNPP/5600_201203131000_report1-1.pdf
15. IAEA. Generic Procedures for Assessment and Response during a Radiological Emergency. // IAEA TECDOC Series. IAEA. Vienna. No. 1162. 2000; На рус. яз.: «Общие инструкции и оценки реагирования на радиологические аварийные ситуации, МАГАТЭ. Вена. 2004. IAEA-TECDOC-1162/R.
16. Методические принципы расчета уровней внешнего и внутреннего облучения населения, проживающего на территориях, загрязненных радиоактивными продуктами аварийных выбросов чернобыльской АЭС. К.И. Гордеев, Р.М. Бархударов, И.К. Дибобес и соавт.
17. Методические основы прогноза уровней облучения населения от радионуклидов цезия при постоянном проживании на территориях, загрязненных в результате аварии на ЧАЭС. Г.М. Аветисов, Р.М. Бархударов, К.И. Гордеев и соавт. 1988.
18. Методические указания № 5792-91. Определение годовых суммарных эффективных эквивалентных доз облучения населения, для контролируемых районов РСФСР, УССР, БССР, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС. М. 1991.
19. Методические указания МУ 2.7.7.001-93. Определение средней годовой эффективной дозы облучения жителей населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии Чернобыльской АЭС. — М. 1993.
20. Методические указания МУ 2.6.1.018-94. Определение средней годовой эффективной дозы облучения жителей населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии Чернобыльской АЭС. — М. 1994.
21. Pathway analysis and dose distributions. // Final report EUR 16541 en. — Brussels, Luxembourg: JSP. № 5. 1996. VIII. 130 pp.
22. Jacob P., Rosenbaum H., Petoussi N., Zankl M. Calculation of organ doses from environmental gamma rays using human phantoms and Monte Carlo methods. Part II: Radionuclides Distributed in the air or deposited on the ground. GSF-Bericht 12: May. 1990.
23. Robison W.L., Bogen K.T., Conrad oC.L. An updated dose assessment for resettlement options at Bikini Atoll: a U.S. nuclear test site // Health Phys. 1997. Vol. 73. № 1. P. 100—114.

24. Miller K.M., Heifer I.K. In situ measurements of ^{137}Cs inventory in natural terrain. // In: Environmental Radiation. Proc. 18th Midyear Topical Symp. Health Physics Society. Central Rocky Mountain Chapter of the Health Physics Society. Colorado Springs. Colorado. 1985. P. 243–251.
25. Persson H. Migration of radiocaesium in six Swedish pasture soils after the Chernobyl accident: a comparison with earlier studies 1987–2005 // Examens- och seminariearbete / Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för markvetenskap, Avdelningen för markkemi och jordmånslära, 2008. Vol. 91.
26. Методические рекомендации по оценке радиационной обстановки в населенных пунктах. М. 1990.
27. Urban Environment and Countermeasures, Final Report. French German Initiative for Chernobyl, Project № 2 “Radioecological Consequences of the Accident”. Conference on “Radioactive Contamination in Urban Areas”, May 7–9, 2003, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark.
28. Панченко С.В., Аракелян А.А., Гаврилина Е.А. Динамика параметров радиационной обстановки в сельском населенном пункте, загрязненном в результате аварии на ЧАЭС в апреле 1986 г. Препринт ИБРАЭ № ИБРАЭ-2014-06. — М. 2014. 35 с.
29. Карлин Н.Е., Карлина Л.В., Пархоменко В.И. и соавт. Оценка эффективности и разработка рекомендаций по реабилитации населенных пунктов, расположенных на радиоактивно-загрязненных территориях Брянской области Российской Федерации (заключительный отчет). Инв. 937 (1). Филиал Санкт-Петербургского НИИ радиационной гигиены. Новозыбков, 1993.
30. Сахаров В.К. Радиоэкология. Учебное пособие. — СПб.: Лань. 2006. 320 с.
31. Инструкция по отбору проб почв при радиационном обследовании загрязнения местности, 1987.
32. Данные по радиоактивному загрязнению территории населённых пунктов российской федерации цезием-137, стронцием-90 и плутонием-239+240. — НПО «Тайфун». Обнинск. 2015. 238 с.
33. Инструкция по обследованию радиационной обстановки на загрязнённых территориях. 1988.
34. Инструкция по наземному обследованию радиационной обстановки на загрязненной территории. 1989.
35. Еремеев М.С., Еременко В.А., Жернов В.С. и соавт. Гибридный мониторинг радиационной обстановки, перспективный подход к оперативному контролю и прогнозированию радиационных загрязнений среды выбросами и сбросами АЭС // Атомная энергия. 1985. Т. 59. № 5. С. 370–372.
36. Богатов С.А., Гаврилов С.Л., Ткаченко С.А. и соавт. Мобильное средство радиационной разведки на базе беспилотного летательного аппарата MD4-1000. // Специальная техника. 2012. № 6. С. 16–22.
37. Богатов С.А., Киселев А.А., Шведов А.М. Развитие существующих систем АСКРО в концепции гибридного мониторинга. // Труды ИБРАЭ РАН «Развитие систем аварийного реагирования и радиационного мониторинга». Под ред. Л.А. Большова. — М.: Наука. 2013.
38. Богатов С.А., Гаврилов С.Л., Долгов В.Н. и соавт. Тестирование моделей интерпретации данных измерений для определения параметров радиоактивных загрязнений почвы на примере загрязнения территории Брянской области цезием-137. // АНРИ. 2014. № 3. С. 32–39.
39. Линник В.Г. Ландшафтная дифференциация техногенных радионуклидов: геоинформационные системы и модели. Автореф. дисс. докт. географ. наук. — М.: 2008. 40 с.
40. Архив ИБРАЭ РАН. В архив входят 7 отчётов НИР, выполненных в рамках проекта ФГИ в период с 1999 по 2002 гг.
41. MicroShield Version5. Grove Engineering. Framatome Technologies, 1996.

Поступила: 15.10.2015

Принята к публикации: 22.03.2016

В.Н. Ключков, В.И. Рубцов

ДЕЗАКТИВАЦИЯ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ РАДИАЦИОННОЙ АВАРИИ: ОПЫТ ЧЕРНОБЫЛЯ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

V.N. Klochkov, V.I. Rubtsov

Decontamination of the Personal Protective Equipment at Rectification of the Radiation Accident Consequences: Use of Chernobyl Experience Today

РЕФЕРАТ

ABSTRACT

Цель: Анализ и обобщение опыта организации дезактивации средств индивидуальной защиты (СИЗ) персонала при ликвидации последствий на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) и определение на этой основе основных направлений совершенствования технологии и организации дезактивационных работ в условиях потенциальных радиационных аварий.

Материал и методы: В работе проанализированы результаты исследований авторов и литературные данные о дезактивации спецодежды и других СИЗ персонала, загрязненных при ликвидации последствий аварии на ЧАЭС в 1986–87 гг.

Результаты: На основании обобщения и анализа данных литературы и опыта многолетних собственных исследований изложены основные выводы об особенностях дезактивации спецодежды и других средств индивидуальной защиты персонала при ликвидации последствий аварии на ЧАЭС. Показано, что эффективность дезактивации СИЗ зависит от всех составляющих этого процесса, включая установление временных допустимых уровней радиоактивного загрязнения СИЗ, сортировку СИЗ в зависимости от уровня и характера загрязнения, строгое соблюдение технологии дезактивации, использование эффективных реагентов и современного высокоэффективного прачечного оборудования, тщательный контроль уровней загрязнения СИЗ после дезактивации и др.

Испытаны и рекомендованы к использованию в действующих спецпрачечных новые эффективные моющие средства. Проведено методическое сопровождение внедрения в спецпрачечных нового высокоэффективного оборудования. Разработана современная нормативно-методическая база по дезактивации СИЗ персонала, учебно-методическая и справочная литература.

Вывод: Анализ итогов работ по дезактивации СИЗ в зоне ЧАЭС показал первостепенное значение правильно построенной системы дезактивации СИЗ, включающей установление временных допустимых уровней радиоактивного загрязнения СИЗ, их сортировку в зависимости от характера и уровня загрязнения, проведение дезактивации в современных стирально-отжимных машинах с применением высокоэффективных моющих средств, контроль качества дезактивации и др.

Ключевые слова: дезактивация, средства индивидуальной защиты, авария на Чернобыльской АЭС, временные допустимые уровни

Purpose: To analyze and summarize the experience of decontaminating of the personal protective equipment (PPE) during rectification of the consequences of the accident at the Chernobyl NPP, and to define the main areas of improving the technology and management of decontamination activities at potential radiation accidents.

Material and methods: This work analyzes the results of the authors' research and literature data on decontamination of overalls and other staff PPE that was contaminated during rectification of the consequences of the accident at the Chernobyl NPP in 1986–87.

Results: Main conclusions on the specifics of decontaminating of the staff overalls and other PPE during rectification of the consequences of the accident at the Chernobyl NPP are provided based on the summary and analysis of literature data and own long-term research experience. It's shown that efficiency of the PPE decontamination depends on all the constituents including settings of the temporary permissible levels of the PPE radioactive contamination, sorting of PPE based on the contamination level and nature, strict following of the decontamination technology, use of efficient chemicals and modern high-performance laundry equipment, close control over the levels of PPE contamination after decontamination etc.

The experts have tested new efficient detergents and recommended them for using in working special laundries. Methodological support of adoption of new high-performance equipment in special laundries has been provided. The actual regulatory and procedural base of the PPE decontamination, as well as training and reference literature have been created.

Conclusion: The analysis of results of the PPE decontamination in the Chernobyl NPP area showed the primary importance of the properly established PPE decontamination framework including settings of the temporary permissible levels of the PPE radioactive contamination, their sorting based on the contamination level and nature, decontamination in the modern washer-extractors with efficient detergents, decontamination quality control etc.

Key words: decontamination, personal protective equipment, accident at the Chernobyl NPP, temporary permissible levels

Введение

Возникшие в результате аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) высокие уровни радиоактивного загрязнения всех объектов, расположенных на промплощадке ЧАЭС, а также почвы, дорог, жилых и служебных помещений в 30-км зоне ЧАЭС и необходимость участия в ликвидации последствий аварии очень большого контингента персонала и личного состава различных министерств и ведомств создали серьезные проблемы в области дезактивации спецодежды и других видов средств индивидуальной защиты (СИЗ).

Сотрудники Института биофизики Минздрава СССР (с 2008 г. — ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России) с первых дней проведения работ по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС были привлечены к решению проблем дезактивации.

Трудности решения данной проблемы определялись прежде всего следующими причинами:

— высокими уровнями радиоактивного загрязнения огромного количества спецодежды и обуви — только в санпропускники ЧАЭС в наиболее напряженный период работ поступало ежедневно до 12 т спецодежды, обуви и других СИЗ;

Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва. E-mail: fmbsc-fmba@bk.ru

A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of FMBA, Moscow, Russia. E-mail: fmbsc-fmba@bk.ru

- необходимость дезактивации большого количества спецодежды, обуви, постельного и нательного белья, используемых и заменяемых в базовых лагерях размещения персонала и личного состава, находящегося как внутри, так и за пределами 30-км зоны;
- наличием в районе аварии только одной спецпрачечной на ЧАЭС, имеющей совершенно недостаточную производительность – при круглосуточной работе не более 2 т в сутки;
- значительно более прочной фиксацией материалов спецодежды и обуви аварийного загрязнения по сравнению с обычным радиоактивным загрязнением спецодежды, возникающим при нормальной эксплуатации и проведении ремонтных работ на АЭС.

В сложившейся ситуации, наряду с выбором и отработкой технологических режимов дезактивации спецодежды и других СИЗ, потребовалось решать целый ряд сложных организационных вопросов по разработке и внедрению системы дезактивации спецодежды в зоне ЧАЭС.

Результаты и обсуждение

Первые же результаты дезактивации спецодежды и другого имущества, загрязненного при аварии на ЧАЭС, показали, что возникшее радиоактивное загрязнение значительно прочнее фиксируется материалами спецодежды и труднее с них удаляется, чем в случае загрязнения при нормальной эксплуатации и проведении ремонтных работ на АЭС. Это может быть объяснено только принципиально иным характером загрязнения поверхностей и спецодежды, возникшим в результате аварийного выброса радиоактивных веществ из 4-го энергоблока. В данном случае загрязнение различных объектов происходило непосредственно мелкодисперсными компонентами облученного ядерного топлива, которое в результате остаточного тепловыделения и горения внутриреакторных материалов нагревалось до 2000 °С. В этих условиях могли образовываться высокопрокаленные окислы, сплавы, другие труднорастворимые химические соединения радиоактивных веществ, прочно фиксируемые при попадании в поры тканевых материалов. Очень плохая растворимость этих загрязнений была подтверждена рядом исследователей.

Указанные факты потребовали исследовать характер радиоактивного загрязнения спецодежды из хлопчатобумажных и смешанных тканей методами бета-радиометрии, гамма-спектрометрии и автордиографии [1].

Наиболее наглядно особенности характера загрязнения спецодежды и его изменение в результате дезактивации были определены контактной автордиографией образцов тканей, вырезанных из загрязненной до высоких уровней спецодежды персонала, выполнявшего работы в зоне ЧАЭС. Для этого каждый образец загрязненной ткани помещали между двумя фотопластинками и экспонировали в течение

3 сут. Затем образец дезактивировали, высушивали и аналогичным образом помещали между двумя фотопластинками, взятыми из той же партии, что и предыдущие, и экспонировали в течение 3 сут. После этого все фотопластинки одновременно проявляли в одной порции проявителя. Наиболее характерный из результатов приведен на рис. 1.

Видно, что радиоактивное загрязнение ткани состоит из отдельных частиц. По результатам радиометрии установлено, что активность данного образца ткани в результате дезактивации уменьшилась в 3,3 раза. Автордиограммы достоверно показывают, что это происходит за счет удаления доли радиоактивных конгломератов. Для наглядности на автордиограммах образца до и после дезактивации цифрами и стрелками показаны изображения одних и тех же частиц.

На полученных автордиограммах было подсчитано количество частиц радиоактивного вещества, находящихся на каждом образце. С учетом их суммарной активности, определенной гамма-спектрометрическим способом, была определена их средняя активность. Используя справочные данные о радионуклидном составе радиоактивного выброса на 26 апреля и на 6 мая 1986 г. [2] с учетом времени, прошедшего

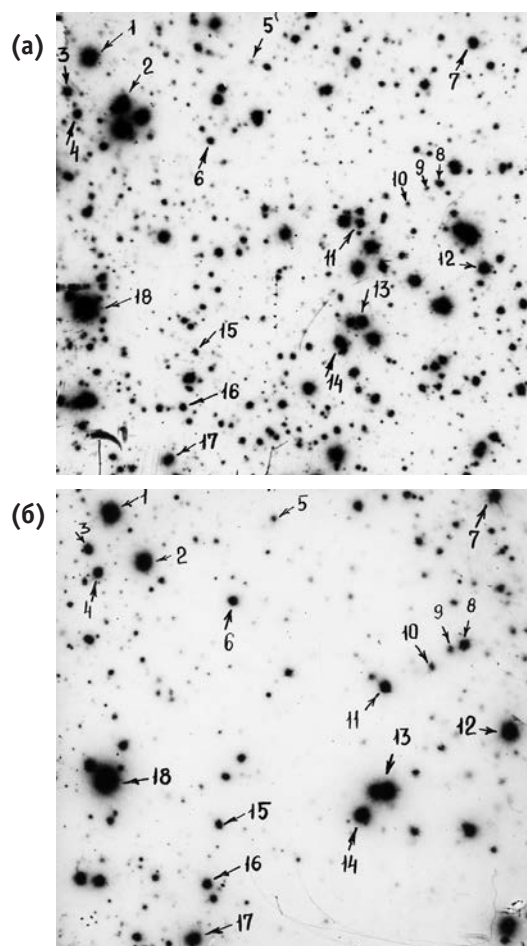


Рис. 1. Автордиограмма образца ткани из рабочего хлопчатобумажного костюма до (а) и после (б) дезактивации по ГОСТ 12.4.078-79. Масштаб 1:1

до момента проведения автордиографических исследований, и с учетом радиационных характеристик облученного ядерного топлива [3], определили средний размер частиц диоксида урана (примерно 5 мкм) и аэродинамический размер (примерно 15 мкм).

Полученные результаты позволили объяснить особенности дезактивации спецодежды, загрязненной в зоне Чернобыльской АЭС. Процесс дезактивации заключался, главным образом, в удалении труднорастворимых частиц диоксида урана, в которых прочно зафиксированы осколочные элементы, без их растворения в моющем растворе.

Основные решения по организации дезактивации спецодежды и других СИЗ были разработаны сотрудниками Института биофизики еще в 1970-е гг. [4, 5] и реализованы в санитарных правилах для промышленных и городских спецпрачечных [6]. Однако отмеченные выше особенности проведения дезактивационных работ потребовали существенной корректировки этих подходов.

Прежде всего, выявилась необходимость изменения системы контроля уровней радиоактивного загрязнения спецодежды и других СИЗ персонала на основе новых подходов к вопросам нормирования радиоактивного загрязнения спецодежды и других видов вещевого имущества в аварийной ситуации. Высокие уровни радиоактивного загрязнения различных объектов, а также существенно повышенный на большой территории радиационный фон привели к невозможности использования в этих условиях допустимых уровней радиоактивного загрязнения поверхностей различных объектов (в том числе спецодежды и других СИЗ), установленных НРБ-76 [7]. При решении этого вопроса потребовался переход от установленного НРБ-76 нормирования допустимых уровней загрязнения, выражаемого в единицах плотности потока бета-частиц, к нормированию мощности дозы гамма-излучения от измеряемых объектов. Последнее определялось следующими причинами:

- значительно большей оперативностью измерения мощности дозы гамма-излучения по сравнению с измерением радиоактивного загрязнения, выражаемого в единицах плотности потока бета-частиц;
- трудностью измерения плотности потока бета-частиц при высоком гамма-фоне;
- отсутствием достаточного количества приборов для измерения уровней радиоактивного загрязнения различных объектов в единицах плотности потока бета-частиц.

Необходимо также отметить, что НРБ-76, как и аналогичные документы других стран, вообще не устанавливали подобных нормативов для большинства объектов, подвергшихся загрязнению в результате радиационной аварии, в частности, для одежды населения и различных видов вещевого имущества.

Опыт многолетних исследований в области радиационной гигиены позволил специалистам Института биофизики Минздрава СССР уже в первые дни после аварии оперативно разработать «Временные допу-

стимые уровни радиоактивного загрязнения различных объектов», которые были 07.05.86 г. утверждены Главным государственным санитарным врачом СССР [8]. Согласно этому документу допустимый уровень радиоактивного загрязнения кожных покровов человека, спецодежды и других видов вещевого имущества составил 0,1 мР/ч. Однако использование указанных временных допустимых уровней оказалось возможным лишь за пределами 30-км зоны ЧАЭС, так как работы по ликвидации последствий аварии приходилось проводить при мощности дозы гамма-излучения, составляющей десятки и сотни мР/ч. В Чернобыле, где работала правительственная комиссия, она составляла 5–8 мР/ч, а в некоторых базовых лагерях размещения персонала — 1–3 мР/ч. Естественно, в этих условиях было нереально и не было необходимости добиваться, чтобы уровни загрязнения спецодежды и других видов вещевого имущества не превышали 0,1 мР/ч. Поэтому были разработаны и 02.06.86 г. утверждены Главным государственным санитарным врачом СССР дифференцированные для различных зон «Временные уровни допустимого радиоактивного загрязнения ...» [8]. В частности, для используемых непосредственно на промплощадке ЧАЭС спецодежды и обмундирования был установлен допустимый уровень радиоактивного загрязнения 5 мР/ч, а для нательного белья — 2 мР/ч².

Внедрение в практику на период ликвидации последствий аварии «Временных уровней допустимого радиоактивного загрязнения...» [8] явилось нормативной базой для предотвращения распространения радиоактивных загрязнений из зоны проведения работ, а также позволило оперативно и обоснованно решать вопросы направления на дезактивацию загрязненного вещевого имущества, его повторного использования и, при невозможности дезактивации, захоронения в качестве радиоактивных отходов. В дальнейшем, по мере улучшения радиационной обстановки в зоне ЧАЭС, разработанные временные допустимые уровни (ВДУ) неоднократно пересматривались в сторону уменьшения, причем снижение внешнего гамма-фона и поставка в зону ЧАЭС необходимого количества радиометрических приборов позволили вернуться к нормированию радиоактивного загрязнения поверхностей в единицах плотности потока бета-частиц [8].

Неординарные решения потребовались для обеспечения дезактивации больших объемов спецодежды и других СИЗ, в несколько раз превышающих производительность спецпрачечной на ЧАЭС в АБК-1. На первых порах в порядке эксперимента была организована отправка специальными автопоездами загрязненной спецодежды и другого имущества для их дезактивации в спецпрачечные других АЭС, а также разработаны соответствующие рекомендации для этих спецпрачечных. Было принято решение направлять в спецпрачечные других АЭС вещи, загрязненные в пределах до 1 мР/ч (около 10000 бета-част./см²·мин). Однако после первых рейсов автопоездов это решение было признано нецелесообразным из-за угрозы разноса радиоактивных веществ и радиоактивного за-

грязнения помещений и оборудования спецпрачечных других АЭС [9].

Существенное увеличение объема дезактивируемого имущества было достигнуто за счет развертывания на границе 30-км зоны автономных прачечных отрядов Министерства обороны СССР, привлечения к дезактивационным работам прачечной-химчистки г. Припяти, прачечных г. Чернобыля и с. Рассохи, находящихся внутри 30-км зоны, и прачечных, находящихся в населенных пунктах Киевской области поблизости от 30-км зоны.

Серьезную трудность при организации работы автономных прачечных отрядов и прачечных сельских населенных пунктов явилось отсутствие устройств для очистки сточных вод, которые сливались в открытые котлованы, вырытые в грунте. Для предотвращения значительного радиоактивного загрязнения территории было рекомендовано в прачечные отряды, расположенные в пределах 30-км зоны, направлять имущество, загрязненное до уровня не выше 1 МР/ч, а за пределами 30-км зоны — не выше 0,1 МР/ч.

Следует отметить, что эксплуатация в зимнее время оборудования прачечных отрядов, расположенных на открытой территории, представляла существенные трудности. Поэтому осенью 1986 г. большое внимание было уделено использованию такого резерва увеличения объема дезактивации имущества, как использование прачечной-химчистки г. Припяти, не эксплуатируемой после эвакуации населения города. Однако необходимо было учитывать, что сточные воды прачечной поступали в городскую канализацию, очистные сооружения которой не предусматривали очистки от радионуклидов. Для предотвращения дополнительного радиоактивного загрязнения воды в реке Припяти было установлено, что на дезактивацию в данную прачечную на обработку в водной среде направляется имущество, загрязненное до уровня не выше 1 МР/ч, а на химическую чистку (при которой не образуются загрязненные сточные воды) — верхняя зимняя одежда, загрязненная до уровня 10 МР/ч [10].

Опыт дезактивационных работ при ликвидации последствий аварии на ЧАЭС показал первостепенную важность именно системы дезактивации СИЗ, включая установление временных допустимых уровней, сортировку загрязненного имущества, применение эффективных моющих средств, контроль чистоты имущества после дезактивации и др. Многие предлагавшиеся (как правило, не специалистами в области дезактивации) чудодейственные реагенты для дезактивации СИЗ не подтвердили свою эффективность при проведении сравнительных лабораторных и производственных испытаний.

В период ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС сотрудниками Института биофизики МЗ СССР выполнялись научные исследования по совершенствованию технологии и организации дезактивации спецодежды и других СИЗ с учетом характера их загрязнения в аварийной ситуации. На основании результатов выполненных исследований был разрабо-

тан и внедрен в практику комплекс инструкций и рекомендаций по технологии и организации дезактивации спецодежды и других СИЗ, большинство из которых опубликованы в сборнике [11].

Практика работы спецпрачечных в зоне ЧАЭС подтвердила, что созданная система дезактивации вещевого имущества позволила в основном решить поставленные задачи и существенно снизить количество спецодежды, обмундирования и другого имущества, направляемого на захоронение в качестве радиоактивных отходов. По мере снижения уровней и изменения характера радиоактивного загрязнения спецодежды разработанные инструкции и рекомендации уточнялись и совершенствовались. Опыт организации дезактивационных работ в условиях радиационных аварий обобщен в публикациях [12–14].

Опыт работ по дезактивации СИЗ в период ликвидации последствий аварии на ЧАЭС показал необходимость внедрения в спецпрачечных современных стирально-отжимных машин. Эти работы были начаты уже в 1987 г. внедрением в спецпрачечных Смоленской и Чернобыльской АЭС стирально-отжимных машин ПАЦ-91АС, специально разработанных специалистами Чехословакии для спецпрачечных советских АЭС. В 1990-е гг. с распадом социалистической системы и распадом Чехословакии производство специальных стиральных для спецпрачечных российских АЭС было прекращено, однако в 2000-е гг. было начато оснащение спецпрачечных современным оборудованием, производимым в России и в передовых зарубежных странах. В настоящее время во всех российских спецпрачечных установлены современные автоматические стирально-отжимные машины.

Внедрение современного оборудования спецпрачечных АЭС позволило значительно уменьшить объемы сточных вод при дезактивации спецодежды и других СИЗ. В настоящее время все сточные воды спецпрачечных направляются на сооружения спецводоочистки с применением современных методов фильтрации, упаривания, ионного обмена, обратного осмоса и др.

Опыт дезактивационных работ на ЧАЭС и последующее внедрение в СССР и России нового оборудования и современных синтетических моющих средств показали нецелесообразность жесткого установления в нормативных документах по дезактивации СИЗ параметров технологических режимов дезактивации спецодежды, таких как водный модуль, концентрация и состав моющих сред, продолжительность отдельных операций, количество полосканий и т.п. В утвержденных в 2003 г. СанПиН 2.2.8.46-03 [15] определены лишь основные принципы построения технологических режимов и рекомендуемые режимы дезактивации. С их учетом на основании рекомендаций изготовителей оборудования, изготовителей моющих средств и СИЗ устанавливаются конкретные режимы дезактивации.

Другой важный вывод, к которому приводит анализ чернобыльской ситуации: в случае возможных аварийных ситуаций целесообразно ориентироваться

на применение спасателями одноразовых дополнительных СИЗ, которые не направляются на дезактивацию, а перерабатываются методом прессования или сжигания в специальных печах с очисткой отходящих газов, после чего продукты переработки направляются на захоронение.

Выводы

Обеспечение дезактивации СИЗ, загрязненных при ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС, было сопряжено со значительными трудностями, обусловленными большим объемом загрязненного имущества, наличием на ЧАЭС только одной спецпрачечной, не рассчитанной на работу в условиях радиационной аварии, чрезвычайно низкой растворимостью радиоактивного загрязнения, состоящего из высокопрокаленных окислов урана и продуктов деления.

Представлены результаты изучения характера радиоактивного загрязнения СИЗ с применением метода автордиографии. Проанализирован опыт привлечения различных прачечных для проведения работ по дезактивации спецодежды. Показана невозможность соблюдения гигиенических и экологических требований при дезактивации спецодежды в прачечных, не имеющих спецочистки сточных вод.

Анализ итогов работ по дезактивации СИЗ в зоне ЧАЭС показал первостепенное значение правильно построенной системы дезактивации СИЗ, включающей установление временных допустимых уровней радиоактивного загрязнения СИЗ, их сортировку в зависимости от характера и уровня загрязнения, проведение дезактивации в современных стирально-отжимных машинах с применением высокоэффективных моющих средств, контроль качества дезактивации и др.

Опыт работ в Чернобыле был реализован при разработке СанПиН 2.2.8.46-03 «Санитарные правила по дезактивации средств индивидуальной защиты», а также при разработке одноразовой дополнительной спецодежды и дополнительных чехлов (бахил) из ламинированных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ключков В.Н., Гольдштейн Д.С., Васькин А.Г. и соавт. Характер радиоактивного загрязнения спецодежды персонала, участвующего в ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС // Атомная энергия, 1990, Т. 68. № 2. С. 105–107.
2. Информация об аварии на Чернобыльской АЭС и ее последствия, подготовленная для МАГАТЭ // Атомная энергия. 1986. Т. 61. № 5. С. 301–320.
3. Колобашкин В.М., Рубцов П.М., Ружанский П.А., Сидоренко В.Д. Радиационные характеристики облученного ядерного топлива. Справочник. — М.: Энергоатомиздат. 1983. 384 с.
4. Городинский С.М., Гольдштейн Д.С. Дезактивация полимерных материалов. — М. 1981. 248 с.
5. Гольдштейн Д.С., Фадеев П.Е., Гальперин Г.Б., Цамерян И.И. Очистка от радиоактивных загрязнений средств индивидуальной защиты, используемых на АЭС // В сб.: «Энергетика и электрификация». Серия «Эксплуатация и ремонт оборудования атомных электростанций». Вып. 4. — М.: Атомиздат. 1984. С. 16–20.
6. Санитарные правила для промышленных и городских спецпрачечных по дезактивации спецодежды и дополнительных средств индивидуальной защиты № 1298-75. М.: МЗ СССР. 1976. 41 с.
7. Нормы радиационной безопасности НРБ-76. // В сб.: «Нормы радиационной безопасности НРБ-76» и «Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений ОСП 72/80». Минздрав СССР. 2-е изд. — М.: Энергоатомиздат. 1981. С. 3–54.
8. Ключков В.Н., Рубцов В.И., Суровцев Н.А., Аветисов Г.М. Обеспечение радиационной безопасности персонала и населения при ликвидации последствий радиационной аварии. — М.: ФГУ «ВЦМК «Защита». 2005. 65 с. Приложение к журн. «Медицина катастроф». № 8. 2005.
9. Ключков В.Н., Васькин А.Г., Филатова В.М. Основные итоги работы по организации дезактивации имущества при ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС // Медицина катастроф. 1996. Спец. вып. С. 19–27.
10. Рекомендации по выбору и дезактивации зимней спецодежды и дополнительных средств индивидуальной защиты для работ по ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС в осенне-зимний период 1986–1987 гг. // В сб. нормативно-методических документов. — М.: ИБФ МЗ СССР. 1987. С. 45–50.
11. Сборник инструктивно-методических материалов. — М.: Минздрав СССР. 1986.
12. Аветисов Г.М., Грачев М.И., Ключков В.Н. и соавт. Первоочередные медико-гигиенические мероприятия при радиационной аварии. Пособие. — М.: ВЦМК «Защита». 1997. 155 с.
13. Ключков В.Н., Васькин А.Г., Филатова В.М. Организация работ по предотвращению распространения радиоактивных загрязнений и дезактивации поверхностей помещений и средств индивидуальной защиты в условиях радиационной аварии. // Медицина катастроф. 1995. № 1–2. С. 43–48.
14. Кошеев В.С., Гольдштейн Д.С., Ключков В.Н. и соавт. Индивидуальная защита работающих в атомной энергетике. — М.: Энергоатомиздат. 1992. 176 с.
15. СанПиН 2.2.8.46-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормы. Санитарные правила по дезактивации средств индивидуальной защиты. Опубликовано в «Российской газете» № 22 (3399) от 6 февраля 2004 г.

Поступила: 29.02.2016

Принята к публикации: 22.03.2016

А.Л. Полудин, Е.Н. Полудина

ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ, ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ И МИГРАЦИИ УРАНА В ПОЧВЕ ПРИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕСТАХ

A.L. Polydin, E.N. Polydina

Specific Features of Accumulation, Reallocation and Migration of Uranium in Soil after the Gas-Dynamic Tests

РЕФЕРАТ

ABSTRACT

Цель: Исследовать особенности перераспределения и миграции урана в почвах, как результат хозяйственной деятельности ВНИИТФ.

Материал и методы: Закладывались почвенные разрезы с учётом элементарных геохимических ландшафтов. В исследуемых образцах проб проводилось последовательное селективное выделение физико-химических форм урана и последующий их анализ спектрофотометрическим методом с использованием трибутилфосфата и арсеназо III. Определялись основные физические и химические свойства почвы, определяющие особенности почвы как депонирующей среды.

Результаты: Показатели кислотности почвы и окислительного — восстановительного потенциала характеризуют почву как среду, способствующую вымыванию урана, при этом в почвах субаквальной позиции происходит восстановление урана до U^{4+} и его осаждение.

В почвах элювиальной позиции содержание урана достигало 260 мг/кг, в почве супераквальной позиции — 350 мг/кг, почве субаквальной позиции 64 мг/кг. Данное содержание урана более чем в 1700 раз превышает содержание урана «фоновое» участка, но не превышает установленные контролируемые уровни.

В почвах элювиальной и супераквальной позиции преобладает кислоторастворимая форма урана (форма, связанная преимущественно с полуторными оксидами). Только в верхних горизонтах почвы супераквальной позиции уран связан в основном с водорастворимыми карбонатами. В почвах субаквальной позиции уран находится преимущественно в подвижной форме, которая характеризуется как рН зависимая, причем уран вымывается из профиля почвы в форме растворимых карбонатов.

Доля потенциально подвижной формы урана в исследуемых почвах достигает 90 %. Распределение этой формы на исследуемой территории связано с фильтрующей способностью почв и их окислительно-восстановительным режимом.

Уран находится во всех почвах, главным образом, в наиболее распространённой фракции 1— 0,05 мм, где его доля достигает 90 %.

Ключевые слова: долгоживущие радионуклиды, уран, формы нахождения, почвы, фракционный состав

Purpose: To investigate the features of reallocation and migration of uranium in the soil as a result of economic activity of VNIITF.

Material and methods: Lays the soil profiles in view of the elementary geochemical landscapes. The test samples of samples are carried out consecutively selective allocation of physical and chemical forms of uranium and the subsequent analysis by spectrophotometric method using tributyl phosphate and arsenazo III. Defines the basic physical and chemical properties of the soil, the soil defining features as storage medium.

Result: Indicators of soil acidity and oxidation–reduction potential characterize the soil as an environment conducive to leaching of uranium in soils subaqueous position — there is a restoration of uranium to U_4^{+} and his deposition.

In soils of eluvial position uranium content reached 260 mg / kg in the soil supraqual position — 350 mg / kg soil subaqueous position 64 mg / kg. This uranium content of more than 1700 times the content of uranium background portion, but does not exceed the controlled levels.

In soils of eluvial and supraqual position prevails acid-soluble forms of uranium (form, mainly due to sesquioxide). Only in the upper soil horizons supraqual position uranium associated mostly with water-soluble carbonates. In subaqueous soils position uranium is preferably in the form of a mobile, which is characterized as pH dependent and uranium leached from the soil profile in the form of soluble carbonates changes in environmental conditions.

The proportion of potentially mobile forms of uranium in these soils reaches 90 %. This form of distribution in the study area due to the filtering ability of soils and their oxidation–reduction regime. Uranium is found in all soils, mainly in the most common fractions of 1— 0.05 mm, where its share reaches 90 %.

Key words: long-living radionuclides, uranium, forms of occurrence, soil, fractional composition

Введение

Всероссийский НИИ технической физики им. академика Е.И. Забабахина (ВНИИТФ) в процессе своей деятельности проводит нерегулярные разовые выбросы урана. Фактический годовой выброс урана не превышает установленные нормативы предельно-допустимых выбросов.

Тем не менее, встаёт проблема проведения радиационного контроля зоны влияния ВНИИТФ. В НРБ 99/2009 под радиационным контролем понимается

«получение информации о радиационной обстановке в организации, окружающей среде и об уровнях облучения людей» [1]. В законе «О радиационной безопасности населения» [2] дано более широкое определение радиационного контроля (статья 11), под которым понимают не только получение информации, но и регулирование, управление радиационной обстановкой, обеспечение информационной поддержки управления радиационной безопасностью. Кроме того, радиационному контролю подлежат «вы-

ВНИИ технической физики им. академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия. E-mail: anderggg@mail.ru

E.I. Zababakhin Russia Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia. E-mail: anderggg@mail.ru

бросы в атмосферу, создаваемые технологическим процессом на рабочих местах и в окружающей среде» (НРБ 99/2009 п. 7.2) [1].

В этой связи актуализируется вопрос об исследовании буферной особенности почвы, как основной компоненты экосистемы депонирующей выбросы. Показателями состояния химических элементов в почвах служат содержание и соотношение их соединений. Исследования состава соединений металлов в почвах и механизмов их трансформации имеют более чем полувековую историю, но актуальность их растёт, поскольку обусловлена необходимостью получения адекватной оценки сегодняшнего состояния загрязнённых почв, прогноза их изменения и поиска путей их рекультивации [3].

Содержание урана в почвах мира изменяется в широких пределах — от 0,1 мг/кг (зона с избыточным увлажнением) [4] до 11 мг/кг [5]. Среднее содержание урана для серых лесных почв составляет 2 мг/кг [6]. Контрольный показатель содержания урана в почве составляет 1 г/кг [7]. Содержание урана «фоновое» участка района исследований составляет 0,2 мг/кг, что объясняется особенностями климата (коэффициент увлажнения составляет 1,8) [8].

С другой стороны, свойства почвы как сорбента и основной депонирующей среды, заслуживают отдельного внимания. На подвижность урана оказывает влияние кислотность почвы и окислительно-восстановительный потенциал [4], а также ее показатель rH_2 , предложенный У.М. Кларком для получения сравнимых данных по окислительно-восстановительным условиям в почвах с различной реакцией среды и позволяющий оценивать скорость и интенсивность протекания процессов окисления или восстановления [9]. Почвы, имеющие более тяжёлый гранулометрический состав (глинистые), лучше аккумулируют тяжёлые металлы, чем лёгкие (песчаные). Водные её свойства определяют перенос радионуклидов с почвенной влагой свободных и адсорбированных ионов [10].

Материал и методы

Исследование проводилось на территории Челябинской области. Место отбора проб — территория ВНИИТФ, которая в рамках административно-территориального деления относится к Каслинскому району Челябинской области, а с точки зрения зонального деления — к горнолесной зоне [11].

Для исследования особенностей миграции исследуемых элементов системы почва-ландшафт при географическом подходе почвы рассматриваются на уровне педона («профиля» почвы), которые формируют элементы ландшафта, именующиеся катенами (сочетание почв в рядах на склонах) [12].

Пробы из почвенных разрезов вынимали слоями с учётом глубины, после чего высушивали до воздуш-

но-сухого состояния и просеивали через сито с ячейками 1 и 3 мм с определением плотности почвы [13]. Определение гранулометрического состава проводилось методом пипетки. Рассчитывался коэффициент фильтрации по Козени [14].

Помимо определения массы фракции анализировалось содержание урана [15]. Кислотность почвы (актуальная и обменная), а также окислительно-восстановительный потенциал, плотность почвы и плотность твёрдой фазы почвы определялись стандартными методами [16].

Также проводилось определение физико-химических форм урана в исследуемых почвах. Выделялось 6 форм урана: обменная (выщелачивалась 1М CH_3COONa при pH водной вытяжки), подвижная (1М CH_3COONa , pH = 5), восстанавливаемая (0,04М $[\text{NH}_3\text{OH}]\text{Cl}$, pH = 2), окисляемая (0,008М HNO_3 , pH = 2), кислоторастворимая (7М HNO_3) и остаточная ($\text{HF} + \text{HNO}_3$). Обменная и подвижная формы выщелачивают преимущественно уран, связанный с водорастворимыми карбонатами, восстанавливаемая — преимущественно с глинистыми минералами, окисляемая — с органическим веществом почвы и кислоторастворимая — с полуторными оксидами, тогда как остаточная форма урана связана с кристаллической решеткой минеральной компоненты почвы и не выщелачивается в рамках данной методики. Кислоторастворимая и остаточная форма условно не подвержены вымыванию из почвенного профиля [17, 18]. Определение содержания урана в различных вытяжках проводили спектрофотометрическим методом с использованием трибутилфосфата и арсеназо III [19].

Результаты и обсуждение

Исследуемые серые лесные почвы характеризуются преобладанием фракции песка (1–0,05 мм), которая составляет 83 % в почвах супераквальной и субаквальной позиции в почвах. Данная почва характеризуется как супесчаная (рис. 1). Плотность (табл. 1) почв элювиальной и супераквальной позиции находится в диапазоне от 1,8 до 2,2 г/см³ в верхних горизонтах почвы и характеризуется как сильно уплотнённая и непроницаемая для воды. Исключение составляет верхний слой торфяной залежи (плотность которой 0,67 г/см³), что связано с высоким содержанием органического вещества. Пористость для всех разрезов характеризуется как чрезвычайно низкая.

Для почв элювиальной и супераквальной позиции коэффициент фильтрации находится в диапазоне от 0,2 до 0,6 см/сутки и характеризуется как исключительно низкий, что характерно для водоупоров. Для почв субаквальной позиции (до 119 см/сут) он описывается как высокий.

