

Медико-биологические проблемы жизнедеятельности

Научно-практический рецензируемый журнал

№ 1(25)

2021 г.

Учредитель

Государственное учреждение
«Республиканский научно-
практический центр
радиационной медицины
и экологии человека»

Журнал включен в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования диссертационных исследований по медицинской и биологической отраслям науки (31.12.2009, протокол 25/1)

Журнал зарегистрирован
Министерством информации
Республики Беларусь,
Свид. № 762 от 6.11.2009

Подписано в печать 12.04.21
Формат 60×90/8. Бумага мелованная.
Гарнитура «Times New Roman».
Печать цифровая. Тираж 130 экз.
Усл. печ. л. 23. Уч.-изд. л. 13,85.
Зак. 28/1.

Издатель ГУ «Республиканский
научно-практический центр
радиационной медицины и
экологии человека»
Свидетельство N 1/410 от 14.08.2014

Отпечатано в КУП
«Редакция газеты
«Гомельская праўда»
г. Гомель, ул. Полесская, 17а

ISSN 2074-2088

Главный редактор, председатель редакционной коллегии

А.В. Рожко (д.м.н., доцент)

Редакционная коллегия

В.С. Аверин (д.б.н., профессор, зам. гл. редактора),
В.В. Аничкин (д.м.н., профессор), В.Н. Беляковский (д.м.н., профессор), К.Н. Буздакин (к.т.н., доцент), Н.Г. Власова (д.б.н., профессор, научный редактор), А.В. Величко (к.м.н., доцент), И.В. Веякин (к.б.н., доцент), А.В. Воропаева (к.б.н., доцент), Д.И. Гавриленко (к.м.н.), А.В. Жарикова (к.м.н.), С.В. Зыблева (к.м.н., отв. секретарь), С.А. Игумнов (д.м.н., профессор), А.В. Коротаев (к.м.н., доцент), А.Н. Лызинов (д.м.н., профессор), А.В. Макарич (к.м.н., доцент), С.Б. Мельнов (д.б.н., профессор), В.М. Мицура (д.м.н., доцент), Я.Л. Навменова (к.м.н., доцент), Э.А. Надыров (к.м.н., доцент), И.А. Новикова (д.м.н., профессор), Э.Н. Платошкин (к.м.н., доцент), Э.А. Повелица (к.м.н.), А.С. Подгорная (к.м.н.), Ю.И. Рожко (к.м.н., доцент), И.П. Ромашевская (к.м.н.), М.Г. Русаленко (к.м.н., доцент), А.П. Саливончик (к.б.н.), А.Е. Силин (к.б.н., доцент), А.Н. Стожаров (д.б.н., профессор), И.О. Стома (д.м.н., доцент), Н.И. Шевченко (к.б.н., доцент), Ю.И. Ярец (к.м.н., доцент)

Редакционный совет

Е.Л. Богдан (МЗ РБ, Минск), А.В. Аклеев (д.м.н., профессор, Челябинск), О.В. Алейникова (д.м.н., чл.-кор. НАН РБ, Минск), С.С. Алексанин (д.м.н., профессор, Санкт-Петербург), Д.А. Базыка (д.м.н., профессор, Киев), А.П. Бирюков (д.м.н., профессор, Москва), Л.А. Бокерия (д.м.н., академик РАН и РАМН, Москва), А.Ю. Бушманов (д.м.н., профессор, Москва), И.И. Дедов (д.м.н., академик РАМН, Москва), В.И. Жарко (Минск), М.П. Захарченко (д.м.н., профессор, Санкт-Петербург), Л.А. Ильин (д.м.н., академик РАМН, Москва), К.В. Котенко (д.м.н., профессор, Москва), В.Ю. Кравцов (д.б.н., профессор, Санкт-Петербург), Н.Г. Кручинский (д.м.н., профессор, Пинск), Т.В. Мохорт (д.м.н., профессор, Минск), Д.Л. Пиневиц (МЗ РБ, Минск), В.Ю. Рыбников (д.м.н., профессор, Санкт-Петербург), Н.Д. Тронько (д.м.н., чл.-кор. НАН, акад. НАМН Украины, Киев), А.Л. Усс (д.м.н., профессор, Минск), В.А. Филонюк (к.м.н., доцент, Минск), Р.А. Часнойть (к.э.н., Минск), В.Д. Шило (Минск)

Технический редактор

С.Н. Никонович

Адрес редакции 246040 г. Гомель, ул. Ильича, д. 290,

ГУ «РНПЦ РМ и ЭЧ», редакция журнала

тел (0232) 38-95-00, факс (0232) 37-80-97

<http://www.mbp.rcrm.by> e-mail: mbp@rcrm.by

© Государственное учреждение

«Республиканский научно-практический центр радиационной медицины и экологии человека», 2021

№ 1(25)

