

А.П. Ермилов, А.В. Сень

«ГОРЯЧИЕ» ЧАСТИЦЫ В ПОСЛЕДСТВИЯХ АВАРИИ НА ЧАЭС

ООО «НТЦ Амплитуда»

РЕФЕРАТ

Представлены свидетельства очевидцев, подтверждающие «рутениевую» природу «чернобыльского» кашля – детерминированного радиобиологического эффекта, проявившегося весной, летом, ранней осенью 1986 г. и весной 1987 г. в местах интенсивных выпадений аварийных выбросов ЧАЭС. Продолжены исследования, результаты которых опубликованы в статье А.П. Ермилова «Феномен топливных частиц в последствиях аварии на ЧАЭС» на сайте открытого доступа журнала «Медицинская радиология и радиационная безопасность» [1].

Ключевые слова: Чернобыльская АЭС, авария, ядерное топливо, топливные частицы, «горячие» частицы, «летучая» фракция, радиобиологический эффект

Для цитирования: Ермилов А.П., Сень А.В. «Горячие» частицы в последствиях аварии на ЧАЭС // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2022. Т. 67. № 6. С. 96–100. DOI:10.33266/1024-6177-2022-67-6-96-100

A.P. Ermilov, A.V. Senj

«Hot» particles in the consequences of the Chernobyl accident

LLC «NTC Amplitude»

ABSTRACT

Eyewitness accounts are presented confirming the «ruthenium» nature of the «Chernobyl» cough – a deterministic radiobiological effect that manifested itself in the spring, summer, early autumn of 1986 and in the spring of 1987 in places of intense fallout from accidental emissions from the Chernobyl nuclear power plant. Research continued, the results of which were published in the article by A.P. Ermilov «The phenomenon of fuel particles in the consequences of the Chernobyl accident» on the open access website of the journal «Medical Radiology and Radiation Safety» [1].

Keywords: Chernobyl nuclear power plant, accident, nuclear fuel, fuel particles, «hot» particles, «volatile» fraction, radiobiological effect

For citation: Ermilov AP, Senj AV. «Hot» particles in the consequences of the Chernobyl accident. Medical Radiology and Radiation Safety. 2022;67(6):96–100. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2022-67-6-96-100

Введение

Взрыв активной зоны (АЗ) уран-графитового реактора РБМК на ЧАЭС явился причиной одного из самых значительных радиационных инцидентов атомного века. Из-за аварии произошло незапланированное поступление высокотехнологичных продуктов деятельности ума и рук человеческих в ветхозаветную окружающую среду, частью которой до сих пор являемся и мы, люди. Масштабы катастрофы и её неожиданность привели к почти полному отсутствию результатов измерений, необходимых для оценки даже основных факторов радиационной опасности произошедшего, таких как физико-химические свойства радиоактивных аэрозолей, их р/н состав, дисперсность и т.д. Пришлось предполагать возможные последствия аварии как неожиданные продолжения, обусловленные нормальным предназначением аварийного объекта. Из опыта эксплуатации промышленных уран-графитовых реакторов следовал вывод о выбросе во внешнюю среду наработанного в АЗ РБМК плутония как возможного ведущего фактора радиационной опасности. Летом 1986 г. основные усилия были направлены на проведение измерений по выявлению в 30-км зоне ЧАЭС и близости от неё мест, подвергшихся выпадениям плутония и определению на них плотности выпадения плутония [1].

В силу сложившихся таким образом обстоятельств оказался как бы «в тени» детерминированный эффект,

обусловленный аварийными выпадениями ЧАЭС – так называемый «чернобыльский кашель», получивший весной и летом 1986 г. массовое распространение в местах интенсивных аварийных выпадений.

Свидетельства очевидцев

Вообще говоря, в момент аварии, сразу после неё и с течением времени в состоянии аварийного объекта происходят последовательные необратимые изменения. Из-за неожиданности произошедшего эти изменения обычно не удается фиксировать специальными измерениями. При стечении подобных обстоятельств особую значимость приобретают свидетельства очевидцев. Анализ свидетельств может оказать существенное влияние на ретроспективу произошедшего.