Таблица 1

Данные физических, химических свойств исследуемых почв

№	Глубина, см	Плотность почвы, г/см ³	Плотность твёрдой фазы почвы, г/см ³	Пористость, %	Кэф. фильтр, см/сутки (КФ)	Содержание урана, мг/кг	ОВП, мВ	pH	гН ₂
Почвы элювиальной позиции									
1	2	1,9	2,4	20,5	0,4	110,1±17,6	320,3	6,8	24,3
2	6	2,2	2,6	17,0	0,2	260,0±41,6	311,6	7,4	25,2
3	17	2,4	2,6	8,9	0,1	258,2±41,3	300,1	6,9	23,8
4	25	2,5	2,6	3,4	0,0	35,1±5,6	324,5	6,2	23,2
5	40	2,7	2,7	1,1	0,0	30,8±4,9	318,2	6,6	23,8
Почвы супераквальной позиции									
6	6	1,9	2,4	23,5	0,7	212,3±34,0	185,9	6,5	19,2
7	10	2,1	2,6	18,1	0,3	350,8±26,1	216,4	7,3	21,8
8	25	2,2	2,7	16,0	0,2	344,0±55,0	234,1	6,8	21,4
9	40	2,7	2,7	0,6	0,0	30,2±4,8	228,5	6,2	20,0
Почвы субаквальной позиции									
10	10	0,7	1,9	63,9	119,2	64,1±10,3	214,7	6,4	20,0
11	22	1,1	2,1	47,8	15,9	50,2±8,0	188,6	5,3	16,9
12	37	2,1	2,4	10,9	0,04	36,2±5,8	154,3	5,1	15,3

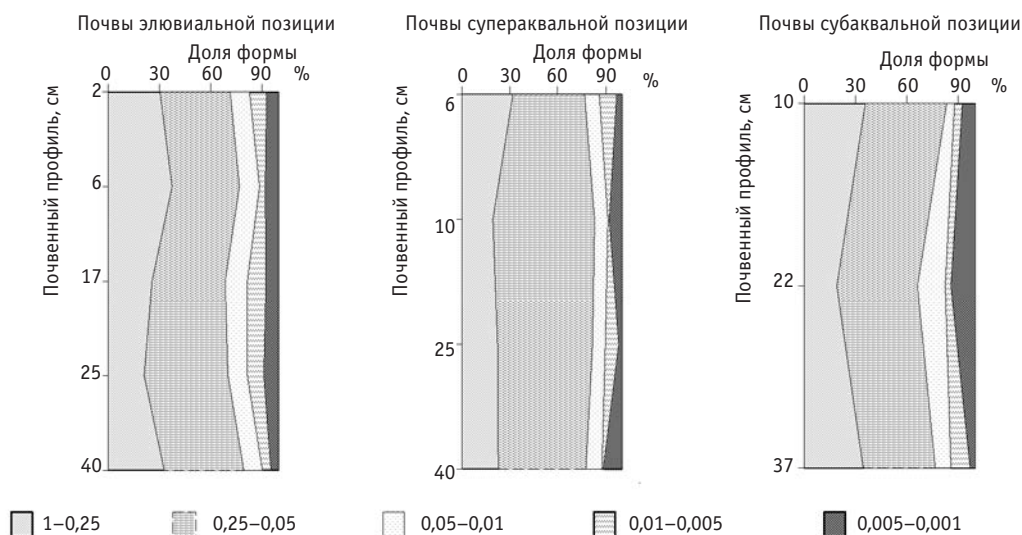


Рис. 1. Данные гранулометрического состава исследуемых почв

Кислотность почв элювиальной и супераквальной позиции находится в диапазоне от 6,5 до 7,4 и определяется как нейтральная. Окислительно-восстановительный режим для этих почв – умеренно-восстановительный. Для почвы субаквальной позиции, затопленной грунтовыми водами, кислотность слабо-среднекислая при наличии процессов интенсивного восстановления. Показатель гН₂ характеризует интенсивность протекания процессов восстановления, свидетельствуя о периодическом создании восстановительной обстановки для почв элювиальной и трансэлювиальной позиции, протекании восстановительных процессов с высокой интенсивностью в почвах субаквальной позиции. Данные условия среды для почв элювиальной и супе-

раквальной позиции способствуют вымыванию урана из профиля почвы, а почв для субаквальной позиции – его осаждению [4].

Содержание урана представлено в табл. 1. В почвах элювиальной позиции содержание урана достигает 260 мг/кг, в почве супераквальной позиции – 350 мг/кг и супераквальной позиции – 64 мг/кг. Данное содержание урана более чем в 1700 раз превышает содержание урана «фонового» участка. Формы нахождения урана представлены на рис. 2. В почвах элювиальной и супераквальной позиции преобладает кислоторастворимая форма урана. Уран этой формы связан, преимущественно, с полуторными оксидами. Только в верхних горизонтах почвы супераквальной позиции уран связан, главным образом, с водорас-

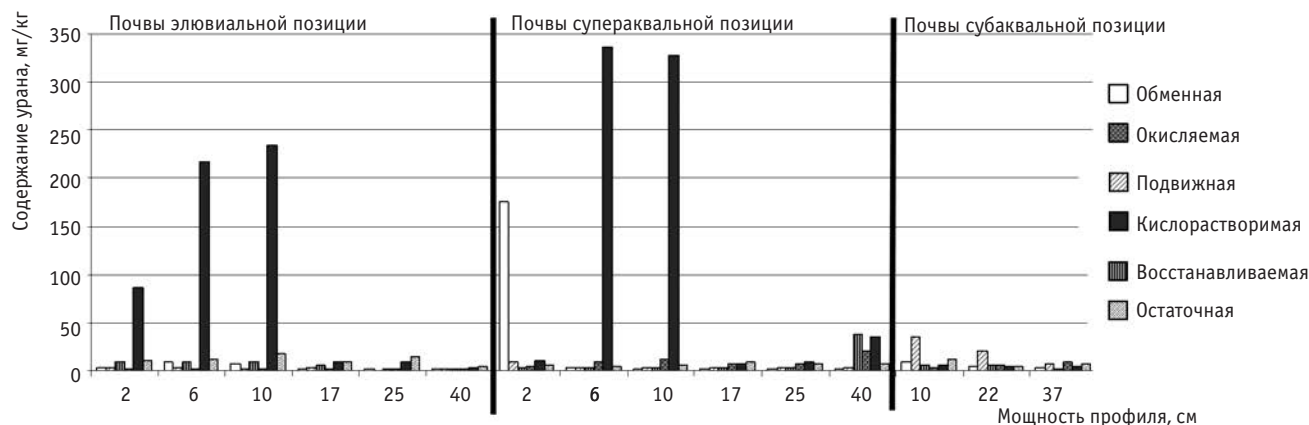


Рис. 2. Формы нахождения урана в пробах исследуемых почв (мг/кг)

творимыми карбонатами. В почвах субаквальной позиции уран находится преимущественно в подвижной форме, которая характеризуется как рН зависимая. Этот уран вымывается из профиля почвы в форме растворимых карбонатов при изменении условий среды. Доля потенциально подвижной формы (сумма форм обменной, подвижной, восстанавливаемой, окисляемой к общему содержанию урана) для почв элювиальной позиции находится в диапазоне от 8 до 41 %, супераквальной позиции — от 5 до 91 %. и субаквальной позиции — от 62 до 79 %. Преобладание потенциально мигрирующей формы в почвах супераквальной позиции, вероятнее всего, связано с особенностями окислительно-восстановительного потенциала данной территории, способствующей миграции урана и подчинённому положению этой формы рельефа. Наличие в верхнем слое почвы супераквальной позиции потенциально мигрирующей формы, достигающей 91 %, обусловлено перераспределением данного элемента с поверхностным стоком в подчинённые формы рельефа при наличии низких коэффициентов фильтрации, способствующих минимизации перераспределения потенциально под-

вижной формы урана с грунтовыми водами в профиле исследуемых почв.

Фракционный состав урана исследуемых почв представлен на рис. 3. Уран находится во всех почвах в наиболее распространённой фракции 1–0,05 мм, где его доля достигает 90 %. Уран фракции 0,25–0,05 мм сконцентрирован в почвах супераквальной позиции, где его содержание превышает содержание урана элювиальной и субаквальной позиции в 5 раз и достигает 100 мг/кг. В почвах субаквальной позиции также преобладает фракция 1–0,25 мм, а в затопленном горизонте фракция 0,01–0,005 мм.

Выводы

1. Почвы имеют лёгкий гранулометрический состав и плохо задерживают поллютанты. Коэффициент фильтрации для почв элювиальной и супераквальной позиции характеризуется как исключительно низкий, характерный для водоупоров, а для почв субаквальной позиции — высокий. Это обусловлено плотностью исследуемой почвы, изменённой под влиянием хозяйственной деятельности человека.

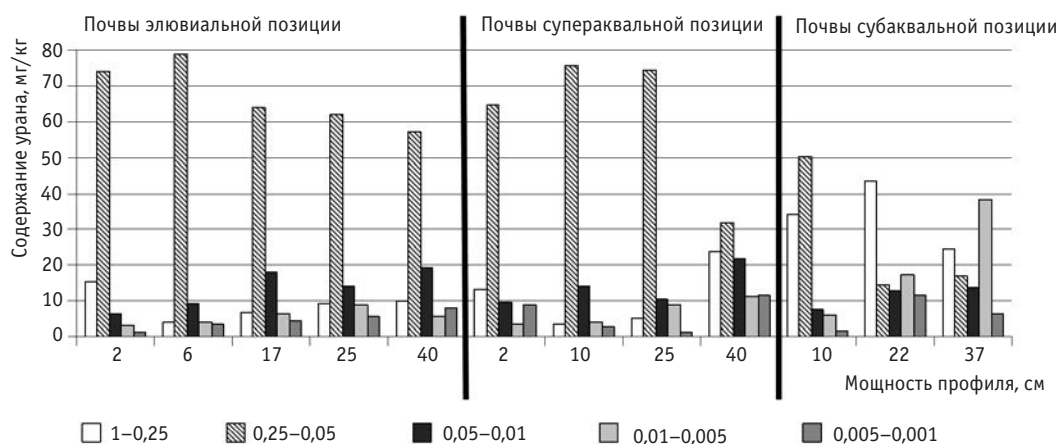


Рис. 3. Данные фракционного состава урана в исследуемых почвах (в % к общему содержанию данного элемента)

2. Показатели кислотности почвы и окислительно-восстановительного потенциала характеризуют почву как среду, способствующую вымыванию урана. В почвах субаквальной позиции происходит восстановление урана до U^{4+} и его осаждение.

3. В почвах элювиальной позиции содержание урана достигает 260 мг/кг, в почве супераквальной позиции — 350 мг/кг и почве субаквальной позиции — 64 мг/кг. Данное содержание урана более чем в 1700 раз превышает содержание урана «фоновое» участка, но не превышает установленные контролируемые уровни.

4. В почвах элювиальной и супераквальной позиции преобладает кислоторастворимая форма урана (форма, связанная преимущественно с полуторными оксидами). Только в верхних горизонтах почвы супераквальной позиции уран связан, главным образом, с водорастворимыми карбонатами. В почвах субаквальной позиции уран находится преимущественно в подвижной форме, которая характеризуется как рН-зависимая и вымывается из профиля почвы в форме растворимых карбонатов при изменении условий среды.

5. Доля потенциально подвижной формы урана в исследуемых почвах достигает 90 %. Распределение этой формы на исследуемой территории связано с фильтрующей способностью почв, их окислительно-восстановительным режимом и рельефом данной местности.

6. Уран находится во всех почвах в наиболее распространённой фракции 1–0,05 мм, где его доля достигает 90 %, и сконцентрирован в почвах супераквальной позиции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. — М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. 2009. 100 с.
2. О радиационной безопасности населения: ФЗ от 19.07.2011 № 242 ФЗ // Южноуральская панорама от 19.07.2011. 12 с.
3. Минкина Т.И. Соединения тяжёлых металлов в почвах Нижнего Дона, их трансформация под влиянием природных и антропогенных факторов. — Ростов-на-Дону: Колосс. 2008. 24 с.
4. Евсеева Л.С., Перельман А.И. Геохимия урана в зоне гипергенеза. — М.: Государственное издательство литературы в области науки и техники. 1962. 239 с.
5. Источники, эффекты и опасность по действию атомной радиации. Доклад научного комитета ООН по действию атомной радиации Генеральной ассамблеи за 1988 г. НКДАР ООН. — М.: Мир. 1993. 728 с.
6. Пределы поступления радионуклидов для работающих с радиоактивными веществами в открытом виде. Публикация 30 МКРЗ. Часть 3. — М.: Энергоатомиздат. 1984. 540 с.
7. СП 2.6.6.1168-02. Санитарные правила обращения с радиоактивными отходами. Санитарные правила. — М.: Минздрав России. 2003. 40 с.
8. Оценка воздействия на окружающую среду от применения ядерных материалов при проведении НИР и ОКР в ФГУП «РФЯЦ — ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина» [Электронный ресурс]. Снежинск, 2012. 34 с. Режим доступа: <http://www.vniitf.ru>
9. Мамонтов В.Г., Панов Н.П., Кауричев И.С., Игнатъев Н.Н. Общее почвоведение. — М.: КолосС. 2006. 456 с.
10. Бекман Н.Н. Экологическая радиохимия и радиоэкология. Радиохимия IV. — М.: ОНТОПРИНТ. 2015. 399 с.
11. Козаченко В.П. Обоснование приёмов рационального использования, обработки и мелиорации земель сельскохозяйственного назначения Челябинской области. — Челябинск: ЧелГУ. 1999. 134 с.
12. Яшин И.М., Шилов Л.Л., Раскатов В.А. Методология и опыт изучения миграции вещества — М.: Издательство МСХА. 2001. 173 с.
13. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. — М.: Агропромиздат, 1985, 351 с.
14. Вадюнина А.Ф., Корчагина В.А. Методы определения физических свойств и грунтов. — М.: Высшая школа. 1961. 345 с.
15. Смирнова Е.А. Выщелачивание радионуклидов из почвы и частиц радионуклидных выпадений 30-километровой зоны ЧАЭС // Труды Радиового института им. В.Г. Хлопина. 2009. № 14. С. 311–317.
16. Синявский В.А. Физические, физико-химические и химические методы анализа в экологии почв. — Челябинск: ЧелГУ. 2004. С. 36.
17. Уралбеков Б.М., Сатыбалдиев Б.С., Назаркулова Ш.Н. Уран и радий в минеральных составляющих почв месторождения Курдай // В сб.: «Материалы международной конференции по аналитической химии и экологии». — Алматы: КазНУ. 2010. С. 86–93.
18. Tessier A. Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals // Analytical Chemistry. 1979. № 51, P. 844–851.
19. Марей Н.А., Зыкова А.С. Методические рекомендации по санитарному контролю за содержанием радиоактивных веществ в объектах внешней среды. — М.: Вторая типография. 1980. 336 с.

Поступила: 14.09.2015

Принята к публикации: 18.05.2016

**Н.А. Метляева, А.Ю. Бушманов, В.И. Краснюк, Е.Э. Западинская,
О.В. Щербатых, М.В. Болотнов**

**ОСОБЕННОСТИ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИИ
КАДРОВЫХ ВОЕННЫХ И ПЕРСОНАЛА ЧАЭС, УЧАСТВОВАВШИХ
В ЛИКВИДАЦИИ АВАРИИ НА ЧАЭС В 1986–1987 гг.**

**N.A. Metlyaeva, A.Yu. Bushmanov, V.I. Krasnuk, E.Eu. Zapadinskaya,
O.V. Scherbatich, M.V. Bolotnov**

**Features of Psychophysiological Adaptation of Military Personnel
and Personnel of ChNPP, Participated in the Liquidation of the
ChNPP Accident in 1986–1987**

РЕФЕРАТ

Цель: Оценка эффективности психофизиологической адаптации кадровых военных и персонала ЧАЭС, участвовавших в ликвидации последствий аварии на ЧАЭС в 1986–1987 гг.

Материал и методы: Обследовано 3 группы участников ликвидации последствий аварии на ЧАЭС, всего 10 человек. 1-ю группу составили 4 военных инженера-химика (кадровые военные, полковники). 2-я группа представлена двумя вертолетчиками и одним инженером-испытателем воздушных судов. 3-я группа – персонал ЧАЭС: физик-ядерщик, главный инженер ЧАЭС, начальник смены электроцеха № 1–2 блока, работавшие с мая 1986 г. по подготовке к пуску и эксплуатации блоков ЧАЭС. Дозы внешнего равномерного гамма-бета-облучения в 1-й группе зарегистрированы в пределах 90–376 мЗв, во 2-й – до 250 мЗв, в 3-й – 560–250 мЗв.

Результаты: Подъем уровня профиля ММИЛ выше 80 Т-баллов выявлялся у лиц 1-й группы по шкале 1Нс–95,38 Т-баллов невротической триады и свидетельствовал о перенапряжении психической адаптации, обусловленной обеспокоенностью состоянием здоровья, ипохондрическими тенденциями. Подъем показателей по шкале 2D–68,80 и 3Нс–72,4; Т-баллов указывал на напряжение психофизиологической адаптации, обусловленное тревожно-демонстративным поведением. Высокий уровень профиля ММИЛ у лиц 2-й группы указывал на перенапряжение психической адаптации, обозначенный подъемом показателей выше 80 Т-баллов как невротической (1Нс–94,50; 2D–77,60; 3Нс–80,83 Т-баллов), так и психотической триады (6Рс–75,80; 7Рс–68,30; 8Сс–81,26 Т-баллов) с относительным снижением показателя шкалы 9Ма–61,16 Т-баллов, что указывало на ипохондрические, демонстративные и тревожно-депрессивные тенденции. Профиль ММИЛ у лиц 3-й группы не выходит за пределы показателей профессиональных и популяционных нормативов и указывает на эффективную психофизиологическую адаптацию у данной группы лиц.

Выводы: Оценка психофизиологической адаптации кадровых военных и персонала ЧАЭС, указывает на перенапряжение психической адаптации у кадровых военных (полковники, вертолетчики) и эффективную адаптацию у персонала (инженеры), сочетавшего основную работу на станции с участием в ликвидации последствий аварии на ЧАЭС.

Ключевые слова: авария на Чернобыльской АЭС, ликвидаторы, психофизиологическая адаптация, мотивация, социальная адаптация, трудовая успешность, гипертоническая болезнь, ишемическая болезнь сердца

ABSTRACT

Purpose: An evaluation of the efficiency of psychophysiological adaptation of military personnel and personnel of ChNPP, participated in liquidation of consequences of the ChNPP accident in 1986–1987 years.

Material and methods: The study involved 3 groups of participants of the liquidation of the consequences of ChNPP accident, in total – 10 people. The 1st group consisted of military personnel, colonels, 4 people, including 4 military chemical engineers. The 2nd group was represented by two helicopter pilots and one test engineer of aircraft. The 3rd group was the ChNPP personnel, who worked from May 1986, in preparation for commissioning and operation of ChNPP units 1,2,3, in the face of a nuclear-physicist, chief engineer of ChNPP and the shift supervisor of the electrical shop № 1–2 unit of ChNPP. The dose of external gamma-beta radiation in the 1st group was registered in the range of 90–376 mSv, the 2nd – up to 250 mSv, the 3rd – 560–250 mSv.

Results: The rise of the profile parameters of MMPI above 80 T-points were detected in persons of the 1st group on the scale 1Hs–95,38 T-points of the neurotic triad and testified to the strain of mental adaptation, due to concerns about the health, hypochondriac tendencies. The rise of parameters on a scale of 2D–68,80 and 3Hs–72,4; T-points indicated the voltage of psychophysiological adaptation, due to anxiety-demonstrative behavior. The level of the profile of MMPI in persons of the 2nd group indicated the over voltage of mental adaptation, marked by the rise of parameters of higher than 80 T-points as neurotic (1Hs–94,50; 2D–77,60; 3Hs–80,83 T-points), and psychotic triad (6Pa–75,80; 7Pt–68,30; 8Sch–81,26 T-points) with a relative decrease of parameters of the scale 9Ma–61,16 T-points, that indicated the hypochondriac, demonstrative and anxious-depressive tendencies. The profile of MMPI in persons of the 3rd group does not extend beyond the limits of professional and population norms and indicates on the efficient physiological adaptation in this group.

Conclusions: Evaluation of psychophysiological adaptation of military personnel and personnel of ChNPP indicates the over voltage of mental adaptation of military personnel (colonels, helicopter pilots) and effective adaptation of the staff (engineers), combined the basic work in station with participation in liquidation of consequences of the ChNPP accident.

Key words: Chernobyl NPP accident, liquidators, psychophysiological adaptation, motivation, social adaptation, labor success, hypertensive disease, ischemic heart disease

Введение

Психическая адаптация является процессом установления оптимального соответствия личности и окружающей среды в ходе осуществления свойственной человеку деятельности. При этом эффективный процесс адаптации в значительной мере определяет успешность деятельности и сохранение физического и психического здоровья человека. Психическую адаптацию нельзя считать эффективной, если чрезмерное напряжение адаптационных механизмов приводит к нарушению нормального функционирования организма, к нарушению физического (или психического) здоровья [1]. Адаптационно-приспособительная деятельность организма требует затрат энергии и информации, в связи с чем можно говорить о «цене адаптации», которая определяется степенью напряжения регуляторных механизмов и величиной израсходованных функциональных резервов. Следовательно, поддержание достаточных адаптационных (приспособительных) возможностей организма, т.е. обеспечение здоровья, находится в прямой зависимости от функциональных резервов организма, от его способности мобилизовать эти резервы для поддержания и сохранения этого равновесия (гомеостаза) в изменяющихся условиях окружающей среды [2].

Перенапряжение и истощение резервов регуляторного механизма приводит к срыву адаптации, к развитию болезни. Поэтому изучение и оценка функциональных резервов занимает центральное место особенно в практике донозологических исследований [3]. Донозологические состояния, отличающиеся от заболеваний преобладанием неспецифических изменений над специфическими, встречаются у значительного количества так называемых практически здоровых людей, которые находятся вне сферы медицинского наблюдения. Обследование практически здоровых лиц показало, что около 40 % обследованных имеют напряжение механизмов адаптации, около 30 % — неудовлетворительную адаптацию и у около 10 % отмечается срыв адаптации [4–6].

Целью данной работы является оценка особенно психифизиологической адаптации кадровых военных и персонала ЧАЭС, участвовавших в ликвидации последствий аварии на ЧАЭС в 1986–1987 гг.

Материал и методы

Обследовано три группы участников ликвидации последствий аварии на ЧАЭС общей численностью 10 чел. Первую группу составили 4 кадровых военных в звании полковника в возрасте 65, 77, 73, 77 лет, из них 3 военных инженера-химика, закончивших Военно-инженерную академию им. В.В. Куйбышева (Б.А.П., Р.А.И., Р.П.П.) и один — Саратовское военное училище химических войск защиты (Т.И.И.). Вторая группа представлена двумя военными вертолетчиками (В.О.В. и Ш.В.О.) и одним инженером-испытателем

воздушных судов (И.В.А.) в возрасте 50, 57 и 75 лет соответственно. Третья группа — персонал ЧАЭС, работавший с 1 мая 1986 г. на консервации, подготовке к пуску и эксплуатации 1, 2 и 3 блоков ЧАЭС, в лице физика-ядерщика доктора технических наук, профессора (О.И.Н.), главного инженера ЧАЭС (Я.Г.Ф.) и начальника смены электроцеха № 1 и 2 блока ЧАЭС (И.Б.Н.) (возраст 78, 72, 75 лет соответственно).

Военные инженеры-химики руководили проведением мероприятий по осуществлению дозиметрического контроля внутренних войск МВД, по созданию зоны охраны вокруг ЧАЭС и оборудованию её инженерными заграждениями, руководили организацией дезактивации и пылеподавления в деревнях, школах, больницах, колодцах, строительством плотины на реке в г. Припяти. Вертолеты армейской авиации использовались для забрасывания поглощающих материалов в горячие активные зоны реакторов (В.О.В. и Ш.В.О.). Метеорологическая авиация распыляла на пути движения радиоактивного облака йодистое серебро в качестве реагента, вызывающего дождь (И.В.А.). После завершения сбросов поглощающих и нейтрализующих материалов с воздуха в жерло взорвавшегося реактора, вертолетчики выполняли различные задачи по обеспечению выполнения научных исследований ведущих специалистов, перевозке членов Правительственной комиссии, работы по орошению специальными растворами местности в целях предотвращения переносов радиоактивной пыли. Кроме того, с помощью вертолётов производились замеры уровней радиации и отбирались пробы воздуха непосредственно над реактором, а также в радиоактивных облаках. Персонал ЧАЭС под руководством О.И.Н. и Я.Г.Ф. выполнял работу по подготовке к пуску первых трех блоков и контролировал работу электроустановок на всех четырех блоках (И.Б.И.).

Дозы внешнего относительно равномерного гамма-бета-облучения в 1-й группе зарегистрированы в пределах от 90 до 376 мЗв (278, свыше 250, 90, 376 соответственно), во 2-й — до 250 мЗв, в 3-й — 370, 560, до 250 мЗв соответственно. Все пациенты прошли клинико-психифизиологическое обследование в клинике ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России (октябрь 2014 — февраль 2015 г.).

Из психосоматической патологии (табл. 1) у восьми обследованных лиц диагностируется гипертоническая болезнь II степени, у двоих — гипертоническая болезнь III степени (Р.П.П. и И.В.А.). ИБС, стенокардия напряжения, ФК II–III — у 8, у двух — постинфарктный кардиосклероз (И.В.А. и Р.П.П.) и у одного из них — последствия нарушения мозгового кровообращения от 1999 г. по ишемическому типу в левой СМА (Р.П.П.). Сахарный диабет 2 типа — у трех (Б.А.П., Р.П.П., В.О.В.). Новообразования в виде рака кожи выявлены у двух (И.В.А., Я.Г.Ф.), у одного — лейомиома нижней трети пищевода (О.И.Н.), один прооперирован по поводу рака ободочной кишки (Р.П.П.).

Таблица 1

**Психосоматические и онкологические
заболевания у участников ликвидации
последствий аварии на ЧАЭС**

№	Наименование заболевания	1-я группа	2-я группа	3-я группа
1	Гипертоническая болезнь II ст.	3	2	3
2	Гипертоническая болезнь III ст.	1	1	—
3	ИБС, стенокардия напряжения, ФК II—III	3	2	3
4	Постинфарктный кардиосклероз	1	1	—
5	Последствия нарушения мозгового кровообращения по ишемическому типу	1	—	—
6	Сахарный диабет 2 типа	2	1	—
7	Рак кожи	—	1	1
8	Лейомиома нижней трети пищевода	—	—	1
9	Рак ободочной кишки (оперированный)	1	—	—
10	Сочетанная травма в виде ушиба головного мозга с переломом костей черепа, переломом левого плеча и левой ключицы	—	1	1

Вертолётчик В.О.В. перенёс в 1994 г. сочетанную травму в виде ушиба головного мозга с переломом костей черепа, переломом левого плеча и левой ключицы, инвалид I группы. Семь пациентов имеют инвалидность II группы, три — пенсионеры по возрасту.

Задачами психофизиологического обследования являются:

- оценка профиля личности и актуального психического состояния (методика многостороннего исследования личности (ММИЛ), вариант адаптации ММРП);
- характерологическая оценка личности (методика 16-ФЛО Кеттелла);
- оценка образно-логического мышления по результатам теста Равенна;
- оценка операторской работоспособности по результатам простой и сложной сенсомоторных реакций (ПСМР, ССМР) и реакции на движущийся объект (РДО).

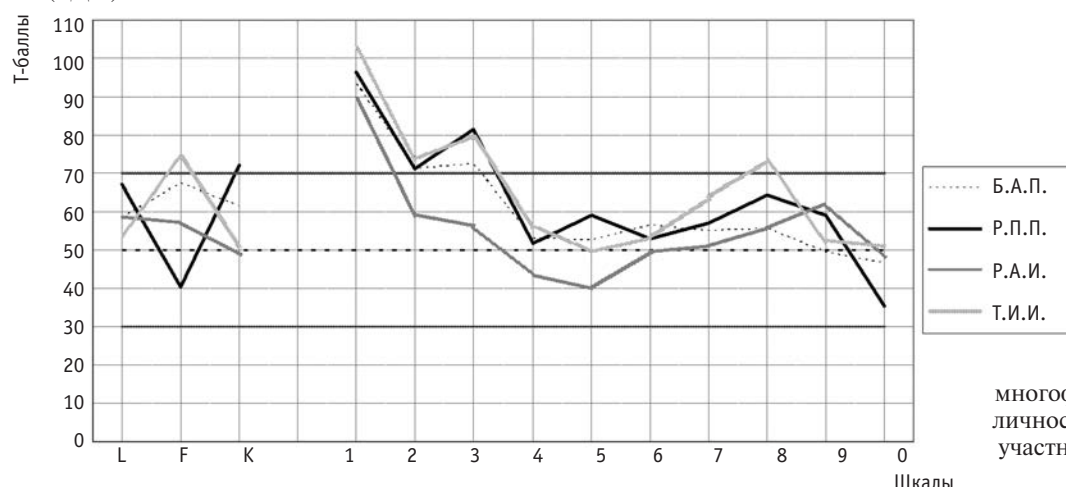


Рис. 1. Показатели многофакторного исследования личности (ММИЛ) у 1-й группы участников ликвидации аварии на ЧАЭС

Статистическая обработка показателей профиля ММИЛ трёх групп проведена с применением следующих непараметрических критериев: критерий упорядоченных альтернатив Джонкхиера—Терпстра для независимых выборок, медианный критерий для независимых выборок, критерий Краскала—Уоллиса, критерий серий Вальда—Вольфовица, U-критерий Манна—Уитни.

Результаты и обсуждение

По данным оценки результатов психофизиологического обследования с использованием метода ММИЛ можно отметить, что подъем показателей профиля ММИЛ выше 80 Т-баллов регистрировался в 1-й группе у всех пациентов (Б.А.П., Р.П.П., Р.А.И. и Т.И.И.) по шкале 1Нs до 93,5; 96,5; 89,0; 102,5 Т-баллов невротической триады соответственно, свидетельствовал о перенапряжении психической адаптации и отражал характер невротического синдрома в виде обеспокоенности состоянием здоровья, ипохондрическими тенденциями. Подъем показателей выше 70 Т-баллов по шкале 2D — (3 чел.), по шкале 3Ну (3 чел.) и по шкале 8Sch — 7 (1 чел.) Т-баллов указывал на перенапряжение и напряжение психофизиологической адаптации, обусловленное тревожно-демонстративным поведением и оригинальностью мышления в виде высокой значимости их деятельности (рис. 1).

У обследованных лиц 2-й группы (В.О.В., Ш.В.О., И.В.А.) перенапряжение психической адаптации определялось подъемом показателей выше 80 Т-баллов как невротической (1Нs — 2 чел., 2D — 1 чел., 3Ну — 1 чел.), так и психотической триады (6Pa — 1 чел., 7Pt — 1 чел., 8Sch — 2 чел.) с относительным снижением показателя шкалы 9Ma — 3 чел., что указывало на преимущественно ипохондрические, демонстративные и тревожно-депрессивные тенденции (рис. 2).

Показатели психофизиологической адаптации у персонала 3-й группы (О.И.Н., Я.Г.Ф., И.Б.И.) расположены в границах популяционной и профессиональной статистической нормы (от 70 до 30 Т-баллов), определяющие эффективную психическую

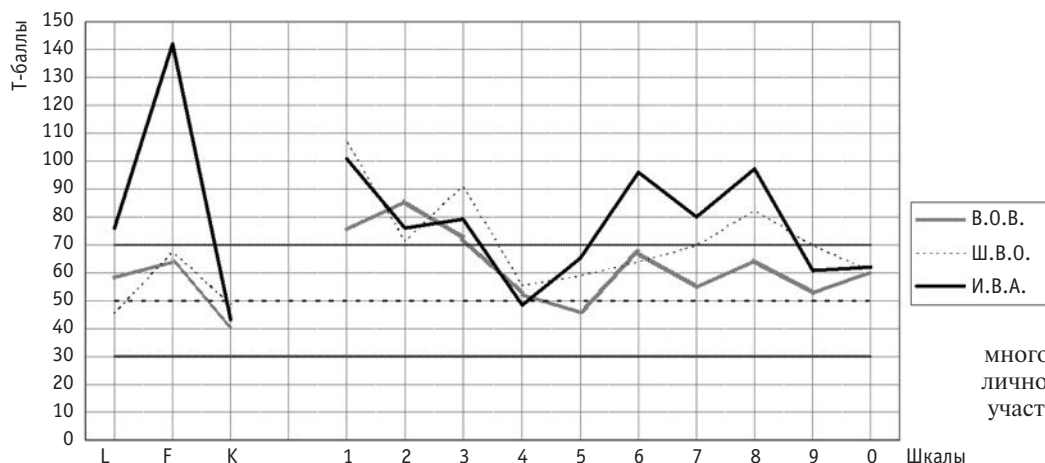


Рис. 2. Показатели многофакторного исследования личности (ММИЛ) у 2-й группы участников ликвидации аварии на ЧАЭС

адаптацию, за исключением показателя тревожности ($2D = 78.4$ Т-балла) у Я.Т.Ф., указывающего на напряжение психической адаптации (рис. 3).

Оценка усредненных показателей характерологических особенностей пациентов трех групп по данным теста Кеттелла показала (рис. 4), что эмоциональность у всех обследованных лиц выше среднего уровня ($A = 6,8-6,7-7,0$ стенов), интеллект высокий, выше у персонала 3-й группы ($B = 7,5-7,0-8,3$ стенов), у всех хорошее образно-логическое мышление (тест Равенна). Уровень показателя воспитанных форм поведения выше у лиц 2-й группы ($N = 5,0-7,3-6,0$ стенов). Тенденция к самостоятельности, самодостаточности, организованности высокая во 2-й и 3-й группе, средняя и выше средней – у лиц 1-й группы ($Q3 = 5,8-7,0-7,0$ стенов). Для всех характерен средний уровень желания работать в группе ($Q2 = 6,0-6,0-6,7$ стенов). Наряду с этим, можно отметить у лиц 1-й и 2-й группы тенденцию к снижению интегративности и стеничности поведения ($C = 3,8-3,3$ стенов) и высокую степень подчинения ($F4 = 4,5-4,7$ стенов) по сравнению с уровнем показателей у лиц 3-й группы ($C = 5,3$ и $F4 = 7,3$ стенов). Кроме того, у лиц 2-й группы регистрировались показатели, указывающие на низкий уровень доминантности, властности, склонности к лидерству

($E = 4,0$ стенов), свободы поведения ($F = 3,0$), склонности к риску ($H = 3,7$ стенов), низкая возможность для контактов ($F2 = 3,3$ стенов) и низкая толерантность к нагрузке ($F3 = 3,4$ стенов), особенно по сравнению с этими показателями у лиц 3-й группы ($E = 7,0$; $H = 7,3$; $F2 = 6,6$; $F3 = 5,2$ стенов). Выявлялся высокий уровень фрустрационной напряженности ($Q4 = 7,5$ стенов) и тревоги ($F1 = 7,2$ стенов) у лиц 1-й группы и средний – у лиц 2-й группы ($Q4 = 6,3$ и $F1 = 6,5$ стенов) по сравнению с уровнем фрустрационного напряжения и тревоги у лиц 3-й группы ($Q4 = 5,3$ и $F1 = 5,1$ стенов).

Оценка операторской работоспособности по данным сенсомоторных реакций (ПСМР, ССМР) и реакции на движущийся объект (РДО) показала, что несколько больше времени на выполнение простой сенсомоторной (3156–360–303 мс) и сложной сенсомоторной реакции (1384–1403–1274 мс) у лиц 2-й группы. Время, потраченное на выполнение РДО, одинаково для всех лиц трех групп (1007–1001–1006 мс). Точность реакции выше у лиц 2-й группы (0–2 %; 3–5 %; 0–2 %). По усредненным данным, у обследуемых лиц выявлено преобладание влияния вегетативной нервной системы над симпатической.

Оценка эффективности психофизиологической адаптации проведена по усредненным данным про-

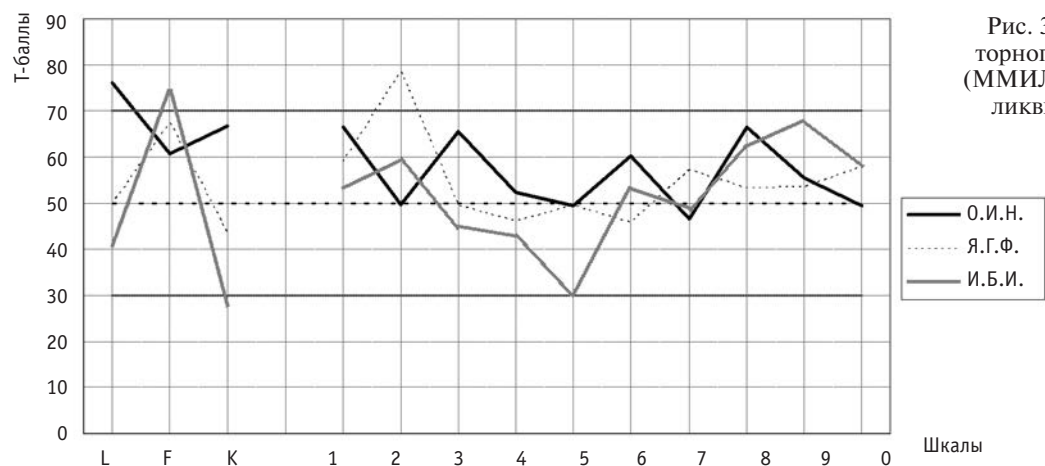
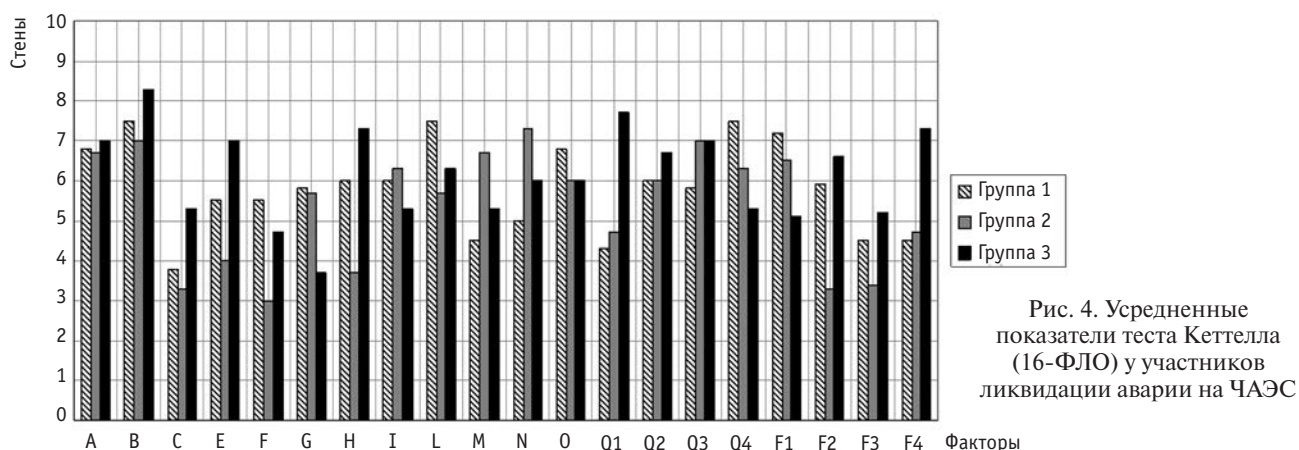


Рис. 3. Показатели многофакторного исследования личности (ММИЛ) у 3-й группы участников ликвидации аварии на ЧАЭС



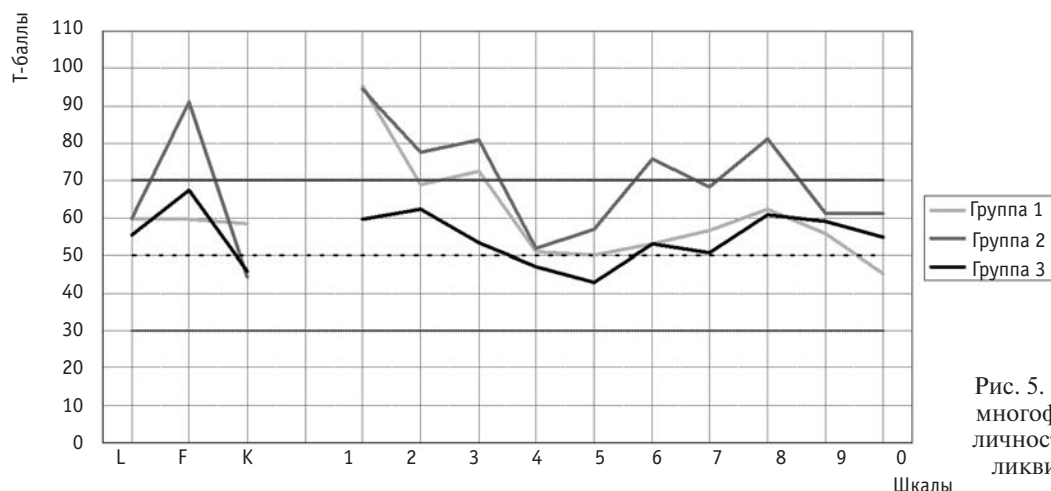
фия методики ММИЛ с учетом высоты показателя Т-баллов, который при высоте выше 80 Т-баллов указывает на перенапряжение психической адаптации, при высоте между 70 и 80 Т-баллов — на неустойчивость психической адаптации, а уровень от 70 до 30 Т-баллов — на эффективную психофизиологическую адаптацию (рис. 5).

Подъем показателей профиля ММИЛ выше 80 Т-баллов выявлялся у лиц 1-й группы по шкале 1Нs до 95,38 Т-баллов невротической триады и свидетельствовал о перенапряжении психической адаптации, обусловленной обеспокоенностью состоянием здоровья, ипохондрическими тенденциями. Уровень показателей по шкале 2D — 68,8 и по шкале 3Ну — 72,4 Т-баллов указывал на напряжение психофизиологической адаптации, обусловленной тревожно-демонстративным поведением. Подъем профиля ММИЛ у лиц 2-й группы указывал на перенапряжение психической адаптации, обусловленное подъемом показателей выше 80 Т-баллов как невротической, так и психотической триады с относительным снижением показателя шкалы 9Ма, что указывало на преимущественно ипохондрические, демонстративные и тревожно-депрессивные тенденции. Профиль ММИЛ у лиц 3-й группы не выходит за пределы професси-

ональных и популяционных нормативов и указывает на эффективную психофизиологическую адаптацию у данной группы лиц (рис. 5).

Проведенная статистическая обработка данных трех групп участников ликвидации последствий аварии на ЧАЭС с применением непараметрического критерия упорядоченных альтернатив Джонкхиера—Терпстра выявила достоверные различия по шкале Нs1 — ипохондрические тенденции ($p = 0,028$), по шкале Ну3 — демонстративность поведения ($p = 0,027$), по шкале Ра6 — ригидность поведения ($p = 0,042$), по шкале Рт7 — фиксация тревоги и ограничительного поведения ($p = 0,043$). Достоверное различие шкалы SiO — интро-и экстраверсии в социальных контактах выявлялось по медианному критерию для независимых выборок ($p = 0,026$), и критерию Краскала—Уоллиса ($p = 0,025$). Достоверность различий по шкалам Нs1 и Ну3 подтвердили критерий серий Вальда—Вольфовица, U- критерий Манна—Уитни и критерий Краскала—Уоллиса ($p = 0,017$ соответственно) при сравнении объединённых данных 1-й и 2-й групп (кадровые военные) с данными 3-й группы (персонал ЧАЭС).

Таким образом, эффективная стабильная психофизиологическая адаптация выявлялась у лиц 3-й



группы — инженеров персонала ЧАЭС, сочетавшего участие в ликвидации последствий аварии на ЧАЭС в 1986—1987 гг. с продолжением работы на ЧАЭС.