2021

Medical and Biological Problems of Life Activity

Scientific and Practical Journal

Founder

Republican Research Centre
for Radiation Medicine
and Human Ecology

Journal registration
by the Ministry of information
of Republic of Belarus

Certificate № 762 of 6.11.2009

© Republican Research Centre
for Radiation Medicine
and Human Ecology

ISSN 2074-2088

Обзоры и проблемные статьи

- А.В. Рожко**
Чернобыльская катастрофа 35 лет спустя: медицинские аспекты 6
- В.М. Мицура**
Применение секвенирования нового поколения (NGS) в медицине 13

Медико-биологические проблемы

- А.П. Бирюков, И.В. Веялкин, Э.П. Коровкина, Ю.В. Орлов, Е.В. Васильев, И.Г. Дибиргаджиев**
Сравнительный анализ показателей заболеваемости злокачественными новообразованиями пациентов лечебно-профилактических учреждений ФМБА России и населения, проживающего на загрязненных радионуклидами территориях Беларуси, и смертности от них 19
- К.Н. Бuzдалкин, Н.Г. Власова, А.В. Рожко**
Ингаляционное поступление радионуклидов в зонах воздействия АЭС 29
- В.В. Евсеенко, В. Дроздович, А.В. Рожко, И.В. Веялкин, В.Ф. Миненко, Т.С. Кухта, С.Н.Трофимик, Р.И. Гракович, О.Н. Полянская, Л.С. Старостенко, Е. Кахун, М. Хэтч, М. Литтл, А.В. Бреннер, Е. Остроумова, К. Мабучи**
Состояние здоровья и оценка доз, поглощенных в щитовидной железе, в белорусской когорте лиц, подвергшихся облучению внутриутробно и в раннем возрасте после аварии на ЧАЭС 36
- В.В. Кляус, Е.В. Николаенко, С.И. Сычик, О.М. Жукова**
Разработка программы аварийного радиационного мониторинга вокруг Белорусской АЭС и АЭС сопредельных государств 47
- Е.В. Кравченко, Е.В. Санько-Счисленок, О.Н. Саванец, И.В. Жебракова, Р.Д. Зильберман, Н.А. Бизунок, Б.В. Дубовик**
Влияние дипептида Pro-Gly на зоосоциальное поведение аутбредных и инбредных мышей 60

Reviews and problem articles

- A.V. Rozhko**
Chernobyl disaster 35 years later: medical aspects 6
- V.M. Mitsura**
The application of next-generation sequencing (NGS) in medicine 13

Medical-biological problems

- A.P. Biryukov, I.V. Veyalkin, E.P. Korovkina, Yu.V. Orlov, E.V. Vasiliev, I.G. Dibirgadzhiiev**
Comparative analysis of cancer incidence and mortality rates of patients of therapeutic and preventive institutions of FMBA Russia and population living on radiactively contaminated territories of the Republic of Belarus 19
- K.N. Buzdalkin, N.G. Vlasova, A.V. Rozhko**
Inhalation of radionuclides in the areas of nuclear power plant exposure 29
- V.V. Yauseyenko, V. Drozdovitch, A.V. Rozhko, I.V. Veyalkin, V.F. Minenko, T.S. Kukhta, S. Trofimik, R. Grakovitch, O.N. Polyanskaya, L. Starastsenka, E.K. Cahoon, M. Hatch, M.P. Little, A.V. Brenner, E. Ostroumova, K. Mabuchi**
Assessment of health effects and reliability of radiation thyroid doses for belarusian persons exposed *in utero* and during early life to Chernobyl fallout 36
- V. Kliaus, A. Nikalayenka, S. Sychik, O. Zhukova**
Development of the emergency radiation monitoring program around the Belarusian NPP and NPP of the neighboring states 47
- E.V. Kravchenko, E.V. Sanko-Chislenok, O.N. Savanets, I.V. Zhebrakova, R.D. Zilberman, N.A. Bizunok, B.V. Dubovik**
Effect of the pro-gly dipeptide on the zosocial behavior of outbred and inbred mice 60

В.А. Мельник Типологические особенности формирования соматического статуса городских школьников	67	V.A. Melnik Typological features of somatotic status formation of urban schoolchildren	
Е.В. Снытков, В.Н. Кипень, С.Б. Мельнов Роль генетического полиморфизма и межгенного взаимодействия в повышении вероятности развития патологической игровой зависимости	72	E.V. Snytkov, V.N. Kipen, S.B. Melnov Role of genetic polymorphism and inter-gene interference in increased probability of the pathological game dependence development	
О.П. Сергеева, Н.А. Артемова, Е.Н. Александрова Противоопухолевая эффективность химиотерапии в условиях общей гипертермии в эксперименте <i>in vivo</i>	81	O.P. Sergeeva, N.A. Artemova, E.N. Alexandrova Antitumor efficacy of thermochemotherapy <i>in vivo</i> experiment	
В.А. Филонюк, В.В. Шевляков, Е.В. Чернышова, Г.И. Эрм, А.В. Буйницкая, С.А. Баранов Токсиколого-гигиеническое обоснование безопасного производства и применения микробного препарата «Корнеплюс»	88	V. Filanyuk, V. Shevlyakov, E. Chernyshova, G. Erm, A. Buinitskaya, S. Baranav Toxicologo-hygienic substantiation of safe production and use of microbial preparation «Corneplus»	
Л.Н. Эвентова, А.Н. Матарас, Г.Н. Евтушкова, Е.А. Дрозд, Н.Г. Власова Методический подход к прогнозу доз облучения населения в ситуации существующего облучения	96	L.N. Eventova, A.N. Mataras, G. N. Evtushkova, E.A. Drozd, N. G. Vlasova Methodological approach for predicting the exposure doses to the population in the existing exposure situation	