Показатели эффективной стабильной психофизиологической адаптации данной обследуемой группы не выходят за пределы профессиональных и популяционных нормативов и близки к усредненным характеристикам для соответствующей группы специалистов, что позволяет как сделать заключение о соответствии психофизиологических качеств этой группы лиц требованиям выполняемой работы по ее эффективной адаптированности в целом, так и рассматривать эффективную психофизиологическую адаптацию как критерий здоровья и показатель здорового образа жизни.

Перенапряжение психофизиологической адаптации (более 80 Т-баллов) и напряжение психофизиологической адаптации (70—80 Т-баллов) выявлялось у обследованных лиц 1-й и 2-й группы (полковники, вертолетчики).

В результате проведенного обследования установлено, что ведущими показателями, определяющими особенности психофизиологической адаптации для лиц 1-й группы, были беспокойность состоянием физического здоровья со склонностью к ипохондрическим тенденциям, тревожности и демонстративности поведения, а к преимущественно тревожно-депрессивным тенденциям — у лиц 2-й группы.

Подъемы профиля ММИЛ свыше 80 Т-баллов являются прогностически неблагоприятными. Такие подъемы свидетельствуют о наличии у обследуемых лиц выраженных акцентуаций характера, склонности к психосоматическим и психическим нарушениям. В таком случае при решении вопроса о профессиональной пригодности этих лиц к участию в ликвидации последствий радиационной аварии, можно говорить о несоответствии выраженных особенностей данной группы лиц требованиям профессионального отбора, проводимого для решения вопроса о допуске лиц к работам в контакте с ионизирующим излучением. Возникла необходимость в стационарном обследовании и лечении выявленной психосоматической и общей соматической патологии, проведении реабилитационных мероприятий с последующим решением вопроса о дальнейшей трудоспособности. Лица с напряженной психофизиологической адаптацией должны выявляться во время медицинских осмотров и психофизиологических обследований, проводимых в целях медицинского и психофизиологического отбора и периодического контроля персонала для возможной работы с источниками ионизирующего излучения и к участию в ликвидации последствий радиационных аварий и инцидентов.

Выводы

1. Оценка психофизиологической адаптации кадровых военных и персонала ЧАЭС показала эффективную адаптацию у персонала (инженеры), сочетавшего основную работу на станции с участием в ликвидации последствий аварии на ЧАЭС, и перенапряжение психической адаптации у кадровых военных (полковники, вертолетчики).

2. Перенапряжение психофизиологической адаптации у 1-й группы лиц (полковники) выявлялось на уровне невротической триады и было обусловлено преимущественно обеспокоенностью состоянием здоровья, ипохондрическими тенденциями.

3. Перенапряжение психофизиологической адаптации у 2-й группы лиц (вертолетчики) регистрировалось как на уровне невротической, так и психотической триады и было обусловлено преимущественно ипохондрическими и тревожно-депрессивными тенденциями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Березин Ф.Б. Психическая и психофизиологическая адаптация человека. — Л.: Наука. 1988. 267 с.
2. Баевский Р.М., Берсенева А.П., Бойко Е.Р. и соавт. Медико-экологические исследования в рамках космического эксперимента «Марс-500». Дозонология. Проблемы здорового образа жизни // В сб. «Материалы V международной научной конференции». 17—18 декабря 2009. — СПб. 2009. С. 181—183.
3. Берсенов Е.Ю., Черникова А.Г. Дозонологический подход к оценке функциональных резервов и его применение к анализу данных эксперимента «Марс-500» Дозонология. Проблемы здорового образа жизни // В сб. «Материалы V международной научной конференции». 17—18 декабря 2009. — СПб. 2009. С. 184—187.
4. Захарченко М.П., Щербук Ю.А., Гриненко О.А. и соавт. Формирование здорового образа жизни населения как приоритетная задача при проведении первичной профилактики заболеваний. Дозонология. Проблемы здорового образа жизни // В сб. «Материалы V международной научной конференции». 17—18 декабря 2009. — СПб. 2009. С. 269—270.
5. Ларцев М.А., Абрамова В.Н., Метляева Н.А. и соавт. Методические указания по проведению медицинских осмотров и психофизиологических обследований работников объектов использования атомной энергии. — М.: 1998. С. 30.
6. French J.R.P., Rogers W., Gobb S. Abgustament as person-enviroment // Coping and adaplation. — New York: 1974. P. 316—333.

Поступила: 14.06.2014

Принята к публикации: 18.05.2016

**В.Ю. Нугис, А.Ю. Бушманов, Е.Э. Западинская, М.Г. Козлова,
О.А. Тихонова**

ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЧЕРЕЗ 28–29 ЛЕТ ПОСЛЕ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

**V.Yu. Nugis, A.Yu. Bushmanov, H.E. Zapadinskaya, M.G. Kozlova,
O.A. Tyhonova**

Cytogenetic Studies 28–29 Years after the Accident at the Chernobyl NPP

РЕФЕРАТ

ABSTRACT

Цель: Цитогенетическое обследование спустя почти 30 лет после аварии на Чернобыльской АЭС ликвидаторов, участвовавших в различные годы в ликвидации последствий аварии, а также жителей разных загрязнённых территорий.

Материал и методы: Цитогенетические исследования были выполнены в культурах лимфоцитов периферической крови. Большинство индивидуумов обследовалось с использованием FISH- и классического методов окраски хромосом параллельно.

Результаты: В целом частоты FISH-регистрируемых транслокаций превышали фоновые уровни у 15 (из 58) человек: у 12 (из 41) ликвидаторов и у 3 (из 17) жителей загрязнённых территорий. При FISH-анализе у 9 обследованных индивидуумов были обнаружены единичные сильно aberrантные клетки, содержавшие в основном нестабильные aberrации хромосом. Присутствие или отсутствие таких клеток не было связано с наличием цитогенетически оцененной дозы. Анализ данных, полученных с помощью классического метода, показал, что индивидуально у всех обследованных лиц как общая частота перестроек хромосом, так и частота aberrаций хромосом — индикаторов радиационного воздействия — не превышали фоновых значений.

Выводы: Полученные цитогенетические данные свидетельствуют о возможности цитогенетической оценки полученных доз спустя почти 30 лет после радиационной аварии с помощью FISH-метода. Для обследованного контингента характерно обнаружение в культурах лимфоцитов периферической крови единичных сильно-aberrантных клеток, по-видимому, связанных с действием α -излучающих радионуклидов.

Ключевые слова: aberrации хромосом, периферическая кровь, культура лимфоцитов, аварийное облучение, авария на Чернобыльской АЭС

Purpose: Cytogenetic examination of liquidators who worked in different years and residents of different contaminated areas nearly 30 years after the accident at the Chernobyl nuclear power plant.

Material and methods: The cytogenetic studies were carried out with the use of peripheral blood lymphocyte cultures. The majority of individuals were examined with the help of FISH- and classical methods of staining chromosomes in parallel.

Results: In general the frequencies of FISH-detected translocations were above background levels in 15 (out of 58 people): 12 out of 41 liquidators and 3 out of 17 residents of contaminated territories. The single highly aberrant cells contained mostly unstable chromosome aberrations were detected by FISH-analysis in 9 examined individuals. The presence or absence of such cells was not associated with the availability of an estimated dose cytogenetically. The analysis of the data obtained the classical method showed that the overall frequency of chromosome rearrangements and the frequency of chromosome aberrations — indicators of radiation exposure — did not exceed the background values of the examined persons individually.

Conclusion: The obtained cytogenetic data indicate the possibility of cytogenetic dose evaluation in almost 30 years after the radiation accident with the help of FISH-method. The detection of single highly aberrant cells in peripheral blood lymphocyte cultures is characteristic for this contingent that apparently related to the action of alpha-emitting radionuclides.

Key words: chromosome aberrations, peripheral blood, lymphocytes culture, accidental irradiation, the accident at the Chernobyl NPP

Введение

Непосредственно после аварии на Чернобыльской АЭС индикация дозы по aberrациям хромосом (дицентрикам) в культурах лимфоцитов периферической крови с помощью классического метода окраски была практически единственным доступным источником информации о дозах, полученных пострадавшими лицами, причём в работе [1] обследованию подверглись в основном пациенты, у которых развилась острая лучевая болезнь различной степени тяжести. Также в ряде исследований цитогенетический анализ был использован для определения меньших величин

доз радиационного поражения у представителей различных групп ликвидаторов и жителей загрязнённых территорий (взрослые и дети) (например, [2–9]). Однако в ближайшие сроки после указанного события изучение хромосомных aberrаций было произведено лишь у относительно небольшой части людей, которые могли быть подвергнуты облучению. В дальнейшем возникла как общая необходимость оценки величины поражения более значительных контингентов, так и потребность индикации самого факта радиационного воздействия и полученной при этом дозы при прохождении межведомственных экс-

пертных советов по установлению причинной связи заболеваний, инвалидности и смерти граждан, подвергшихся воздействию радиационных факторов (приведено официальное название данных структур). Так как с течением времени уровни aberrаций хромосом нестабильного типа, к которым относятся и дисцентрики (основной индикатор радиационного поражения в ближайшие сроки после облучения), имеют тенденцию к снижению своей частоты, то для более адекватной оценки полученных доз в отдалённый период или при хроническом облучении (на загрязнённых территориях) в соответствии с методическими рекомендациями МАГАТЭ [10] разные исследователи применяли FISH-методику окрашивания хромосом [11–15].

В настоящей работе представлены результаты цитогенетического обследования спустя почти 30 лет после аварии на Чернобыльской АЭС разнородной группы лиц, в той или иной степени имевших отношение к этой ситуации, в которую вошли ликвидаторы, участвовавшие в ликвидации последствий аварии в различные годы, и жители разных загрязнённых территорий.

Материал и методы

Материалом для цитогенетических исследований служила венозная кровь лиц, предположительно облучившихся в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС. В обследованную группу вошли ликвидаторы последствий данной аварии (41 человек) и жители загрязнённых территорий (17 человек). Забор крови у различных лиц производился в общем временном интервале с октября 2014 г. по сентябрь 2015 г., т.е. примерно через 28,4–29,4 лет после аварии. Использовалось как FISH-окрашивание хромосом, так и классическая окраска препаратов хромосом для параллельного сравнения (у большинства индивидов).

Методики культивирования лимфоцитов периферической крови, приготовления препаратов хромосом и их классического и FISH-окрашивания ничем не отличались от описанных в нашей более ранней статье [16]. Для анализа транслокаций с помощью FISH-методики отбирались метафазы, где присутствовали все FISH-окрашенные части выбранных трёх пар хромосом (1, 4 и 12). При этом регистрировали все видимые перестройки с участием окрашенных и неокрашенных хромосом, хотя оценку дозы на всё тело производили только по частотам содержащимся в клетках одиночных транслокаций. Поиск метафаз и их анализ осуществлялись с помощью автоматизированной системы «Метафер 4» (MetaSystems, Германия).

Для перерасчёта обнаруженного числа транслокаций на весь геном была использована следующая формула из работы [17]:

$$F_G = F_p / [2,05 \times f_p \times (1 - f_p)], \quad (1)$$

где F_G — геномная частота транслокаций, F_p — наблюдаемая частота транслокаций с участием флуоресцентно-окрашенных хромосом, f_p — доля генома по содержанию ДНК, которую составляют флуоресцентно-окрашенные хромосомы. По данным работы [18] для хромосом 1, 4 и 12 пар эта величина составляет 0,19.

Для расчёта дозы была использована трансформированная зависимость из работы [19]. Эта трансформация потребовалась в связи с необходимостью учёта возраста обследуемых лиц, т.к. сведения, имеющиеся в научной литературе [20–22], свидетельствуют о зависимости у людей фоновой частоты FISH-регистрируемых транслокаций от их возраста. Ниже приведено полученное нами уравнение для наблюдаемой частоты транслокаций при FISH-окрашивании 1, 4 и 12 пар хромосом:

$$Y = c + 2,402 \times D + 0,516 \times D^2, \quad (2)$$

где Y — частота FISH-зарегистрированных транслокаций на 100 клеток, c — возрастной контроль, взятый из работы [22], D — доза (Зв).

Результаты и обсуждение

Результаты исследования aberrаций хромосом в культурах лимфоцитов периферической крови ликвидаторов аварии на Чернобыльской АЭС и жителей загрязнённых территорий, полученные с помощью FISH- и классической методик, представлены в табл. 1 и 2 соответственно.

В табл. 1 также даны краткие сведения об обследованных людях (включая физические дозовые характеристики) и приведены оценки полученных доз на основании обнаруженных частот FISH-транслокаций. При этом мы поступали так, как предлагается в работе [19], т.е. сначала устанавливали статистическую значимость наблюдаемого отличия частот aberrаций хромосом от их фоновых значений, а уже в случае достоверного повышения уровня повреждений хромосом у обследуемого индивида производили расчёт дозы по калибровочной кривой «доза–эффект». Для указанного сравнения использовался метод χ^2 с поправкой Йетса [23]. При этом независимо от любого числа проанализированных клеток наличие единственной aberrации, даже относящейся к группе индикаторов радиационного воздействия, не может свидетельствовать о перенесённом переоблучении и служить поводом для количественной оценки дозы [19].

Таблица 1

Результаты цитогенетического FISH-анализа культур лимфоцитов периферической крови участников ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС и жителей загрязнённых территорий

№ п/п	Ф.И.О.	Возраст, полных лет	Статус ¹	Число проанализированных клеток	Число транслокаций		Частоты aberrаций хромосом на 100 клеток							Индивидуальная оценка дозы
					Полных	Неполных	Все транслокации	Инсерции	Инверсии	Терминальные делеции	Дисцептрики	Ацентрики	Транслокации на весь геном	
1	А.И.Е.	52	ЛПА 08-09.1986 г. 135,67 сГр	759	2	0	0,26	0	0	0	0,40	0	0,82	нет отличия от контроля
2	А.И.Д.	69	Ж-ль до 1987 г.	685	1	1	0,29	0,15	0	0	0	0	0,92	нет отличия от контроля
3	А.М.М.	47	Ж-ль Брянской обл. до 1990 г.	828	3	0	0,36	0	0	0	0	0	1,14	нет отличия от контроля
4	Б.С.В.	48	ЛПА 05-06.1986 г.	860	1	0	0,12	0	0	0	0	0	0,38	нет отличия от контроля
5	Б.В.В.	61	ЛПА 11.1986–03.1987 г. 22,3 Р	1005	9	0	0,90	0	0	0,10	1,10	0,10	2,85	23 сЗв
6	Б.Н.А.	56	Ж-ль Брянской обл. до 10.1986 г.	877	4	0	0,46	0	0	0	0	0	1,46	нет отличия от контроля
7	Б.А.В.	57	ЛПА 1987 г. 26 Р	591	1	0	0,17	0	0,17	0,17	0	0	0,54	нет отличия от контроля
8	Б.Н.И.	59	ЛПА 1988 г.	929	8	0	0,86	0	0	0	0,11	0	2,73	25 сЗв
9	Г.А.А.	45	ЛПА 1989–90 гг. 1,2 сЗв	903	1	1	0,22	0	0	0,11	0	0	0,70	нет отличия от контроля
10	Г.О.В.	52	ЛПА 06–09.1986 г.	865	3	0	0,35	0	0	0	0	0	1,11	нет отличия от контроля
11	Г.Ю.В.	60	ЛПА 1987 г. 22,7 сЗв + 175 Гр ЛФТО (рак кожи века) 2014 г.	954	8	0	0,84	0	0	0	0	0	2,66	21 сЗв
12	Г.Л.Г.	75	ЛПА 1986 г.	1026	10	2	1,17	0,10	0	0	0,19	0	3,71	29 сЗв
13	Г.Р.Е.	75	ЛПА 1986 г.	528	3	0	0,57	0	0	0	0,38	0	1,81	нет отличия от контроля
14	Д.С.С.	62	ЛПА 1987 г. 12,34 Р	682	0	0	0	0	0	0	0	0	0	нет отличия от контроля
15	Д.Н.К.	79	ЛПА 05–08.1986 г. 18,6 сЗв	968	4	1	0,52	0	0	0	0	0	1,65	нет отличия от контроля
16	Е.Ю.Ф.	43	Ж-ль Брянской обл. до 07.1986 г.	872	1	0	0,11	0	0	0	0	0	0,35	нет отличия от контроля
17	Е.А.С.	44	Ж-ль Брянской обл. до 1989 г.	851	3	0	0,35	0	0	0,47	0	0	1,11	нет отличия от контроля
18	Е.С.С.	55	Ж-ль Брянской обл. до ?	961	7	0	0,73	0	0	0	0	0,10	2,31	20 сЗв
19	Е.Н.Н.	67	ЛПА 04–05.1986 г.	791	1	0	0,13	0	0	0,13	0	0	0,41	нет отличия от контроля
20	З.С.З.	67	ЛПА	932	5	0	0,54	0	0	0,11	0	0	0,35	нет отличия от контроля
21	З.А.А.	74	ЛПА 1986 г.	945	4	2	0,63	0	0	0	0	0,11	2,00	нет отличия от контроля
22	И.В.А.	76	ЛПА 1986 г.	990	14	1	1,52	0,10	0,10	0,10	0,10	0	4,82	42 сЗв
23	И.Л.М.	75	ЛПА 04–11.1986 г. 17,5 сЗв по дозиметру	1012	1	0	0,10	0	0	0,10	0,10	0,10	0,32	нет отличия от контроля
24	К.Н.Г.	67	Вертолётчик, летал над ЧАЭС в конце 1986 г.	688	11	0	1,60	0	0	0	0,15	0,29	5,07	48 сЗв
25	К.Л.К.	55	ЛПА 06.1986 г. 25,0 сЗв	966	3	0	0,31	0,41	0	0	0	0	0,98	нет отличия от контроля
26	К.Н.В.	54	Ж-ль Брянской обл. 1986 г.	603	5	0	0,83	0,17	0	0	0	0,17	2,63	24 сЗв
27	К. Е.И.	76	ЛПА 05.1986 г.	956	15	0	1,57	0	0	0	0	0	4,98	44 сЗв
28	К.В.И.	74	ЛПА 06.1986 г. ЛФТО 2008 г.	962	13	0	1,35	0	0	0	0	0	4,28	36 сЗв
29	Л.Н.В.	56	Ж-ль Брянской обл. до 1990 г.	913 ²	2	0	0,22	0	0	0	0	0	0,70	нет отличия от контроля
30	Л.Н.П.	58	Ж-ль Брянской обл. до 1990 г.	349	0	0	0	0	0	0	0	0	0	нет отличия от контроля
31	М.В.Е.	64	ЛПА 08–09.1986 г.	934 ³	8	0	0,86	0	0	0	0	0	2,73	21 сЗв
32	М.С.П.	48	Ж-ль г. Припять	886	0	0	0	0	0	0	0,11	0,11	0	нет отличия от контроля

№ п/п	Ф.И.О.	Возраст, полных лет	Статус ¹	Число проанализированных клеток	Число транслокаций		Частоты aberrаций хромосом на 100 клеток							Индивидуальная оценка дозы
					Полных	Неполных	Все транслокации	Инсерции	Инверсии	Терминальные делеции	Дицентрики	Ацентрики	Транслокации на весь геном	
33	М.А.И.	56	ЛПА 05–06.1986 г.	893 ⁴	5	0	0,56	0	0	0	0	0	1,77	нет отличия от контроля
34	М.А.С.	77	ЛПА 1986, 1987 г. 22 сЗв по дозиметру	887	5	0	0,56	0	0,11	0,11	0	0	1,77	нет отличия от контроля
35	П.В.В.	63	Ж-ль Брянской обл. до 1990 г.	885	3	0	0,34	0	0	0	0,11	0,79	1,08	нет отличия от контроля
36	П.В.М.	62	ЛПА	926 ⁵	2	0	0,22	0	0	0	0	0	0,70	нет отличия от контроля
37	П.Л.Д.	59	ЛПА 06–07.1986 г. 31 сЗв по дозиметру	448	5	0	1,12	0	0	0	0	0	3,55	34 сЗв
38	П.В.Я.	65	ЛПА 08–09.1986 г. 25,38 Р	737	2	0	0,27	0,14	0	0	0	0	0,86	нет отличия от контроля
39	П.Ю.Н.	66	ЛПА 11.1987–04.1988 г.	890 ⁶	7	0	0,79	0	0	0	0	0	2,50	19 сЗв
40	Р.О.В.	64	ЛПА 1986 г. (КБ 6)	659	0	0	0	0	0	0	0	0	0	нет отличия от контроля
41	Р.С.В.	71	ЛПА 05.1986 г.	987 ⁷	2	0	0,20	0,30	0	0	0,61	0,15	0,63	нет отличия от контроля
42	С.Ю.П.	79	ЛПА 05–06.1986 г.	1004	12	0	1,20	0	0,10	0	0	0,10	3,80	30 сЗв
43	С.А.В.	58	ЛПА 08–10.1987 г. 8,25 сЗв по дозиметру	644	4	0	0,62	0	0	0	0	0	1,97	нет отличия от контроля
44	С.Э.П.	73	ЛПА 1986–1987	937	4	1	0,53	0	0	0	0	0	1,68	нет отличия от контроля
45	С.В.А.	77	ЛПА 1986 г.	676	3	0	0,44	0	0	0	0	0	1,39	нет отличия от контроля
46	С.В.Б.	61	Ж-ль 1986–1990 г.	641	2	0	0,31	0	0	0,16	0	0,31	0,98	нет отличия от контроля
47	С.В.М.	60	Ж-ль 1986–1992 г.	856	5	0	0,58	0	0	0,12	0	0,23	1,84	нет отличия от контроля
48	С.В.П.	77	ЛПА 05.1986 г. 25 Р по дозиметру (рак 2014 г.)	955	5	1	0,63	0	0,10	0	0	0,10	2,00	нет отличия от контроля
49	Т.Н.М.	61	ЛПА 08–11.1987 г. 9,88 сЗв	784	6	0	0,77	0	0	0	0	0	2,44	нет отличия от контроля
50	Т.И.Н.	30	Ж-ль Брянской обл. до 2010 г.	748	2	0	0,27	0	0	0,13	0	0	0,86	нет отличия от контроля
51	Т.Н.Н.	34	Ж-ль Брянской обл. до 1998 г.	785	0	0	0	0	0	0,13	0	0	0	нет отличия от контроля
52	Т.О.Б.	49	ЛПА 01.05.1986 г.	1001	1	0	0,10	0	0	0,10	0	0,2	0,32	нет отличия от контроля
53	Т.М.И.	78	ЛПА 04–05.1986 г.	509	1	0	0,20	0	0	0	0	0	0,63	нет отличия от контроля
54	У.В.Г.	69	ЛПА 1987–1990 г.	997 ⁸	5	0	0,50	0	0,10	0,10	0	0	1,58	нет отличия от контроля
55	Ч.С.П.	58	ЛПА 08–11.1986 г.	979 ⁹	1	0	0,10	0	0	0	0	0	0,32	нет отличия от контроля
56	Ч.Н.И.	55	Ж-ль Гомельской обл. 12.1986 г.	755	1	0	0,13	0	0	0	0	0	0,41	нет отличия от контроля
57	Ш.В.О.	57	ЛПА 05–06.1986 г. вертолётчик	865 ¹⁰	6	0	0,69	0,23	0	0	0,12	0	2,19	18 сЗв
58	Я.Е.Н.	45	Ж-ль до 12.1986 г.	870	4	0	0,46	0,12	0	0,23	0	0,23	1,46	нет отличия от контроля

Примечания.

¹ – Сокращения: Ж-ль – житель загрязнённой территории; ЛПА – участник ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС в том или ином году (годах); ЛФТО – локальное фракционированное терапевтическое облучение в том или ином году; КБ 6 – Клиническая больница № 6.

² – В расчёт частот aberrаций хромосом не вошла 1 сильно aberrантная клетка со следующими перестройками: 3 транслокации, 1 трицентрик, 4 дицентрика, 2 центрических кольца и 3 свободных парных фрагмента.

³ – В расчёт частот aberrаций хромосом не вошла 1 сильно aberrантная клетка со следующими перестройками: 2 транслокации, 1 трицентрик, 1 свободный парный фрагмент, 1 инсерция.

⁴ – В расчёт частот aberrаций хромосом не вошли 2 сильно aberrантные клетки, содержавшие по 2 транслокации и 1 дицентрику с сопутствующим парным фрагментом.

⁵ – В расчёт частот aberrаций хромосом не вошла 1 сильно aberrантная клетка со следующими перестройками: 1 транслокация, 2 дицентрика, 1 ассоциированный фрагмент и 2 идентичных (ассоциированных?) фрагмента.

⁶ – В расчёт частот aberrаций хромосом не вошла 1 сильно aberrантная клетка со следующими перестройками: 1 трицентрик, 2 дицентрика и 4 свободных фрагмента.

⁷ – В число этих клеток также вошли 3 метафазы со следующими aberrациями: 1) 2 дицентрика, 2 парных (ассоциированных) фрагмента, 1 инсерция; 2) 1 дицентрик, 1 парный (ассоциированный) фрагмент, 1 инсерция; 3) 1 дицентрик, 2 идентичных (ассоциированных?) фрагмента.

⁸ – В расчёт частот aberrаций хромосом не вошла 1 сильно aberrантная клетка со следующими перестройками: 3 дицентрика, 3 свободных фрагмента, 1 инсерция, 1 хроматидный обмен.

⁹ – В расчёт частот aberrаций хромосом не вошла 1 сильно aberrантная клетка со следующими перестройками: 2 транслокации, 1 дицентрик, 4 свободных фрагмента, 2 инсерции.

¹⁰ – В расчёт частот aberrаций хромосом не вошла 1 aberrантная клетка со следующими перестройками: 1 транслокация, 1 дицентрик с сопутствующим парным фрагментом.

Таблица 2

Результаты классического цитогенетического анализа культур лимфоцитов периферической крови участников ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС и жителей загрязнённых территорий

№ п/п	Ф.И.О.	Число проанализированных клеток	Аберрации хромосомного типа (на 100 клеток)							Аберрации хроматидного типа (на 100 клеток)			
			Процент aberrантных клеток	Парные фрагменты	Дицентрики	Центрические кольца	Ацентрические кольца	Атипичные хромосомы	Всего	Процент aberrантных клеток	Хроматидные фрагменты	Хроматидные обмены	Всего
1	А.И.Е.	497	0,40	0,40	0	0	0	0	0,40	0,20	0,20	0	0,20
2	А.И.Д.	228	0,44	0,44	0	0	0	0	0,44	0	0	0	0
3	А.М.М.	322	0,31	0,31	0	0	0	0	0,31	0,31	0,31	0	0,31
4	Б.С.В.	541	0,74	0,74	0	0	0	0	0,74	0,37	0,37	0	0,37
5	Б.В.В.	316	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	Б.Н.А.	374	1,07	1,07	0	0	0	0	1,07	0	0	0	0
7	Б.А.В.	381	0,52	1,05	0	0	0	0	1,05	0,52	0,52	0	0,52
8	Б.Н.И.	294	0,68	4,08	0	0	0	0,34	4,42	0	0	0	0
9	Г.А.А.	533	0,19	0,19	0	0	0	0	0,19	0,38	0,38	0	0,38
10	Г.О.В.	329	0,3	0,30	0	0	0	0	0,30	0,91	0,91	0	0,91
11	Г.Ю.В.	120	1,67	2,50	0	0	0	0	2,50	1,67	0,83	0,83	1,67
12	Г.Л.Г.	476	1,68	2,52	0	0	0	0	2,52	0	0	0	0
13	Г.Р.Е.	417	0,96	0,72	0	0	0	0,24	0,96	0,24	0	0,24	0,24
14	Д.С.С.	437	0,69	0,92	0	0	0	0	0,92	0,23	0,23	0	0,23
15	Д.Н.К.	373	0,27	0,27	0	0	0	0	0,27	0,27	0,27	0	0,27
16	Е.Ю.Ф.	425	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	Е.А.С.	97	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	Е.С.С.	257	0,78	0,39	0	0,39	0	0	0,78	0	0	0	0
19	Е.Н.Н.	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20	З.С.З.	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
21	З.А.А.	446	0,22	0,22	0	0	0	0	0,22	0,22	0,22	0	0,22
22	И.В.А.	463	0,43	0,43	0	0	0	0,22	0,65	0,65	0,62	0	0,65
23	И.Л.М.	425	0,24	0,24	0	0	0	0	0,24	0	0	0	0
24	К.Н.Г.	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
25	К.Л.К.	480	1,67	1,25	0,21	0	0	0,42	1,88	0,62	0,62	0	0,62
26	К.Н.В.	349	0,57	0,29	0	0,29	0	0	0,57	0,29	0,29	0	0,29
27	К. Е.И.	481	0,21	0,21	0	0	0	0	0,21	0,62	0,62	0	0,62
28	К.В.И.	409	0,49	0	0,245	0	0	0,245	0,49	0	0	0	0
29	Л.Н.В.	220	0,45	0,45	0	0	0	0	0,45	0,45	0,45	0	0,45
30	Л.Н.П.	79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	М.В.Е.	445	0,45	0,225	0	0	0	0,225	0,45	0,45	0,45	0	0,45
32	М.С.П.	407	1,23	0,98	0,25	0	0	0	1,23	1,23	1,23	0	1,23
33	М.А.И.	463	0,22	0,22	0	0	0	0	0,22	0	0	0	0
34	М.А.С.	293	0,34	0,68	0	0	0	0	0,68	0,34	0,34	0	0,34
35	П.В.В.	345	0,29	0,29	0	0	0	0	0,29	0	0	0	0
36	П.В.М.	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
37	П.Л.Д.	139	0,72	0	0	0	0	0,72	0,72	0	0	0	0
38	П.В.Я.	337	0,59	0,59	0	0	0	0	0,59	0,89	0,89	0	0,89
39	П.Ю.Н.	382	0,26	0,26	0	0	0	0	0,23	0,26	0,26	0	0,26
40	Р.О.В.	376	0,53	1,33	0	0	0	0	1,33	0	0	0	0
41	Р.С.В.	578	0,52	0,52	0	0	0	0	0,52	0,69	0,69	0	0,69

№ п/п	Ф.И.О.	Число проанализированных клеток	Аберрации хромосомного типа (на 100 клеток)							Аберрации хроматидного типа (на 100 клеток)			
			Процент аберрантных клеток	Парные фрагменты	Дицентрики	Центрические кольца	Ацентрические кольца	Атипичные хромосомы	Всего	Процент аберрантных клеток	Хроматидные фрагменты	Хроматидные обмены	Всего
42	С.Ю.П.	400	0	0	0	0	0	0	0	0,75	0,75	0	0,75
43	С.А.В.	389	0,26	0	0	0	0	0,26	0,26	0	0	0	0
44	С.Э.П.	347	1,15	1,15	0	0	0	0	1,15	0	0	0	0
45	С.В.А.	224	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
46	С.В.Б.	338	0	0	0	0	0	0	0	0,59	0,59	0	0,59
47	С.В.М.	168	0	0	0	0	0	0	0	0,60	0,60	0	0,60
48	С.В.П.	425	0,47	0,235	0	0,235	0	0	0,47	0,235	0,235	0	0,235
49	Т.Н.М.	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
50	Т.И.Н.	195	1,03	1,03	0	0	0	0	1,03	0,51	0,51	0	0,51
51	Т.Н.Н.	249	0,40	0	0	0	0	0,40	0,40	0	0	0	0
52	Т.О.Б.	537	0,56	0,56	0	0	0	0	0,56	0	0	0	0
53	Т.М.И.	517	0,39	0,19	0	0	0	0,19	0,39	0	0	0	0
54	У.В.Г.	517	0,19	0	0	0	0	0,19	0,19	0,58	0,58	0	0,58
55	Ч.С.П.	464	0,43	0,43	0	0	0	0	0,43	0,65	0,65	0	0,65
56	Ч.Н.И.	205	0,98	0,49	0	0	0	0,49	0,98	0	0	0	0
57	Ш.В.О.	383	0,52	0,62	0	0	0	0	0,52	0,78	0,78	0	0,78
58	Я.Е.Н.	506	0	0	0	0	0	0	0	0,20	0,20	0	0,20

В целом частоты FISH-регистрируемых транслокаций превышали фоновые уровни у 15 (из 58) человек: у 12 (из 41) ликвидаторов и у 3 (из 17) жителей загрязнённых территорий. Эти данные не позволили выявить существенного различия между обеими группами по числу лиц с цитогенетически оцененной дозой ($p = 0,178$, точный критерий Фишера). Дозы у ликвидаторов и жителей варьировали от 180 до 480 и от 200 до 240 мЗв соответственно.

В настоящей работе в качестве зависимых от возраста фоновых значений приведены данные, представленные в работе [22], и просуммированы результаты, полученные в разных лабораториях, как и в статье [21]. В целом наблюдаемые в этих двух работах средние возрастные частоты FISH-регистрируемых транслокаций достаточно близки друг к другу, отсутствует их зависимость от пола, но если в работе [21] отмечается более высокая частота транслокаций у курящих людей, то в статье [22] это обстоятельство не было выявлено.

Наиболее последовательно выполненным изучением возрастной зависимости частоты FISH-транслокаций, выполненным в нашей стране, является, по-видимому, исследование [20]. В нём в целом были обнаружены более высокие частоты стабильных перестроек хромосом по сравнению с упомянутыми выше статьями [21, 22], особенно в наиболее старых возрастных группах. Единственное объяснение, которое мы можем предложить, — это возможное использование терапевтического воздействия. Действительно, ещё в 1976 г. J.R.K.Savage [24] указывал на возможность трансформации при делении клеток изначально хроматидных аберраций

(обменов) в перестройки, выглядящие как аберрации хромосомного типа (дицентрики, транслокации). Поэтому, с нашей точки зрения, контрольные уровни FISH-транслокаций отражают не только фоновое облучение, доза от которого накапливается со временем, но и другие виды внешнесредовых воздействий (химическое, вирусное), что и приводит к увеличению с возрастом не только средней частоты транслокаций, но и соответствующей ей дисперсии, т.к. люди могут подвергаться в течение их жизни существенно разным влияниям. Наличие существенного размаха колебаний частот транслокаций у индивидуумов одного возраста порождает некоторую неопределённость при осуществлении индикации дозы сверхфоновое переоблучения с помощью FISH-метода.

Также отметим следующее обстоятельство. При ретроспективной оценке дозы неявно исходят из того, что скорость пролиферации неаберрантных лимфоцитов и лимфоцитов только с транслокациями примерно одинакова. Однако возможны случаи образования (непатологических) клонов с какой-либо определённой FISH-выявляемой транслокацией [25]. В этой ситуации необходимо принимать в расчёт только одну клетку из данной линии, а остальные игнорировать при оценке дозы.

В примечаниях к табл. 1 отмечены единичные сильно аберрантные клетки, которые были обнаружены при FISH-анализе у 9 обследованных индивидуумов и содержали в основном нестабильные аберрации хромосом. Скорее всего, их появление связано с действием инкорпорированных α -излучающих радионуклидов. При этом присутствие или отсутствие таких клеток не было связано с наличием цитогене-

тически оцененной дозы ($p = 0,241$, точный критерий Фишера). Таким образом, хотя присутствие сильно-аберрантных клеток явно указывает на наличие радиационного поражения, но как трансформировать эти находки в дозовые параметры, остаётся непонятным.

У 15 человек имелись дозовые оценки, выполненные расчётным методом или определённые по показаниям дозиметров. Сразу отметим, что явно не соответствующим истине является физическая оценка у индивидуума № 1: приписываемая доза равна 1356,7 мГр, тогда как частота транслокаций не превышала фоновых значений. Также некоторые оценки даны как экспозиционные дозы в воздухе (в Р), а другие представлены в виде эквивалентной поглощённой дозы (в мЗв). Переход от одной размерности к другой всегда спорен. Однако считается [26], что при экспозиционной дозе редкоизирующего излучения в воздухе в 1 Р энергия, поглощённая в воздухе, составляет 88 эрг/г ($0,0088 \text{ Дж/кг} = 0,0088 \text{ Гр} = 8,8 \text{ мГр}$), тогда как в мягких тканях животных — 92–97 эрг/г (9,2–9,7 мГр, в среднем 9,6 мГр) (после того, как процессы испускания и поглощения вторичных электронов придут в равновесие). С нашей точки зрения, в рассматриваемых диапазонах «малых» доз этими «тонкостями» можно пренебречь и численно уподобить величины экспозиционных доз, выраженные в рентгенах, поглощённым дозам, выраженным в милливертах. Таким образом, при физических оценках доз в диапазоне 12–186 мЗв (6 человек) частоты FISH-транслокаций не отличались от возрастного контроля. Только в диапазоне 220–310 мЗв у 3 из 8 индивидуумов цитогенетическая оценка дозы оказалась значимой (от 210 до 340 мЗв) и близкой к физической оценке (см. табл. 1).

Необходимо заметить, что представленные здесь физические оценки доз не являются истиной в последней инстанции: некоторые из них основаны на расчётах, включающих ряд предположений, другие же отражают только локальную дозу на дозиметр. Полученные данные также позволяют нам не согласиться с мнением, выраженным в работе [27], что порог чувствительности индивидуальной оценки дозы с помощью FISH-метода составляет примерно 0,5 Гр накопленной дозы. Это значение было получено не прямыми измерениями, а с помощью определённых рассуждений. С нашей точки зрения, порог чувствительности данной биодозиметрической оценки близок к 20–250 мЗв.

Анализ данных, полученных с помощью классического метода, показал, что индивидуально у всех обследованных лиц как общая частота перестроек хромосом, так и частота aberrаций хромосом — индикаторов радиационного воздействия, не превышали фоновых значений [28].

Учитывая неоднородность всей группы обследованных людей, мы посчитали нецелесообразным рассчитывать какие-либо общие статистические показатели, ограничившись индивидуальным сравнением обнаруженных частот aberrаций хромосом с их фоновыми значениями.

Выводы

1. Через почти 30 лет после аварии на Чернобыльской АЭС возможна оценка дозы на всё тело у людей, вовлечённых в данную ситуацию, с помощью FISH-метода окраски хромосом.

2. У того же контингента с помощью классического метода окраски хромосом не удалось выявить существенного отличия частот aberrаций хромосом от их фоновых значений.

3. Для ликвидаторов аварии на Чернобыльской АЭС и жителей загрязнённых территорий характерно обнаружение в культурах лимфоцитов периферической крови единичных сильно-аберрантных клеток, по-видимому связанных с действием α -излучающих радионуклидов, дозиметрическая трактовка которых остаётся неясной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пяткин Е.К., Нугис В.Ю., Чирков А.А. Оценка поглощенной дозы по результатам цитогенетических исследований культур лимфоцитов у пострадавших при аварии на Чернобыльской АЭС // Мед. радиол. 1989. Т. 34. № 6. С. 52–57.
2. Бочков Н.П., Катосова Л.Д., Сапачева В.А. и соавт. Цитогенетический анализ лимфоцитов периферической крови у проживающих в загрязнённых радионуклидами районах Калужской области // Мед. радиол. 1991. Т. 36. № 1. С. 50–52.
3. Воробцова И.Е., Колюбаева С.Н., Воробьева М.В. и соавт. Цитогенетическая характеристика детей, пострадавших в результате аварии на Чернобыльской АЭС // Мед. радиол. 1993. Т. 38. № 10. С. 25–28.
4. Воробцова И.Е., Михельсон В.М., Воробьева М.В. и соавт. Результаты цитогенетического обследования ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС, проведенного в разные годы // Радиационная биология. Радиоэкология. 1994. Т. 34. № 6. С. 798–803.
5. Домрачева Е.В., Клевезаль Г.А., Нечай В.В. и соавт. Индивидуальные дозы облучения, определённые двумя методами биологической дозиметрии у жителей Чернобыльского региона и участников ликвидации аварии // Гематол. и трансфузиол. 1991. Т. 36. № 12. С. 18–20.
6. Зайнуллин В.Г., Бородкин П.А., Черняк С.И. и соавт. Результаты цитогенетического обследования лиц, принимавших участие в ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС // Радиобиология. 1992. Т. 32. № 5. С. 668–672.