Клиническая медицина

Clinical medicine

А.Г. Булгак, И.Б. Моссе, О.В. Зотова, Т.С. Королева, Н.В. Николаева, А.Л. Гончар Роль генетического полиморфизма в развитии инфаркта миокарда среди мужчин из Республики Беларусь	102	A.G. Bulgak, I.B. Mosse, O.V. Zotova, T.S. Koroleva, N.V. Nikolaeva, A.L. Gonchar The role of genetic polymorphism in the development of myocardial infarction in men from the Republic of Belaurus	
С.В. Зыблева Особенности экспрессии рецепторов ранней и поздней активации Т-лимфоцитов у пациентов после трансплантации почки	113	S.V. Zybleva Features of expression of receptors of early and late activation of T-lymphocytes in patients after kidney transplantation	
А.В. Коротаев, Е.П. Науменко, Л.Е. Коротаева Возможности диагностики и прогнозирования патологического ремоделирования миокарда левого желудочка	122	A.V. Korotaev, E.P. Naumenko, L.E. Korotaeva Diagnostic and predictive capabilities pathological remodeling of the left ventricular myocardium	

- М.В. Линков, И.В. Веялкин, Д.К. Новик, Н.Н. Усова**
Эпидемиологическая характеристика множественной миеломы в Республике Беларусь за 2010-2019 годы 130
- Е.А. Полякова, Д.В. Остроушко, М.В. Стёганцева, И.Е. Гурьянова, Ю.В. Тимохова, М.В. Белевцев**
Оценка содержания кольцевых молекул ДНК Т- и В-клеточного рецептора (TREC/KREC) у новорожденных различного гестационного возраста 135
- И.Г. Савастеева, Ю.И. Ярец, М.Г. Русаленко**
Компоненты метаболического риска у молодого населения Гомельской области 143
- М.М. Шепетько, И.О. Стома**
Пролонгированное выделение вируса SARS-CoV-2 при инфекции COVID-19 у пациентов с онкогематологическими заболеваниями 151
- Ю.И. Ярец, Н.И. Шевченко, О.П. Логинова**
Особенности чувствительности к антимикробным лекарственным средствам изолятов бактерий, полученных из раневого отделяемого пациентов с обширными и локальными ранами 157

Обмен опытом

- Ж.М. Козич, В.Н. Мартинков, Ю.И. Ярец, Ж.Н. Пугачева, Д.А. Близин, Л.А. Смирнова**
Галектин-3 как маркер поражения почек при моноклональной гаммапатии неуточненного значения и множественной миеломе у жителей Гомельского региона Беларуси 168
- Э.В. Могилевец, П.В. Гарелик, Л.Ф. Васильчук, Р.Э. Якубцевич, И.Н. Невген**
Трансъюгулярное портосистемное шунтирование в собственной модификации (Предварительное сообщение о серии случаев) 175

Experience exchange

- Zh.M. Kozich, V.N. Martinkov, Yu.I. Yarets, Zh.N. Pugacheva, D.A. Blizin, L.A. Smirnova**
Galectin-3 as a marker of kidney damage in monoclonal gammopathy of undetermined significance and multiple myeloma in residents of the Gomel region of Belarus
- E.V. Mahiliavets, P.V. Harelik, L.F. Vasilchuk, R.E. Yakubceovich, I.N. Nevgen**
Transjugular intrahepatic portosystemic shunt in our own modification (Case series preliminary report)

ИНГАЛЯЦИОННОЕ ПОСТУПЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ЗОНАХ ВОЗДЕЙСТВИЯ АЭС

¹ГУ «РНПЦ радиационной медицины и экологии человека», Гомель, Беларусь;

²УО «Гомельский государственный медицинский университет», Гомель, Беларусь

Объектами исследований являлись аэрозоли с содержанием ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{238,239,240}\text{Pu}$, ^{241}Pu и ^{241}Am чернобыльского происхождения, а также выбросы Белорусской АЭС в режиме нормальной эксплуатации. Предметом исследований – дозы облучения персонала в результате ингаляционного поступления указанных радионуклидов во время выполнения работ в белорусском секторе зоны отчуждения Чернобыльской АЭС, а также в зоне воздействия штатных выбросов Белорусской АЭС. На основе отбора и измерения проб аэрозолей, а также расчётным методом оценены ожидаемые дозы внутреннего облучения участников тушения пожаров в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС за счет ингаляционного поступления радионуклидов. Ожидаемые дозы облучения персонала Белорусской АЭС в зоне воздействия штатных выбросов оценивались расчётным методом. Проведена сравнительная оценка ингаляционного поступления радионуклидов в зонах воздействия АЭС с учётом действующих национальных технических нормативных правовых актов. Установлено, что во время пожаров в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС ожидаемый вклад ингаляционной компоненты в эффективную дозу облучения персонала может достигать уровня, формируемого внешним облучением. В зоне наблюдения Белорусской АЭС вклад ингаляционного поступления радионуклидов в суммарную индивидуальную эффективную дозу облучения персонала также сравним (одного порядка величины) с дозой внешнего облучения. Показано, что в зоне отчуждения ЧАЭС вклад ^{137}Cs в «ингаляционную» дозу облучения персонала может составлять только 1%, а вклад трансурановых элементов – 60%. В зоне воздействия штатных выбросов Белорусской АЭС до 95% дозы облучения формируется инертными радиоактивными газами. В зоне отчуждения ЧАЭС ингаляционная компонента дозы не превышает 0,1 мЗв/год, что значительно меньше контрольного уровня, установленного в Полесском государственном радиационно-экологическом заповеднике для персонала (5 мЗв/год). При работах в зоне наблюдения Белорусской АЭС за пределами промплощадки ожидаемые дозы облучения персонала от штатных выбросов на порядки величины ниже, чем в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС. По ингаляционному пути облучения зона отчуждения Чернобыльской АЭС остаётся наиболее радиационно опасной территорией в Республике Беларусь.

Ключевые слова: персонал, ингаляция, радионуклид, доза облучения

Введение

Общеизвестно, что почти во всех аварийных ситуациях в лучшем случае постоянно проводился лишь контроль дозы внешнего проникающего излучения с применением дозиметров. Дозы от поступления радионуклидов в организм или от загрязнения кожи не оценивались, а только ограничивались путём использования

индивидуальных средств защиты органов дыхания и кожных покровов, йодной профилактики и продолжительностью проведения работ на радиационно опасных участках. В настоящее время оперативный контроль поступления радионуклидов через органы дыхания так же практически не проводится в связи с отсутствием методического и технического обеспечения.

Из трёх зон отчуждения, откуда эвакуировано население и где прекращена традиционная хозяйственная деятельность (на территории восточно-уральского радиоактивного следа, вокруг поврежденных реакторов Чернобыльской и Фукусимской АЭС), 30-километровая зона Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) является наиболее опасной вследствие загрязнения α -излучающими долгоживущими радионуклидами. Выпавшие на почву ^{241}Am , ^{238}Pu , ^{239}Pu и ^{240}Pu практически не вносят вклад в дозу внешнего облучения и не поступают корневым путем в растения и далее в продукты питания растительного происхождения, а через корма – в пищевую продукцию животного происхождения. Однако при пожарах в результате подъема радионуклидов в зону дыхания происходит формирование доз внутреннего облучения ингаляционным путем. На участках зоны отчуждения с высоким уровнем загрязнения трансурановыми элементами и ^{90}Sr вклад ингаляционного поступления радионуклидов в дозу облучения персонала может превышать все остальные пути облучения при некоторых видах работ. Однако контролируется только содержание в организме ^{137}Cs , а контроль облучения персонала в результате поступления ^{241}Am , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu и ^{90}Sr через органы дыхания не проводится [1-5].

Проблема индивидуального дозиметрического контроля заключается в том, что для оценки объемной активности воздуха, на основе которой рассчитываются ожидаемые дозы внутреннего облучения за счет ингаляционного поступления радионуклидов, необходимо несколько суток [6]. Такая «оперативность», например, во время пожара, не позволяет нормировать продолжительность смены, принимать адекватные решения по применению индивидуальных средств защиты органов дыхания и других защитных мер.

Надёжная оценка радиационного воздействия штатных выбросов Белорусской АЭС так же должна включать оперативный контроль индивидуальных доз внутреннего облучения персонала АЭС от поступления радионуклидов через органы дыхания.

Однако, за исключением поступления ^{131}I , ингаляционному пути облучения персонала уделяется недостаточно внимания. В то же время в зонах наблюдения АЭС имеют место объективные методологические проблемы, связанные с измерением концентраций в воздухе короткоживущих инертных радиоактивных газов.

Представляет интерес сравнить дозы облучения персонала, ожидаемые в результате ингаляционного поступления радионуклидов при проведении работ вблизи различных радиационно опасных объектов.

Цель исследования – оценить дозы облучения персонала, ожидаемые в результате ингаляции радионуклидов в зонах воздействия АЭС на территории Республики Беларусь.

Материал и методы исследования

На территории зоны отчуждения Чернобыльской АЭС проводилась оценка ожидаемых доз внутреннего облучения участников тушения пожаров за счет ингаляционного поступления радионуклидов. Другие виды работ на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника формируют ингаляционные дозы значительно, на порядки величины, меньшие [7].

Объектами исследований являлись частицы аэрозолей с содержанием ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu и ^{241}Am , образующиеся в результате высокотемпературной возгонки и горения лесных материалов. Предметом исследований в зоне отчуждения ЧАЭС являлись дозы облучения персонала в результате ингаляционного поступления ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu и ^{241}Pu во время тушения пожаров. Крупные частицы радиоактивных аэрозолей размером более 1 мкм осаждаются в трахее, бронхах и быстро выводятся из организма, а субмикронные – проникают в альвеолы легких и длительное время находятся в организме [8, 9].