7. Пилинская М.А., Шеметун А.М., Дыбский С.С. и соавт. Цитогенетический эффект в лимфоцитах периферической крови как индикатор действия на человека факторов Чернобыльской аварии // Радиобиология. 1992. Т. 32. № 6. С. 632–639.
8. Хандогина Е.К., Агейкин В.А., Зверева С.В. и соавт. Цитогенетическое обследование различных групп детей, проживающих в районах Брянской области, загрязненных в результате Чернобыльской аварии // Радиационная биология. Радиозэкология. 1995. Т. 35. № 5. С. 618–625.
9. Хвостунов И.К., Севаньяев А.В., Михайлова Г.Ф., и соавт. Роль цитогенетического обследования для оценки последствий неконтролируемого воздействия радиации на человека // В сб.: «Медицинские радиологические последствия Чернобыля: прогноз и фактические данные спустя 30 лет». Под ред. В.К. Иванова, А.Д. Каприна. — М.: ГЕОС. 2015. С. 93–119.
10. Cytogenetic Dosimetry: Applications in Preparedness for and Response to Radiation Emergencies. — Vienna: IAEA. 2011. 245 pp.
11. Воробцова И.Е., Богомазова А.Н. Стабильные хромосомные aberrации в лимфоцитах периферической крови лиц, пострадавших в результате аварии на ЧАЭС // Радиационная биология. Радиозэкология. 1995. Т. 35. № 5. С. 636–640.
12. Севаньяев А.В., Михайлова Г.Ф., Потетня О.И. и соавт. Результаты динамического цитогенетического наблюдения за детьми и подростками, проживающими на радиоактивно-загрязненных территориях после Чернобыльской аварии // Радиационная биология. Радиозэкология. 2005. Т. 45. № 1. С. 5–15.
13. Снигирева Г.П., Шевченко В.А., Новицкая Н.Н. Использование FISH метода для реконструкции поглощенных доз, полученных участниками ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная биология. Радиозэкология. 1995. Т. 35. № 5. С. 654–661.
14. Шевченко В.А., Снигирева Г.П. Значимость цитогенетического обследования для оценки последствий Чернобыльской катастрофы // Радиационная биология. Радиозэкология. 2006. Т. 46. № 2. С. 133–139.
15. Maznyk N.A., Vinnikov V.A. Retrospective cytogenetic biodosimetry using fluorescence in situ hybridization (FISH) technique in persons exposed to radiation due to the Chornobyl accident // Український радіологічний журнал. 2005. Т. 13. № 1. С. 66–72.
16. Нугис В.Ю., Козлова М.Г. Цитогенетические исследования в двух ситуациях обнаружения неконтролируемых источников ионизирующего излучения // Мед. радиол. и радиац. безопасность. 2015. Т. 60. № 2. С. 37–46.
17. Lucas J.N., Awa A., Straume T. et al. Rapid translocation frequency analysis in human decades after exposure to ionizing radiation // Int. J. Radiat. Biol. 1992. V. 62. № 1. P. 53–63.
18. Mendelsohn M.L., Mayall B.H., Bogart E. et al. DNA content and DNA-based centromeric index of 24 human chromosomes // Science. 1973. V. 179. № 78. P. 1126–1129.
19. Снигирева Г.П., Богомазова А.Н., Новицкая Н.Н. и соавт. Биологическая индикация радиационного воздействия на организм человека с использованием цитогенетических методов. Медицинская технология №ФС-2007/015-У. М.: 2007. 29 с.
20. Воробцова И.Е., Семенов А.В. Возрастная динамика частоты спонтанных и индуцированных in vitro хромосомных aberrаций в лимфоцитах крови человека при естественном и лучевом старении // Радиационная биология. Радиозэкология. 2010. Т. 50. № 3. С. 253–258.
21. Sigurdson A.J., Ha M., Hauptmann M. et al. International study of factors affecting human chromosome translocations // Mutat. Res. 2008. V. 652. № 2. P. 112–121.
22. Whitehouse C.A., Edwards A.A., Tawn E.J. et al. Translocation yields in peripheral blood lymphocytes from control populations // Int. J. Radiat. Biol. 2005. Vol. 81. № 2. P. 139–145.
23. Бакаева О.А. Необходимость использования поправки Йетса в критерии χ^2 проверки независимости качественных переменных // Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2012»: Сб. науч. трудов SWorld Международной научно-практической конференции. — Одесса: КУПРИЕНКО. 2012. Т. 2. Вып. 3. С. 82–83.
24. Savage J.K. Classification and relationships of induced chromosomal structural changes // J. Medical Genetic. 1976. Vol. 13. № 2. P. 103–122.
25. Salassidis K., Georgiadou-Schumacher V., Braselmann H. et al. Chromosome painting in highly irradiated Chernobyl victims: a follow-up study to evaluate the stability of symmetrical translocations and the influence of clonal aberrations for retrospective dose estimation // Int. J. Radiat. Biol. 1995. Vol. 68. № 3. P. 257–262.
26. Кудряшов Ю.Б. Радиационная биофизика (ионизирующие излучения). Под ред. В.К. Мазурика, М.Ф. Ломанова. — М.: ФИЗМАТЛИТ. 2004. 448 с.
27. Edwards A.A., Lindholm C., Darroudi F. et al. Review of translocations detected by FISH for retrospective biological dosimetry application // Radiat. Protect. Dosim. 2005. V. 113. № 4. P. 396–402.
28. Севаньяев А.В., Хвостунов И.К., Снигирева Г.П. и соавт. Сравнительный анализ результатов цитогенетических обследований контрольных групп лиц в различных отечественных лабораториях // Радиационная биология. Радиозэкология. 2013. Т. 53. № 1. С. 5–24.

Поступила: 19.03.2016

Принята к публикации: 18.05.2016

Ю.Е. Квачева

«ГОРЯЧИЕ» ЧАСТИЦЫ В ЛЕГКИХ УЧАСТНИКОВ ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС И ЖИТЕЛЕЙ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Yu.E. Kvacheva

Chernobyl Hot Particles in Lungs of the Participants of the Post-Accident Clean-up Operation and Residents of the Contaminated Regions

РЕФЕРАТ

ABSTRACT

Цель: Изучить морфологическую специфику распределения «горячих» частиц (ГЧ) в легких участников ликвидации последствий аварии (ЛПА) на Чернобыльской АЭС и жителей загрязненных территорий.

Материал и методы: Разработана методика поиска и оценки содержания ГЧ в легких человека, с помощью которой исследованы материалы аутопсий участников ЛПА 1986–1988 гг., умерших в течение трех поставарийных лет (12); жителей загрязненных территорий, скончавшихся от случайных причин в 1989–1992 гг. (170); непосредственных свидетелей аварии (27), погибших от острой лучевой болезни (ОЛБ).

Результаты и заключение: Наличие ГЧ в легких обнаруживалось в подавляющем большинстве случаев (24/27; 88 %), составивших группу непосредственных свидетелей аварии, погибших от ОЛБ. По типу излучателей регистрируемые при световой микроскопии гисторадиоавтографов ГЧ были представлены смешанными (альфа-/бета-излучающими) и чистыми (бета-излучающими) ГЧ и визуализировались в легочных макрофагах (интрацеллюлярно), располагавшихся преимущественно в просветах бронхиол и альвеол, а также на поверхности межальвеолярных перегородок (интралюминальная локализация). Из 12 участников ЛПА ГЧ были обнаружены у одного (1/12; 8,3 %), умершего в 1990 г. от рака легких. Морфологическая специфика их распределения была аналогичной представленной выше (интрацеллюлярная + интралюминальная локализация ГЧ). Из 170 жителей загрязненных районов Белоруссии и Украины, умерших в 1989–1992 гг. от случайных причин (острая алкогольная интоксикация, транспортная травма, суицид и др.), ГЧ были обнаружены в легких 3 человек (3/170; 1,8 %). Зарегистрированные в этих наблюдениях ГЧ были немногочисленными и, в отличие от упомянутых выше наблюдений первых двух групп, визуализировались в макрофагах, располагавшихся не в просветах альвеол, а в фиброзной ткани по ходу сосудов и бронхов (интрамуральная локализация). При этом во всех трех случаях имела место фоновая патология органов системы дыхания, что свидетельствовало о функциональной недостаточности (дефицитности) механизмов самоочищения легких.

Ключевые слова: авария на Чернобыльской АЭС, «горячие» частицы, легкие человека, ингаляционный путь поступления, аутопсия

Purpose: To investigate the morphological specificity of hot particles (HP) retention in the lungs of participants of liquidation of the consequences of the accident at the Chernobyl nuclear power plant and residents of the contaminated territories.

Material and methods: The lungs obtained after the standard manner were examined in total using an elaborated technique based on auto- and histoautoradiography of autopsy materials. Three distinct groups of patients were studied: 12 persons who participated in post-accident clean-up operation (1986–1988) and died 3 years later after the accident; 170 residents of the contaminated regions, who died from casual causes in 1989–1992; and the immediate witnesses of the accident (27) who dying from the acute radiation sickness (ARS).

Results and conclusion: Chernobyl HP were observed in most of patients (24/27; 88 %) died of ARS. These particles presented as mixed alpha-/beta- and pure beta-emitters were seen in pulmonary macrophages (i.e. intracellularly), located predominantly in the bronchioles and alveoli, as well as on the surfaces of alveolar septa (intraluminal localization). Only one of 12 participants of the post-accident clean-up operation had HP in his lungs (1/12; 8.3 %). Morphological specificity of HP retention was similar to the mentioned above (intracellular + intraluminal localization). Three out of 170 (3/170; 1.8 %) residents of the Ukrainian and Belorussian regions contaminated by radionuclides, died in 1989–1992 from accidental causes (acute alcohol intoxication, transport injury, suicide, etc.), were shown to have HP. These particles were few in number and, unlike the above presented groups, were visualized in macrophages, located in fibrous tissue along the vessels and bronchi (intramural localization). In addition, all three cases were found to be accompanied by lung pathology indicative of pulmonary self-clearance deficiency.

Key words: Chernobyl NPP disaster, hot particles, human lungs, inhalation retention, autopsy

Введение

Под термином «горячие» частицы (ГЧ) понимают радиоактивные аэрозоли с относительно высокой удельной активностью. При аварии на Чернобыльской АЭС они образовались в результате теплового взрыва четвертого энергоблока и выброса в атмосферу значительного количества диспергированного реакторного топлива. Сообщалось о том,

что воздействию аэрозоля чернобыльских ГЧ подверглись не менее 65 % из 1500 работников станции, ставших непосредственными свидетелями аварии 26 апреля 1986 г. [1].

Хотя зарождение проблемы ГЧ относится к середине 1950-х гг., до настоящего времени все занимающиеся этим вопросом исследователи существенно расходятся в оценке степени их опасности для чело-

Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И.Бурназяна ФМБА России, Москва. E-mail: fmbsc-fmba@bk.ru.

A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of FMBA, Moscow, Russia. E-mail: fmbsc-fmba@bk.ru.

века. В отношении ингалированных ГЧ существуют две крайние точки зрения — от полного отрицания какой-либо патологической значимости ввиду того, что они «практически не попадают в органы дыхания» [2], до явного преувеличения потенциальных биологических эффектов. В последнем случае, исходя чаще всего из теоретических расчетов, полагают, что в непосредственной близости от такой частицы величина дозовой нагрузки может быть настолько высока, что все клетки из ближайшего микроокружения погибнут [3]. Это повлечет за собой грубую деструкцию, или буквально «выжигание», участков легочной ткани в радиусе действия ГЧ, тогда как клеточные элементы легких, отстоящие от ГЧ, полагаются обреченными неопластической трансформации [4, 5]. На эти вопросы нет однозначного ответа и в Публикациях МКРЗ, посвященных биологическим эффектам ингалированных радионуклидов [6].

Из вышесказанного следует, что до настоящего времени остается не вполне ясным, задерживаются ли ГЧ в легких людей и, если да, насколько продолжительно их пребывание, а также какова морфологическая специфика их распределения и взаиморасположения с тканевыми и клеточными компонентами воздухоносных и респираторных отделов органа дыхания человека. Это и стало предметом настоящего исследования.

Материал и методы

Существующие в настоящее время методики поиска ГЧ в легких основаны главным образом на радиометрических и радиохимических исследованиях, что исключает возможность изучения их распределения и взаиморасположения с гистоструктурами органа и не позволяет оценивать микрораспределение дозовых нагрузок и возможные биологические эффекты, связанные с ними [7]. Именно этими обстоятельствами была продиктована необходимость создания собственной методики, разработанной в лаборатории патологической морфологии радиационных поражений ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России. При этом исходили из следующих основных моментов.

Во-первых, принимали во внимание, что число ГЧ в легких людей при отсутствии фоновой патологии органов дыхания и наличии эффективной функции самоочищения будет невелико, что объективным образом может затруднять их поиск и идентификацию. Во-вторых, исходили из факта, что точная топография распределения ГЧ в легких остается неизвестной. Экстраполяция результатов эксперимента с лабораторных животных на человека существенным образом затруднена в силу принципиальных гистоморфологических различий [8, 9]. В то же время,

предпринятые ранее клинко-анатомические исследования связаны с изучением отдельных фрагментов легких, отбираемых, как правило, из нижних долей [10]. Однако общепризнанное положение о наибольшей вентиляции нижних (базальных) отделов органа дыхания, и, как следствие, преимущественного поступления в них горячих частиц, отнюдь не исключает возможности попадания последних в среднюю и верхние доли. В этой связи представлялось целесообразным исследовать отбираемые при аутопсии легкие тотально. Наконец, в-третьих, неотъемлемым требованием к разрабатываемой методике явилось обязательное обеспечение сохранности секционного материала для гистологической оценки.

Для стандартизации исследований был утвержден специальный регламент, согласно которому легочный комплекс отбирали целиком. Фиксацию осуществляли в 10 %-м растворе нейтрального формалина. При наличии отека или резкого полнокровия органа производили поверхностные надрезы в параллельных плоскостях для лучшего пропитывания фиксирующей жидкостью. Каждый случай сопровождали унифицированной формой документального сопровождения с указанием паспортных данных, места проживания, места работы и характера выполняемых рабочих операций в момент аварии и после нее, сведений об участии в ликвидации последствий аварии (ЛПА), клинического и патолого-анатомического диагнозов.

Методика поиска и идентификации ГЧ предусматривала следующие этапы исследования.

Этап 1. Доли легкого после фиксации в формалине по вертикальной оси разрезали на пластины (анатомические макросрезы) толщиной не более 10 мм, которые маркировали и герметично запаивали в полиэтиленовую пленку со стандартной толщиной (0,5 мм). Данная процедура предотвращала высыхание легочной ткани и хорошо сохраняла ее для дальнейшей проводки.

Этап 2. Для отбора легочных макросрезов, содержащих радиоактивность, их помещали между двумя листами радиографической медицинской пленки (РМ-1, «Тасма») или фотопластинами для ядерных исследований, обеспечивая плотный контакт между поверхностями пленки (фотопластин) и исследуемых объектов, исключая воздушные зазоры, но избегая излишне плотного давления. Продолжительность экспонирования составляла 30 сут. Выполнение данного этапа позволяло автордиографически выявить радиоактивность и определить характер ее распределения (диффузный или локальный).

Этап 3. Участки (локусы) макросрезов легких, содержащие радиоактивность, вырезали в виде кусочков объемом 1,5–2,0 см³ и обрабатывали ги-

стологически с помощью общепринятых методик (обезвоживание, заливка в парафин-целлоидин или парафин). Из целого образца изготавливали серийные микросрезы толщиной 4–5 мкм (в среднем их количество составляло около 2000) и наклеивали на предметные стекла, далее помещаемые на пленку РМ-1, или непосредственно на ядерные пластинки со стороны эмульсии. По результатам экспонирования, продолжительность которого на данном этапе исследования составляла 15 сут, отбирали уже микросрезы, содержащие радиоактивность. Для контроля вновь полученные гистологические препараты экспонировали одновременно с таковыми, заведомо содержащими ГЧ (архивные материалы лаборатории).

Этап 4. Из отобранных гистологических срезов после удаления парафина изготавливали гисторадиоавтографы с использованием фотоэмульсий, продолжительность экспонирования с которыми составляла в каждом отдельном случае не менее 15 сут. Гисторадиоавтографы, в которых обнаруживалось содержание ГЧ, окрашивали гематоксилином и эозином, либо с помощью любой другой необходимой гистологической методики. Для патогистологической оценки состояния легких из каждого исследуемого образца отбирали по 2–3 среза.

Таким образом был исследован аутопсийный материал от 12 участников ликвидации последствий аварии (ЛПА) 1986–1988 гг., умерших в течение трех поставарийных лет, а также 50 жителей Украины и 120 жителей Белоруссии, проживавших на загрязненных территориях и скончавшихся в 1989–1992 гг. от случайных причин. Кроме того, в исследование были включен аутопсийный материал (части легких) от 27 человек, погибших в первые недели (2–14-я) после аварии на Чернобыльской АЭС от острой лучевой болезни, обусловленной неконтролируемым относительно равномерным внешним гамма- и бета-облучением в диапазоне доз от 3,7 до 13,7 Гр.

Результаты и обсуждение

Наличие ГЧ в легких обнаруживалось в подавляющем большинстве случаев, составивших группу непосредственных свидетелей аварии, скончавшихся от острой лучевой болезни (24/27; 88 %). Максимальное содержание ГЧ определяли в образцах легочной ткани, отобранных из нижних долей легких, из прикорневых и центральных их отделов, что соответствует нормальному регионарному распределению дыхательного объема.

По типу излучателей регистрируемые в гисторадиоавтографах ГЧ были представлены двумя вариантами: смешанные альфа-/бета-излучающие ГЧ и чистые бета-излучающие ГЧ, при явном преоб-

ладании первых (рис. 1). Специального изучения радионуклидного состава не проводили, он хорошо известен из литературы. Повторные гистоавтордиографические исследования одного и того же материала, проведенные с периодичностью раз в два года (1986, 1988, 1990 и 1992 гг.) подтвердили известные из литературы данные: в гисторадиоавтографах 1990 и 1992 гг. содержание бета-излучателей было заметно снижено, и ГЧ в итоге оказывались представленными преимущественно альфа-излучателями. При этом еще можно было встретить единичные чистые бета-излучающие ГЧ, состоящие, скорее всего, из ^{90}Sr или ^{106}Ru .

Все обнаруживаемые при световой микроскопии гисторадиоавтографов ГЧ визуализировались в альвеолярных макрофагах (т.е. интрацеллюлярно), располагавшихся среди клеточных элементов того же типа, свободных от ГЧ, в просветах бронхиол и альвеол, а также на поверхности межальвеолярных перегородок (интралюминальная, или внутрипросветная локализация). Лишь малая часть альвеолярных фагоцитов, «нагруженных» ГЧ, определялась в толще последних.

Это обстоятельство, на наш взгляд, заслуживает особого внимания. С одной стороны, подобная морфологическая картина (интрацеллюлярная + интралюминальная локализация ГЧ) является документальным подтверждением элиминации радиоактивности из легких фагоцитами-носителями, входящими в состав мокроты (функция мукоцилиарного клиренса). С другой стороны, данный факт свидетельствует о перемещении радиоактивности макрофагами по тканевым структурам дыхательной системы человека и, следовательно, о реализации дозовых нагрузок не только в пределах отдельных микролюков, как это принято считать, а в существенно боль-

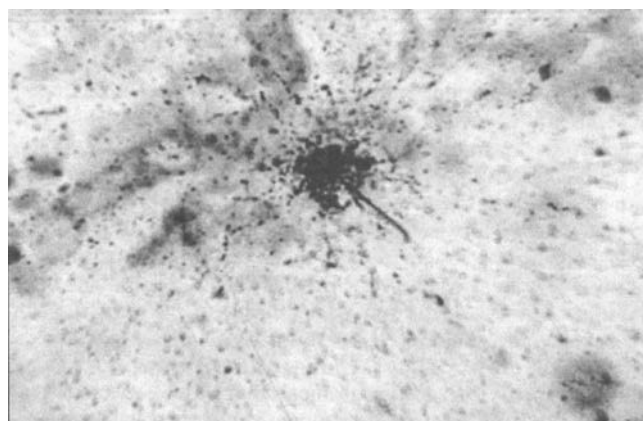


Рис. 1. «Горячая» частица в легком свидетеля аварии на ЧАЭС, погибшего от ОЛБ на 23-е сут. Гисторадиоавтограф. Окраска — гематоксилин-эозин. X280

шем объеме воздухопроводящих и газообменивающих областей легких.

Путем измерения геометрического диаметра пылевых ГЧ, содержащихся в цитоплазме 10 макрофагов из 10 различных образцов легочной ткани изученных случаев, было показано, что размеры обнаруживаемых ГЧ укладывались в пределы от 0,2 до 1 мкм.

В зависимости от местонахождения в момент аварии и ближайшие часы после нее все 27 погибших были подразделены на две подгруппы:

1) 18 человек (главным образом, персонал АЭС по обслуживанию реактора и турбин), работавшие в помещениях четвертого энергоблока на расстоянии от эпицентра взрыва до 50 м, до 100 м и до 200 м;

2) 9 человек (пожарные, вахтеры, рабочий железной дороги), работавшие вне помещений АЭС на расстоянии от эпицентра взрыва до 100 м, до 200 м и свыше 200 м. Минимальное расстояние составило 35 м (подгруппа 1), максимальное — 1000 м (подгруппа 2).

В легких непосредственных свидетелей аварии, составивших первую подгруппу, число ГЧ было наибольшим. При этом в каждом отдельном случае оно определялось, очевидно, не столько расстоянием от эпицентра аварии и продолжительностью поставарийного пребывания на станции, сколько местом нахождения пострадавшего в момент аварии. Так, в легких двоих пострадавших, в момент аварии находившихся на одинаковом расстоянии (35–50 м) и работавших в течение приблизительно равного интервала времени (30–40 мин), однако в разных помещениях АЭС — в помещении для операторов и в помещении для электриков, — число обнаруженных ГЧ оказалось различным. В первом случае в одном гистологическом срезе легкого площадью около 2 см² было зафиксировано более двух десятков (23) ГЧ; в другом — 1 ГЧ в одном из сотен таких же срезов.

Такая высокая вариабельность ретенции ГЧ в легких связана, по-видимому, с неравномерностью распространения аэрозольного облака по рабочим помещениям АЭС, и была характерна только для группы ликвидаторов-профессионалов, работавших на станции в первые часы после аварии.

Количество ГЧ в легких лиц, составивших вторую подгруппу, было многократно меньшим; в ряде случаев (3 чел.) они не были обнаружены вовсе.

Следует отметить, что даже в случаях с максимальным насыщением легких ГЧ, число их в одном альвеолярном фагоците не превышало единицы, поэтому величина активности в одном макрофаге, скорее всего, соответствовала активности одной горячей частицы. Принимая во внимание, что активность альфа-излучающих радионуклидов ГЧ, измеренная

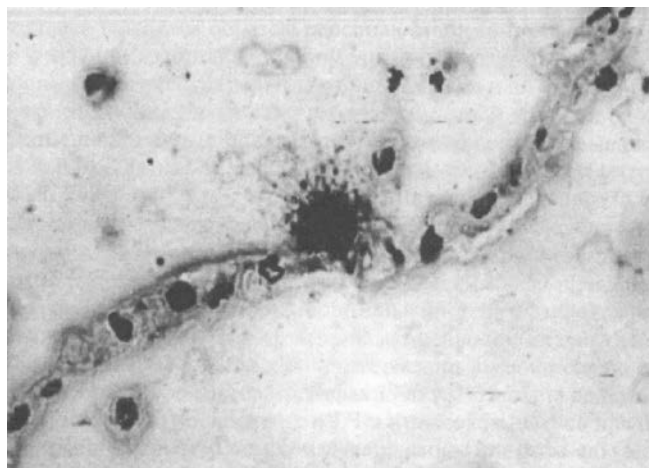


Рис. 2. «Горячая» частица в легком участника ликвидации последствий аварии на ЧАЭС 1986 г., умершего в 1992 г. Гисторадиоавтограф. Окраска — гематоксилин-эозин. X280

в помощью диэлектрических трековых детекторов, была в пределах от 5×10^{-6} до 8×10^{-5} Бк, и исходя из соотношения содержания альфа- и бета-излучателей в реакторном топливе АЭС (1:1000), можно заключить, что суммарная «усредненная» активность ГЧ составляла порядка 10^{-3} Бк [1].

Из 12 участников ликвидации последствий аварии ГЧ были обнаружены у одного (1/12; 8,3 %), работавшего шофером на поливочной машине (в 1986 г.) и умершего в 1990 г. от рака легких согласно записям в медицинских документах.

В данном аутопсийном наблюдении ГЧ были выявлены в двух гистологических срезах. Как и в легких непосредственных свидетелей аварии, обнаруженные ГЧ визуализировались в цитоплазме макрофагов (3 чел.), т.е. интрацеллюлярно, и, если принять, что в каждом фагоците-носителе число ГЧ не превышает единицы, то общее число обнаруженных ГЧ составило не более трех. В одном срезе альвеолярный фагоцит, содержащий ГЧ, располагался на поверхности межальвеолярной перегородки (интралюминальная локализация, рис. 2), что, как указано выше, было расценено как морфологическое свидетельство перемещения и элиминации ГЧ из легких. Еще два макрофага, «нагруженных» ГЧ, были выявлены среди клеточных элементов воспалительного экссудата в бронхиальном дереве, поскольку помимо патоморфологических признаков основного заболевания, в данном случае наблюдались также выраженные явления хронического катарального и катарально-гнойного бронхита.

Из 170 жителей загрязненных районов Белоруссии и Украины, умерших в 1989–1992 гг. от случайных причин (острая алкогольная интоксикация, транспортная травма, суицид и др.), ГЧ были

обнаружены в легких 3 человек (3/170; 1,8 %), проживавших в Хойникском и Ветковском районах Гомельской области Белоруссии. Один из жителей Хойникского района являлся участником ликвидации последствий аварии на ЧАЭС в 1986 г. Следует подчеркнуть, что во всех трех случаях обнаружения ГЧ в легких резидентов загрязненных территорий имела место фоновая патология органов системы дыхания в виде фиброзирующего альвеолита, туберкулеза легких и катарально-гнойного деформирующего бронхита, что свидетельствовало о той или иной степени функциональной недостаточности (дефицитарности) механизмов самоочищения легких.

Важно также отметить, что обнаруженные в этих наблюдениях ГЧ были немногочисленными (не более 2–3 на случай). При этом, в отличие от упомянутых выше наблюдений первых двух групп, ГЧ визуализировались в макрофагах, располагавшихся не в просветах альвеол, а в соединительной (фиброзной) ткани по ходу сосудов и бронхов (интрамуральная локализация).

Полученные данные, по-видимому, не следует рассматривать как показатель малой вероятности ингаляционного поступления ГЧ. Возможно, и число людей-носителей чернобыльских ГЧ, и количество самих частиц изначально (в первые месяцы после аварии на АЭС) были все-таки большими, однако по прошествии определенного времени последние подверглись активной элиминации.

Заключение

Таким образом, результаты исследований, проведенных с применением разработанной методики, показали, что чернобыльские ГЧ поступали в органы дыхания людей и в течение некоторого периода времени задерживались в ткани легких. Наиболее часто и в наибольшем количестве их обнаруживали в легких непосредственных свидетелей аварии; существенно реже и меньших количествах — в легких ликвидаторов ее последствий. Для жителей загрязненных в результате аварии на Чернобыльской АЭС территорий риск попадания ГЧ в легкие был много-

кратно ниже, подтверждением чего могут служить полученные в настоящем исследовании патоморфологические данные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутьков В.А., Муравьев Ю.В., Арефьева З.С., Камарицкая О.И. Горячие частицы — взгляд спустя семь лет после аварии на Чернобыльской АЭС // Пульмонология. 1993. № 4. С. 10–19.
2. 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. 145 с.
3. Charles M.W., Harrison J.D. Hot particle dosimetry and radiobiology — past and present // J. Radiol. Prot. 2007. V. 27. № 3A. P. A97–109.
4. Charles M.W., Mill A.J., Darley P.J. Carcinogenic risk of hot-particle exposures // J. Radiol. Prot. 2003. V. 23. № 1. P. 5–28.
5. Harrison J. Biokinetic and dosimetric modelling in the estimation of radiation risks from internal emitters // J. Radiol. Prot. 2009. V. 29. № 2A. P. A81–105.
6. ICRP PUBLICATION 71 Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 4 Inhalation Dose Coefficients // Ann. ICRP. 1995.
7. Gerardi S. A comparative review of charged particle microbeam facilities // Radiat. Prot. Dosimetry. 2006. V. 122. № 1. P. 285–291.
8. Маленченко А.Ф., Голубенков А.М. Медико-биологические аспекты “горячих” частиц // Здравоохранение Белоруссии. 1990. № 6. С. 41–45.
9. Tyler W.S., Julian M.D. Gross and subgross anatomy of lungs, pleura, connective tissue septa, distal airways, and structural units // In: Comparative Biology of the Normal Lung. Vol. I (Parent RA, ed). — Boca Raton, FL: CRC Press, Inc. 1992. P. 37–48.
10. Harrison J.D., Stather J.W. The assessment of doses and effects from intakes of radioactive particles // J. Anat. 1996. V. 189. № 4. P. 521–530.

Поступила: 06.05.2016

Принята к публикации: 18.05.2016

**С.Е. Охрименко¹, И.П. Коренков², Н.А. Аكوпова¹, С.А. Рыжкин³,
С.И. Иванов¹**

ОПТИМИЗАЦИЯ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ ПАЦИЕНТОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РЕНТГЕНОДИАГНОСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

S.E. Okhrimenko¹, I.P. Korenkov², N.A. Akopova¹, S.A. Ryzhkin³, S.I. Ivanov¹
Patient Dose Optimization during X-Ray Investigation

РЕФЕРАТ

Цель: Оценка технического состояния парка рентгенодиагностических аппаратов (РДА) Москвы, установление зависимости уровней облучения пациентов от технического состояния РДА.

Материалы и методы: Радиационный контроль физико-технических (эксплуатационных) параметров РДА, оценка доз облучения пациентов за счет рентгенодиагностических исследований.

Результаты: Приведены материалы оценки технического состояния рентгенодиагностического парка г. Москвы, оценка дозовых нагрузок пациентов за 1998–2013 гг. Установлена зависимость доз облучения пациентов от технического состояния РДА. Установлено, что доза облучения пациентов должна оцениваться в каждом случае, а применение усреднённых (табличных) значений приводит к существенным искажениям при оценке дозовой нагрузки. Одним из главных аспектов обеспечения радиационной безопасности пациентов является реализация принципа оптимизации: максимально возможное снижение доз облучения пациентов при сохранении надлежащего качества диагностической информации. Решающую роль в реализации настоящей задачи играет понимание персоналом необходимости снижения доз облучения пациентов, влияния технического состояния оборудования на лучевую нагрузку и внедрение представленных в статье подходов в повседневную практику.

Выводы: Анализ полученных результатов показывает, что доза облучения пациентов с 1998 по 2013 гг. уменьшилась более чем в 2,5 раза. Снижение лучевой нагрузки связано с выводом из эксплуатации РДА, не отвечающих требованиям действующих нормативных документов, внедрением цифровых технологий, введением контроля доз облучения пациентов при проведении рентгенологических процедур.

Ключевые слова: рентгеновское излучение, пациенты, эффективные дозы облучения, радиационно-гигиенический паспорт, рентгеноскопия, рентгенография, компьютерная томография

ABSTRACT

Purpose: To estimate the technical condition of the X-ray machine park in Moscow, according to the establishment of patient exposure levels from the technical condition.

Material and methods: Radiation monitoring of physical and technical parameters of X-ray machines, patient dose assessment due to X-ray studies.

Results: The evaluation of the technical condition of x-ray park of Moscow, the assessment of radiation exposure of patients for 1998–2013 is given. The dependence of radiation doses of patients from the technical condition of the X-ray diagnostic apparatus was estimated. It is established that the patient radiation dose should be evaluated in each case, and the use of averaged (tabular) values leads to significant distortions during the assessing radiation exposure. One of the main aspects of ensuring radiation safety of patients is the implementation of the principle of optimization: the maximum possible decrease in exposure to patients while maintaining appropriate quality diagnostic information. The crucial thing in the implementation of this task is played by the staff understanding the need to reduce the radiation doses of patients, the influence of the technical condition of the equipment at the radiation exposure and the implementation presented in the paper approaches into everyday practice.

Summary: Analysis of the results shows that the dose of irradiation of patients from 1998 to 2013 decreased by more than 2.5 times. Reduced radiation exposure associated with the decommissioning of the X-ray machines that do not meet the requirements of the applicable regulations, the introduction of digital technology, the introduction of patient dose monitoring during radiological procedures.

Key words: X-ray radiation, patients, effective radiation doses, radiation-hygienic passport, fluoroscopy, radiography, CT scan

Введение

Одним из основных факторов облучения населения является медицинское облучение и, прежде всего, рентгенодиагностические процедуры [1]. Ежегодно в Москве выполняется до 6 млн рентгенологических исследований, доля облучения в структуре дозовой нагрузки достигала 30–50 % годовой дозы облучения населения, а средняя индивидуальная доза составляла по данным [2] 1,2–1,5 мЗв, а в Москве 1,8 мЗв [3].

Основными факторами, формирующими лучевую нагрузку пациентов, являются физико-технические параметры выполняемого исследования (техническое

состояние) рентгеновского аппарата, его соответствие действующим стандартам, санитарно-эпидемиологическим требованиям, соблюдение оптимальных режимов, максимально возможная защита пациентов при проведении исследований.

Материалы и методы

Рассмотрены результаты радиационного контроля технических (эксплуатационных) параметров (ЭП) рентгенодиагностических аппаратов (РДА), а также контроля доз облучения пациентов при рентгенодиагностических исследованиях. Контроль ЭП осуществ-

¹ Российская медицинская академия последиplomного образования, Москва. E-mail: ooniii@mail.ru

² Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва

³ Казанский федеральный университет, Казань

¹ Russian Medical Academy of Postgraduate Education, Moscow, Russia. E-mail: ooniii@mail.ru

² A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of FMBA, Moscow, Russia.

³ Kazan Federal University, Kazan, Russia

влялся с применением специализированного клинического дозиметра Nomex производства PTW (Германия), позволяющего неинвазивным способом осуществлять комплексное тестирование параметров рентгеновского аппарата, путём измерения таких характеристик, как напряжение (U), время (t), количество электричества (мАс), линейность и повторяемость характеристик, радиационный выход, доза облучения пациента и др. Целью исследований являлось определение возможности эксплуатации РДА и проведения оптимизации режимов исследований. Данная работа легла в основу методологии гигиенической экспертизы рентгеновских аппаратов в Российской Федерации [4, 5]. Для определения доз облучения пациентов применялся дозиметр рентгеновского излучения клинический ДРК-1 производства ООО НПП «Доза», который был использован нами также для выявления неисправных РДА в соответствии со специально разработанной инструкцией [6].

Результаты и обсуждение

Первые в России работы по гигиенической оценке параметров РДА и их соответствия действующим стандартам и санитарно-эпидемиологическим требованиям проведены санитарной службой Москвы и кафедрой радиационной гигиены РМАПО с применением клинического дозиметра Nomex ещё в 1998 г. Регулярные исследования ЭП на территории Москвы проводятся с 1999 г. Нами установлено, что на начальном этапе исследования 32,8 % рентгеновских аппаратов не соответствовали нормативным требованиям [7, 8]. Такие аппараты выводились из эксплуатации, если ремонтные работы не устраняли выявленных нарушений ЭП. Примеры несоответствий ЭП аппаратов требованиям нормативных документов приведены в табл. 1.

Около 30 % из впервые выявленных с отклонениями ЭП аппаратов не удалось привести в полное соответствие с действующими нормативными требованиями и после проведения ремонтных работ. В этом случае, такие РДА, если позволяли результаты экспертизы, временно эксплуатировались с теми или иными ограничениями до замены. На них запрещалось проведение определённых рентгеноскопических исследований в связи с низкой разрешающей способностью

Таблица 1

Примеры выявляемых неисправностей РДА, явившихся причинами снятия их с эксплуатации

Наименование РДА	Виды выявленных отклонений
РУМ-20	Не соответствует требованиям по уставкам значений длительности экспозиции, напряжения, совпадению полей оптического и рентгеновского полей облучения.
HYRALUX	Не соответствует требованиям по линейности дозы при заданном анодном напряжении от уставок времени, невозможность устранения выявленных отклонений.
РУМ-17	Отсутствует индикация комбинированного фильтра, неисправна блокировка двери, невозможность устранения выявленных отклонений.
9Л5	Не соответствие требованиям по длительности экспозиции, анодному напряжению, совпадению светового и радиационного полей, пробой изоляции на корпус, невозможность устранения выявленных отклонений.

электронно-оптического преобразователя (ЭОП), вводились ограничения на использование уставок анодного тока и напряжения и т.д. Таким образом, сокращался перечень разрешенных исследований, что указывалось в санитарно-эпидемиологическом заключении на РДА, оформление которого было обязательно в соответствии с действовавшим в то время законодательством.

В рамках настоящей работы проведены исследования с применением клинического дозиметра ДРК-1 по установлению связи между дозой облучения пациентов, техническим состоянием аппарата и режимами работы. Установлены эталонные зависимости показаний прибора ДРК-1 (произведение дозы на площадь $\text{сГр}\times\text{см}^2$) и значений ЭП при штатных режимах работы РДА (рис. 1, 2).

Примеры отклонений физико-технических или эксплуатационных параметров аппаратов, таких как количество электричества (мАс), напряжение (U), экспозиция (t), и их влияния на показатель произведения дозы на площадь и, соответственно, дозу облучения (лучевую нагрузку) пациента приведены на рис. 3, 4 [6].

Как видно из данных графиков, у РДА с отклонениями физико-технических параметров наблюдается увеличение доз облучения пациентов и ухудшение

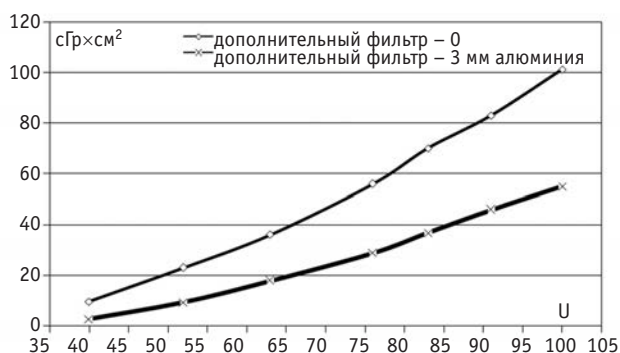


Рис. 1. Эталонная зависимость показателя $\text{сГр}\times\text{см}^2$ от напряжения (U) и дополнительной фильтрации при штатной работе РДА

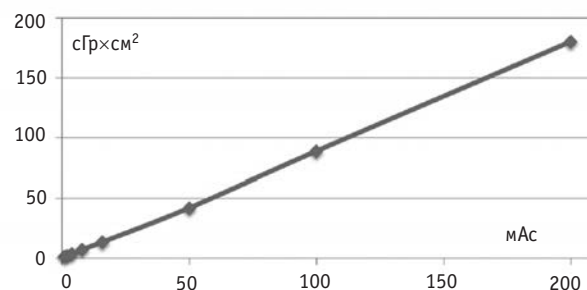


Рис. 2. Эталонная зависимость показателя $\text{сГр}\times\text{см}^2$ от количества электричества (мАс) при штатной работе РДА

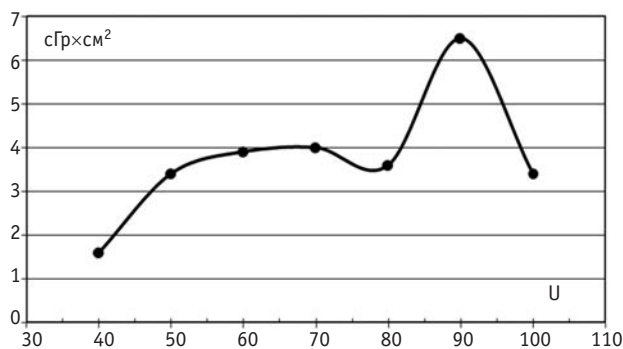


Рис. 3. Пример отклонения зависимости $\text{сГр} \times \text{см}^2$ от напряжения (U) при нарушении штатных режимов работы РДА

качества получаемого изображения. Выявление таких отклонений требовало проведения углублённой экспертизы с применением клинического дозиметра Nотех и принятием решения по результатам экспертизы о возможности или невозможности дальнейшей эксплуатации РДА.

За 2000–2004 гг. было выявлено 256 РДА, подлежащих выводу из эксплуатации, 154 из которых по результатам контроля доз облучения пациентов с помощью дозиметра ДРК-1, для чего нами была разработана соответствующая инструкция. Этим прибором в 2000 г. были оснащены отделы радиационной гигиены центров Госсанэпиднадзора во всех административных округах Москвы, что позволило ускорить выполнение работ по выявлению неисправных РДА, подлежащих замене. Благодаря проведённой работе по приведению РДА в соответствие с нормативными требованиями и по их замене, количество выявляемых аппаратов, не отвечающих требованиям санитарных правил, снизилось до 10 %. На основании результатов настоящей работы требования по контролю эксплуатационных параметров были впервые введены в СанПиН 2.6.1.802-99, а затем и СанПиН 2.6.1.1192-03 (приложение 10) [4, 5].

Вторым направлением наших исследований являлась оценка эффективных доз облучения пациентов. Эти работы проводились нами на протяжении 15 лет и

Таблица 2

Характерные дозы облучения пациентов для отдельных рентгенологических процедур

Виды исследований	Доза, мЗв
Рентгеноскопические исследования (взрослые)	
Лёгкие и органы средостения	1,3–2,1
Желудок	0,6–1,7
12-перстная кишка	2,6–4,2
Рентгенографические исследования	
Шейный отдел позвоночника (взрослые)	0,005–1,0
Шейный отдел позвоночника (дети)	0,056–0,002
Грудной отдел позвоночника (взрослые)	0,1–0,6
Флюорография цифровая	0,1–0,15
Органы грудной клетки (взрослые)	0,006–1,0
Органы грудной клетки (дети)	0,01–0,3
Поясничный отдел позвоночника (взрослые)	0,2–2,5
Груднопоясничный отдел (дети)	0,7–1,1
Рентгенография черепа (взрослые)	0,007–0,16
Рентгенография черепа (дети)	0,01–0,02

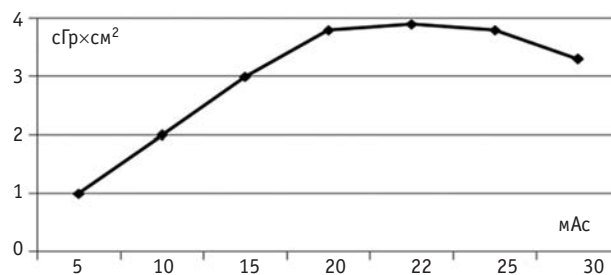


Рис. 4. Пример отклонения зависимости $\text{сГр} \times \text{см}^2$ от количества электричества (мАс) при нарушении штатных режимов работы РДА

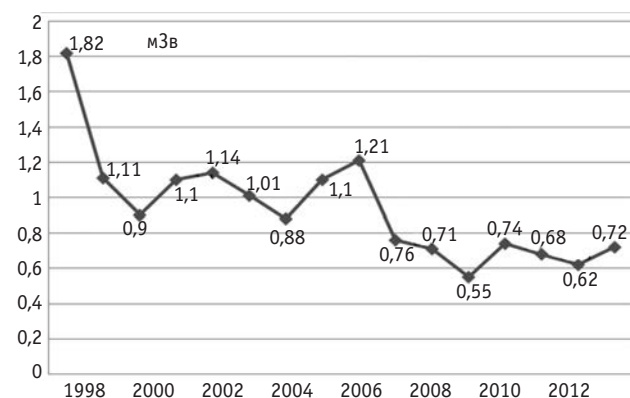


Рис. 5. Динамика средних индивидуальных доз медицинского облучения населения г. Москвы за 1998–2013 гг. (без компьютерной томографии)

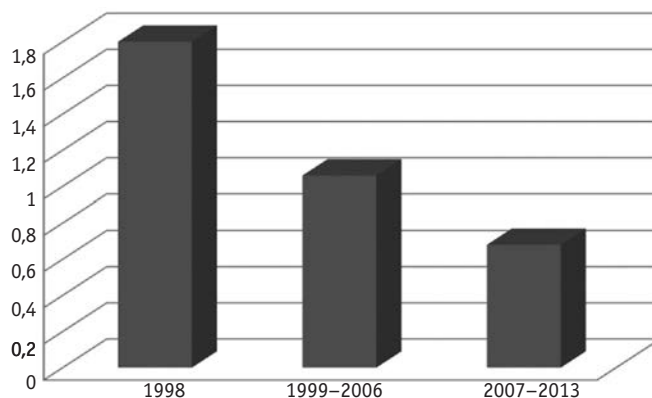


Рис. 6. Динамика средних индивидуальных доз медицинского облучения населения Москвы по периодам, без компьютерной томографии, мЗв/год

все результаты оформлялись в формах государственной статистической отчетности № 3-ДОЗ и в радиационно-гигиеническом паспорте (РГП) территории г. Москвы [3, 9]. Пример доз облучения в зависимости от вида процедур и типа исследований приведены в табл. 2 [9].