Оценку ожидаемых доз внутреннего облучения участников тушения пожаров в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС проводили как по результатам измерений объемной активности радионуклидов в зоне

дыхания участников пожаротушения [6], так и расчетным методом [1], который не требовал длительного радиохимического выделения и осаждения трансурановых элементов в лабораторных условиях с применением дорогостоящих ионообменных смол, α -спектрометрического окончания. В расчётном методе объемная активность i -ого радионуклида в зоне дыхания участников пожаротушения ρ_i (Бк·м⁻³) оценивается по формуле:

$$\rho_i = k_i \cdot \sigma_i, \quad (1)$$

где k_i – коэффициент подъема (ресуспензии) i -ого радионуклида, м⁻¹; σ_i – плотность загрязнения территории i -ым радионуклидом, Бк·м⁻².

Удельное содержание в пробах и, соответственно, плотность загрязнения почвы ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs определялось с использованием β - γ -спектрометра с органическим и сцинтилляционным детекторами. Плотность загрязнения территории зоны отчуждения ЧАЭС ²³⁸Pu, ²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu и ²⁴¹Pu с достаточной точностью оценивали по плотности загрязнения ²⁴¹Am [1, 2], которую оперативно измеряли по удельной активности проб почвы «аппаратным методом» с использованием γ -спектрометра с детектором на основе высокочистого германия с углеродным окном. Продолжительность измерения проб почвы, отобранных на территории зоны отчуждения ЧАЭС, как правило, не превышала 4 ч (при статистической погрешности оценки площади пика полного поглощения γ -линии ²⁴¹Am менее 15 %).

Для оперативной оценки плотности загрязнения территории также использовали карты загрязнения [3]. В этом случае отбор проб и измерения не проводили, а использовали приближенное значение, указанное на карте. Погрешностью оценки плотности загрязнения пренебрегали, так как неопределенность коэффициентов подъема радионуклидов, а также дозовых коэффициентов, используемых для оценки ожидаемых доз облучения, была на порядок выше.

Объектами исследований в зоне наблюдения Белорусской АЭС являлись выбросы в режиме нормальной эксплуата-

ции. Предметом исследований являлись дозы облучения персонала в результате ингаляционного поступления радионуклидов во время выполнения работ в зоне воздействия штатных выбросов Белорусской АЭС за пределами промплощадки.

Ожидаемые ингаляционные дозы облучения персонала Белорусской АЭС в зоне воздействия штатных выбросов оценивались расчётным методом. Для оценки радиационного воздействия штатных выбросов применялись геоинформационные технологии. Разработана геоинформационная модель [12], позволяющая выполнять прогнозы уровней загрязнения радионуклидами приземного слоя атмосферы. В основу расчетов концентраций радионуклидов в приземном слое атмосферы положена гауссова модель переноса поллютантов. Исходными данными для модели являлись информация о метеорологических условиях, характерных для площадки размещения Белорусской АЭС в Островецком районе Гродненской области [13], высоте и диаметре вентиляционных труб энергоблоков, а также о скорости потоков, изотопном составе и величине выброса при проектных режимах работы реакторов. Выходные данные размещались в электронных таблицах формата Microsoft Excel, которые далее использовались для обработки и построения тематических карт с помощью MapInfo Professional. Результаты расчетов и параметры самой геоинформационной модели представлялись в виде таблиц и тематических карт.

Оценивалось ожидаемое внутреннее облучение персонала Белорусской АЭС в результате ингаляционного поступления γ - и β -излучающих радионуклидов в организм. Трансурановые элементы в штатных выбросах АЭС отсутствуют. Прогноз построен путем суммирования величин ожидаемых эффективных доз от наиболее значимых радионуклидов, формирующих более 95% дозы.

Индивидуальные эффективные дозы облучения персонала $E_{\text{инг}}$ (Зв), ожидаемые в результате ингаляционного поступления радионуклидов, оценивали с использованием выражения:

$$E_{ing} = \sum_i \{e(g)_i \cdot \rho_i\} \cdot v \cdot t, \quad (2)$$

где $e(g)_i$ – дозовый коэффициент, равный ожидаемой эффективной дозе, обусловленной ингаляционным поступлением 1 Бк i -го радионуклида, Зв·Бк⁻¹ [10, 11];

v – интенсивность дыхания, 4,2 мЗ·ч⁻¹ при больших нагрузках [11];

t – продолжительность вдыхания загрязненного воздуха, ч.

Результаты исследования

По результатам отбора проб радиоактивных аэрозолей и их последующего лабораторного исследования установлено, что при тушении пожара 2015 г. в Полесском государственном радиационно-экологическом заповеднике объёмные активности достигали: ²³⁸⁺²³⁹⁺²⁴⁰Pu – 0,09 мБк·м⁻³, ²⁴¹Pu – 0,6 мБк·м⁻³, ²⁴¹Am – 0,1 мБк·м⁻³, ⁹⁰Sr – 40 мБк·м⁻³ и ¹³⁷Cs – 20 мБк·м⁻³. Индивидуальная эффективная доза внутреннего облучения персонала, ожидаемая в результате ингаляции радионуклидов при тушении указанного пожара, определялась в соответствии с формулой (2) и составила 2,5 мкЗв [5]. Вклад ¹³⁷Cs в «ингаляционную» дозу облучения персонала составил только 1%, при этом вклад ⁹⁰Sr составил 41%, а трансурановых элементов – 58% [2]. Вклад ²⁴¹Pu, распадающегося по схеме β-распада и ранее не учитываемого в расчетах, при ингаляционном поступлении составил 3%, т.е. в 3 раза больше, чем ¹³⁷Cs.

Предложенный расчётный метод [1] применялся далее при оценках радиационных рисков при пожарах в белорусском секторе зоны отчуждения Чернобыльской АЭС 2017-2018 годах. Объёмные активности радионуклидов рассчитывались по значениям плотности загрязнения территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника в зонах пожаров в соответствии с формулой (1) [3]. С учетом периодов полураспада соотношение между плотностями загрязнения территории заповедника трансурановыми элементами в указанное время оценивается приблизительно как ²⁴¹Am : ²³⁸⁺²³⁹⁺²⁴⁰Pu : ²⁴¹Pu = 1,0 : 0,75 : 10.

По характеру сгоревших лесных горючих материалов, полноте их сгорания и скорости распространения фронта все пожары 2017-2018 годов в белорусском секторе зоны отчуждения ЧАЭС отнесены к виду низовых лесных пожаров. Поэтому дозы облучения участников пожаротушения, ожидаемые в результате поступления ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²³⁸Pu, ²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu, ²⁴¹Pu и ²⁴¹Am через органы дыхания, оценивались с использованием консервативных коэффициентов подъема радионуклидов [8].

В 2017 году объёмные активности достигали: ²³⁸⁺²³⁹⁺²⁴⁰Pu – 1,5 мБк·м⁻³, ²⁴¹Pu – 26 мБк·м⁻³, ²⁴¹Am – 2 мБк·м⁻³, ⁹⁰Sr – 370 мБк·м⁻³ и ¹³⁷Cs – 11 Бк·м⁻³. Вклад трансурановых элементов в индивидуальную эффективную дозу внутреннего облучения персонала, ожидаемую в результате ингаляционного поступления радионуклидов, составил 60%, в том числе от ²⁴¹Am – 27%, ²³⁸⁺²³⁹⁺²⁴⁰Pu – 24% и от ²⁴¹Pu – 9%. Тушение всех пожаров заняло 55 ч, индивидуальная эффективная доза внутреннего облучения персонала, ожидаемая в результате ингаляционного поступления радионуклидов, оценивается в 74 мкЗв [2].

В 2018 г. вклад трансурановых элементов в ингаляционную дозу облучения составил 62%. 77% индивидуальной эффективной дозы внутреннего облучения персонала, ожидаемой в результате ингаляционного поступления радионуклидов, обусловлены тушением пожаров в Крюковском и Колыбанском лестничествах, наиболее загрязненных на территории заповедника. Объёмные активности достигали: ²³⁸⁺²³⁹⁺²⁴⁰Pu – 0,75 мБк·м⁻³, ²⁴¹Pu – 10 мБк·м⁻³, ²⁴¹Am – 1 мБк·м⁻³, ⁹⁰Sr – 120 мБк·м⁻³ и ¹³⁷Cs – 7 Бк·м⁻³ [1]. Годовая индивидуальная эффективная доза внутреннего облучения персонала, ожидаемая в результате ингаляции радионуклидов при тушении всех пожаров 2018 года, не превысила 0,1 мЗв.

При ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций в белорусском секторе зоны отчуждения ЧАЭС по ряду причин в настоящее время оцениваются только объёмная активность ¹³⁷Cs и его распространение на значительные расстояния. В то же

время, показано, что вклад ^{137}Cs в «ингаляционную» дозу облучения персонала может составлять только 1% от всей внутренней дозы. На территории белорусского сектора зоны отчуждения Чернобыльской АЭС оценка объёмных активностей всего состава техногенных радионуклидов (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu и ^{241}Am) путём отбора проб аэрозолей во время пожара выполнена впервые и единственный раз [6].

Сравнение полученных коэффициентов подъёма радионуклидов с более ранними результатами контролируемых экспериментов (пожаров) в украинском секторе зоны отчуждения Чернобыльской АЭС [8, 9] показало, что они одного порядка. Несколько более низкие значения, полученные в Беларуси, можно объяснить тем, что исследовались аэрозоли во время верхового пожара, когда основной запас радионуклидов, расположенный в подстилке леса, был практически не тронут. На Украине же эксперимент проводился с луговыми и с низовыми лесными, переходящими в верховые, пожарами.