Наибольшие дозы облучения отмечаются при рентгеноскопических исследованиях (12-перстная кишка, органы грудной клетки). Кроме того, показано, что использование стандартных таблиц доз не даёт объективной картины, и для правильного учёта доз необходимо

В 2013 г. в РФ выполнено почти 260 млн рентгенодиагностических процедур

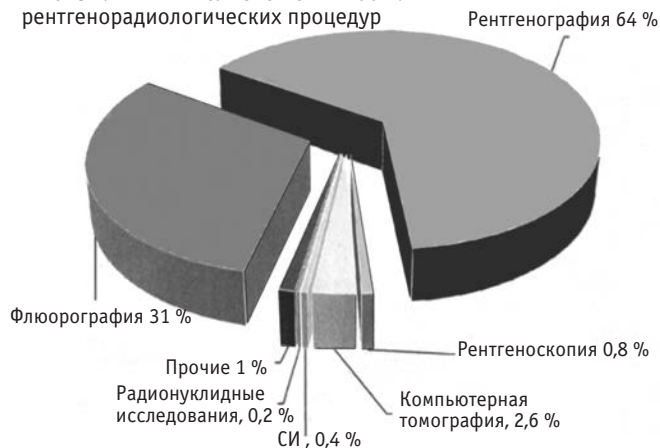


Рис. 7. Доля компьютерной томографии в структуре рентгеновских диагностических исследований

использовать измеренные значения радиационного выхода или произведения дозы на площадь [9].

Анализ данных РГП по дозам облучения за 1998–2013 гг. показывает, что введение технологий по контролю качества РДА и лучевой нагрузки на пациентов обеспечило существенное снижение доз облучения. Динамика средних индивидуальных доз облучения (без учета доз от РКТ) пациентов за счет оптимизации проведения рентгенодиагностических исследований приведены на рис. 5, 6.

По данным [10], значение годовой дозы при рентгеновской компьютерной томографии (РКТ) составляет в среднем 3,48 мЗв (в некоторых случаях доза облучения может достигать 10 мЗв за 1 процедуру). Причем, несмотря на сравнительно небольшой общий объем КТ-исследований (рис. 7), вклад РКТ в коллективную дозу облучения пациентов достигает 35 %. Следовательно, при увеличении количества РКТ-исследований следует ожидать рост лучевых нагрузок на пациентов.

Снижение средних индивидуальных доз медицинского облучения в указанные периоды объясняется выведением из эксплуатации аппаратов, не отвечающих санитарно-эпидемиологическим требованиям, внедрением контроля качества проведения рентгенодиагностических исследований, внедрением цифровых технологий и методов оценки доз облучения.

Важную роль в оптимизации лучевых нагрузок пациентов играет осознание рентгенологами актуальности этого вопроса, чему способствовало внедрение современных методов контроля эксплуатационных параметров РДА и установление зависимости лучевых нагрузок на пациентов от технического состояния аппаратов.

Выводы

1. На основании проведенных исследований установлено, что около 30 % РДА не соответствовали требованиям санитарных правил. Данные аппараты выведены из эксплуатации.

2. Проведена оценка эффективных доз облучения пациентов при рентгенодиагностических исследованиях, показана динамика доз с 1998 по 2013 гг. Дозы облучения пациентов за этот период снижены более чем в 2 раза. Снижение уровней облучения пациентов связано с выведением из эксплуатации РДА, не отвечающих требованиям нормативных документов, контролем эксплуатационных параметров, внедрением цифровых технологий и методов измерения доз облучения.

3. Прогнозирован рост коллективной дозы облучения пациентов за счет увеличения РКТ-исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. НКДАР ООН, 2012. Источники и эффекты ионизирующего излучения. Доклад Научного комитета ООН по действию атомной радиации 2000 г. Генеральной Ассамблее с научными приложениями. Пер. с англ. — Нью-Йорк. 2012. 756 с.
2. Ставицкий Р.В., Блинов Н.Н., Рабкин И.Х., Лебедев Л.А. Радиационная защита в медицинской рентгенологии. — М.: «Кабур». 1994. 272 с.
3. Радиационно-гигиенический паспорт территории г. Москвы за 1998. — М. 1999. 6 с.
4. Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских кабинетов, аппаратов и проведению рентгенологических исследований. СанПиН 2.6.1.802-99.
5. Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских кабинетов, аппаратов и проведению рентгенологических исследований. СанПиН 2.6.1.1192-03.
6. Воронин К.В., Охрименко С.Е., Никитина М.Н. Измерение произведения дозы на площадь как метод контроля параметров рентгеновского аппарата и оптимизации доз облучения пациентов // АНРИ. 2000. № 4. С. 65–69.
7. Охрименко С.Е., Воронин К.В., Иванов С.И., Аكوпова Н.А. Обеспечение радиационной безопасности в рентгенодиагностике с применением новых технологий // Здоровоохранение и мед. техника. 2004. № 4. С. 36–37.
8. Охрименко С.Е., Иванов С.И., Лазаренко В.Н. и соавт. Использование эксплуатационных параметров рентгеновских аппаратов в качестве критериев для принятия решения о продлении срока их эксплуатации // Вестник С.-Пб. гос. мед. академии им. И.И. Сеченова. 2002. № 3. С. 56–59.
9. Охрименко С.Е., Воронин К.В., Иванов С.И. Эффективные дозы пациентов, полученные на основе измерений ДРК-1 в ЛПУ г. Москвы // АНРИ. 2003. № 1. С. 39–43.
10. Романович И. К. Актуальные задачи радиационной гигиены в свете итогов ФЦП ЯРБ // Российская научная конференция «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях». — М. 2015. С. 30–38.

Поступила: 13.05.2016

Принята к публикации: 18.05.2016

**И.А. Мартиненко¹, М.Э. Сокольников¹, Н.А. Кошурникова¹,
Ю.Г. Мокров², Д.А. Берегич²**

**ОЦЕНКА РИСКА ЗАБОЛЕВАНИЯ РАКОМ ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ
У НАСЕЛЕНИЯ ПРИ ПРОЖИВАНИИ ВБЛИЗИ ПО «МАЯК»**

**I.A. Martinenko¹, M.E. Sokolnikov¹, N.A. Koshurnikova¹, Yu.G. Mokrov²,
D.A. Beregich²**

**Risk Assessment of Thyroid Cancer Incidence among Population Due to the
Residence Close to Mayak PA**

РЕФЕРАТ

Цель: Эпидемиологическая оценка радиационного риска заболевания раком щитовидной железы (РЩЖ) среди населения, проживавшего в детском возрасте на территории, загрязненной радиоактивными газо-аэрозольными выбросами в период освоения технологии на ПО «Маяк».

Материал и методы: Исследование проведено в когорте, включающей 31836 человек, проживавших в детском возрасте в г. Озерске в период 1948–1962 гг., когда имели место неконтролируемые газо-аэрозольные выбросы в атмосферу из труб радиохимических заводов ПО «Маяк». В изучаемой когорте было установлено 60 гистологически верифицированных случаев РЩЖ. Стандартизованный относительный риск (СОР) оценен методом косвенной стандартизации по полу и возрасту с 95 %-ным доверительным интервалом. В качестве стандарта избраны возрастно-половые показатели заболеваемости РЩЖ в России и среди городского населения Челябинска. Сведения об уровнях облучения щитовидной железы для жителей г. Озерска разного возраста были получены на основе предварительных расчетов дозы для двух сценариев потребления продуктов питания от разных поставщиков. Оценка радиационного избыточного относительного риска на единицу дозы (ИОР/Зв) проведена с использованием модели регрессии Пуассона, реализованной в программном модуле Amfit пакета EpiCure.

Результаты: Стандартизованный относительный риск заболевания РЩЖ в изучаемой когорте по сравнению с данными национальной статистики составил у мужчин 3,16 (1,68–5,06), у женщин – 2,07 (1,52–2,65). Также показано достоверное различие заболеваемости РЩЖ в когорте по сравнению с региональной статистикой: СОР у мужчин составил 2,04 (1,08–3,26) и 1,59 (1,17–2,04) у женщин. Величина ИОР/Зв составила –0,03 ($p > 0,5$), т.е. между увеличением заболеваемости РЩЖ и рассчитанными групповыми оценками доз отсутствует корреляционная связь.

Выводы: В изучаемой когорте лиц, проживавших в детском возрасте в г. Озерске в период 1948–1962 гг., когда имели место неконтролируемые газо-аэрозольные выбросы в атмосферу из труб радиохимических заводов, возрастно-половые показатели и стандартизованный относительный риск заболевания раком щитовидной железы как у мужчин, так и у женщин в 2–3 раза превышали таковые в национальной и региональной статистике. Корреляция между дозой и наблюдаемым эффектом отсутствует. Этот результат, вероятно, обусловлен использованием групповых доз из-за отсутствия индивидуальных данных.

Ключевые слова: рак щитовидной железы, заболеваемость, ПО «Маяк», радиационный риск, стандартизованный относительный риск

ABSTRACT

Purpose: Thyroid cancer incidence rates in the population residing as children in areas contaminated by radioactive gas-aerosol emissions during technological development at Mayak PA were assessed in the current epidemiological study.

Material and methods: The study was carried out in a cohort of 31,836 people residing in childhood in Ozersk during 1948–1962. In that period uncontrolled gas-aerosol emissions from chimneys of radiochemical plants took place. There were 60 thyroid cancer cases diagnosed and histologically verified in the study cohort. Standardized incidence rates (SIR) were estimated by the indirect standardization by age and sex with a 95 % confidence interval. Age- and sex-related thyroid cancer incidence rates in Russia and among the urban population of Chelyabinsk were chosen as a standard. Information on radiation exposure levels of thyroid for Ozersk residents of different ages was obtained on the basis of preliminary dose calculations for two scenarios of food consumption from different suppliers. Radiation excess relative risk per unit dose (ERR/Sv) was calculated with the use of a Poisson regression model implemented in Amfit module of the EpiCure software.

Results: SIR of thyroid cancer in the cohort was 3.16 among men (1.68–5.06) and 2.07 (1.52–2.65) among women compared to the data of national statistics. Significant difference of thyroid cancer incidence in the cohort compared to the regional statistics was also found: SIR was 2.04 (1.08–3.26) among men and 1.59 (1.17–2.04) among women. ERR/Sv was –0.03 ($p > 0.5$), i.e. increase of thyroid cancer incidence in the study cohort is not associated with the obtained estimates of equivalent doses to the thyroid.

Conclusion: In the cohort of persons residing as children in Ozersk in the period of uncontrolled gas-aerosol emissions from the chimneys of radiochemical plants in 1948–1962, age- and sex-related thyroid cancer incidence rates and relative risk of thyroid cancer incidence in men and women significantly (2–3 times) exceeded those in the national and regional statistics. The correlation between dose and effect was not observed. It could be associated with using group doses due to lack of individual doses.

Key words: thyroid cancer incidence, Mayak PA, radiation risk, standardized incidence ratio

¹ Южно-Уральский институт биофизики, Челябинская обл., Озерск. E-mail: martinenko@subi.su

² ПО Маяк, Озерск, Челябинская обл., Россия

¹ Southern Urals Biophysics Institute, Ozersk, Russia. E-mail: martinenko@subi.su

² Mayak PA, Ozersk, Russia

Введение

Известно, что главным источником поступления ^{131}I в окружающую среду являются газо-аэрозольные выбросы из труб ядерных реакторов и заводов по переработке облученного ядерного топлива [1]. В связи с этим не теряет актуальности проблема оценки риска медицинских последствий, в первую очередь канцерогенных, среди населения, проживающего в районе расположения атомных предприятий, которые в период освоения технологии являлись источником сверхфонового радиоактивного загрязнения прилегающих территорий [2].

На протяжении многих лет ЮУрИБФ проводятся исследования онкологической заболеваемости среди жителей г. Озерска — ближайшего к ПО «Маяк» населенного пункта. Актуальность этих исследований обусловлена тем, что в первые годы деятельности предприятия имели место неконтролируемые газо-аэрозольные выбросы в атмосферу из труб промышленных реакторов и радиохимического завода. Установлено, что основным дозообразующим радионуклидом в составе выбросов был ^{131}I , образование которого происходило в процессе переработки облученных в реакторах урановых блоков [3]. Изъяты из активной зоны реакторов блоки помещались в бассейн выдержки на период времени, достаточный для распада короткоживущих радионуклидов. Далее облученные блоки транспортировались на радиохимический завод, где производилось их растворение и выделение плутония, урана и осколков деления [4]. Для полного распада ^{131}I требуется время выдержки блоков в бассейне не менее 80 сут (10 периодов полураспада ^{131}I). Однако в связи с тем, что в 1949–1954 гг. перед работниками ПО «Маяк» стояла задача в сжатые сроки получить оружейный плутоний, время выдержки блоков в бассейне было сокращено до 20–50 сут [4]. Короткая выдержка привела к тому, что не полностью распавшийся радиоактивный йод в составе газо-аэрозольных выбросов попадал в атмосферу через вентиляционные системы радиохимического завода, вследствие чего происходило радиационное загрязнение окружающей территории, в том числе го-

рода Озерска. В работе [4] показано, что общий объем поступления ^{131}I в атмосферу с газо-аэрозольными выбросами из труб радиохимического завода составил 1,0 млн Ки, из них 90 % поступило в 1948–1954 гг.

В ранее опубликованных работах показано, что среди населения, проживавшего в городе в детском возрасте, единственным достоверным медицинским последствием является увеличение заболеваемости раком щитовидной железы (РЩЖ) [5].

Целью настоящей работы является продолжение исследований по оценке риска заболевания РЩЖ и поиску доказательств радиогенной природы этого эффекта. В задачи исследования входила оценка групповых доз облучения щитовидной железы в когорте жителей Озерска, а также расчет стандартизованного и избыточного относительного риска заболевания РЩЖ в изучаемой популяции.

Материал и методы

Исследование проведено на основе регистров, которые созданы и поддерживаются в лаборатории радиационной эпидемиологии ЮУрИБФ. Детский регистр г. Озерска [6] содержит сведения более чем на 90 тыс. жителей города 1934–2010 гг. рождения, которые родились в городе или приехали в возрасте до 15 лет в период с 1948 (в 1948 г. ПО «Маяк» введен в эксплуатацию) по 2013 гг. Регистр включает сведения о дате и месте рождения, времени проживания в Озерске, жизненном статусе, данные о профессиональном облучении при работе на «ПО Маяк». Характеристика Детского регистра представлена в табл. 1.

Как следует из данных табл. 1, более 90 % членов регистра имеют установленный жизненный статус.

Анализ риска был проведен в субкогорте лиц, проживавших в детском возрасте в г. Озерске в 1948–1962 гг. — в период, когда в связи с отсутствием эффективной газоочистки население могло подвергаться наибольшему радиационному воздействию, в том числе от ^{131}I [7]. Изучаемая субкогорта включает 31836 членов Детского регистра, из них 27378 (86 %) — с установленным жизненным статусом.

Таблица 1

Характеристика «Детского регистра г. Озерска»

По состоянию на 31.12.2013	Мужчины		Женщины		Оба пола	
	абс.	%	абс.	%	абс.	%
Всего в Детском регистре	46907	51,2	44652	48,8	91559	100,0
С установленным жизненным статусом	43613	93,0	40617	91,0	84230	92,0
— из них:						
живы	35410	81,2*	37080	91,3*	72490	86,1*
умерли от всех причин	8203	18,8*	3537	8,7*	11740	13,9*
Потерины для наблюдения	3295	7,0	4037	9,0	7332	8,0

Примечание: * — процент рассчитан от числа лиц с установленным жизненным статусом

Таблица 2

Характеристика изучаемой субкогорты лиц, проживавших в Озерске в 1948–1962 гг.

По состоянию на 31.12.2013	Мужчины		Женщины		Оба пола	
	абс.	%	абс.	%	абс.	%
Количество людей в субкогорте	16196	50,9	15640	49,1	31836	100,0
Количество людей с установленным жизненным статусом	14298	88,3*	13080	83,6*	27378	86,0
Количество заболевших РЩЖ	13	0,09*	47	0,36*	60	0,22*
Средний возраст заболевших, лет	44,4 (28–57)		44,3 (12–64)		44,3 (12–64)	

Примечание: * — процент рассчитан от числа лиц с установленным жизненным статусом

Данные о случаях заболевания РЩЖ получены из базы данных «Онкорегистр» [8], содержащей сведения о злокачественных новообразованиях всех локализаций, диагностированных у жителей г. Озерска независимо от года рождения в период 1948–2013 гг. во время их проживания в городе. В выделенной когорте рак щитовидной железы диагностирован у 60 человек. Все случаи РЩЖ гистологически верифицированы. Характеристика изучаемой субкогорты представлена в табл. 2.

Данные табл. 2 свидетельствуют о том, что в изучаемой субкогорте, как и во всем Детском регистре, количество и доля людей с известным жизненным статусом является достаточно высокой (86 %). Средний возраст заболевших составил больше 40 лет, т.е. РЩЖ диагностирован у взрослых, несмотря на облучение ЩЖ в детском возрасте. Единственный диагноз РЩЖ у 12-летней девочки являлся случайной находкой при гистологическом исследовании удаленного на операции шейного лимфатического узла.

В соответствии с задачами исследования был оценен стандартизованный относительный риск (СОР) методом косвенной стандартизации по полу и возрасту с 95 %-ным доверительным интервалом. В качестве стандартов избраны усредненные возраст-половые показатели заболеваемости РЩЖ в России за 1989–2010 гг. [9] и среди городского населения Челябинска за 1991–2007 гг. Выбор стандарта для сравнения и расчета ожидаемых величин обусловлен тем, что в указанные годы качество диагностики с использованием УЗИ практически не отличалось как в группе сравнения, так и в изучаемой когорте. Региональная статистика предпочтительнее для сравнения, т.к. оба города (Озерск и Челябинск) расположены на эндемичной по зобу территории [5].

Для анализа зависимости «доза–эффект» была проведена работа по оценке радиационного облучения населения в результате выбросов ^{131}I в атмосферу. Эта задача выполнялась специалистами ПО «Маяк» по проекту 1.4 Объединенного координационного комитета по изучению радиационных воздействий (ОКК ИРВ/JCCRER) (в рамках российско-американского соглашения о сотрудничестве в области из-

учения радиационных воздействий с целью минимизации последствий радиоактивного загрязнения на здоровье человека и окружающую среду) и состояла из следующих основных этапов:

1. Реконструкция ежемесячных выбросов ^{131}I из труб реакторного и радиохимического производства за период 1948–1962 гг., когда инструментальный контроль выбросов не проводился. Работы этого этапа включали: расчет накопления ^{131}I в уране промышленных уран-графитовых ядерных реакторов (ПУГР) [10], учет распада ^{131}I за время хранения облученного ядерного топлива (ОЯТ) в бассейнах выдержки [3], оценка выхода ^{131}I в газовую фазу (для трех химических форм йода) при растворении ОЯТ, учет задержки ^{131}I газоочистными системами радиохимического завода [4]. Для реакторного производства отдельно учитывался выход ^{131}I в атмосферу при аварийных ситуациях на ПУГР.

2. Расчет атмосферного переноса выбросов ^{131}I из труб предприятия с использованием программы RATCHET. При проведении этих расчетов использовались реконструированные на первом этапе данные о мощности выброса ^{131}I в атмосферу и реальные почасовые данные метеорологических наблюдений (направление и скорость ветра, категория устойчивости атмосферы, наличие и интенсивность атмосферных осадков и др.), выполненных на метеостанции ПО «Маяк» за весь рассматриваемый период. В результате расчетов была получена подробная пространственно-временная информация об объемной активности ^{131}I в приземном слое атмосферы и плотности радиоактивных выпадений на поверхность почвы.

3. Расчет доз внешнего облучения различных возрастных групп населения от радиоактивного облака и от поверхности почвы, загрязненной ^{131}I , с учетом защитных свойств зданий и продолжительности пребывания на открытой местности.

4. Расчет ингаляционных доз внутреннего облучения для различных возрастных групп населения с учетом объемов дыхания и защитных свойств зданий. Расчет доз на этапах 3 и 4 выполнен с использованием дозовых коэффициентов [11], а результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Предварительные результаты оценки
доз облучения щитовидной железы
взрослых жителей Озерска (1948–2002 гг.)
от атмосферных выбросов ^{131}I , Гр**

Фактор воздействия	Доза на щитовидную железу, Гр	Примечание
Доза от внешнего облучения	0,01–0,015	Для различных районов города и типов жилой застройки
Ингаляционная доза	0,004–0,01	
Потребление продуктов питания (молоко, овощи и др.)	0,5–1,5	С учетом различных поставщиков продуктов питания

5. Расчет доз внутреннего облучения для перорального (с продуктами питания) поступления ^{131}I является наиболее сложным и ответственным этапом реконструкции, поскольку этот путь вносит подавляющий вклад в суммарное дозовое воздействие на население. Известно, что основным продуктом питания, с которым ^{131}I поступает в организм человека, является коровье (козье) молоко (до 90 % общего поступления) и, в значительно меньшей степени, листовые овощи и куриные яйца.

На всех этапах работ специалисты ПО «Маяк» стремились всемерно, где это было возможно, придерживаться методических рекомендаций, разработанных американскими коллегами при выполнении ими Хэндфордского йодного проекта (HEDR). Однако реализовать точную схему расчета миграции йода по цепочке: атмосфера → растительность → почва → корова (коза) → молоко → человек не представлялось возможным из-за существенно различных природно-климатических условий Хэндфорда и Озерска, поэтому расчет пероральных доз облучения жителей Озерска был выполнен по упрощенной схеме, с использованием рекомендаций специалистов ОНИС. Поставки молока и овощей жителям Озерска проводились из нескольких сельскохозяйственных предприятий, удаленных в разных направлениях и на разные расстояния от ПО «Маяк». Поэтому доза облучения щитовидной железы жителей существенным образом зависела не только от объема потребляемого молока, но и от поставщика молочной продукции. При этом следует иметь в виду, что (при прочих равных условиях) содержание ^{131}I в козьем молоке может быть в разы больше, чем в коровьем [7].

Для расчета индивидуальных доз облучения щитовидной железы каждый член изучаемой субкогорты был отнесен к первому или второму сценарию в зависимости от предполагаемого источника поступления ^{131}I с продуктами питания, достигнутого возраста и времени проживания в Озерске. Считалось, что до 1956 г. молоко и овощи поступали в город из совхоза № 2 (пос. Метлино). С 1957 г. пос. Метлино был переселен, и снабжение жителей молоком и овощами

Таблица 4

**Стандартизованный относительный риск
заболевания РЩЖ в изучаемой субкогорте по
сравнению с национальным и региональным
контролем**

Контроль	Изучаемая субкогорта	
	Мужчины	Женщины
Национальная статистика	3,16 (1,68–5,06)	2,07 (1,52–2,65)
Региональная статистика	2,04 (1,08–3,26)	1,59 (1,17–2,04)

Примечание: В скобках указаны границы 95 %-го доверительного интервала

осуществлялось из совхозов, расположенных на незагрязненных радионуклидами территориях. В результате расчетов были получены групповые оценки эквивалентных доз облучения ЩЖ для членов субкогорты за каждый год проживания в период 1948–1962 гг. за счет, в основном, перорального поступления радио-йода. Суммируя ежегодные дозы, были рассчитаны накопленные эквивалентные дозы облучения за весь период проживания.

Оценка радиационного избыточного относительного риска на единицу дозы (ИОР/Зв) проведена с использованием модели регрессии Пуассона, реализованной в программном модуле Amfit пакета EpiSure [12].

Результаты и обсуждение

Оценка стандартизованного относительного риска заболевания РЩЖ в изучаемой когорте

Результаты оценки СОР в настоящем исследовании представлены в табл. 4.

Как следует из данных табл. 4, СОР достоверно выше у мужчин и женщин как по сравнению с национальной, так и с региональной статистикой. Более широкий доверительный интервал у мужчин связан с небольшим количеством случаев РЩЖ, тем не менее, результат оценки является высоко достоверным.

Результаты значительного увеличения заболеваемости РЩЖ у мужчин и женщин выделенной субкогорты по сравнению с региональной статистикой могут свидетельствовать о наличии дополнительного канцерогенного фактора. По нашему мнению, таковым фактором является техногенное радиационное воздействие, которому подвергались жители Озерска при проживании в городе в детском возрасте. Это предположение обосновано тем, что различия между сравниваемыми популяциями по другим факторам, влияющим на заболеваемость РЩЖ, были нивелированы путем стандартизации по полу и возрасту, а также выбора контроля из территориально близко расположенного региона, где также имеет место дефицит йода.

Таблица 5

Предварительные оценки эквивалентной дозы облучения щитовидной железы для различных возрастных групп населения Озерска, Зв

Начало облучения	Возраст на момент облучения					
	до 1 года	От 1 до 2 лет	От 2 до 7 лет	От 7 до 12 лет	От 12 до 17 лет	Взрослые
1	2	3	4	5	6	7
Сценарий 1. Потребление молока и овощей только из совхоза № 2 (Метлино, р. Теча)						
1949	5,226	10,166	5,882	2,140	1,373	0,707
1950	2,337	4,547	2,631	0,957	0,614	0,316
1951	1,739	3,384	1,958	0,712	0,457	0,236
1952	0,421	0,820	0,474	0,173	0,111	0,057
1953	0,174	0,339	0,196	0,071	0,046	0,024
1954	1,266	2,463	1,425	0,518	0,333	0,171
1955	0,694	1,350	0,781	0,284	0,182	0,094
1956	0,248	0,483	0,279	0,102	0,065	0,034
Сценарий 2. Потребление только местных (Озерск) молока и овощей						
1949	1,229	2,390	1,383	0,503	0,323	0,166
1950	0,342	0,666	0,385	0,140	0,090	0,046
1951	0,423	0,823	0,476	0,173	0,111	0,057
1952	0,121	0,235	0,136	0,049	0,032	0,016
1953	0,060	0,118	0,068	0,025	0,016	0,008
1954	0,544	1,058	0,612	0,223	0,143	0,074
1955	0,121	0,235	0,136	0,049	0,032	0,016
1956	0,060	0,118	0,068	0,025	0,016	0,008
1957	0,020	0,039	0,023	0,008	0,005	0,003
1958	0,040	0,078	0,045	0,016	0,011	0,005
1959	0,00020	0,00039	0,00023	0,00008	0,00005	0,00003
1960	0,010	0,020	0,011	0,004	0,003	0,001
1961	0,002	0,004	0,002	0,001	0,001	0,000
1962	0,004	0,008	0,005	0,002	0,001	0,001

Оценка эквивалентной дозы облучения щитовидной железы

В табл. 5 приведены предварительные расчетные оценки дозы облучения щитовидной железы для жителей Озерска разного возраста для двух сценариев потребления продуктов питания от разных поставщиков (совхоз № 2 и местные продукты). Значения доз, представленные в каждой клетке табл. 5, характеризуют максимальную годовую дозу для каждого сценария (для полного рациона) за выбранный год (столбец 1) для заданной возрастной группы (столбцы 2–7). В случае смешанной (с разным долевым вкладом) реализации обоих сценариев и частичного (неполного) рациона питания результирующее значение дозы будет лежать в пределах границ, оцененных для каждого сценария.

Следует отметить, что несмотря на тщательность исследования с учетом архивных данных, существуют неопределенности в ретроспективной оценке индивидуальных доз облучения щитовидной железы, которые в основном связаны с невозможностью персонифицировать накопленные дозы для каждого конкретного человека.

Изучение дозовой зависимости

Результаты оценки индивидуальных доз облучения щитовидной железы, полученные на основании предварительных расчетных оценок доз облучения щитовидной железы для жителей Озерска разного возраста для двух сценариев потребления продуктов питания от разных поставщиков, представлены в табл. 6.

Данные табл. 6 свидетельствуют о том, что более 50 % членов когорты могли иметь эквивалентную дозу облучения ЩЖ более 2 Зв. В результате, как у мужчин, так и у женщин максимальная кумулятивная доза составила 17,6 Зв, средняя доза — 4,5 Зв.

Полученные данные были использованы при расчете избыточного относительного риска заболевания РЩЖ. Величина ИОР/Зв составила $-0,03$ ($p > 0,5$). Это означает, что между повышенным уровнем заболеваемости РЩЖ и рассчитанными групповыми оценками доз облучения щитовидной железы у членов исследуемой когорты отсутствует связь.

Следует иметь в виду, что отсутствие корреляционной связи между эффектом и дозой нельзя считать свидетельством того, что техногенное облучение в

Таблица 6

Характеристика эквивалентных доз облучения ЩЖ в изучаемой когорте

Дозовая категория, Зв	Мужчины				Женщины			
	Средняя доза, Зв	Количество человек	%	Случаев РЩЖ	Средняя доза, Зв	Количество человек	%	Случаев РЩЖ
0	0	1	0,0	0	0	2	0,0	0
>0–0,1	0,02	4554	28,1	4	0,02	4439	28,4	14
0,1–0,5	0,18	1691	10,4	2	0,18	1642	10,5	6
0,5–1,0	0,84	693	4,3	1	0,82	624	4,0	1
1,0–2,0	1,37	499	3,1	0	1,37	507	3,2	2
2,0–4,0	3,2	3289	20,3	5	3,21	3217	20,6	6
4,0–8,0	6,0	1913	11,8	0	5,96	1769	11,3	9
>8,0	14,2	3556	22,0	1	14,1	3440	22,0	9
Всего	4,58	16196	100,0	13	4,54	15640	100,0	47

детском возрасте никак не повлияло на заболеваемость РЩЖ у изучаемого населения. Наблюдаемое отсутствие корреляции может быть обусловлено рядом причин. Величины накопленных доз, использованные для оценки риска, являются групповыми, при этом их значение рассчитано относительно года рождения и периода проживания в Озерске, но не учитывает индивидуальную вариабельность поступления радиоактивного йода, которая зависит от особенностей питания индивидуума в разном возрасте, вида потребляемого молока (коровье/козье) и источников его поступления. К настоящему моменту с целью поиска отсутствующих сведений о снабжении жителей Озерска молоком (из какого совхоза, в какой период и в какой магазин поставлялось молоко, кто содержал коров/коз, употреблял ли человек в детстве молоко магазинное или цельное коровье/козье) нами проверены все доступные источники информации из городского архива и архива ПО «Маяк», медицинские книжки, персональные анкеты, заполненные участниками скринингового исследования [13], но, к сожалению, в этих источниках необходимые данные отсутствовали.

Вместе с тем, нельзя не принять во внимание результаты ранее проведенных исследований по поиску свидетельств радиогенной природы РЩЖ в изучаемой когорте. Так, повышение заболеваемости РЩЖ выявлено среди членов изучаемой когорты, проживавших в городе в детском возрасте в период 1948–1962 гг., когда имели место неконтролируемые газо-аэрозольные выбросы в атмосферу, содержащие ^{131}I . Важно отметить, что среди лиц, проживавших в Озерске после введения в 1962 г. эффективной системы газоочистки, не выявлен повышенный уровень заболеваемости РЩЖ [14]. Результаты, полученные в [15], свидетельствуют о том, что среди резидентов, проживавших в Озерске в детском возрасте в 1948–1962 гг., отношение шансов заболеть РЩЖ у жителей пригородного поселка было в два раза выше, чем у городских жителей. Возможно, это связано с особенностями

питания жителей поселка, которые могли содержать личное подсобное хозяйство и употреблять молоко от собственных коз и коров, места выпаса которых находились на загрязненных территориях.

Выводы

1. В изучаемой когорте лиц, проживавших в детском возрасте в г. Озерске в период 1948–1962 гг., когда имели место неконтролируемые газо-аэрозольные выбросы ^{131}I в атмосферу из труб радиохимических заводов, возрастно-половые показатели и стандартизованный относительный риск заболевания раком щитовидной железы как у мужчин, так и у женщин в 2–3 раза превышали таковые в национальной и региональной статистике.

2. На основе предварительных оценок дозы облучения щитовидной железы для жителей Озерска разного возраста и периода проживания для двух сценариев потребления продуктов питания от разных поставщиков были рассчитаны ежегодные и накопленные групповые эквивалентные дозы для членов изучаемой когорты. В результате, как у мужчин, так и у женщин максимальная кумулятивная доза составила 17,6 Зв, средняя доза — 4,5 Зв. Более 50 % членов когорты имели суммарную дозу более 2 Зв.

3. Между повышенным уровнем заболеваемости РЩЖ и рассчитанными групповыми оценками доз облучения щитовидной железы у членов исследуемой когорты не установлена корреляционная связь. Такой результат обусловлен тем, что величины накопленных доз, использованные для оценки риска, являются групповыми и не учитывают индивидуальную вариабельность поступления радиоактивного йода в организм.

4. Увеличение уровня заболеваемости раком щитовидной железы у лиц, проживавших в детском возрасте в Озерске в период 1948–1962 гг., связано с техногенным облучением, обусловленным неконтролируемыми газо-аэрозольными выбросами из труб радиохимических заводов ПО «Маяк».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильин Л.А. с соавт. Радиоактивный йод в проблеме радиационной безопасности. М.: Атомиздат. 1972. 272 с.
2. Аклеев А.В., Крестинина Л.Ю., Престон Д. и соавт. Радиационный риск злокачественных новообразований у жителей прибрежных сел реки Течи // Мед. радиол. и радиац. безопасность. 2008. Т. 53. № 4. С. 13–37.
3. Глаголенко Ю.В., Дрожко Е.Г., Мокров Ю.Г. и соавт. Методика реконструкции радионуклидного состава и активности осколков деления, накапливающихся в облученном уране на момент его радиохимической переработки на заводе «Б» ПО «Маяк» в начале 1950-х гг. // Вопросы радиац. безопасности. Спец. выпуск. 2008. С. 35–51.
4. Глаголенко Ю.В., Дрожко Е.Г., Мокров Ю.Г. и соавт. Реконструкция выбросов в атмосферу йода-131 из труб радиохимического производства ПО «Маяк» за период с 1948 по 1967 гг. // Вопросы радиац. безопасности. Спец. выпуск. 2008. С. 52–61.
5. Ильин Л.А., Аксель Е.М., Дрожко Е.Г. и соавт. Заболеваемость раком щитовидной железы среди жителей г. Озерска (эпидемиологическое исследование) // Мед. радиол. и радиац. безопасность. 2003. Т. 48. № 1. С. 57–64.
6. Кошурникова Н.А., Кабирова Н.Р., Болотникова М.Г. и соавт. Характеристика регистра лиц, проживавших в детском возрасте вблизи производственного объединения «Маяк» // Мед. радиол. и радиац. безопасность. 2003. Т. 48. № 1. С. 27–34.
7. Мокров Ю.Г., Мартюшов В.З., Стукалов П.М. и соавт. Особенности структуры питания населения г. Озерска за период с 1948 по 1966 гг., значимые для оценки пероральной составляющей доз внутреннего облучения // Вопросы радиац. безопасности. Спец. выпуск. 2008. С. 62–75.
8. Фомин Е.П., Окатенко П.В., Кошурникова Н.А. Опыт ретроспективного создания канцер-регистра для населения г. Озерска и анализ показателей заболеваемости злокачественными новообразованиями на его основе с 1948 по 2005 гг. // Вопросы радиац. безопасности. 2007. № 4. С. 54–62.
9. Давыдов М.И., Аксель Е.М. Статистика злокачественных новообразований в России и странах СНГ в 2005 г. // Вестник РОНЦ им. Н.Н. Блохина РАМН. 2007. Т. 18. № 2. 156 с.
10. Глаголенко Ю.В., Дрожко Е.Г., Мокров Ю.Г. и соавт. Методика и результаты реконструкции выбросов инертных радиоактивных газов из труб графитовых реакторов ПО «Маяк» за весь период их эксплуатации // Вопросы радиац. безопасности. Спец. выпуск. 2008. С. 6–21.
11. Sbyder S.F., Farris W.T., Napier B.A., Ikenberry T.A. et al. Parameters used in the environmental pathway and radiological dose modules (DESCARTES, CIDER and CRD Codes) of the Hanford Environmental Dose Reconstruction Integrated Codes (HEDRIC) // In: PNWD-2023. HEDR. Rev. 1. UC-000. Battelle. Pacific Northwest Laboratories. Richland. Washington.
12. Preston D.L., Lubin J.H., Pierce D.A. EPICURE user's Guide. — Seattle: Hirosoft International Corp. 1993. 330 pp.
13. Машарова Е.И., Азизова Т.В., Чутчикова Т.А. и соавт. Распространенность патологии щитовидной железы в когорте жителей г. Озерска, подвергшихся в детском возрасте техногенному облучению // Клинич. и эксперим. тиреоидология. 2011. 7. № 4. С. 56–62.
14. Кошурникова Н.А., Мартиненко И.А., Кайгородова Л.Я. и соавт. Заболеваемость раком щитовидной железы при проживании в детском возрасте вблизи атомного предприятия // В сб.: «Источники и эффекты облучения работников ПО «Маяк» и населения, проживающего в зоне влияния предприятия». Часть IV. Под ред. М.Ф. Киселева, С.А. Романова. — Челябинск: Челябинский Дом печати. 2012. С. 187–204.
15. Мартиненко И.А., Сокольников М.Э. Относительный риск заболевания раком щитовидной железы у жителей двух районов ЗТО г. Озерск // Вопросы радиац. безопасности. 2012. № 2. С. 66–72.

Поступила: 31.12.2015

Принята к публикации: 18.05.2016

Т.М. Гелиашвили, А.В. Важенин, Е.Б. Васильева, Н.Г. Афанасьева
ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПЭТ/КТ С ^{18}F -ФДГ В ДИАГНОСТИКЕ
РЕЦИДИВОВ И МЕТАСТАЗОВ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОГО
РАКА ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ

T.M. Geliashvili, A.V. Vazhenin, E.B. Vasil'eva, N.G. Afanas'eva
Experience of Use ^{18}F -FDG PET/CT in Detecting Tumor Recurrence
and Metastasis of Differentiated Thyroid Cancer

РЕФЕРАТ

Цель: Анализ собственных результатов с обобщением клинических данных по применению комбинированного метода ПЭТ/КТ для диагностики локо-регионарных рецидивов и отдаленных метастазов у больных с дифференцированным раком щитовидной железы (ДРЩЖ).

Материал и методы: Проведен ретроспективный анализ 61 ПЭТ/КТ-исследования. В анализ включены больные с повышенным уровнем тиреоглобулина во время послеоперационного курса радиоiodабляции или после завершения комбинированного метода лечения при динамическом наблюдении.

Результаты: Положительный результат получен по 39 (64 %) ПЭТ/КТ исследованиям (локо-регионарный рецидив 18 (46,1 %), отдаленные метастазы 12 (30,8 %), сочетание локо-регионарного рецидива с отдаленными метастазами 9 (23,1 %)). Отрицательный результат получен по 22 (36 %) ПЭТ/КТ-исследованиям (без патологии 7 (31,8 %), сомнительные результаты 15 (68,2 %)). Суммарно по 27 (44,3 %) ПЭТ/КТ диагностирован локо-регионарный рецидив, методом скintiграфии всего тела (СВТ) с ^{131}I – в 14 случаях (23 %)). Выполнено 15 оперативных вмешательств по поводу локо-регионарного рецидива. Диагноз рецидива гистологически верифицирован в 13 случаях (87 %). В 2 (13 %) случаях получен ложноположительный результат ПЭТ/КТ. По 21 (34,4 %) ПЭТ/КТ-исследованию выявлены отдаленные метастазы (в легкие и/или средостение 14 (67 %), в кости 3 (14 %), сочетание нескольких очагов отдаленного метастазирования 4 (19 %)). В 11 из 14 случаев (78,6 %) метастазы в легкие выявлены исключительно в режиме КТ. Метастазы в лимфоузлы средостения оказались все ПЭТ-позитивными 6 (100 %). Метастазы в другие органы выявлены в 7 случаях, из которых все метастазы в кости оказались ПЭТ-позитивными (6 случаев); метастазы в мягкие ткани выявлены в режиме КТ в 1 случае. Методом планарной СВТ отдаленные метастазы выявлены в 18 случаях (29,5 %).

Выводы: Метод ПЭТ/КТ показал более высокую чувствительность в выявлении метастазов в лимфатические узлы шеи (44,3 %), чем СВТ (23 %). В отношении выявления отдаленных метастазов ПЭТ/КТ и СВТ показали схожую чувствительность (34,5 % и 29,5 % соответственно). За счет комбинации режима ПЭТ с режимом КТ значительно повышается чувствительность ПЭТ/КТ в отношении выявления метастазов в легкие.

Ключевые слова: ПЭТ/КТ, ^{18}F -ФДГ, дифференцированный рак щитовидной железы, скintiграфия всего тела с ^{131}I , локо-регионарный рецидив, отдаленные метастазы

ABSTRACT

Purpose: To investigate the diagnostic accuracy and impact in patients management of the integrated ^{18}F -FDG PET/CT modality in patients with differentiated thyroid cancer.

Material and methods: A retrospective review of patients who underwent PET/CT scans were performed. The study included patients with elevated thyroglobulin levels during the postoperative radioiodine ablation course or after completion of the combination treatment at follow-up of DTC.

Results: PET/CT was positive in 39 cases (64 %), 18 (46.1 %) of which was loco-regional recurrence, 12 (30.8 %) – distant metastases and the combination of loco-regional recurrence with distant metastases 9 (23.1 %). The negative result was obtained for 22 (36 %) PET/CT study (without pathology 7 (31.8 %), questionable results 15 (68.2 %)). Totally 27 (44.3 %) loco-regional recurrences diagnosed with PET / CT, and by ^{131}I whole body scan (WBS) – 14 (23 %)). 15 surgical interventions for loco-regional recurrence were achieved. Diagnosis of recurrence in 13 cases (87 %) was proved historically. In 2 (13 %) patients we received a false-positive results of PET/CT. In 21 (34.4 %) of PET/CT study distant metastases were revealed (in the lungs and/or mediastinum – 14 (67 %), in bone 3 (14 %), a combination of several sites of distant metastases 4 (19 %)). In 11 of 14 cases (78.6 %) lung metastases were revealed exclusively in CT mode. Mediastinal lymph node metastases appeared all PET-positive 6 (100 %). Metastases in other organs were detected in 7 cases out of which all bone metastases were PET positive (6 cases); soft tissue metastases identified by CT mode in 1 case. By planar WBS detected distant metastases in 18 cases (29.5 %).