Возможные выбросы Белорусской АЭС и дозы облучения щитовидной железы неоднократно обсуждались на этапе оценки воздействия станции на окружающую среду, а в публикациях приводились оценки их вклада во внешнюю эффективную дозу облучения [14, 15]. Можно лишь добавить, что при проектных режимах работы реакторов Белорусской АЭС выбросы значительно меньше установленных допустимых уровней, а выбросы инертных радиоактивных газов (ИРГ) примерно в 400000 раз выше выбросов ^{131}I , в 800000 раз больше $^{134+137}\text{Cs}$ и в $10^9 - ^{60}\text{Co}$.

В то же время общеизвестны сложности, связанные с измерением в зоне наблюдения АЭС малых объёмных активностей инертных газов с коротким периодом полураспада. Поэтому особый интерес представляет оценка вклада радионуклидов криптона и ксенона в ингаляционную дозу облучения расчётным способом.

При расчете доз облучения персонала учитывались радионуклиды, формирующие 99% выбросов. Рассматривались четыре формы радиоактивных веществ, распро-

страняющихся в атмосфере: ИРГ, молекулярный и органический йод, аэрозоли (йод, цезий и кобальт). При расчётах учитывалась роза ветров в 2018 году в зоне наблюдения Белорусской АЭС, преобладание ветров со скоростью ≤ 2 м/с (их повторяемость составляла 60,6%) и повторяемость неблагоприятных классов устойчивости (E и F) [13].

Установлено, что максимальные уровни загрязнения приземного слоя атмосферы радионуклидами ожидаются, в зависимости от скорости ветра, на расстоянии до 8 км от промплощадки АЭС по оси следа. Объёмные активности инертных радиоактивных газов могут достигнуть следующих значений: $^{133}\text{Xe} - 10 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$, $^{135}\text{Xe} - 2 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$. Концентрации остальных ИРГ ($^{131\text{m},133\text{m}}\text{Xe}$, $^{85,85\text{m},87,88}\text{Kr}$, ^{41}Ar) не должны превысить $0,2 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$. Вклад ^{131}I , 134 , ^{137}Cs , $^{89,90}\text{Sr}$, ^{60}Co и других радионуклидов в объёмную активность не превысит 1%. При наиболее вероятной категории устойчивости атмосферы (D) суммарная объёмная активность не превысит $3 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$.

Проведённые с использованием выражения (2) расчёты показали, что индивидуальные эффективные дозы персонала, ожидаемые в результате ингаляционного поступления радионуклидов при выполнении работ в зоне наблюдения Белорусской АЭС, при проектных режимах не могут превысить $10 \text{ мкЗв}\cdot\text{год}^{-1}$. Вклад инертных радиоактивных газов в ингаляционную компоненту дозы может достигать 95%.

Территория Республики Беларусь находится также в зонах воздействия Смоленской и Ровенской АЭС, однако в настоящее время, в силу удалённости и отсутствия аварийных ситуаций, радиационные риски от данных источников ничтожны по сравнению с рассмотренными.

Сравнительная оценка ингаляционного поступления радионуклидов в зонах Чернобыльской и Белорусской АЭС проведена без учёта применения средств индивидуальной защиты органов дыхания.

Заключение

Проведена сравнительная оценка ингаляционного поступления радионуклидов в

зонах воздействия АЭС с учётом действующих национальных технических нормативных правовых актов. Установлено, что во время пожаров в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС ожидаемый вклад ингаляционной компоненты в эффективную дозу облучения персонала может достигать уровня, формируемого внешним облучением. В южной части белорусского сектора зоны отчуждения ЧАЭС, наиболее загрязнённой трансурановыми элементами, вклад ингаляционной компоненты может составлять 1 мкЗв в час. В зоне наблюдения Белорусской АЭС вклад ингаляционного поступления радионуклидов в суммарную индивидуальную эффективную дозу облучения персонала так же сравним (одного порядка величины) с дозой внешнего облучения, т.е. находится в диапазоне 1÷10 мкЗв в год.

Показано, что в зоне отчуждения ЧАЭС вклад ^{137}Cs в «ингаляционную» дозу облучения персонала может составлять только 1%, а вклад трансурановых элементов – 60%. В зоне воздействия штатных выбросов Белорусской АЭС до 95% дозы облучения формируется инертными радиоактивными газами. В зоне отчуждения ЧАЭС ингаляционная компонента дозы не превышает 0,1 мЗв/год, что значительно меньше контрольного уровня, установленного в Полесском государственном радиационно-экологическом заповеднике для персонала (5 мЗв/год).

При работах в зоне наблюдения Белорусской АЭС за пределами промплощадки ожидаемые дозы облучения персонала от штатных выбросов на порядки величины ниже, чем в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС. По ингаляционному пути облучения зона отчуждения Чернобыльской АЭС остаётся наиболее радиационно опасной территорией в Республике Беларусь.

Библиографический указатель

1. Буздалкин, К.Н. Метод оперативной оценки доз облучения персонала, ожидаемых в результате ингаляции радионуклидов при тушении пожаров / К.Н. Буздалкин // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. – 2019. – № 1(21). – С. 36-42.

2. Буздалкин, К.Н. Ингаляционное поступление трансурановых элементов в организм при чрезвычайных ситуациях в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС / К.Н. Буздалкин, В.Н. Бортновский // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. – СПб, 2019. – № 3. – С. 59-65.