Conclusions: PET/CT showed higher sensitivity in the detection of the neck lymph nodes metastases (44.3 %) than WBS (23 %). With regard to detection of distant metastases, PET/CT and WBS showed similar sensitivity (34.5 % and 29.5 %, respectively). Through a combination of modes of PET with CT mode the sensitivity of PET/CT in detection of metastases in the lungs increases greatly.

Key words: ^{18}F -FDG PET/CT, differentiated thyroid cancer, whole body scan, loco-regional recurrence, distant metastases

Введение

Дифференцированный рак щитовидной железы (ДРЩЖ), включающий папиллярный, фолликулярный и гюртле-клеточный подтипы, составляет более 90 % от всех случаев рака щитовидной железы [1]. Заболеваемость РЩЖ увеличивается во всем мире,

в основном за счет роста основной формы ДРЩЖ – папиллярной [2]. При этом общая смертность от РЩЖ остается стабильной на протяжении многих лет [3]. Большинство больных с ДРЩЖ имеют хороший прогноз, общая 10-летняя выживаемость достигает 85 % [4]. Первичное лечение ДРЩЖ всегда хирургическое с последующим проведением радио-

йодаблации по показаниям. Большинство больных вылечиваются после первичного лечения.

Однако неблагоприятное течение определенных форм ДРЩЖ с метастазирующими либо рецидивирующими состояниями до и после первичного оперативного лечения опухоли и радиойодтерапии (РЙТ) является для практических врачей непростой и очень частой клинической ситуацией. Столь же сложна ситуация и с больными, у которых гистологически первично выявлены средне- или слабо дифференцированные опухоли щитовидной железы с пониженной чувствительностью к радиоактивному ^{131}I [5]. Поэтому проблеме обнаружения рецидивов и метастазов ДРЩЖ у пациентов после первичной и аблативной терапии придается в последнее время большое значение.

На протяжении многих лет одним из самых важных диагностических инструментов при динамическом наблюдении ДРЩЖ считается сцинтиграфия всего тела (СВТ) с ^{131}I . СВТ на практике остается незаменимой, т.к. позволяет уникальным образом, основанным на физиологии тиреоцита, контролировать показания к назначению радиоактивного ^{131}I больному на разных этапах заболевания [5, 6].

Однако известно, что до 10 % ДРЩЖ в процессе дедифференцировки теряют способность накапливать радиоактивный йод внутри клетки, что делает невозможным использование ^{131}I в диагностических и лечебных целях. В практике радиотерапевта, занимающегося лечением ДРЩЖ радиоактивным йодом, часто возникают клинические ситуации, когда опухоль либо перестает накапливать ^{131}I , либо изначально не накапливает, либо слабо накапливает ^{131}I , но при этом отмечается повышенный уровень тиреоглобулина (единственного опухолевого маркера при ДРЩЖ) или его рост в динамике. В такой ситуации встает вопрос о дальнейших диагностических мероприятиях, позволяющих исключить или выявить рецидив. Одним из таких диагностических методов является ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ.

Впервые сообщили об успешном применении ПЭТ с ^{18}F -ФДГ при ДРЩЖ радиологи из Финляндии в 1987 г. [7]. Наблюдения и выводы, которые были сделаны авторами на трех клинических случаях, и по сей день, по прошествии почти 30 лет, остаются актуальными. В дальнейшем детально изучил накопление ^{18}F -ФДГ и ^{131}I при раке щитовидной железы Feine U. et al. В своей работе 1996 г. несоответствие между накоплением ^{18}F -ФДГ и ^{131}I он назвал «flip-flop» феноменом. Суть данного феномена сводится к тому, что рак щитовидной железы с низкой йодной avidностью склонен к более высокому метаболизму глюкозы и, следовательно, больше вероятность позитивного ПЭТ скана. Рак щитовидной железы, хорошо

накапливающий ^{131}I , имеет низкий метаболизм глюкозы и, следовательно, маловероятен позитивный ПЭТ скан [8]. Так, по данным Wang W. et al., чувствительность ПЭТ у пациентов с радиойод-позитивным сканом всего лишь 18,6 %, тогда как у пациентов с радиойод-негативным сканом чувствительность ПЭТ достигает 80 % [9]. И даже в этом случае, в противовес всем оптимистическим литературным данным, очевидно, что всех СВТ-негативных и тиреоглобулин-позитивных пациентов также являются и ПЭТ-негативными [10,11].

Однако в настоящее время практически во всем мире применяется комбинированный метод ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ, который позволяет выявить в режиме КТ мелкие очаги, негативные в режиме ПЭТ. Диагностическая эффективность ПЭТ и комбинированного метода ПЭТ/КТ при ДРЩЖ была оценена в крупном мета-анализе, который включил в себя 17 исследований 571 пациента с рецидивным или метастатическим ДРЩЖ и негативным радиойод-сканом. По данным мета-анализа, чувствительность и специфичность метода ПЭТ/КТ достигают 94 % и 84 % соответственно, по сравнению с 89 % и 85 % ПЭТ [12]. И на сегодняшний день применение ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ при динамическом наблюдении больных с ДРЩЖ стало рутинным и порой просто незаменимым обследованием. Выяснив так называемую метаболическую стадию опухолевого процесса, можно оптимизировать дальнейшие диагностические обследования и схемы лечения больных с метастатическим и/или рецидивным течением.

Но, учитывая пока еще ограниченную доступность метода, дороговизну исследования и особенности метаболизма ^{18}F -ФДГ ДРЩЖ, важно принимать во внимание достоинства и недостатки данного метода, чтобы правильно выставить показания для проведения.

Целью данной работы явился анализ собственных результатов с обобщением клинических данных, полученные в нашей клинике, о применении комбинированного метода ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ для диагностики локо-регионарных рецидивов и отдаленных метастазов у больных с ДРЩЖ.

Материал и методы

Проведен ретроспективный анализ результатов 61 ПЭТ/КТ исследования, проведенных 50 больным с ДРЩЖ в Челябинском областном клиническом онкологическом диспансере с 2011 г. по февраль 2015 г. В анализ включены больные с повышенным уровнем тиреоглобулина во время послеоперационного курса радиойодаблации или после завершения комбинированного метода лечения при динамическом наблюдении. ПЭТ-исследование проводилось на томографах

PET/CT-System Siemens Biograph TruePoint 40 и 64, позволяющих детектировать очаг патологического накопления размером менее 1 см. ПЭТ-исследование всего тела проводилось от основания черепа до проксимальной части бедер. Обследование проводилось натощак; после 20-минутной подготовки больного (полулежачее положение в отдельной комнате) внутривенно вводился РФП; спустя 30–45 мин после инъекции РФП проводилось обследование.

В 31 случае (50,8 %) ПЭТ/КТ сопровождалась положительными данными по посттерапевтической сцинтиграфии всего тела с ^{131}I (СВТ), а в 30 случаях (49,2 %) – негативными данными СВТ. Больные по результатам ПЭТ/КТ разделены на 2 группы – с положительными и отрицательными ПЭТ/КТ-данными. В свою очередь, группу больных с положительным ПЭТ/КТ результатом мы подразделили на три группы: больные с локо-регионарным рецидивом, с отдаленными метастазами и сочетанием локо-регионарного рецидива с отдаленными метастазами. В группу же больных с отрицательными данными ПЭТ/КТ вошли пациенты без патологии и с сомнительными результатами обследования.

Результаты и обсуждение

Положительный результат получен по 39 (64 %) ПЭТ/КТ исследованиям. Из них отдельно локо-регионарный рецидив был выявлен по 18 (46,1 %) ПЭТ/КТ-исследованиям. По 12 (30,8 %) ПЭТ/КТ диагностировались только отдаленные метастазы, а сочетание локо-регионарного рецидива с отдаленными метастазами зарегистрировано в 9 (23,1 %) случаях. Суммарно локо-регионарный рецидив диагностирован по 27 (44,3 %) ПЭТ/КТ-исследованиям.

В попытке определить место ПЭТ/КТ среди других методов диагностики рецидивов ДРЩЖ мы сопоставили результаты ПЭТ/КТ с результатами СВТ ^{131}I и УЗИ шеи (временной интервал отклонения от даты ПЭТ/КТ обследования был взят 6 мес). По данным ^{131}I , всего лишь в 14 случаях из 61 (23 %) нами были установлены метастазы в лимфоузлы шеи. Полученные результаты еще раз подтверждают данные литературы, что СВТ ^{131}I дает, как правило, менее точные результаты по идентификации слабо дифференцированных рецидивов по сравнению с ПЭТ с ^{18}F -ФДГ [5, 6].

Из 27 рецидивов, выявленных по ПЭТ/КТ, 25 (93 %) выявлялись и методом УЗИ шеи. И только в 2 (7 %) случаях с ПЭТ/КТ-положительным результатом УЗИ шеи оказалось без патологии. Здесь возникает вопрос: зачем делать дорогостоящее обследование, если локо-регионарный рецидив можно диагностировать и по более доступному УЗИ? Отметим, что ПЭТ/КТ обладает перед УЗИ шеи не-

сколькими преимуществами. Во-первых, по данным литературы и по нашему небольшому материалу, методом ПЭТ/КТ выявляется большее количество метастатических очагов в области шеи, чем методом УЗИ. Во-вторых, данный метод за счет совмещения с ПЭТ- и КТ-изображений позволяет установить точное анатомическое расположение патологических очагов, что особо важно при хирургическом лечении рецидива. В-третьих, в клинических случаях с сомнительными результатами УЗИ шеи и неоднозначными цитологическими заключениями после тонкоигольной аспирационной биопсии (ТАБ) подозрительных очагов можно опираться на результат ПЭТ/КТ (при достоверно высоком уровне SUV) в качестве метода инструментальной верификации рецидива. И, наконец, по уровню накопления ^{18}F -ФДГ и количеству ФДГ-позитивных очагов можно определить агрессивность опухоли и выбрать правильную лечебную тактику (выжидательная или агрессивная лечебная тактика). Тем не менее, УЗИ шеи остается «золотым стандартом» диагностики рецидива в области шеи ДРЩЖ. И вопрос, выполнять ли ПЭТ/КТ при обнаружении патологических очагов по УЗИ шеи с целью получения дополнительной информации, по нашему мнению, должен решаться в каждом отдельном клиническом случае.

Всего выполнено 15 оперативных вмешательств по поводу локо-регионарных рецидивов. При этом предоперационную цитологическую верификацию удалось получить в 7 случаях. В 8 же случаях при попытке ТАБ под УЗ-контролем подозрительных очагов предоперационная цитологическая верификация рецидива не была получена. Диагноз рецидива постоперационно гистологически верифицирован в 13 случаях (87 %). В 2 (13 %) случаях получен ложноположительный результат ПЭТ/КТ. Таким образом, в 8 случаях (13,1 %) результаты ПЭТ/КТ изменили тактику лечения больного.

Мы приводим клинический случай лечения СВТ-негативного/ТГ-позитивного рецидива рака щитовидной железы.

Больной С., 64 года. Хирургическое лечение первичной опухоли (папиллярный рак) щитовидной железы в 2006 г., хирургическое лечение рецидива в области первичного очага и метастазов в лимфоузлы шеи в 2012 г., курс радиойодабляции в 2013 г. Учитывая сохраняющийся высокий уровень тиреоглобулина после курса радиойодабляции (ТГ 32 нг/мл) и отсутствие патологического накопления РФП по СВТ с ^{131}I (рис. 1а), больной дообследован методом ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ выявлен рецидив опухоли (рис. 1б). Больному проведено хирургическое лечение в объеме селективной лимфаденэктомии 7-го уровня, рецидив опухоли гистологически верифицирован. После

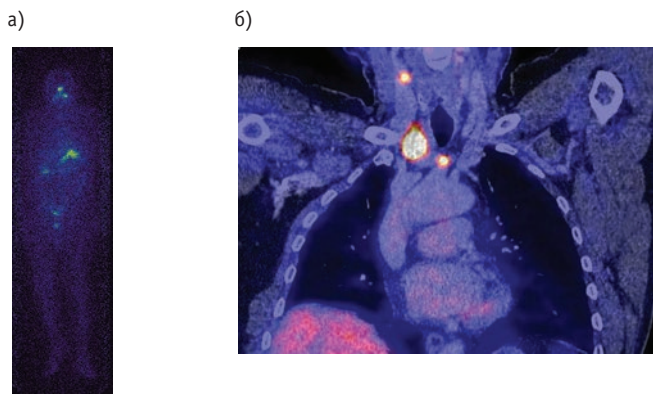


Рис. 1.

а) СВТ: отсутствие патологического накопления РФП
б) ПЭТ/КТ (на фоне ТТГ-стимуляции): картина метаболически активных лимфоузлов шеи справа и верхнего средостения – в правой половине шеи 7×6 мм (SUV = 7,6), по передней поверхности шеи 13×10 мм (SUV = 5,4), паратрахеально 29×19 мм (SUV = 22,4), в переднем средостении – 12×8 мм (SUV = 8,8)

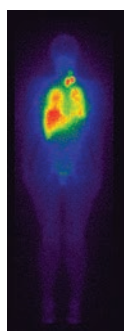
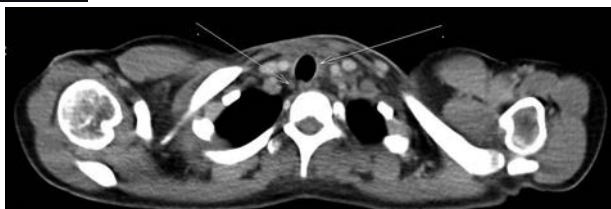
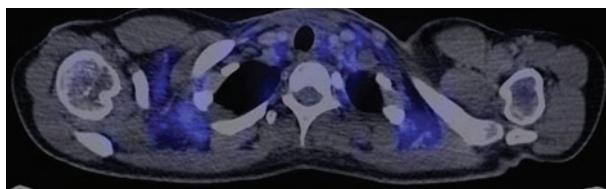


Рис. 2а. СВТ: очаги патологического накопления РФП в зоне удаленной щитовидной железы в проекции обоих легких



КТ-режим ПЭТ/КТ



ПЭТ-режим ПЭТ/КТ

Рис. 26. ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ (на фоне ТТГ-стимуляции): на шее группа лимфоузлов (лимфаденопатия) до 12×7 мм без гиперфиксации РФП, оставшийся фрагмент щитовидной железы без признаков накопления РФП

операции проведена дистанционная нейтронная терапия на метастатические лимфоузлы справа и ДЛТ на лимфоузлы шеи справа и верхний этаж средостения. По контрольному ПЭТ/КТ ^{18}F -ФДГ (на фоне ТТГ-стимуляции, ТГ 2 нг/мл) в 10.2015 г. у больного зафиксирована ремиссия заболевания.

По 21 (34,4 %) ПЭТ/КТ-исследованию выявлены отдаленные метастазы, среди которых преобладали метастазы в легкие и/или средостение – 14 (67 %). Изолированно метастазы в кости наблюдали в 3 случаях (14 %), сочетание нескольких очагов отдаленного метастазирования – в 4 (19 %). В 11 из 14 случаев (78,6 %) метастазы в легкие выявлены исключительно в режиме КТ. И только в 3 случаях (21,4 %) метастазы в легкие накапливали ^{18}F -ФДГ и выявлялись в режиме ПЭТ. В отличие от метастазов в легкие, метастазы в лимфоузлы средостения оказались все ПЭТ-позитивными – 6 (100 %). Метастазы в другие органы выявлены в 7 случаях, из которых все метастазы в кости оказались ПЭТ-позитивными (6 случаев); метастазы в мягкие ткани выявлены в режиме КТ в 1 случае (табл. 1). Методом планарной СВТ отдаленные метастазы выявлены в 18 случаях (29,5 %).

Таблица 1

Чувствительность комбинированного метода ПЭТ/КТ ^{18}F -ФДГ в диагностике отдаленных метастазов ДРЩЖ

	Легкие $n = 14$		Средостение $n = 6$		Другие органы $n = 7$	
	Абс.	%	Абс.	%	Абс.	%
ПЭТ-позитивные	3	21,4	6	100	6	85,7
ПЭТ-негативные	11	78,6	0	0	1	14,3

Отрицательный результат получен по 22 (36 %) ПЭТ/КТ-исследованиях (без патологии 7 (31,8 %), сомнительные результаты 15 (68,2 %)).

Приводим клинический пример ложноотрицательного результата ПЭТ.

Больная Г., 24 года. В 11.2011 г. проведено хирургическое лечение по поводу дифференцированной (папиллярной) формы рака щитовидной железы в объеме тиреоидэктомии и шейной лимфаденэктомии справа. С диагнозом рак щитовидной железы $\text{T}_1\text{N}_{\text{Ib}}\text{M}_0$, I ст в 01.2012 г. больная поступила в радиотерапевтическое отделение системной терапии ЧОКОД для проведения курса радиойодабляции. На посттерапевтической СВТ выявлено патологическое накопление РФП не только в области удаленной щитовидной железы, но и в легкие (рис. 2а). Учитывая данные СВТ, диагноз был изменен на $\text{T}_1\text{N}_{\text{Ib}}\text{M}_1$, II стадия (метастазы в легкие). Больной с целью завершения стадирования и определения отдаленного прогноза проведено ПЭТ/КТ-исследование (рис. 26).

Учитывая отсутствие патологического накопления ФДГ, у больной установлен благоприятный отдаленный прогноз, определена тактика лечения (радиойодтерапия) и наблюдения (УЗИ шеи, КТ грудной клетки). По поводу метастазов в лимфоузлы шеи слева в 03.2012 г. проведена лимфаденэктомия 2–4 уровня слева (гистологически – метастазы папиллярного рака в 6 из 11 лимфоузлов с тотальным замещением структуры). По поводу метастазов в легкие больная получила 6 курсов радиойодтерапии (последний курс в 04.2014 г.). В 07.2014 г. при КТ грудной клетки зафиксирован полный ответ, который сохраняется по настоящее время.

Анализируя данный клинический случай, можно выделить две основные причины ложноотрицательного результата ПЭТ: хорошо-дифференцированный РЩЖ от природы обладает низким уровнем гликолиза, недостаточная разрешающая способность ПЭТ в отношении метастазов в легкие (7–8 мм).

Выводы

Метод ПЭТ/КТ показал более высокую чувствительность в выявлении метастазов в лимфатические узлы шеи (44,3 %), чем СБТ (23 %). При выявлении отдаленных метастазов ПЭТ/КТ и СБТ показали схожую чувствительность (34,5 % и 29,5 % соответственно). За счет комбинации ПЭТ с КТ значительно повышается чувствительность ПЭТ/КТ в отношении выявления метастазов в легкие. Однако учитывая, что из всех отдаленных метастазов ДРЩЖ хуже всего накапливают ^{18}F -ФДГ метастазы в легкие (особенности метастазирования, разрешающая способность ПЭТ), в клинических случаях с подозрением на метастазы легкие с целью инструментальной верификации предпочтительнее выполнение многосрезовой КТ грудной клетки до назначения ПЭТ/КТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sherman S.I. Thyroid carcinoma // *Lancet*, 2003. V. 361. № 9356. P. 501–511.
2. Sipos J.A., Mazzaferri E.L. Thyroid cancer epidemiology and prognostic variables // *Clin. Oncol.* 2010. V. 22. № 6. P. 395–404.
3. Davies L., Welch H.G. Increasing incidence of thyroid cancer in the United States, 1973–2002 // *JAMA*. 2006. V. 295. № 18. P. 2164–2167.
4. Eustatia-Rutten C.F., Corssmit E.P., Biermasz NR et al. Survival and death causes in differentiated thyroid carcinoma // *J. Clin. Endocrinol. Metabolism*. 2006. V. 91. № 1. P. 313–319.
5. Заплатников К., Менцель К., Диль М. и соавт. Позитронно-эмиссионная томография с ^{18}F -фтордезоксиглюкозой в ракурсе современной диагностики, диспансерного наблюдения и лечения дифференцированного рака щитовидной железы // *Проблемы эндокринологии*. 2003. № 4. С. 46–50.
6. Schluter B., Bohuslavizki K.H., Beyer W. et al. Impact of FDG PET on patients with differentiated thyroid cancer who present with elevated thyroglobulin and negative ^{131}I scan. // *J. Nucl. Med.* 2001. V. 42. № 1. P. 71–76.
7. Joensuu H., Ahonen A. Imaging of metastases of thyroid carcinoma with fluorine-18 fluorodeoxyglucose // *J. Nucl. Med.* 1987. V. 28. № 5. P. 910–914.
8. Feine U., Lietzenmayer R., Hanke J.P. et al. Fluorine-18-FDG and iodine-131-iodide uptake in thyroid cancer // *J. Nucl. Med.* 1996. V. 37. № 9. P. 1468–1472.
9. Wang H., Fu H.L., Li J.N. et al. Comparison of whole-body ^{18}F -FDG PET and posttherapeutic ^{131}I scintigraphy in the detection of metastatic thyroid cancer // *Clin. Imaging*. 2008. V. 32. № 1. P. 32–37.
10. Hooft L., Hoekstra O.S., Devillé W. et al. Diagnostic accuracy of ^{18}F -fluorodeoxyglucose positron emission tomography in the follow-up of papillary or follicular thyroid cancer // *J. Clin. Endocrinol. Metabolism*. 2001. V. 86. № 8. P. 3779–3786.
11. Khan N., Oriuchi N., Higuchi T. et al. PET in the follow-up of differentiated thyroid cancer // *Brit. J. Radiol.* 2003. V. 76. № 910. P. 690–695.
12. Dong M.J. et al. Value of ^{18}F -FDG-PET/CT in differentiated thyroid carcinoma with radioiodine-negative whole-body scan. Meta-analysis // *Nucl. Med. Commun.* 2009. V. 30. № 8. P. 639–650.

Поступила: 24.11.2015

Принята к публикации: 18.05.2016

Ю.В. Лысак¹, Б.Я. Наркевич^{2,3}, С.В. Ширяев², В.В. Крылов⁴

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЩЕНИЯ С ЖИДКИМИ РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ ПРИ РАДИОНУКЛИДНОЙ ТЕРАПИИ

Yu.V. Lysak¹, B.Ya. Narkevich^{2,3}, S.V. Shiryaev², V.V. Krylov⁴

Mathematical Modeling of Liquid Radioactive Waste in Radionuclide Therapy

РЕФЕРАТ

ABSTRACT

Цель: Определение проектной мощности станции спецочистки в подразделениях радионуклидной терапии на основе математического моделирования процессов накопления и выдержки на распад жидких радиоактивных отходов.

Материал и методы: Моделирование основано на решении системы линейных дифференциальных уравнений первого порядка с постоянными коэффициентами в рамках определенных упрощающих допущений относительно указанных процессов накопления и выдержки. Для получения конкретных числовых результатов моделирования использованы технические и клинические параметры для типовых подразделений радионуклидной терапии.

Результаты: Показано, что только наличие вакуумной спецканализации в подразделении радионуклидной терапии обеспечивает выполнение требований нормативных документов по допустимости сброса распавшихся жидких радиоактивных отходов в хозяйственно-бытовую канализацию. Потребление воды госпитализированными в «активные» палаты пациентами не должно превышать 50 л/сут на 1 чел.

Выводы: Математическое моделирование позволяет объективизировать описание процессов обращения с жидкими радиоактивными отходами в подразделениях радионуклидной терапии радиологических клиник России.

Ключевые слова: радионуклидная терапия, жидкие радиоактивные отходы, мощность станции очистки, математическое моделирование

Purpose: To determine the estimated capacity of the station cleaning in special units radionuclide therapy based on mathematical modeling of processes of accumulation and exposure to the collapse of liquid radioactive waste.

Material and methods: The simulation is based on solving a system of linear first order differential equations with constant coefficients under certain simplifying assumptions about these processes of accumulation and exposure. For specific numerical simulation results technical and clinical settings for typical units of radionuclide therapy were used.

Results: It is shown that only the presence of a vacuum in the unit special sewage radionuclide therapy ensures that the requirements of regulations on permissible discharge disintegrated liquid radioactive waste into the domestic sewage. Water consumption was hospitalized in "active" patient rooms should not exceed 50 liters / day for 1 person.

Conclusion: Mathematical modeling allows to objectify the processes of dealing with liquid radioactive waste in radionuclide therapy units of radiological clinics in Russia.

Key words: radionuclide therapy, liquid radioactive waste, cleaning station power, , mathematical modeling

Введение

При радионуклидной терапии с введением в организм 1–7 ГБк ¹³¹I больной становится мобильным источником серьезного гамма-облучения для остальных пациентов и персонала подразделения радионуклидной терапии (РНТ). В связи с этим его госпитализируют в так называемую «активную» палату с дополнительной радиационной защитой стен, дверей, пола и потолка, где он находится в закрытом режиме на протяжении нескольких суток, в зависимости от введенной активности радиофармпрепарата (РФП). Такой режим позволяет минимизировать контакт «заряженного» пациента с персоналом клиники и полностью исключить контакты с родственниками и другими лицами, в том числе и с пациентами того же подразделения РНТ.

При этом от 40 до 80 % от введенной активности ¹³¹I выводится с мочой и может попасть в окружающую среду. Чтобы предотвратить такое попадание, в соответствии с действующими нормативными документами

[1–4] «активные» палаты и некоторые другие рабочие помещения центра РНТ должны быть оборудованы системой спецканализации с функциями накопления, выдержки на радиоактивный распад жидких радиоактивных отходов (ЖРО) и последующего удаления очищенных от радиоактивности вод в хозяйственно-бытовую канализацию.

При проектировании центров РНТ к системе спецочистки ЖРО предъявляются достаточно жесткие специфические требования. Они обусловлены целым рядом физико-технических, инженерных, радиоэкологических и экономических факторов:

- 1) высоким общим уровнем активности ¹³¹I в потоке ЖРО, удаляемых из «активных» палат и производственных помещений подразделения РНТ;
- 2) возможными нарушениями предписанных правил по пребыванию больных в «активных» палатах, приводящими к радиационным авариям и инцидентам различного рода (рвота радиоактивными массами,

¹ Московский инженерно-физический институт, Москва

² Российский онкологический научный центр им. Н.Н. Блохина, Москва

³ Институт медицинской физики и инженерии, Москва.
E-mail: narvik@yandex.ru

⁴ Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба, Обнинск

¹ Moscow Engineering Physics Institute, Moscow, Russia

² N.N. Blokhin Russian Oncological Research Center, Moscow, Russia

³ Institute of Medical Physics and Engineering, Moscow, Russia.
E-mail: narvik@yandex.ru

⁴ A.F. Tsyb Medical Radiological Research Center, Obninsk

засоры канализационных коммуникаций, незапланированный перерасход воды и т.д.);

- 3) значительными вариациями как вводимой активности ^{131}I для каждого пациента из вновь поступившей партии больных (выбираемая активность зависит от ряда клинических факторов и состава этой группы пациентов), так и различием темпов выведения ЖРО в систему спецочистки из «активных» палат и из некоторых других производственных помещений подразделения РНТ (фасовочная, моечная, процедурная);
- 4) требованиями новых нормативных документов [2, 3], в которых по сравнению с предыдущими версиями тех же документов [5, 6] норматив для безопасного сброса ЖРО с ^{131}I без какого-либо научного обоснования был ужесточен в 160 (!) раз, т.е. до 0,62 кБк/кг вместо прежних 100 кБк/кг; ошибочность и негативные последствия такого изменения уже обсуждались нами ранее [7];
- 5) необходимостью обладания резервами мощности станции очистки ЖРО с учетом возможного изменения состава и численности потока больных, вводимых им активностей ^{131}I , запланированного или неожиданного долгосрочного выхода из строя канализационных коммуникаций и насосного оборудования и т.д.;
- 6) наконец, необходимостью учета возможности клинических испытаний и дальнейшего применения новых терапевтических РФП, например, меченных альфа-излучающими радионуклидами, а также нестандартных технологий получения РФП и их введения в организм больных.

При этом необходимо учитывать, что система спецочистки ЖРО требует больших расходов на капитальное строительство, монтаж, наладку и сертификацию очистного оборудования (иногда до 80 % от общей стоимости строительства и оснащения центра РНТ). Существенными являются также ограничения по размерам требуемой площади для его размещения, по материалам, конфигурации и толщины наружной радиационной защиты баков-накопителей с ЖРО, а также по соблюдению общих санитарно-гигиенических норм обращения с фекальными отходами, в том числе и по подавлению неприятного запаха.

Таким образом, следует констатировать наличие большого количества плохо контролируемых и даже неизвестных факторов, которые превращают процесс проектирования системы спецочистки ЖРО из чисто инженерного в своего рода эвристическую процедуру. Отсюда следует, что для повышения радиационно-гигиенической и экономической эффективности проектирования необходимо использовать всю доступную априорную информацию о поступлении, накоплении, выдержке и удалении ЖРО из системы баков-накопителей как основы всей системы спецочистки ЖРО.

Целью настоящей работы является математическое моделирование процессов обращения с ЖРО, результаты которого позволят объективизировать выбор технических параметров и режимов работы станции спецочистки ЖРО в подразделениях РНТ.

Материал и методы

Технология сбора и удаления ЖРО заключается в следующем: с унитазов в «активных» палатах и из фасовочной и моечной блока радионуклидного обеспечения радиоактивные сливные воды поступают в поочередно заполняемые баки-накопители, где ЖРО выдерживаются на распад необходимый промежуток времени, и после достижения удельной активности ниже установленного норматива (0,62 кБк/кг для ^{131}I), баки поочередно, как правило, с интервалом в несколько недель, опорожняются в хозяйственно-бытовую канализацию.

Для формирования математической модели и последующего расчета мощности системы спецочистки ЖРО были использованы следующие технические параметры и характеристики такой системы:

- m — количество занимаемых больными коек в «активных» палатах отделения РНТ (чел.);
- q — средняя активность ^{131}I , вводимая одному больному в ходе курса РНТ (ГБк/чел.);
- $T_{1/2}$ — период полураспада ^{131}I , равный 8,04 сут;
- k — скорость расходования воды на одного больного или, вернее, скорость поступления ЖРО в бак-накопитель от каждого больного (л/сут на 1 чел.);
- V — емкость каждого бака-накопителя (л);
- n — количество баков-накопителей на станции спецочистки ЖРО (шт.);
- p — коэффициент сменности коек в «активных» палатах на неделю (смена/нед);
- c_0 — предельно-допустимая концентрация ^{131}I в сливных водах, сбрасываемых в хозяйственно-бытовую канализацию (0,62 кБк/кг).

Рассчитаем среднее время заполнения одного бака T^* :

$$T^* = \frac{V}{mk} [\text{сут}] = \frac{V}{7mk} [\text{нед}]. \quad (1)$$

Дополнительно следует учесть еще и медико-физиологические факторы, влияющие на проектную мощность станции спецочистки ЖРО:

1. Структура потока больных. Практика работы МРНЦ им. А.Ф. Цыба показала, что наибольшую пропускную способность отделения обеспечивает следующая схема госпитализации: вначале (например, во второй половине дня понедельника) все m коек занимают больные дифференцированным раком щитовидной железы (ДРЩЖ). Каждый из них находится в «активной» палате в среднем 4 сут (2 раза по 0,5 сут + 3 полных суток с понедельника по первую половину дня пятницы включительно). В день выписки после дезактивации палат и смены постельного белья те же койки во вторую половину дня пятницы занимают m больных диффузным токсическим зобом (ДТЗ), которые в среднем находятся на них в течение 3 сут (2 раза по 0,5 сут + 2 полных суток с пятницы по первую половину дня понедельника включительно).

2. Не останавливаясь на различных способах расчета вводимых активностей ^{131}I онкологическим и эндокринологическим больным, будем считать, что в среднем больному ДРЩЖ вводят 4 ГБк ^{131}I , а больному ДТЗ — 1 ГБк ^{131}I . Эти данные в целом несколько

завышены, хотя, как свидетельствует опыт МРНЦ им. А.Ф. Цыба, бывают клинические случаи, требующие и более высоких значений вводимой активности. Такое завышение сделано сознательно, чтобы расчет мощности станции спецочистки был выполнен по консервативному сценарию.

3. Наиболее сложным является вопрос определения скорости выведения ^{131}I из организма пациентов обеих категорий и, следовательно, учет скорости поступления ^{131}I в баки-накопители. С этой целью используем давно известный в эксперименте и в клинике эффект постепенного снижения темпа выведения активности ^{131}I из организма больного со временем, причем с достаточной для прикладных целей точностью такое снижение описывается моноэкспоненциальной зависимостью [8, 9].

С учетом всех перечисленных факторов предлагается простая математическая модель процесса кинетики ЖРО, которая описывается системой из двух линейных неоднородных дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{aligned} \frac{dR_i(t)}{dt} &= -\lambda R_i(t) - a_i R_i(t) = -(\lambda + a_i) R_i(t) \\ \frac{dQ_i(t)}{dt} &= -\lambda Q_i(t) + a_i R_i(t) \quad 0 \leq t \leq T^* \end{aligned} \quad i = 1, 2, (2)$$

где $i = 1$ относится к категории больных ДРЩЖ, $i = 2$ — к категории ДТЗ. Здесь $R_i(t)$ — функция удержания ^{131}I в организме больного i -ой категории, $Q_i(t)$ — функция накопления в баке активности ^{131}I от больного категории i , λ — постоянная радиоактивного распада ^{131}I , равная $\ln 2 / T_{1/2}$, тогда как a_i — скорость выведения ^{131}I из организма больного категории i , выраженная в отнормальных единицах сут $^{-1}$:

$$a_i = \frac{\ln 2}{T_{1/2}^i}, \quad (3)$$

где $T_{1/2}^i$ — период полувыведения активности ^{131}I из организма больного категории i .

В доступной нам литературе не удалось найти достоверных значений периодов полувыведения $T_{1/2}^1$ для больных ДРЩЖ и $T_{1/2}^2$ для больных ДТЗ. Дело в том, что для получения таких данных необходимо проводить многократную радиометрию больных с достаточно высоким содержанием ^{131}I в организме, и подобные измерения обуславливают чрезмерно высокий уровень профессионального облучения персонала, проводящего радиометрию. Чтобы обойти это затруднение, предположим, что у всех больных при выписке из стационара в организме содержится предельно-допустимая активность, необходимая для обеспечения надлежащего уровня радиационной безопасности всех лиц, которые контактируют с больным после его выписки. Нормативы допустимой остаточной активности при выписке больных из стационара, согласно [1], составляют 400 МБк ^{131}I при допустимой мощности эквивалентной дозы 20 мЗв/ч на расстоянии 1 м от тела больного. Опыт МРНЦ им. А.Ф. Цыба показывает, что для подавляющего большинства выписываемых из стационара больных обеих категорий эта мощность

дозы близка к указанной, т.е. остаточная активность в теле больного также близка к указанной. Если принять, что у всех больных при выписке из стационара в теле будет содержаться по 400 МБк, то с учетом принятого нами моноэкспоненциального характера выведения ^{131}I при первоначально введенных активностях 4000 и 1000 МБк с продолжительностью пребывания 4 и 3 сут для больных ДРЩЖ и ДТЗ соответствующие периоды биологического полувыведения составят 1,21 и 2,27 сут соответственно. Тогда $a_1 = 0,575$ и $a_2 = 0,305$ сут $^{-1}$.

Решение первого уравнения системы (3) есть:

$$R_i(t) = q_i \exp[-(\lambda + a_i)t] \quad R_i(0) = q_i, \quad i = 1, 2. \quad (4)$$

Подставляя (4) во второе уравнение системы (3), получим:

$$\frac{dQ_i(t)}{dt} = -\lambda Q_i(t) + a_i q_i e^{-(\lambda + a_i)t}. \quad (5)$$

Решение этого дифференциального уравнения есть:

$$Q_i(t) = q_i e^{-\lambda t} (1 - e^{-a_i t}) \quad Q_i(0) = 0 \quad i = 1, 2. \quad (6)$$

Результаты и обсуждение

Рассмотрим числовой пример для типового отделения РНТ с простейшей негерметизированной системой спецочистки ЖРО: $m = 16$ коек; $k = 100$ л/сут; $V = 38000$ л; $p = 2$ смены в неделю. Эти исходные данные соответствуют показателям строящегося в РОНЦ им. Н.Н. Блохина центра радионуклидной терапии. Здесь следует отметить, что проект станции очистки ЖРО в РОНЦ им. Н.Н. Блохина был разработан еще исходя из прежнего норматива 100 кБк/л по сбросу ^{131}I в хозяйственно-бытовую канализацию, тогда как новый норматив 0,62 кБк/л привел к резкому повышению требований к мощности станции.

Принимаем $t_1^* = 4$ сут (продолжительность поступления в бак активности от m больных как первой смены, так и всех последующих смен с ДРЩЖ) и $t_2^* = 3$ сут (то же самое для первой смены и всех последующих смен больных с ДТЗ). Теперь по формуле (6) рассчитаем поступившие в бак к моментам t_1^* и t_2^* активности от больных первой и второй категорий соответственно:

$$Q_1(t_1^*) = m q_1 \exp(-\lambda t_1^*) [1 - \exp(-a_1 t_1^*)] = 40,79 \text{ ГБк} \quad (7)$$

$$Q_2(t_2^*) = m q_2 \exp(-\lambda t_2^*) [1 - \exp(-a_2 t_2^*)] = 7,39 \text{ ГБк} \quad (8)$$

Таким образом, с учетом радиоактивного распада и снижения темпа выведения активности ^{131}I из организма больного, от 16 больных ДРЩЖ после проведенного курса РНТ с введением им по 4 ГБк ^{131}I на момент выписки этих больных в бак будет содержаться 40,79 ГБк, а от 16 больных ДТЗ с введением им по 1 ГБк ^{131}I туда же добавится еще 7,39 ГБк.

Общее время заполнения бака определяется по формуле (1). Если полное число недель, вычисленное по этой формуле, обозначить как r , то в бак суммарно поступит r раз по $Q_1(t_1^*)$ и r раз по $Q_2(t_2^*)$ активности ^{131}I . Тогда для тех же исходных данных и $V = 38 \text{ м}^3$ значение $T^* = 23,8 \text{ сут} \approx 4$ нед.

Однако активность от каждой смены больных подвергается радиоактивному распаду не только непосред-

ственно в процессе своего поступления в бак, но и после того, т.е. в ходе пребывания в баке вплоть до окончания заполнения всего бака. Тогда для активности, поступившей за первую неделю накопления, можно написать:

$$\begin{aligned} Q_{11}(t_1^*) &= Q_1(t_1^*) \exp[-\lambda(r-1)t_1^* - \lambda r t_2^*] \\ Q_{21}(t_2^*) &= Q_2(t_2^*) \exp[-\lambda(r-1)t_1^* - \lambda(r-1)t_2^*] \end{aligned} \quad (9)$$

Аналогичные выражения можно составить и для последующих смен вплоть до r . После этого все активности $Q_{1j}(t_1^*)$ и $Q_{2j}(t_2^*)$ ($j = 1, \dots, r$) надо просуммировать, чтобы получить полную активность $Q(T^*)$, накопленную в баке ко времени его заполнения T^* с учетом радиоактивного распада за прошедшие pr смен:

$$\begin{aligned} Q(T^*) &= \sum_{j=1}^r Q_{1j}(t_1^*) + \sum_{j=1}^r Q_{2j}(t_2^*) = \\ &= Q_1(t_1^*) \sum_{j=1}^r \exp[-\lambda(r-j)t_1^*] \exp[-\lambda(r-j+1)t_2^*] + \\ &+ Q_2(t_2^*) \sum_{j=1}^r \exp[-\lambda(r-j)t_1^*] \exp[-\lambda(r-j)t_2^*]. \end{aligned} \quad (10)$$

Далее по времени будет продолжаться только радиоактивный распад до концентрации ^{131}I , равной c_0 . Рассчитаем $Q(T^*)$ со следующими исходными данными $Q_1(t_1^*) = 40,79$ ГБк, $Q_2(t_2^*) = 7,39$ ГБк, $V = 38 \text{ м}^3$, $k = 100 \text{ л/сут} \times \text{чел.}$, $T^* = 23,8 \text{ сут} \approx 4 \text{ нед.}$, т.е. $r = 4$. Тогда $Q(T^*) = 78,12$ ГБк, а время необходимой выдержки на полного бака с активностью $Q(T^*)$ составляет:

$$T = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{Q(T^*)}{Vc_0} = 94,0 \text{ сут} \approx 13,4 \text{ нед.} \quad (11)$$

Общее время накопления и выдержки составит $T^* + T = 23,8 + 94,0 = 117,8 \text{ сут} \approx 16,8 \text{ нед.}$ Минимальное количество баков n должно быть таким, чтобы общая продолжительность накопления и выдержки активности во всех баках была бы не меньше, чем продолжительность этого цикла. При этом значения n , T и T^* должны быть связаны между собой неравенством:

$$nT^* \geq T + T^*. \quad (12)$$

Тогда:

$$n = 1 + \frac{T}{T^*} = 5,22 \approx 5 \text{ баков.} \quad (13)$$

Таким образом, расчет показывает, что при указанных выше исходных данных количество баков емкостью 38 м^3 каждый должно составлять 6 (5 основных и 1 резервный), т.е. не удовлетворяет уже спроектированной и построенной в РОНЦ им. Н.Н. Блохина системе очистки ЖРО из 4 баков.

Устранение этого противоречия возможно только путем ограничения объемов потребляемой воды в центре РНТ. Если вместо $k = 100 \text{ л/сут} \times \text{чел.}$ использовать более жесткое условие $k = 50 \text{ л/сут} \times \text{чел.}$, то повторные расчеты по формулам (1) и (10) – (13) дают следующие значения $T^* = 47,6 \text{ сут.}$, т.е. $r \approx 7 \text{ нед.}$, $Q(T^*) = 83,9$ ГБк, $T = 94,9 \text{ сут.}$, $T^* + T = 142,5 \text{ сут} \approx 20 \text{ нед.}$, $n = 3$ бака. Отметим, что значение $k = 50 \text{ л/сут} \times \text{чел.}$ может быть реализовано только при оснащении станции очистки ЖРО вакуумной системой спецканализации, обеспечивающей резкое сокращение объемов сбрасываемой через унитазы и водопроводные раковины воды.

Таким образом, только существенное ограничение потребления воды позволит обеспечить выполнение

нормативных требований и соответствие разработанному ранее проекту станции спецочистки ЖРО в РОНЦ им. Н.Н. Блохина. Вполне обоснованно можно полагать, что с аналогичными трудностями сталкиваются и другие центры РНТ, уже построенные и находящиеся в эксплуатации в различных городах России.

Выводы

1. Математическое моделирование процессов заполнения и выдержки на радиоактивный распад с учетом скорости выведения ^{131}I из организма госпитализированных больных категорий ДРЩЖ и ДТЗ в рамках разумных упрощающих допущений позволяет формализовать описание процессов обращения с ЖРО и, тем самым, объективизировать выбор технических параметров и режимов работы станций спецочистки ЖРО в подразделениях РНТ радиологических клиник России.

2. Непродуманное введение нового норматива по предельно-допустимой концентрации ^{131}I в ЖРО, сбрасываемых в хозяйственно-бытовую канализацию, для уже действующих в России центров РНТ обуславливает необходимость либо жесткого ограничения объемов потребляемой воды, которое не может быть реализовано без вакуумной спецканализации, либо снижения пропускной способности центров РНТ. Последнее является абсолютно неприемлемым, учитывая большие очереди больных на госпитализацию во всех действующих центрах РНТ России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. СанПиН 2.6.1.2523-09.
2. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ-99/2010. СП 2.6.1.2612-10. (в ред. изменений № 1, утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 16.09.2013 № 43).
3. Санитарные правила обращения с радиоактивными отходами СПОРО-2002. Изменения и дополнения № 1 к СП 2.6.6.1168-02. СанПиН 2.6.6.2796-10.
4. Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при проведении лучевой терапии с помощью открытых радионуклидных источников. СанПиН 2.6.1.2368-08.
5. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ-99/2010. СП 2.6.1.2612-10.
6. Санитарные правила обращения с радиоактивными отходами (СПОРО-2002). СП 2.6.6.1168-02.
7. Наркевич Б.Я., Ширяев С.В., Крылов В.В. Повышает ли новая версия ОСПОРБ-99/2010 уровень радиационной безопасности в ядерной медицине? // Мед. радиол. и радиац. безопасность. 2015. Т. 60. № 6. С. 5–9.
8. Manual on Therapeutic Uses of Iodine-131. IAEA. Vienna. 1996. 65 pp.
9. Radiological Protection after Nuclear Medicine Procedures. ICRP Publication 94. 2006. 27 pp.

Поступила: 29.01.2016

Принята к публикации: 18.05.2016

**И.А. Знаменский^{1,2}, А.К. Кондаков^{1,2}, В.В. Милькин¹, Д.Ю. Мосин¹,
А.В. Гречко¹**

**ПОЗИТРОННО-ЭМИССИОННАЯ ТОМОГРАФИЯ С КИСЛОРОДОМ-15
В НЕВРОЛОГИИ. ЧАСТЬ 2. КЛИНИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ**

**I.A. Znamenskiy^{1,2}, A.K. Kondakov^{1,2}, V.V. Mil'kin¹, D.Ju. Mosin¹,
A.V. Grechko¹**

**Positron Emission Tomography with Oxygen-15 in Neurological Practice.
Part 2. Clinical Application**

РЕФЕРАТ

Цель: Проанализировать клиническое применение позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ) с радиофармпрепаратами (РФП) на основе ^{15}O и определить границы её применимости в настоящее время.

Материал и методы: Представлен обзор литературных источников по теме исследования, отобранных в международных библиографических базах данных.

Результаты: Показано, что ПЭТ с РФП на основе ^{15}O позволила достаточно глубоко изучить патофизиологические основы ряда заболеваний головного мозга, среди которых важнейшее место занимает ишемический инсульт. Кроме того, в части 2 обзора рассмотрено применение ПЭТ в диагностике хронических цереброваскулярных заболеваний и в качестве «золотого стандарта» для валидации других методов лучевой диагностики.

Выводы: ПЭТ с РФП на основе ^{15}O в настоящее время — единственный прямой валидированный метод измерения ряда величин, характеризующих перфузию и функциональные способности головного мозга. Она может быть применена в оценке зоны ишемической полутени, контроле качества лечения пациентов с хроническими нарушениями головного мозга, а также в научно-исследовательских работах. Широкому распространению и внедрению этого метода препятствует необходимость реализации большого количества дорогостоящих технических мероприятий.

Ключевые слова: позитронная эмиссионная томография, ^{15}O , перфузия, головной мозг, обзоры

ABSTRACT

Purpose: To analyze clinical application of positron-emission tomography with radiopharmaceuticals based on oxygen-15 and to determine the field of its application.

Material and methods: The review of sources, selected from international bibliographic databases.

Results: It is shown that PET with radiopharmaceuticals based on oxygen-15 leads to deep exploration of pathophysiologic basis of a number of brain diseases, among which is ischemic stroke which occupies an important place. Furthermore, the review presents clinical application of PET for chronic cerebrovascular diseases and as a gold standard for validation of other neuroimaging modalities.

Conclusion: PET with radiopharmaceuticals based on oxygen-15 is the only one direct validated method of measurement of a number of quantities characterizing the perfusion and functional capacity of the brain. It may be used in the evaluation of penumbra, quality control of treatment for chronic cerebrovascular diseases and in research. Wide application of this method is prevented by a need of implementation of a large number of costly technical measures.

Key words: positron emission tomography, ^{15}O , perfusion, brain, review

Введение

Настоящая работа посвящена обзору использования позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ) с изотопом кислорода-15 (^{15}O) в неврологической практике. С ростом доступности позитронно-эмиссионной томографии остро встают вопросы о возможностях её применения как в клинической практике, так и в исследовательской деятельности. Наша работа суммирует опыт применения ПЭТ с радиофармпрепаратами (РФП) на основе ^{15}O в практике зарубежных научных и клинических центров. В первой части этого обзора, опубликованной ранее, были рассмотрены основные процессы, лежащие в основе

физиологии распределения РФП в тканях головного мозга, а также история появления, развития и становления ПЭТ, основные методики и лучевая нагрузка при проведении исследований с РФП на основе ^{15}O .

^{15}O и РФП на его основе представляют большой интерес, т.к. являются естественным биомаркером экстракции кислорода из крови и потребления его тканями организма, в том числе головным мозгом.

Методология поиска

В этот обзор включены статьи, обзоры, оригинальные исследования, опубликованные с 1960 г. по настоящее время, индексируемые в базах дан-

¹ Госпиталь для incurable больных — Научный лечебно-реабилитационный центр, Москва. E-mail: doc551@yandex.ru
² Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова МЗ РФ, Москва

¹ Hospital for incurable patients — Scientific and Medical Rehabilitation Center, Moscow, Russia. E-mail: doc551@yandex.ru
² N.I. Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russia.

ных MedLine и РИНЦ. Поиск статей осуществлялся с использованием ресурса PubMed по ключевым словам: positron-emission tomography (термин MeSH), oxygen 15. В поисковых системах РИНЦ и Google Scholar производился поиск русскоязычных статей с использованием ключевых слов: ^{15}O -вода, ^{15}O -кислород, позитронно-эмиссионная томография. Дополнительно осуществлялся поиск опубликованных данных исследований по библиографическим ссылкам в найденных статьях.

Таким образом, в исследование было включено 93 работы, из них 87 идентифицировано в базах данных, а 6 — при поиске по библиографическим ссылкам.

Во второй части обзора использованы 65 источников.

Патофизиологические основы цереброваскулярных заболеваний

В первой части обзора [1] кратко освещались ключевые патофизиологические синдромы, характерные для цереброваскулярных заболеваний: «нищя» (misery) и «избыточная» (luxury) перфузия, проявляющиеся несовпадением между перфузией головного мозга и его физиологической функцией. Превосходство перфузии над функциональной активностью нейронов, называемое синдромом избыточной перфузии (luxury perfusion syndrome), впервые введено N.A. Lassen [2], в то время как при обратном явлении, синдроме «нищей перфузии» (misery perfusion), потребление кислорода тканью повышено на фоне значительно сниженной или даже отсутствующей перфузии [3].

Для пояснения механизма развития этих синдромов целесообразно осветить некоторые основы саморегуляции перфузии головного мозга. Основным параметром перфузии, часто используемым в практике радионуклидной диагностики, является мозговой кровоток (CBF, cerebral blood flow), отражающий объём крови, перфузирующий определённую часть мозгового вещества в течение некоторого времени и выражаемый обычно в мл/(100 г × мин). Объём крови, находящейся в сосудистом русле определённого участка головного мозга в заданный момент времени, обозначают как объём мозгового кровотока (CBV, cerebral blood volume) и измеряют в мл/100 г. Среднее время транзита (MTT, mean transit time) — это то время, в течение которого болюс введённого вещества (РФП или контрастного вещества) проходит по сосудистому руслу внутри определённого участка мозга. Среднее время транзита определяют как отношение объёма мозгового кровотока к мозговому кровотоку ($\text{MTT} = \text{CBV}/\text{CBF}$).

При использовании ПЭТ можно дополнительно определить специфичные параметры мозгового кровотока: фракцию экстракции кислорода (OEF, oxygen extraction fraction, т.е. часть кислорода, метаболизируемого тканью головного мозга) и скорость утилизации кислорода в головном мозге (CMRO_2 , cerebral metabolic rate of oxygen). Последняя величина, введённая в 1948 г. в работе Kety и Schmidt [4], является производной величиной от мозгового кровотока и фракции экстракции кислорода, и в настоящее время может быть рассчитана при ПЭТ с РФП на основе кислорода-15 различными методами, как с использованием образцов крови пациента [5], так и без них [6]. При ПЭТ нормальная величина CBF составляет 48 мл/(100 г × мин), CMRO_2 — 2,8 мл/(100 г × мин), CBV — 3,7 мл/100 г и MTT — 4,7 с [7].

Рассматривая цереброваскулярные заболевания, нельзя обойти вниманием механизмы саморегуляции кровотока в головном мозге. При изменении перфузионного давления в головном мозге (CPR, cerebral perfusion pressure), представляющего собой разность между артериальным и венозным давлением в пределах 70–150 мм рт. ст., изменение мозгового кровотока оказывается незначительным. Такая регуляция осуществляется, в первую очередь, благодаря изменению диаметра, а соответственно и сопротивления церебральных сосудов, в основном артериол. При повышении CPR сосуды сужаются, а при снижении — расширяются, способствуя сохранению мозгового кровотока на прежнем уровне. При снижении CPR ниже пределов динамической саморегуляции, истощении вазодилататорного резерва, начинается постепенное снижение CBF, однако при этом потребности клеток мозга в кислороде компенсируются увеличивающейся фракцией экстракции кислорода, которая может возрастать с 30–40 до 70 %, поддерживая, таким образом, скорость утилизации кислорода в головном мозге на постоянном уровне [7]. Состояние, при котором нормальная скорость метаболизма кислорода поддерживается возрастающей фракцией экстракции кислорода, называется олигиемией, и в таком состоянии весь головной мозг или его участок может находиться достаточно долго. При продолжающемся снижении CPR развивается ишемия, при которой скорость утилизации кислорода тканями значительно снижается. Схематично взаимоотношения между перфузионным давлением и параметрами мозгового кровотока и метаболизма представлены на рис. 1.

Благодаря использованию изотопа ^{15}O появилась возможность изучать метаболизм кислорода непосредственно на человеке. Связь между скоростью мозгового кровотока и степенью утилизации кислорода, определённая у человека в состоянии покоя (лёжа в затемнённой комнате, без специальной

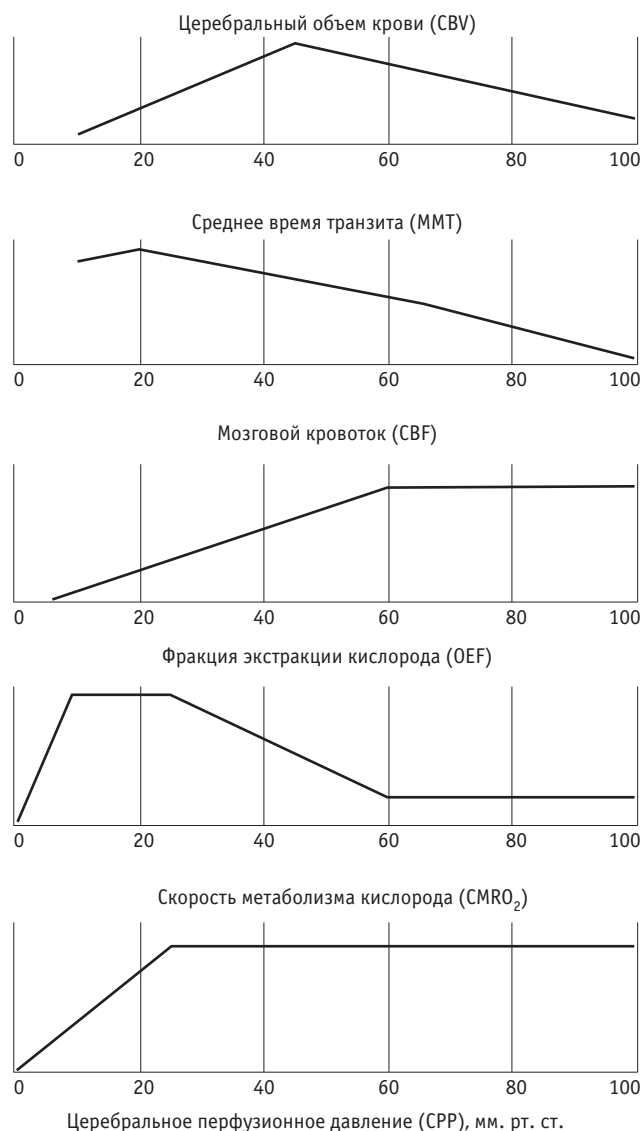


Рис. 1. Взаимоотношение между церебральным перфузионным давлением (по горизонтальной оси) и параметрами мозгового кровотока и метаболизма. При нахождении в пределах границ динамической саморегуляции (свыше 60 мм. рт. ст.), постоянная скорость метаболизма кислорода поддерживается увеличением объёма мозгового кровотока. При снижении CPP в пределах 20–60 мм. рт. ст. компенсаторные механизмы реализуются с использованием увеличения фракции экстракции кислорода

сенсорной стимуляции и когнитивной нагрузки), показала однородное распределение фракции экстракции кислорода в сером и белом веществе головного мозга [8, 9]. Было выявлено также, что скорость и объём мозгового кровотока имеют практически линейную взаимосвязь [10]. Изучение саморегуляции давления в головном мозге на фоне изменения перфузионного давления также было осуществлено методом ПЭТ с ^{15}O . В частности, показано, что среднее время транзита является чувствительным показате-

лем цереброваскулярного гемодинамического резерва, отражающего способность сосудов головного мозга к дилатации [10–12].

Изменения мозгового кровотока и метаболизма при инсульте

Технологии ПЭТ с РФП на основе ^{15}O оказали значительное влияние на представления о патофизиологических основах острых нарушений мозгового кровообращения и характере их течения. ПЭТ с этими РФП предоставила уникальную возможность количественно оценить доставку и утилизацию кислорода к определённым участкам головного мозга, а также получить информацию о взаимоотношении (соответствии или несоответствии) между перфузией и утилизацией кислорода. Поскольку эти процессы вовлечены в патогенез ишемии головного мозга, то они, в первую очередь, применяются для оценки инсульта и других цереброваскулярных заболеваний.

Несовпадение между перфузией и метаболизмом кислорода по типу «избыточной перфузии» было впервые подтверждено данными, полученными при помощи ПЭТ головного мозга с изотопом ^{15}O [13–15]. При этом на фоне высокой перфузии определялась сниженная фракция экстракции кислорода, что обуславливало значительно сниженную регионарную скорость утилизации кислорода тканями головного мозга. Этот вид распределения РФП (паттерн) обнаруживался на второй день после начала развития инсульта и практически исключительно возникал в областях некроза тканей головного мозга. Такой паттерн отражает реперфузию некротизированных тканей головного мозга.

Однако в других регионах головного мозга был выявлен иной феномен: на фоне сниженного мозгового кровотока определялись участки повышенной утилизации кислорода [16]. Такой паттерн распределения был назван «нищя перфузия», и связан с истощением вазодилаторного резерва. Таким образом, «нищя перфузия» отражает жизнеспособные участки головного мозга с нарушенной регуляцией регионарной перфузии, связанной со снижением регионарного мозгового кровотока [17] (рис. 2).

Синдром «нищей перфузии» преобладал при острой фазе инсульта [13, 14]. В этом случае он отражал наличие так называемой пенумбры, которую также называют ишемической полутенью: гипоперфузированной и повреждённой, но всё ещё жизнеспособной ткани. Эта находка была ключевой в момент её обнаружения в начале 1980-х гг., т. к. в отличие от принятой догмы о быстрой и необратимой гибели нейронов после окклюзии артерии, она устанавливала, что в течение нескольких часов вокруг очага инсульта сохраняется жизнеспособная ткань, способная к восстановлению. Это в значительной мере повлия-

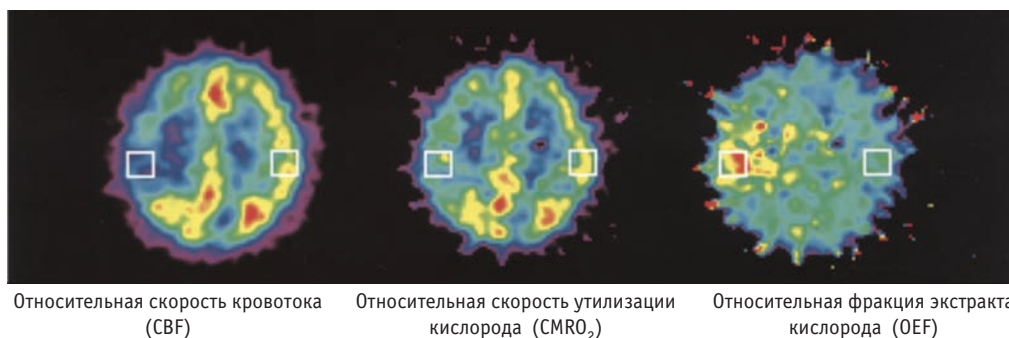


Рис. 2. Позитронно-эмиссионная томография. Рассчитанные параметры скорости мозгового кровотока, скорости утилизации кислорода и относительной фракции экстракции кислорода из двух ПЭТ-томограмм с ^{15}O -водой и ингаляционным применением $^{15}\text{O}_2$. Изображения демонстрируют снижение скорости мозгового кровотока в правом полушарии при сохраненной скорости утилизации кислорода и, соответственно, повышенной фракцией экстракции кислорода (синдром «нищей перфузии»). На томограммах квадратом обозначена зона интереса, соответствующая ишемическому повреждению, а также контралатеральная зона интереса. Изображение взято из [6].

ло на развитие представлений о лечении инсульта и сформировало лечебную тактику, применяемую в настоящее время в острую и остерейшую фазы острого нарушения мозгового кровообращения [17].

Таким образом, ПЭТ с РФП на основе ^{15}O , которые позволяют рассчитать не только CBF, но и CMRO₂, применима во время остерейшей и острой фаз инсульта для оценки зоны пенумбры с целью прогнозирования исхода заболевания и принятия решения о возможности тромболизиса. При этом пороговые значения CMRO₂ для зоны необратимого инфаркта составляют от 0,87 до 1,7 мл/(100 г × мин) [18–21]. Различия обусловлены разными методами проведения ПЭТ и должны быть стандартизованы для каждой клиники в соответствии с применяемым протоколом. В общем случае сочетание параметров CBF менее 60 % и CMRO₂ свыше 40 % от должных значений позволяют точно определить зону, реперфузия которой приведёт к восстановлению её функциональной активности [7].

Широкое проспективное исследование, проведенное Marchal et al., позволило формально показать существование зоны пенумбры у человека в фазе остерейшего инсульта, регистрируя совпадение клинической картины и зоны поражения со снижением скорости кровотока и высокой фракцией экстракции кислорода [22]. Пациенты, у которых в течение 18 ч после появления симптомов инсульта при ПЭТ с ^{15}O регистрировалась локальная гиперперфузия с нормальной или немного повышенной скоростью метаболизма кислорода, имели более благоприятный прогноз, что позволило предположить, что ранняя спонтанная реканализация артерий помогала восстановить ткань в зоне ишемической полутени [23, 24].

Эти исследования показали, что зона пенумбры головного мозга не только существует, но и может быть безопасно восстановлена. Последовавшие за этой работой рандомизированные исследования позволили доказать, что тромболизис в течение 3 ч от

начала развития инсульта способен помочь пациентам, и это определяет тактику лечения пациентов с острым инсультом, существующую до настоящего времени [25].

ПЭТ с ^{15}O сыграла важную роль в изучении не-прямых эффектов инсульта, в частности, в выявлении зоны совпадения сниженных показателей как перфузии, так и утилизации кислорода, расположенной вне инфарктной зоны, и, соответственно, не вызванной непосредственно окклюзией артерии. Первое сообщение о таком эффекте описывало перекрёстный мозжечковый диашиз — снижение перфузии в контралатеральном, относительно очага, полушарии мозжечка [26, 27]. При сопоставлении с ПЭТ с 18-фтор-дезоксиглюкозой было выявлено, что и утилизация глюкозы при диашизе уменьшается сходным образом [28, 29]. Показано, что эти изменения обратимы у небольшого числа пациентов, которые быстро восстанавливаются после инсульта или транзиторных дефицитов, в то время как при стойком гемипарезе он сохраняется долгое время [30–32]. Более поздние исследования установили, что, хотя степень таких метаболических изменений коррелирует со степенью выраженности неврологического дефицита, этот эффект не прямой и связан с объёмом инфаркта [32]. Механизм перекрёстного мозжечкового диашиза связывают с разрывом на уровне первого корково-мостового нейрона корково-мостомозжечкового пути, несущем афферентные импульсы к коре контралатерального полушария мозжечка, что приводит к транснавальному снижению метаболизма [33].

Схожий тип непрямого эффекта инсульта был обнаружен в коре ипсилатерального полушария при таламическом инсульте [34, 35]. Этот эффект коррелировал по времени и выраженности проявления с неврологическим дефицитом, отражая разрушение полушарной таламо-кортикальной сети [36].

Хроническая ишемия головного мозга

В 1990-х гг. клиническое применение ПЭТ с ^{15}O расширилось, особенно в области изучения хронической ишемии головного мозга. Изучался гемодинамический эффект хронической окклюзии сонной артерии, и в проспективных исследованиях было показано, что наличие синдрома «нишей перфузии» является сильным предиктором высокого риска последующего ипсилатерального инсульта [37–41]. Рандомизированные клинические исследования по использованию экстракраниально-интракраниального шунтирования по сравнению с консервативным лечением, для отбора пациентов в которые использовались фракция экстракции кислорода или нарушенный цереброваскулярный резерв, показали небольшую, но статистически значимую пользу от хирургического вмешательства (рис. 3) [42, 43]. Тем не менее, вокруг необходимости интервенционного лечения до сих пор существуют споры, т.к. ряд исследований показывает, что оно не улучшает жизненные показатели пациентов [44, 45].

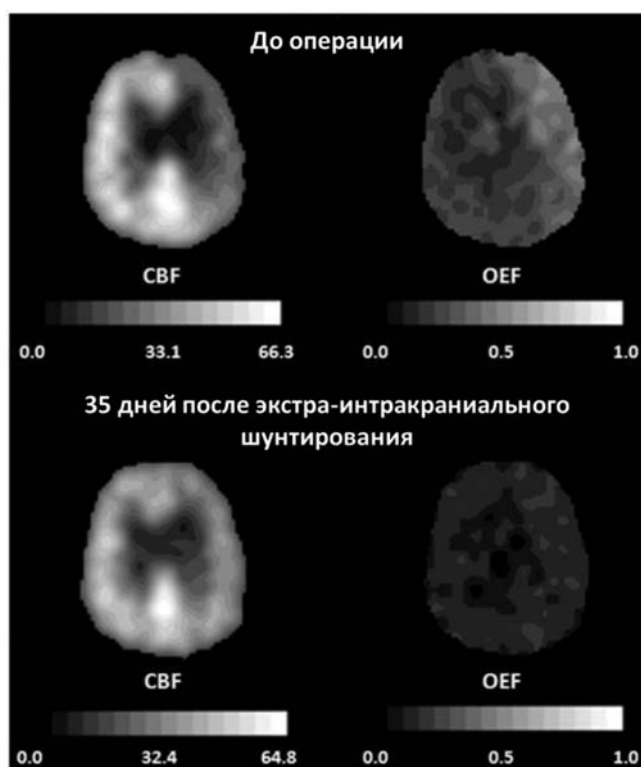


Рис. 3. Позитронно-эмиссионная томография. Рассчитанные значения мозгового кровотока и фракции экстракции кислорода у пациента до (верхний ряд) и через 35 дней после (нижний ряд) экстра-интракраниального шунтирования. До операции определяется снижение скорости кровотока и повышение фракции экстракции кислорода в левом полушарии. Через 35 дней после операции мозговой кровоток восстанавливается. Изображение из [46]

Современное использование ПЭТ с радиофармпрепаратами на основе ^{15}O

Несмотря на то, что большая часть исследований, посвященных ПЭТ с ^{15}O в оценке неврологических заболеваний, была опубликована в 1980–90-х гг., в настоящее время исследования с использованием этого высокочувствительного метода продолжают. В частности, ^{15}O используется для оценки вторичной тканевой ишемии при травмах головного мозга [47–49]. Используя ПЭТ с ^{15}O в качестве «золотого стандарта», исследователи острого инсульта валидировали соотношение диффузионно-взвешенного и перфузионно-взвешенного режимов МР-томографии как аналога для определения соотношения ядра инсульта и ишемической полутени [50, 51].

В Японии ПЭТ с ^{15}O является рутинным методом исследования при определении показаний к хирургической ревазуляризации головного мозга. Исследование больших групп пациентов показало, что снижение скорости метаболизма кислорода в ткани головного мозга, расположенной в области коры дистальнее места длительно существующей окклюзии, также ассоциировано со снижением связывания ^{11}C -флуменазила, и, таким образом, отражает клинически не определяемую скрытую гибель нейронов головного мозга, вызванную повторными эпизодами ишемии [52–55].

Метод перфузионной ПЭТ с ^{15}O так же применяется для быстрой регистрации активации участков головного мозга человека под воздействием перцептивных [56, 57] или когнитивных стимулов [58–60]. Исследования головного мозга методом МРТ с использованием глубокой стимуляции головного мозга могут быть связаны с определёнными техническими трудностями, включая искажения в магнитном поле вследствие наличия электродов, поэтому в таком случае ПЭТ может быть хорошей дополнительной методикой [17].

Перспективные разработки

В течение последних лет на фоне широкого развития и увеличения доступности МРТ, в том числе с использованием высокопольных томографов, продолжается дискуссия о необходимости ПЭТ с ^{15}O и его соединениями для диагностики заболеваний головного мозга. В частности, в недавней работе Paul Cumming [61] называет ПЭТ с ^{15}O «белым слоном» — дорогой методикой, без которой можно обойтись. В ответ на эту статью ряд авторов выдвигают ряд возражений [62–64].

В частности, в ответных письмах отмечается несовершенство методик функциональной МРТ, связанное с движениями пациента, наличием посторонних шумов и артефактом магнитной восприимчивости, затрудняющим оценку определённых областей мозга.

Кроме того, авторы указывают и на новые возможности, которые открывают совмещенные ПЭТ/МРТ аппараты. Одновременное комбинированное ПЭТ/МРТ исследование нарушения мозгового кровообращения стало предметом исследования Werner et al. [65], показавшего, что вариабельность показателей перфузии головного мозга, полученных при помощи МРТ, требует сопоставления с данными «золотого стандарта» — ПЭТ с ^{15}O .

В настоящем обзоре не получили освещения ряд методик ПЭТ с РФП на основе кислорода-15, направленные на диагностику болезни Паркинсона, шизофрении, эпилепсии, аутизма и различных видов деменций. Эти работы, как правило, носят научно-исследовательский характер и направлены на изучение патофизиологических механизмов перечисленных заболеваний. Несомненное их достоинство заключается в том, что полученные в исследованиях количественные данные были понятны неврологам и психиатрам и позволили применить их в практической деятельности, несмотря на ограниченное развитие метода [17].

Заключение

Изотоп кислорода-15 по настоящее время остаётся одним из ведущих биомаркеров для изучения метаболизма кислорода в тканях головного мозга вне зависимости от конкретного заболевания. Это особенно важно в отношении острого инсульта и ишемии головного мозга, при которых ПЭТ с ^{15}O является единственным прямым валидированным методом оценки ишемической полутени и цереброваскулярного резерва, даже несмотря на наличие более доступных непрямых методов исследования.

Ограничения применения этого метода связаны, в первую очередь, с коротким периодом полураспада ^{15}O , что позволяет использовать его только вблизи центров, обладающих специальным циклотроном для наработки этого радионуклида, что, в свою очередь, ведёт к увеличению материальных затрат на создание и поддержание работы такого центра. Этим обусловлено небольшое количество мировых центров, активно использующих и совершающих эту ядерно-медицинскую технологию.

Очевидно, в ближайшем будущем внедрение метода в рутинную клиническую практику не состоится. Однако в ряде клинических центров, специализирующихся в области неврологии, нейрохирургии и психиатрии, применение ПЭТ с ^{15}O может быть обосновано как для научно-исследовательских, так и для клинических целей в тех случаях, когда более распространённые и менее дорогостоящие методы не могут обеспечить точность диагностики и высокое качество наблюдения за состоянием здоровья пациента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Знаменский И.А., Кондаков А.К., Гречко А.В. Позитронно-эмиссионная томография с кислородом-15 в неврологии. Часть 1. Основные сведения и исторический обзор // Мед. радиол. и радиац. безопасность. 2015. Т. 60. № 6. С. 48–54.
2. Lassen N.A. The luxury-perfusion syndrome and its possible relation to acute metabolic acidosis localised within the brain // Lancet. 1966. Vol. 2. № 7473. P. 1113–1115.
3. Baron J.C., Bousser M.G., Rey A. et al. Reversal of focal “misery-perfusion syndrome” by extra-intracranial arterial bypass in hemodynamic cerebral ischemia. A case study with ^{15}O positron emission tomography // Stroke. 1981. Vol. 12. № 4. P. 454–459.
4. Kety S.S., Schmidt C.F. The Nitrous Oxide Method For The Quantitative Determination Of Cerebral Blood Flow In Man: Theory, Procedure And Normal Values // J. Clin. Invest. 1948. Vol. 27. № 4. P. 476–483.
5. Kudomi N., Hirano Y., Koshino K. et al. Rapid quantitative CBF and CMRO(2) measurements from a single PET scan with sequential administration of dual (15)O-labeled tracers // J. Cereb. Blood Flow Metab. 2013. Vol. 33. № 3. P. 440–448.
6. Ibaraki M., Shimosegawa E., Miura S. et al. PET measurements of CBF, OEF, and CMRO₂ without arterial sampling in hyperacute ischemic stroke: method and error analysis // Ann. Nucl. Med. 2004. Vol. 18. № 1. P. 35–44.
7. Powers W.J. Cerebral blood flow and metabolism: regulation and pathophysiology in cerebrovascular disease // In: Stroke: Pathophysiology, Diagnosis, and Management. 6th ed., ed. by Grotta J.C., Albers G.W., Broderick J.P. et al. — Elsevier Health Sci. 2015. P. 28–43.
8. Raichle M.E., Grubb R.L., J., Eichling J.O. et al. Measurement of brain oxygen utilization with radioactive oxygen-15: experimental verification // J. Appl. Physiol. 1976. Vol. 40. № 4. P. 638–640.
9. Lebrun-Grandi P., Baron J.-C., Soussaline F. et al. Coupling between regional blood flow and oxygen utilization in the normal human brain. A study with positron tomography and oxygen-15 // Arch. Neurol. 1983. Vol. 40/ № 4. P. 230–236.
10. Sette G., Baron J.C., Mazoyer B. et al. Local brain haemodynamics and oxygen metabolism in cerebrovascular disease. Positron emission tomography // Brain. 1989. Vol. 112. Pt 4. P. 931–951.
11. Leblanc R., Yamamoto Y.L., Tyler J.L. et al. Borderzone ischemia // Ann. Neurol. 1987. Vol. 22. № 6. P. 707–713.
12. Gibbs J.M., Wise R.J., Leenders K.L. et al. Evaluation of cerebral perfusion reserve in patients with carotid-artery occlusion // Lancet. 1984. Vol. 1. № 8372. P. 310–314.
13. Ackerman R.H., Correia J.A., Alpert N.M. et al. Positron imaging in ischemic stroke disease using compounds labeled with oxygen 15. Initial results

- of clinicophysiology correlations // *Archives of neurology*. 1981. Vol. 38. № 9. P. 537–543.
14. Wise R.J., Bernardi S., Frackowiak R.S. et al. Serial observations on the pathophysiology of acute stroke. The transition from ischaemia to infarction as reflected in regional oxygen extraction // *Brain*. 1983. Vol. 106. Pt. 1. P. 197–222.
 15. Hakim A.M., Pokrupa R.P., Villanueva J. et al. The effect of spontaneous reperfusion on metabolic function in early human cerebral infarcts // *Ann. Neurol*. 1987. Vol. 21. № 3. P. 279–289.
 16. Baron, J.C., Bousser M.G., Comar D. Human hemispheric infarction studied by positron emission tomography and the ^{15}O continuous inhalation technique // In: *Computerized tomography* ed. by Caille J.M., Salamon G. – New York: Springer Verlag. 1980. P. 231–237.
 17. Baron J.C., Jones T. Oxygen metabolism, oxygen extraction and positron emission tomography: Historical perspective and impact on basic and clinical neuroscience // *Neuroimage*. 2012. Vol. 61. № 2. P. 492–504.
 18. Powers W.J., Grubb R.L., Darriet D. et al. Cerebral blood flow and cerebral metabolic rate of oxygen requirements for cerebral function and viability in humans // *J. Cereb. Blood Flow Metab*. 1985. Vol. 5. № 4. P. 600–608.
 19. Touzani O., Young A.R., Derlon J.M. et al. Progressive impairment of brain oxidative metabolism reversed by reperfusion following middle cerebral artery occlusion in anaesthetized baboons // *Brain Res*. 1997. Vol. 767. № 1. P. 17–25.
 20. Marchal G., Benali K., Iglesias S. et al. Voxel-based mapping of irreversible ischaemic damage with PET in acute stroke // *Brain*. 1999. Vol. 122. Pt. 1. P. 2387–2400.
 21. Frykholm P., Andersson J.L., Valtysson J. et al. A metabolic threshold of irreversible ischemia demonstrated by PET in a middle cerebral artery occlusion-reperfusion primate model // *Acta Neurol. Scand*. 2000. Vol. 102. № 1. P. 18–26.
 22. Marchal G., Rioux P., Serrati C. et al. Value of acute-stage positron emission tomography in predicting neurological outcome after ischemic stroke: further assessment // *Stroke*. 1995. Vol. 26. № 3. P. 524–525.
 23. Marchal G., Furlan M., Beaudouin V. et al. Early spontaneous hyperperfusion after stroke. A marker of favourable tissue outcome? // *Brain*. 1996. Vol. 119. Pt. 2. P. 409–419.
 24. Marchal G., Young A.R., Baron J.C. Early postischemic hyperperfusion: pathophysiology insights from positron emission tomography // *J. Cereb. Blood Flow Metab*. 1999. Vol. 19. P. 467–482.
 25. NINDS. Tissue plasminogen activator for acute ischemic stroke. The National Institute of Neurological Disorders and Stroke rt-PA Stroke Study Group // *N. Engl. J. Med*. 1995. Vol. 333. № 24. P. 1581–1587.
 26. Baron J.C., Bousser M.G., Comar D. et al. “Crossed cerebellar diaschisis” in human supratentorial brain infarction // *Trans. Amer. Neurol. Assoc*. 1981. Vol. 105. P. 459–461.
 27. Yamauchi H., Fukuyama H., Kimura J. Hemodynamic and metabolic changes in crossed cerebellar hypoperfusion // *Stroke*. 1992. Vol. 23. № 6. P. 855–860.
 28. Baron J.C., Rougemont D., Soussaline F. et al. Local Interrelationships of Cerebral Oxygen Consumption and Glucose Utilization in Normal Subjects and in Ischemic Stroke Patients: A Positron Tomography Study // *J. Cereb. Blood Flow Metab*. 1984. Vol. 4. № 2. P. 140–149.
 29. Yamauchi H., Fukuyama H., Nagahama Y. et al. Significance of increased oxygen extraction fraction in five-year prognosis of major cerebral arterial occlusive diseases // *J. Nucl. Med*. 1999. Vol. 40. № 12. P. 1992–1998.
 30. Sobesky J., Thiel A., Ghaemi M. et al. Crossed cerebellar diaschisis in acute human stroke: a PET study of serial changes and response to supratentorial reperfusion // *J. Cereb. Blood Flow Metab*. 2005. Vol. 25. № 12. P. 1685–1691.
 31. Pantano P., Baron J.C., Samson Y. et al. Crossed cerebellar diaschisis. Further studies // *Brain*. 1986. Vol. 109. Pt. 4. № 1. P. 677–694.
 32. Serrati C., Marchal G., Rioux P. et al. Contralateral cerebellar hypometabolism: a predictor for stroke outcome? // *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry*. 1994. Vol. 57. № 2. P. 174–179.
 33. Виничук С.М. Дишиз и его роль в развитии рефлекторно-двигательных расстройств при мозговом инсульте // *Український медичний часопис*. 2013. № 2. С. 143–147.
 34. Szekely B., Herholz K., Pawlik G. et al. Widespread functional effects of discrete thalamic infarction // *Arch. Neurol*. 1991. Vol. 48. № 2. P. 178–182.
 35. Baron J.C., D’Antona R., Pantano P. et al. Effects of thalamic stroke on energy metabolism of the cerebral cortex. A positron tomography study in man // *Brain*. 1986. Vol. 109. Pt. 6. P. 1243–1259.
 36. Chabriat H., Pappata S., Levasseur M. et al. Cortical metabolism in posterolateral thalamic stroke: PET study // *Acta Neurol. Scand*. 1992. Vol. 86. № 3. P. 285–290.
 37. Yamauchi H., Fukuyama H., Nagahama Y. et al. Uncoupling of oxygen and glucose metabolism in persistent crossed cerebellar diaschisis // *Stroke*. 1999. Vol. 30. № 7. P. 1424–1428.
 38. Powers W.J., Derdeyn C.P., Fritsch S.M. et al. Benign prognosis of never-symptomatic carotid occlusion // *Neurology*. 2000. Vol. 54. № 4. P. 878–882.
 39. Hokari M., Kuroda S., Shiga T. et al. Impact of oxygen extraction fraction on long-term prognosis in patients with reduced blood flow and vasoreactivity because of occlusive carotid artery disease // *Surg. Neurol*. 2009. Vol. 71. № 5. P. 532–538; discussion 538, 538–539.

40. Yamauchi H., Fukuyama H., Nagahama Y. et al. Evidence of misery perfusion and risk for recurrent stroke in major cerebral arterial occlusive diseases from PET // *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry*. 1996. Vol. 61. № 1. P. 18–25.
41. Yamauchi H., Higashi T., Kagawa S. et al. Is misery perfusion still a predictor of stroke in symptomatic major cerebral artery disease? // *Brain*. 2012. Vol. 135. № 8. P. 2515–2526.
42. Barnett H., Peerless S., Fox A. et al. Failure of extracranial-intracranial arterial bypass to reduce the risk of ischemic stroke. Results of an international randomized trial. The EC/IC Bypass Study Group // *N. Engl. J. Med.* 1985. Vol. 313. № 19. P. 1191–1200.
43. Schaller B. Extracranial-intracranial bypass to reduce the risk of ischemic stroke in intracranial aneurysms of the anterior cerebral circulation: a systematic review // *J. Stroke Cerebrovasc. Dis.* 2008. Vol. 17. № 5. P. 287–298.
44. Powers W.J., Clarke W.R., Grubb R.L. et al. Extracranial-intracranial bypass surgery for stroke prevention in hemodynamic cerebral ischemia: the Carotid Occlusion Surgery Study randomized trial // *JAMA*. 2011. Vol. 306. № 18. P. 1983–1992.
45. Persoon S., van Berckel B.N., Bremmer J.P. et al. Intervention versus standard medical treatment in patients with symptomatic occlusion of the internal carotid artery: a randomised oxygen-15 PET study // *EJNMMI Res.* 2013. Vol. 3. № 1. P. 79.
46. Powers W.J., Zazulia A.R. PET in cerebrovascular disease // *PET Clin.* 2010. Vol. 5. № 1. P. 83106.
47. Nortje J., Coles J.P., Timofeev I. et al. Effect of hyperoxia on regional oxygenation and metabolism after severe traumatic brain injury: preliminary findings // *Crit. Care Med.* 2008. Vol. 36. № 1. P. 273–281.
48. Hutchinson P.J., Gupta A.K., Fryer T.F. et al. Correlation between cerebral blood flow, substrate delivery, and metabolism in head injury: a combined microdialysis and triple oxygen positron emission tomography study // *J. Cereb. Blood Flow Metab.* 2002. Vol. 22. P. 735–745.
49. Coles J.P., Steiner L.A., Johnston A.J. et al. Does induced hypertension reduce cerebral ischaemia within the traumatized human brain? // *Brain*. 2004. Vol. 127. № 11. P. 2479–2490.
50. Takasawa M., Jones P.S., Guadagno J.V. et al. How reliable is perfusion MR in acute stroke? Validation and determination of the penumbra threshold against quantitative PET // *Stroke*. 2008. Vol. 39. № 3. P. 870–877.
51. Sobesky J., Weber O.Z., Lehnhardt F.G. et al. Does the mismatch match the penumbra? Magnetic resonance imaging and positron emission tomography in early ischemic stroke // *Stroke*. 2005. Vol. 36. № 5. P. 980–985.
52. Yamauchi H., Kudoh T., Kishibe Y. et al. Selective neuronal damage and chronic hemodynamic cerebral ischemia // *Ann. Neurol.* 2007. Vol. 61. № 5. P. 454–465.
53. Yamauchi H., Kudoh T., Kishibe Y. et al. Selective neuronal damage and borderzone infarction in carotid artery occlusive disease: a ¹¹C-flumazenil PET study // *J. Nucl. Med.* 2005. Vol. 46. № 12. P. 1973–1979.
54. Kuroda S., Shiga T., Houkin K. et al. Cerebral oxygen metabolism and neuronal integrity in patients with impaired vasoreactivity attributable to occlusive carotid artery disease // *Stroke*. 2006. Vol. 37. № 2. P. 393–398.
55. Giffard C., Landeau B., Kerrouche N. et al. Decreased chronic-stage cortical ¹¹C-flumazenil binding after focal ischemia-reperfusion in baboons: a marker of selective neuronal loss? // *Stroke*. 2008. Vol. 39. № 3. P. 991–999.
56. Fox P.T., Burton H., Raichle M.E. Mapping human somatosensory cortex with positron emission tomography // *J. Neurosurg.* 1987. Vol. 67. № 1. P. 34–43.
57. Fox P.T., Fox P.T., Miezin F.M. et al. Retinotopic organization of human visual cortex mapped with positron-emission tomography // *J. Neurosci.* 1987. Vol. 7. № 3. P. 913–922.
58. Petersen S.E., Fox P.T., Posner M.I. et al. Positron emission tomographic studies of the cortical anatomy of single-word processing // *Nature*. 1988. Vol. 331. № 6157. P. 585–589.
59. Posner M.I., Petersen S.E., Fox P.T. et al. Localization of cognitive operations in the human brain // *Science*. 1988. Vol. 240. № 4859. P. 1627–1631.
60. Feng C.-M., Narayana S., Lancaster J.L. et al. CBF changes during brain activation: fMRI vs. PET // *Neuroimage*. 2004. Vol. 22. № 1. P. 443–446.
61. Cumming P. PET Neuroimaging: The white elephant packs his trunk? // *Neuroimage*. 2014. Vol. 84. P. 1094–1100.
62. Gunn R.N., Rabiner E.A. PET neuroimaging: The elephant unpacks his trunk // *Neuroimage*. 2014. Vol. 94. P. 408–410.
63. Horwitz B., Simonyan K. PET neuroimaging: plenty of studies still need to be performed: comment on Cumming: “PET neuroimaging: the white elephant packs his trunk?” // *Neuroimage*. 2014. Vol. 84. P. 1101–1103.
64. Siebner H.R., Strafella A.P., Rowe J.B. The white elephant revived: a new marriage between PET and MRI: comment to Cumming: “PET neuroimaging: the white elephant packs his trunk?” // *Neuroimage*. 2014. Vol. 84. P. 1104–1106.
65. Werner P., Zeisig V., Saur D. et al. Simultaneous PET/MRI - A new tool for translational brain imaging early after stroke // *J. Nucl. Med.* 2014. Vol. 55. supplement № 1. P. 412.