3. Буздалкин, К.Н. Уточнённые карты загрязнения трансурановыми элементами белорусского сектора зоны отчуждения Чернобыльской АЭС / К.Н. Буздалкин, Н.Г. Власова // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. – 2019. – № 2 (22). – С. 24-29.

4. Бортновский, В.Н. Гигиеническая оценка ингаляционного поступления радионуклидов в результате пожаров в Гомельской области / В.Н. Бортновский, А.М. Буздалкина, К.Н. Буздалкин // Проблемы здоровья и экологии. – 2016. – Т. 1(47). – С. 75-78.

5. Буздалкин К.Н. Облучение персонала в результате ингаляционного поступления радионуклидов при пожарах в зонах отчуждения и отселения Чернобыльской АЭС / К.Н. Буздалкин // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. – 2018. – № 1(19). – С. 25-32.

6. Буздалкин, К.Н. Мониторинг ожидаемых доз облучения спасателей в случаях пожаров на территории радиоактивного загрязнения / К.Н. Буздалкин, Е.К. Нилова, А.Б. Кухтевич // Чрезв. ситуации: образование и наука. – 2015. – № 10(2). – С. 61-64.

7. Аверин, В.С. Дозы облучения работников при проведении сельскохозяйственных операций на загрязнённой радионуклидами (^{137}Cs , ^{241}Am и $^{238, 239+240}\text{Pu}$) территории / В.С. Аверин, А.Г. Подоляк, С.А. Тагай, К.Н. Буздалкин, Е.К. Нилова // Бюллетень национального радиационно-эпидемиологического регистра «Радиация и риск». – Москва, 2014. – № 23(2). – С 85-94.

8. Руководство для участников тушения лесных пожаров в белорусском и украинском секторах зоны отчуждения Чернобыльской АЭС / ОБСЕ. – Фрайбург : Гомель : Киев, 2016. – 70 с.

9. Territory contamination with the radionuclides representing the fuel component of Chernobyl fallout / V.A. Kashparov [et al.] // The Science of The Total Environment. – 2003. – Vol. 317. – Iss. 1/3. – P. 105-119.

10. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности. Общие требования безопасности GSR-3 / МАГАТЭ. – Вена, 2015. – 520 с.

11. Критерии оценки радиационного воздействия: гигиен. норматив: утв. постановлением Минздрава Респ. Беларусь, 28.12.2012 г. № 213 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2013. 2/26850.

12. Аверин, В.С. Применение геоинформационных технологий для оценки радиационного воздействия штатных и проектных аварийных выбросов / В.С. Аверин, К.Н. Буздалкин, Е.К. Нилова // Вестник Ко-

мандно-инженерного института МЧС РБ. – 2010. – № 2(12). – С. 105-109.

13. Отчет по результатам экологического мониторинга в зоне наблюдения Белорусской АЭС / Государственное предприятие «Белорусская АЭС». – Островец, 2019. – 36 с.

14. Аверин, В.С. Дозы облучения животных и растений как результат радиационного воздействия АЭС с реакторами типа ВВЭР / В.С. Аверин, К.Н. Буздалкин, Е.К. Нилова // Веснік Мазырскага дзярж. унів. імя І.П. Шамякіна. – 2011. – № 4(33). – С. 3-8.

15. Переволоцкая, Т.В. Оценка объёмной активности и мощности поглощённой дозы внешнего γ -излучения от штатных выбросов радиоизотопов инертных газов Белорусской атомной электростанции / Т.В. Переволоцкая, А.Н. Переволоцкий // Радиация и риск. – Москва, 2014. – Том 23. – № 3. – С. 89-97.

K.N. Buzdalkin, N.G. Vlasova, A.V. Rozhko

INHALATION OF RADIONUCLIDES IN THE AREAS OF NUCLEAR POWER PLANT EXPOSURE

During fires in the exclusion zone of the Chernobyl nuclear power plant, the expected contribution of the inhalation component to the effective radiation dose of personnel can reach the level formed by external radiation. In the observation area of the Belarusian NPP, the contribution of inhaled radionuclides to the total individual effective radiation dose of personnel is also comparable with the dose of external radiation. It is shown that in the exclusion zone of the Chernobyl nuclear power plant, the contribution of ^{137}Cs to the «inhalation» dose of personnel can be only 1%, and the contribution of transuranic elements – 60%. In the zone of exposure to regular emissions of the Belarusian NPP up to 95% of the radiation dose is formed by inert radioactive gases. In the Chernobyl exclusion zone, the inhaled dose component does not exceed 0,1 mSv per year, which is significantly less than the control level set in the Polesky State Radiation and Environmental Reserve for personnel (5 mSv per year). When working in the observation area of the Belarusian NPP outside the industrial site, the expected radiation doses of personnel from regular emissions are an order of magnitude lower than in the exclusion zone of the Chernobyl NPP. According to the inhalation route of radiation exposure, the exclusion zone of the Chernobyl nuclear power plant remains the most radiation-hazardous territory in the Republic of Belarus.

Key words: irradiation dose, personnel, inhalation, radionuclide

Поступила 17.03.21