Поступила: 28.12.2015

Принята к публикации: 18.05.2016

**А.Н. Башков¹, Ж.В. Шейх², Е.А. Ионов¹, С.А. Мирзоянц¹,
Н.С. Дребушевский¹, О.О. Григорьева¹, А.П. Дунаев¹**

**УНИКАЛЬНЫЙ СЛУЧАЙ ГИГАНТСКОГО СОЛИТАРНОГО
ЭКЗОФИТНОГО МЕТАСТАЗА ПЕЧЕНИ ПРИ НЕЙРОЭНДОКРИННОМ
РАКЕ ТОНКОЙ И ТОЛСТОЙ КИШКИ**

**A.N. Bashkov¹, Z.V. Sheykh², E.A. Ionova¹, S.A. Mirzoyants,
N.S. Drebushevskiy¹, O.O. Grigor'eva¹, A.P. Dunaev¹**

**Unique Case of Giant Exophytic Solitary Liver Metastasis of Neuroendocrine
Cancer of Small and Large Intestine**

РЕФЕРАТ

ABSTRACT

Цель: Представить случай гигантского солитарного метастаза печени с экзофитным характером роста у пациента с нейроэндокринным раком тонкой и толстой кишки, продемонстрировать координированную работу служб лучевой диагностики.

Материал и методы: При обследовании пациента выполняли компьютерную томографию на мультисрезовом компьютерном томографе Toshiba Aquilion 64 с болюсным внутривенным введением 100 мл контрастного препарата Ультравист-370, а также скintiграфию всего тела на однофотонном эмиссионном компьютерном томографе Philips Precedence с внутривенным введением 218,0 МБк ¹¹¹In-октреотида.

Результаты: При КТ было выявлено образование в илеоцекальной области, которое имело признаки, характерные для карциноида, а также крупное экзофитное образование левой доли печени, наблюдаемое у пациента по данным анамнеза с 2011 г. Образование в печени было солитарным, экзофитным и было заметно больше, чем образование в илеоцекальной области, имело неоднородную структуру и накапливало контрастный препарат всем объемом максимально к венозной фазе. Был предположен дифференциальный диагноз между первичной опухолью печени и метастазом, а также рекомендовалось выполнить однофотонную эмиссионную компьютерную томографию с ¹¹¹In-октреотидом в связи с подозрением на нейроэндокринный рак тонкой кишки. По результатам исследования был подтвержден нейроэндокринный характер образований в илеоцекальной области и печени, кроме того прослеживалось накопление специфического радиофармпрепарата и в сигмовидной кишке, где при колоноскопии были выявлены полипы. После оперативного вмешательства по данным морфологического исследования был подтвержден нейроэндокринный рак тонкой и толстой кишки с метастазом в печени.

Выводы: 1. Представлен случай гигантского солитарного метастаза печени с экзофитным характером роста у пациента с нейроэндокринным раком тонкой и толстой кишки. 2. Данные компьютерной томографии и однофотонной эмиссионной томографии позволили правильно поставить диагноз на этапе предоперационного обследования.

Ключевые слова: нейроэндокринный рак, карциноид, мультисрезовая компьютерная томография, однофотонная эмиссионная компьютерная томография, солитарный экзофитный метастаз

Purpose: To present a rare case of a giant solitary metastasis of the liver with exophytic growth pattern in a patient with neuroendocrine cancer of small intestine and colon, to demonstrate coordinated work of radiology department.

Material and methods: Computer tomography with bolus intravenous administration of 100 ml of contrast agent Ultravist-370 on multislice CT Aquilion 64; whole body scintigraphy on SPECT Philips with intravenous administration of 218.0 MBq ¹¹¹In-octreotide.

Results: Computer tomography revealed a mass in the ileocecal region, which had features of carcinoid, and also a large exophytic solid mass in the left lobe of the liver observed since year 2011. The mass in the liver was solitary, with exophytic growth and heterogeneous structure, much more than the mass in the ileocecal region, maximal accumulate of the contrast agent at the venous phase; thus we thought of the differential diagnosis between primary tumor and liver metastasis. It was recommended to perform ¹¹¹In-octreotide SPECT in connection with suspected neuroendocrine cancer. The study has confirmed neuroendocrine nature of masses in the ileocecal region and liver, as well as the accumulation of a specific agent in the sigmoid colon, where was a colonoscopy found polyps. The histopathological study after surgery confirmed neuroendocrine cancer of the small and large intestine with liver metastasis.

Conclusion: 1. A rare case of a giant solitary metastasis of the liver with exophytic growth pattern in a patient with neuroendocrine cancer of small intestine and colon was presented. 2. Data from computer tomography and single photon emission tomography allow to make correct diagnosis at the stage of preoperative examination, despite the atypical signs of the solid mass in the liver.

Key words: neuroendocrine cancer, carcinoid, multidetector spiral computed tomography, single photon emission computed tomography, a solitary exophytic metastasis

Введение

Нейроэндокринные опухоли (НЭО) представляют собой разнородную группу новообразований, происходящих из нейроэндокринных клеток, находящихся

во всех частях тела и для которых характерно присутствие таких внутриклеточных маркеров эндокринной ткани, как хромогранин А и синаптофизин [1].

Частота встречаемости НЭО составляет 2 человека на 100 тыс., на их долю приходится приблизительно

¹ Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва. E-mail: abashkov@yandex.ru.
² Городская клиническая больница им. С.П. Боткина, Москва

¹ A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of FMBA, Moscow, Russia. E-mail: abashkov@yandex.ru.
² S.P. Botkin City clinical hospital Moscow, Russia.

0,5 % от всех злокачественных опухолей. Средний возраст на момент установления диагноза 61,4 года. Отмечается значительное увеличение заболеваемости НЭО всех локализаций за последние 30 лет [2, 3].

В 1902 г. Обендорфер впервые ввел термин «карциноид»; в конце 1970-х гг. Пирс выдвинул концепцию специализированной высокоорганизованной клеточной системы, которую он назвал APUD-системой (Amine Precursor Uptake and Decarboxylation). Эти опухоли характеризуются способностью продуцировать пептиды, которые вызывают типичные гормональные синдромы. Большинство НЭО растут медленнее, чем другие эпителиальные злокачественные новообразования, однако и они могут быть агрессивными и резистентными к лечению. В настоящее время ведущими европейскими патологами в соответствии с консенсусом, достигнутым на ENETS в 2010 г., было предложено делить НЭО ЖКТ на 3 группы исходя из потенциала их злокачественности, который зависит от митотической и пролиферативной активности опухолевых клеток [1].

В соответствии с этим в группы G1–G2 входят высокодифференцированные НЭО ЖКТ с интенсивной экспрессией хромогранина А и синаптофизина. К группе G3 на основании совокупности признаков относят низкодифференцированные нейроэндокринные карциномы [1, 4].

К НЭО относят совершенно разные группы новообразований. Большинство из них являются карциноидами, которые развиваются из эндокринных клеток желудочно-кишечного тракта (ЖКТ), секретирующих серотонин. Функционирующие и нефункционирующие нейроэндокринные опухоли могут возникать в легких, поджелудочной железе, вилочковой железе, надпочечниках и щитовидной железе. Наиболее частая локализация (~66 %) – ЖКТ, преобладающее место расположения – слепая кишка (17,1 %) и прямая кишка (16,3 %). Около 30 % НЭО встречаются в бронхопульмональной системе. Следует отметить, что термин карциноид употребляется только в отношении нейроэндокринных опухолей ЖКТ [1, 5].

Большинство НЭО тонкой и толстой кишки возникают sporadически, тогда как поражения иной локализации могут быть составной частью наследственного синдрома. Карциноид подвздошной кишки может протекать бессимптомно. В клинической картине могут быть явления тонкокишечной непроходимости, кровотечения, боли, потеря веса, диарея, тошнота и рвота [6]. Большинство колоректальных карциноидов локализуется в прямой и слепой кишке, часто имеет вид полипов. Типичными жалобами пациентов при указанной локализации опухоли являются боли в животе и потеря веса. При этом более чем в 50 % случаев заболевание протекает бессимптомно, и опухоль выявляется случайно при рутинном ректальном пальцевом исследовании или при колоноскопии [7].

На момент постановки диагноза у 19 % пациентов с карциноидом имеются метастазы в регионарные

лимфатические узлы и у 21 % выявляют метастатическое поражение печени, что заметно ухудшает прогноз заболевания. 5-летняя выживаемость у таких пациентов составляет всего 0–20 %. Метастатическое поражение печени при нейроэндокринном раке имеет множественный, часто билобарный характер [8].

Наиболее часто в диагностике карциноидов применяются мультисрезовая компьютерная томография (МСКТ), магнитно-резонансная томография (МРТ) и скинтиграфия или ОФЭКТ/КТ.

Мультисрезовая компьютерная и магнитно-резонансная томография позволяют определить локализацию и распространенность патологического процесса при нейроэндокринном раке. Чувствительность КТ и МРТ составляет от 76 до 100 % [9, 10]. В связи с гиперваскуляризацией для карциноидов характерно интенсивное накопление контрастного препарата в артериальной фазе как при МСКТ, так и при МРТ-исследованиях с болюсным введением контрастного препарата. Однако в зависимости от дифференцировки опухолевые узлы могут иметь неоднородную структуру, обусловленную некрозом и кровоизлияниями [9, 10]. Кроме того, следует отметить, что в связи с выработкой карциноидами тонкой кишки биогенных аминов, перифокально развивается выраженная десмопластическая реакция в виде перифокальных фиброзных тяжей, формирующихся по ходу сосудов с деформацией брыжейки. Аналогичные изменения наблюдаются вокруг пораженных лимфатических узлов [9]. Что касается колоректальных карциноидов, то их трудно отличить от аденокарциномы, поскольку для обоих заболеваний характерно циркулярное утолщение стенки кишки или формирование полиповидных масс [11, 12]. Дифференциальный диагноз карциноида тонкой кишки включает метастаз, первичную аденокарциному, лимфому, гастринтеринальную стромальную опухоль. Гиперваскулярность, тяжистое уплотнение клетчатки вокруг пораженного сегмента тонкой кишки и лимфатических узлов являются характерными для карциноида. Болезнь Крона и ишемический энтерит могут вызывать воспалительные изменения тонкой кишки, которые способны имитировать карциноид [9].

Хотя большинство метастазов карциноидов в печень гиперваскулярны, приблизительно в 6–20 % случаев они могут быть и гиповаскулярными. МСКТ и МРТ с болюсным внутривенным контрастированием позволяют выявить важный дифференциальный признак в виде накопления контрастного препарата в артериальной фазе [10, 13].

Скитиграфия с аналогами соматостатина, меченными индием-111, применяется уже довольно давно для оценки распространенности нейроэндокринного рака. В РФ зарегистрирован препарат «Октреотид ¹¹¹In», который связывается с соматостатиновыми рецепторами нейроэндокринных опухолей, что, в свою очередь, позволяет их визуализировать. Однофотонная эмиссионная компьютерная томография, совмещенная с компьютерной томогра-

фией (ОФЭКТ/КТ), объединяет функциональные преимущества сцинтиграфии с возможностью точной анатомической локализации патологических изменений по данным МСКТ. Чувствительность этого метода достигает 73 %, а специфичность 100 %, ложноотрицательные данные могут быть получены при малых размерах опухоли или при низкой экспрессии соматостатиновых рецепторов опухолевой тканью [14–16].

Клиническое наблюдение

Пациентка Ш., 71 года, поступила в хирургическое отделение клиники ФМБЦ им. А.И. Бурназяна в ноябре 2015 г. в связи с ростом наблюдаемого с 2011 г. неverifiedированного образования в печени. Ранее от оперативного вмешательства больная отказывалась. Жалобы при поступлении были на общую слабость, тошноту после приема пищи, периодические запоры, тяжесть в правом подреберье. В клинике было проведено предоперационное обследование в следующем объеме.

Эзофагогастродуоденоскопия: хронический неактивный гастрит с признаками атрофии.

Колоноскопия: наружный геморрой в стадии ремиссии, полипы сигмовидной кишки (результаты гистологического исследования: тубулярная аденома толстой кишки с дисплазией II степени, тубулярная аденома толстой кишки с дисплазией I–II степени, высокодифференцированная аденокарцинома толстой кишки, развившаяся в тубулярно-ворсинчатой аденоме с дисплазией III степени, вращением очагов карциномы в сосудистую ножку).

МСКТ органов грудной клетки и брюшной полости: По органам грудной клетки без особенностей.

В илеоцекальной области, на уровне баугиниевой заслонки с распространением на терминальный отдел тонкой кишки, определяется образование размером до 43х50х30 мм, выражено накапливает контрастный препарат, начиная с артериальной фазы, прослеживается распространение патологического процесса в прилежащую клетчатку по ходу брыжеечных сосудов с ее тяжистым уплотнением (рис. 1–3). Печень кранио-каудальным размером правой доли до 177 мм. Из сегмента S3 исходит крупное образование овальной формы размером до 152х103х135 мм, почти полностью расположено экзофитно, опускаясь до уровня пупочной области. Образование васкуляризовано ветвями левой печеночной артерии, очертания четкие, ровные, структура неоднородная, накапливает контрастный препарат максимально в венозной фазе до 100 HU. Образование оттесняет желчный пузырь, желудок, поперечную ободочную кишку (рис. 3–7). В S3,6 печени – единичные кисты размером до 5 мм. Другие отделы паренхимы печени без очаговых изменений. Внутри- и внепеченочные желчные протоки не расширены. Лимфатические узлы брюшной полости и забрюшинного пространства не увеличены. В остальном без особенностей. Заключение: гиперва-



Рис. 1. Карциноид в илеоцекальной области (стрелка)



Рис. 2. Карциноид в илеоцекальной области. Вовлечение брыжеечных сосудов с формированием радиально направленных тяжей



Рис. 3. Нейроэндокринный рак в илеоцекальной области и крупный экзофитный метастаз в левой доле печени, фронтальная реконструкция

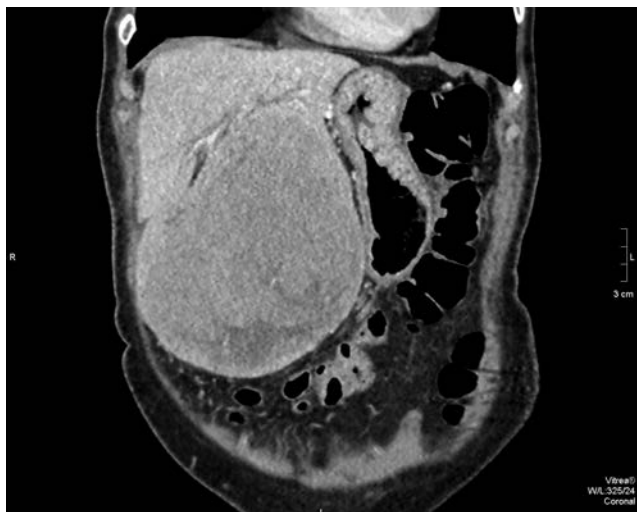


Рис. 4. Крупный экзофитный метастаз, исходящий из левой доли печени, фронтальная реконструкция



Рис. 5. Крупный экзофитный метастаз, исходящий из левой доли печени, сагитальная реконструкция



Рис. 6. Крупный экзофитный метастаз, питающийся левой печеночной артерией, фронтальная реконструкция



Рис. 7. Крупный экзофитный метастаз, исходящий из левой доли печени, аксиальный срез

скулярная опухоль в илеоцекальной области с распространением в клетчатку, вероятно, имеет место карциноид; опухолевое образование печени, исходящее из сегмента S3, неясной природы (первичная опухоль или крупный солитарный mts); рекомендовано проведение ОФЭКТ/КТ в связи с подозрением на нейроэндокринный рак.

ОФЭКТ/КТГ. Пациенту внутривенно введено 218,0 МБк ^{111}In -октреотида, через 24 ч после введения проведено сканирование в режиме «всё тело». На сканограммах визуализируется очаг гиперфиксации радиофармпрепарата (РФП) в проекции печени, который при совмещении данных ОФЭКТ и МСКТ соответствует образованию, исходящему из сегмента печени S3 размером до 15×10,5×13,8 см (рис. 8). Также отмечается накопление РФП в области илеоцекального угла и в сигмовидной кишке (рис. 9). Заключение: на момент исследования результаты

ОФЭКТ/КТ с ^{111}In -октреотидом свидетельствуют о наличии специфической ткани с гиперэкспрессией рецепторов соматостатина (нейроэндокринной природы) в области экзофитного образования печени S3, в илеоцекальной области и в сигмовидной кишке.

Для попытки верификации образования левой доли печени выполнена пункция под контролем ультразвукового сканирования. Заключение: цитограмма рака, вероятно, протокового.

После предоперационного обследования выполнено оперативное вмешательство в объеме лапаротомии, правосторонней гемиколэктомии, резекции нисходящей ободочной, сигмовидной кишки, ректосигмоидного перехода, резекции 2–3 сегментов печени, расширенной лимфаденэктомии (рис. 10).

Результаты морфологического исследования постоперационного материала. ПГИ№96336-65: низко-

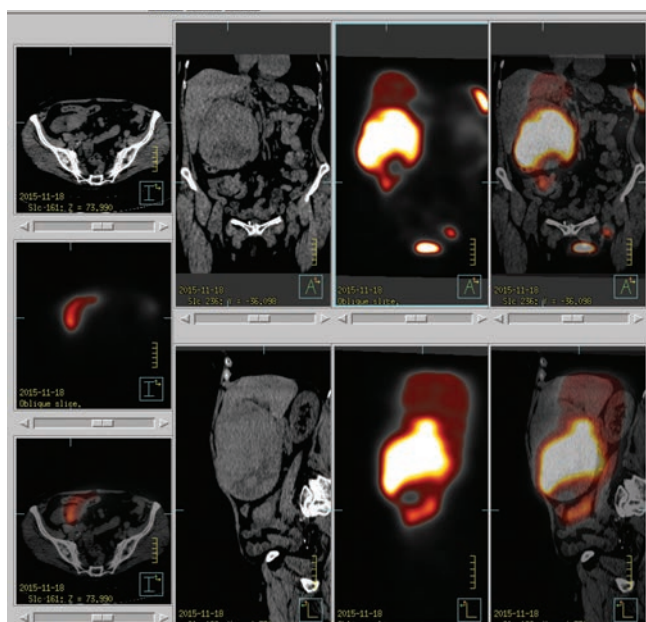


Рис. 8. ОФЭКТ/КТ. Накопление РФП в образовании печени и илеоцекальной области

дифференцированная нейроэндокринная карцинома тонкой кишки (подвздошно-слепокишечная заслонка) и толстой кишки, с прорастанием всех слоев кишки и прилежащей клетчатки; метастаз нейроэндокринной карциномы в печень.

Больная была проконсультирована онкологом, рекомендована химиотерапия.

Заключительный диагноз: нейроэндокринный рак тонкой и сигмовидной кишки $T_4N_0M_1$ (метастаз в печень).



Рис. 11. Экзофитная форма гепатоцеллюлярного рака правой доли печени

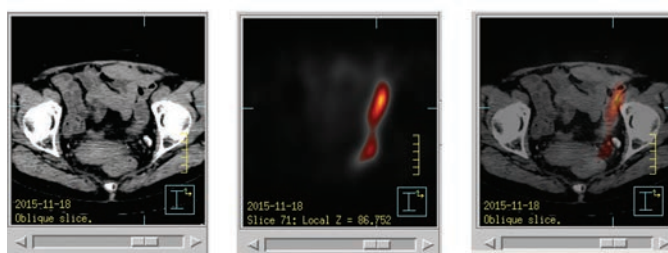


Рис. 9. ОФЭКТ/КТ. Накопление РФП в сигмовидной кишке

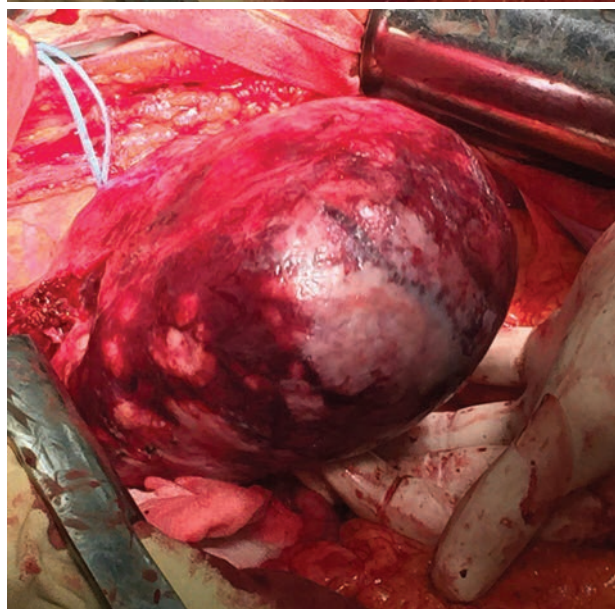
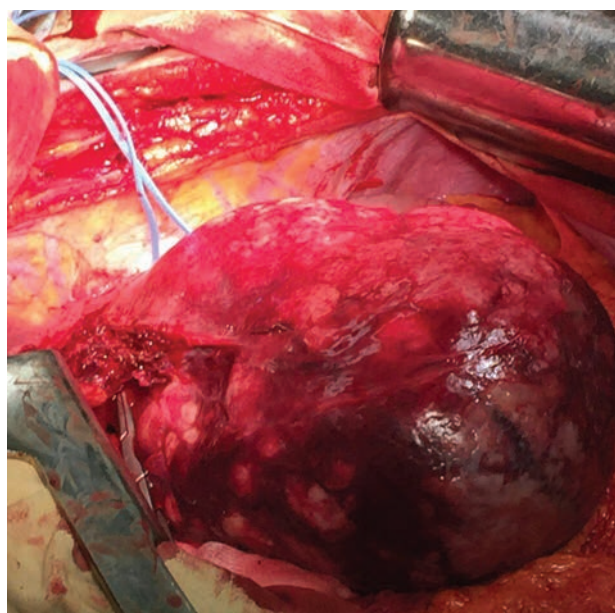


Рис. 10. Интраоперационные фотоснимки крупного экзофитного узла левой доли печени.



Рис. 12. Эзофитная форма гемангиомы левой доли печени, фронтальная реконструкция



Рис. 13. Эзофитная форма фокальной нодулярной гиперплазии левой доли печени, фронтальная реконструкция

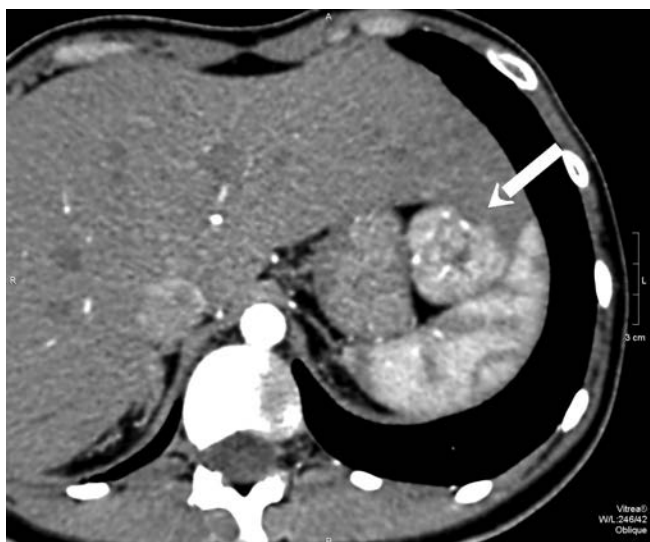


Рис. 14. Эзофитная форма фокальной нодулярной гиперплазии левой доли печени



Рис. 15. Экзофитная форма метастаза колоректального рака в печень

Обсуждение

При МСКТ была выявлена гипervasкулярная опухоль в илеоцекальной области с признаками перифокальной десмопластической реакции (фиброзные тяжи по ходу брыжеечных сосудов и спаечный процесс), что с учетом локализации патологического процесса характерно для карциноида. При этом крупный экзофитный опухолевый узел, исходящий из левой доли печени, не демонстрировал гипervasкулярный характер и в целом накапливал контрастный препарат максимально к венозной фазе. Так как других очаговых изменений в печени отмечено не было, а также в связи с гигантскими размерами узлового образования

(до 15 см), то в дифференциальном ряду рассматривалась в первую очередь первичная опухоль печени и, менее вероятно, солитарный метастаз. С учетом данных МСКТ было рекомендовано выполнить ОФЭКТ/КТ, при котором был подтвержден нейроэндокринный характер образования в илеоцекальной области, опухолевый узел в печени также имел признаки, указывающие на его нейроэндокринную природу. Кроме того, отмечалось накопление РФП в области сигмовидной кишки, где при колоноскопии было выявлено три полиповидных образования (рис. 8, 9). С учетом результатов инструментальных методов исследования уже на этапе предоперационного обследования был выставлен предположительный диагноз нейроэндо-

кринного рака подвздошной и сигмовидной кишки с метастатическим поражением печени.

В приведенном клиническом примере крупное экзофитное образование левой доли печени не имело типичных признаков метастаза нейроэндокринного рака. Во-первых, характер накопления контрастного препарата при МСКТ исследовании не был гиперваскулярным, хотя образование и явно питалось ветвью левой печеночной артерии, после внутривенного введения контрастного препарата максимально плотность возрастала к венозной фазе, что, по всей видимости, обусловлено крупными размерами узла. Во-вторых, образование в левой доле печени было солитарным, тогда как для метастатического процесса характерна множественность поражения. В-третьих, имела места диссоциация между размерами обнаруженной первичной опухоли в илеоцекальной области (5 см) и возможного метастаза в печени (15 см), который, кроме того, по данным анамнеза наблюдался с 2011 г.

Экзофитный характер роста образований печени — не редкость и описан при различных доброкачественных и злокачественных процессах, таких как киста, гемангиома, фокальная нодулярная гиперплазия, гепато- и холангиоцеллюлярный рак, метастазы. При этом сохраняется типичная семиотика перечисленных заболеваний, как и при внутрипеченочной локализации [18].

На рис. 11–15 приведены примеры экзофитных образований печени из нашей практики.

Выводы

1. Благодаря взаимодействию между службами лучевой диагностики правильный диагноз нейроэндокринного рака был поставлен на стадии предоперационного обследования. Знание типичных признаков позволило предположить карциноид тонкой кишки по данным МСКТ и рекомендовать наиболее информативный диагностический метод для его подтверждения — ОФЭКТ.

2. Учитывая существенную разницу между размерами первичной опухоли и метастаза в печени в приведенном примере, можно предположить, что на определенной стадии развития опухолевого процесса узловое образование печени могло быть единственной находкой при МСКТ или МРТ. Таким образом, при выявлении крупного экзофитного образования в печени в дифференциальном ряду следует рассматривать и возможность метастаза нейроэндокринного рака.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбунова В.А. Нейроэндокринные опухоли желудочно-кишечного тракта. Принципы диагностики и лечения. — М. 2009. 196 с.
2. Hallet J., Law C.H., Cukier M. et al. Exploring the rising incidence of neuroendocrine tumors: a population-

based analysis of epidemiology, metastatic presentation, and outcomes // *Cancer*. Feb 2015. 27. № 4. P. 589–597.

3. Taal B.G., Visser O. Epidemiology of neuroendocrine tumours // *Neuroendocrinology*. 2004. Vol. 80. No. 1. P. 3–7.
4. Arnold R. Endocrine tumours of the gastrointestinal tract. Introduction: definition, historical aspects, classification, staging, prognosis and therapeutic options. *Best Pract. Res. Clin. // Gastroenterol*. 2005. Vol. 19. № 4. P. 491–505.
5. Kulke M.H., Benson A.B. 3rd, Bergsland E. et al. Neuroendocrine tumors // *J. Natl. Compr. Canc. Netw*. 2012. Vol. 10. № 6. P. 724–64.
6. Modlin I.M., Lye K.D., Kidd M.A. 5-decade analysis of 13,715 carcinoid tumors // *Cancer*. 2003. Vol. 97. № 4. P. 934–959.
7. Pickhardt P.J., Kim D.H., Menias C.O. et al. Evaluation of submucosal lesions of the large intestine. Part 1. Neoplasms // *RadioGraphics*. 2007. Vol. 27. P. 1681–1692.
8. Zuetenhorst J.M., Taal B.G. Metastatic carcinoid tumors: a clinical review // *Oncologist*. 2005. Vol. 10. № 2. P. 123–131.
9. Angela D.L. Gastrointestinal carcinoids: Imaging features with clinicopathologic comparison // *RadioGraphics*. 2007. Vol. 27. № 1. P. 237–257.
10. Karen M.H., Inhab K., Lawrence H. et al. Carcinoid tumors of the Small Bowel: A Multitechnique Imaging Approach // 2004, Vol. 182. № 3. P. 559–567.
11. Ganeshan D., Bhosale P., Yang T. et al. Imaging Features of Carcinoid Tumors of the Gastrointestinal Tract // *Amer. J. Roentgenol*. 2013. Vol. 201. № 4. P. 773–786.
12. Elsayes K.M., Menias C.O., Bowerson M. Imaging of carcinoid tumors: spectrum of findings with pathologic and clinical correlation // *J. Comput. Assist. Tomogr*. 2011. Vol. 35. № 1. P. 72–80.
13. Elias D., Lefevre J.H., Duvillard P. et al. Hepatic metastases from neuroendocrine tumors with a “thin slice” pathological examination: they are many more than you think // *Ann Surg*. 2010. Vol. 251. P. 307–310.
14. De Herder W.W., Kwekkeboom D.J., Valkema R. et al. Neuroendocrine tumors and somatostatin: imaging techniques // *J. Endocrinol. Invest*. 2005. Vol. 28. P. 132–136.
15. Fuccio C., Spinapolice E. G., Chondrogiannis S. et al. Evolving role of SPECT/CT in neuroendocrine tumors management: staging, treatment response, and follow-up // *Clin. Nucl. Med*. 2013. Vol. 38. № 10. P. 384–389.
16. Modlin I.M., Cornelius E., Lawton G.P. Use of an isotropic somatostatin receptor probe to image gut endocrine tumors. // *Arch Surg*. 1995. Vol. 130. P. 367–373.

Поступила: 11.01.2016

Принята к публикации: 18.05.2016

Гребенюк А.Н., Легеза В.И., Гладких В.Д. и соавт. Практическое руководство по использованию медицинских средств противорадиационной защиты при чрезвычайных ситуациях и обеспечению ими аварийных медико-санитарных формирований и региональных аварийных центров. – М. 2015. 304 с.

Grebenyuk A.N., Legeza V.I., Gladkihk V.D. et al. Practical Guidance on the Use of Medical Devices for Radiation Protection in Emergency Situations and Their Provision of Emergency Health Units and Regional Emergency Centers. – M. 2015. 304 pp.

В руководстве представлены современные возможности медикаментозной профилактики и терапии радиационных поражений, а также методические подходы к формированию резерва медицинских средств противорадиационной защиты для ликвидации медико-санитарных последствий радиационных аварий и катастроф.

В руководстве изложены особенности организации медицинского обеспечения населения в условиях чрезвычайных ситуаций радиационной природы, показана роль и место медицинской противорадиационной защиты в системе мероприятий медицинской службы на этапах медицинской эвакуации, приведены алгоритмы оказания медицинской помощи пораженным, образцы форм специальной медицинской карты и карты предварительного гигиенического исследования радиационной аварии. Рассмотрены нормативно-правовые аспекты медицинского обеспечения населения в условиях чрезвычайных ситуаций, современные подходы к профилактике и лечению лучевой патологии с учетом особенностей различных клинических форм радиационных поражений и этапности оказания медицинской помощи. Обобщены существующие представления о фармакологических свойствах медикаментозных препаратов, формирующих современную систему медицинской противорадиационной защиты — средств профилактики лучевых поражений, лечебно-профилактических противолучевых средств, средств госпитальной терапии острых радиационных поражений. Представлены номенклатура и минимальные объемы содержания лекарственных препаратов и медицинских изделий в резервах медицинских средств для ликвидации медико-санитарных последствий чрезвычайных ситуаций радиационной природы, даны варианты комплектования аварий-

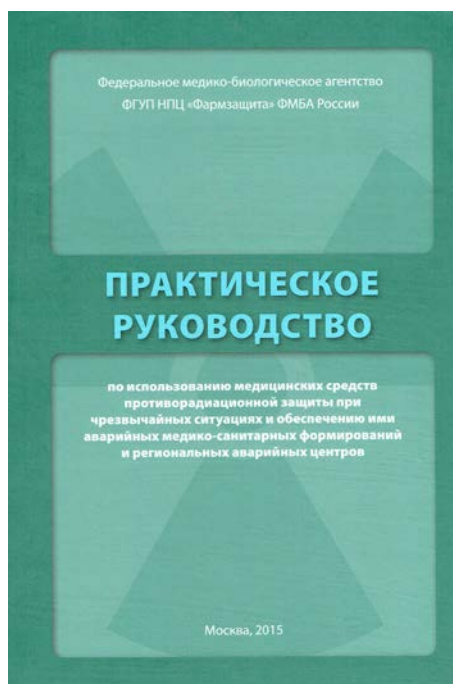
ных медицинских укладок для врачебно-сестринских бригад и медицинских учреждений, участвующих в оказании медицинской помощи пострадавшим из очагов радиационных поражений.

Руководство предназначено для обеспечения практической деятельности медицинского персонала здравпунктов АЭС, аварийных радиологических бригад, медицинских отрядов специального назначения, медико-санитарных частей, специализированных медицинских центров и госпиталей, а также для подготовки научно-педагогических работников и медицинских специалистов в системе послевузовского и дополнительного профессионального образования.

Руководство разработано коллективом авторов в составе: доктор медицинских наук, профессор А.Н. Гребенюк; лауреат Государственной премии СССР, заслуженный деятель науки РФ, доктор медицинских наук, профессор В.И. Легеза; доктор медицинских наук, профессор В.Д. Гладких; доктор медицинских наук, доцент А.А. Тимошевский; доктор биологических наук В.Б. Назаров.

Рецензентами руководства выступили профессор кафедры медицины катастроф Российской медицинской академии последиplomного образования, заслуженный деятель науки РФ, доктор медицинских наук, профессор М.В. Васин, профессор кафедры военной токсикологии и медицинской защиты Военно-медицинской академии имени С.М. Кирова, заслуженный работник высшей школы РФ, доктор медицинских наук, профессор Н.А. Смирнов.

Издание руководства проведено в рамках Федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 и на период до 2015 г.».



Особые радиоактивные отходы. Под общей редакцией И.И. Линге. — М. 2015. 240 с.

Specific radioactive waste. Edited by I.I. Linge. — M. 2015. 240 pp.

Авторы: А.А. Абрамов (разд. 2.5, гл. 3–6), А.Н. Дорофеев (гл. 3, 6), Ж.В. Тяжкороб (гл. 3, 6) — Гос-корпорация «Росатом»; М.Н. Савкин (гл. 1, разд. 2.1, гл. 4, 5), М.В. Ведерникова (разд. 1.2, 2.1, гл. 3–5, разд. 6.2), И.И. Линге (гл. 1–6), С.С. Уткин (гл. 4, разд. 6.1), В.И. Дорогов (гл. 3–6), А.А. Самойлов, (разд. 2.5), Д.В. Бирюков (разд. 6.3) — ИБРАЭ РАН; И.И. Крышев (разд. 2.4, 4.8, 5.5) — ФГБУ «НПО «Тайфун»; В.В. Бочкарев (разд. 2.3, 3.4), М.А. Непейпиво (разд. 2.3), А.С. Абакумова (разд. 3.4) — ФБУ «НТЦ ЯРБ»; В.Г. Барчуков, О.А. Кочетков (разд. 2.2, гл. 4) — ГНЦ РФ ГБУ «ФМБА им. А.И. Бурназяна»; В.В. Касаткин (разд. 1.2, 3.4, 6.1) — АО «ВНИПИПромтехнологии»; Н.П. Поцяпун (разд. 2.2, 6.1) — ФМБА России; В.С. Репин (разд. 3.4, 6.1) — ФБУН НИИРГ им. проф. П.В. Рамзаева; Л.А. Курындина (разд. 2.4, гл. 4).

В монографии обобщен зарубежный и отечественный опыт обращения с накопленными радиоактивными отходами (РАО) в ядерном топливном цикле и оборонном комплексе — «ядерным наследием холодной войны». Рассмотрены современные правовые и нормативные основы формирования Единой государственной системы обращения с РАО. Законодательное выделение удаляемых и особых РАО создает условия для осуществления наиболее безопасных и экономически эффективных вариантов окончательного захоронения удаляемых отходов в централизованных пунктах захоронения и особых РАО — в месте их размещения. Дана характеристика регулирующих технических, санитарно-гигиенических и природоохранных требований по безопасному обращению с РАО.

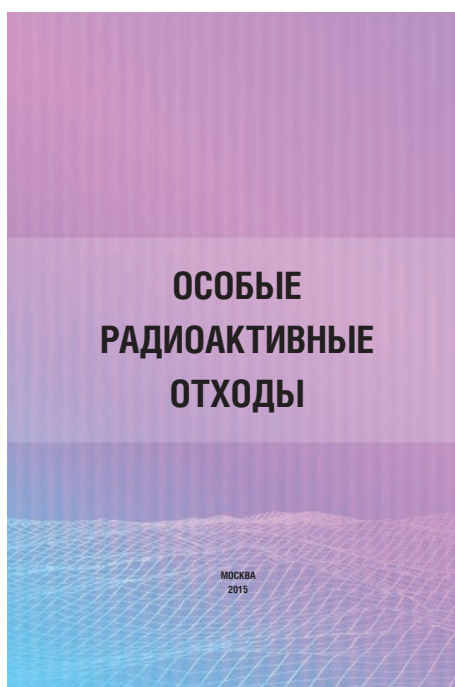
Для обоснования отнесения накопленных отходов к особым РАО в качестве критериальных показателей применяются коллективные эффективные дозы облучения, риски потенциального облучения, затраты, связанные с удалением радиоактивных отхо-

дов и с захоронением радиоактивных отходов в месте их размещения, а также оценки совокупного размера возможного вреда окружающей среде в случае захоронения РАО в месте их нахождения. Комплекс радиологических, радиоэкологических и экономических факторов за весь период потенциальной опасности РАО для целей стратегического планирования и реализации принципа обоснования практической деятельности впервые введен в системе регулирования в области использования атомной энергии. Это потребовало разработки методических подходов по оценке этих критериальных показателей, которые изложены в монографии.

Практическое внедрение методических подходов реализовано в ходе первичной регистрации РАО, проведенной в 2013–2014 гг. Приведены результаты оценки критериальных показателей на примере организаций атомной отрасли, в которых накоплены значительные количества РАО. К особым РАО было отнесено более 99,9 % всех накопленных жидких РАО и более 82 % по объему накопленных твердых РАО без учета захороненных в пунктах глубинного захороне-

ния РАО и РАО в центральных зонах мирных ядерных взрывов. Особые РАО размещены в 67 пунктах хранения РАО на территориях семи организаций. Еще в отношении 89 объектов решения были отложены по причинам, которые анализируются в монографии.

Рассмотрены среднесрочные и долгосрочные перспективы решения проблем обращения с РАО. Приведены результаты работ, выполненных в отношении пунктов хранения особых РАО, в рамках Федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 г. и на период до 2015 г.», а также планируемые работы в рамках Федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 гг. и на период до 2030 г.».



В статье Ю.Г. Григорьева «Первые недели после аварии на Чернобыльской АЭС (личные оценки)», опубликованной в журнале «Медицинская радиология и радиационная безопасность» № 3 за 2016 г., на С. 24 допущена опечатка: инициалы и фамилию В.Д. Солидовкин следует читать как Г.Д. Селидовкин. В той же статье на С. 25 допущены опечатки: фамилию Галустян следует читать как Галстян; А.С. Баранов следует читать А.Е. Баранов; Ф.К. Торубаров следует читать как Ф.С. Торубаров.

Редакция