В контексте настоящей работы такими свидетелями явились:

А.А. Боровой, научный руководитель экспедиции ИАЭ им. И.В. Курчатова на ЧАЭС с осени 1986 г.;

[С.В. Петров,] руководитель бригад специалистов ИБФ Минздрава СССР на ЧАЭС в мае–июне и в августе–сентябре 1986 г.;

[Б.И. Огородников,] научный руководитель работ, проводившихся на ЧАЭС сотрудниками НИФХИ им. Л.Я. Карпова.

С позволения А.А. Борового приводим выдержку из его рецензии на статью А.П. Ермилова «Феномен

топливных частиц в последствиях аварии на ЧАЭС», опубликованную на сайте открытого доступа журнала «Медицинская радиология и радиационная безопасность» [1]:

«...Теперь то, что касается причин «чернобыльского кашля», распространявшегося летом 1986 г. и летом 1987 г., о котором пишет автор. Факты следующие. После аварии все лето и раннюю осень 1986 г. специалисты, работающие в пределах нескольких километров от станции, были подвержены приступам кашля. При этом для сотрудников, посещавших территорию АЭС, а тем более объект «Укрытие», приступы эти были настолько сильными, что становились серьёзной помехой в работе. По этой причине из нашей группы курчатовцев (15–20 чел), трое были отозваны в Москву для лечения. Медики указывали на несколько возможных причин такого заболевания, а рекомендованные лекарства не помогали. В чистой зоне кашель постепенно проходил, но вызывал длительное ослабление голосовых связок. Зимой 1986 г. и весной 1987 г. кашель не наблюдался. Летом он ненадолго вернулся для специалистов, работавших в помещениях объекта «Укрытие». Никто не связал это со значительным повышением гамма-фона в центральном зале над развалом реактора. Дальнейшие исследования показали, что такое увеличение объясняется жаркой погодой и увеличением выхода из развала реактора аэрозолей, обогащенных радиоактивным ^{106}Ru (из-за возгонки летучего соединения RuO_4). Представленная работа позволяет объяснить такое совпадение и понять причину появления кашля».

С.В. Петров во время его первой командировки на ЧАЭС был вынужден прервать командировку по причине приступов кашля. Сразу по прибытии в Москву он провел измерение верхней части торса на гамма-спектрометре с полупроводниковым детектором и обнаружил, что основными гамма-излучающими радионуклидами в его легких оказались ^{103}Ru и ^{106}Ru (^{106}Rh). Через два месяца, во время второй командировки он опять закашлялся, но интенсивность кашля была гораздо меньше, чем в мае–июне 1986 г.

Б.И. Огородников в середине августа 1986 г. организовал в Чернобыле семинар, на котором сообщил, что прошедшим летом в воздухе над развалом реактора в основном оказались аэродисперсные формы радионуклидов рутения.

Свидетельства очевидцев как минимум не противоречат выводу в упомянутой ранее статье А.П. Ермилова:

«Анализ совокупности сложившихся обстоятельств позволяет рассматривать причиной «чернобыльского кашля», распространявшегося летом 1986 г. и летом 1987 г. на территориях, подвергшихся интенсивным выпадениям ЧАЭС, ингаляцию р/н ^{103}Ru и ^{106}Ru в составе летучих молекул RuO_4 , образовавшихся в выпадениях рутениевых «горячих» аэрозольных частиц».

«Горячие» частицы

При делении ядер ^{235}U тепловыми нейтронами кинетическая энергия атомов легких осколков продуктов деления (ПД) ~ 100 МэВ/атом, что обеспечивает значение пробега атома в топливе ~ 9 мкм. Таким образом, во время кампании вследствие кинетических эффектов часть атомов ПД оказывается в межгранулярных, газовых, поровых и других пустотах в раскаленном топливе [2]. Выход легких ПД металлов (Ru, Rh, Tc и Pd) при делении ядер урана ~ 22 %. Попадая в заполненные гелием пустоты топливных таблеток, атомы этих ПД, сталкиваясь в процессе термодиффузии друг с другом,

образуют в пустотах топлива инклюзии – компактные микроскопические металлические включения сферической формы [2]. Через несколько дней после взрыва и р/а распада короткоживущих ПД состав бета-излучающих р/н в инклюзиях в основном определялся р/н ^{103}Ru и ^{106}Ru (^{106}Rh).

Летом 1986 г. и 1987 г. инклюзии были найдены на территории Финляндии, Норвегии, Швеции, Польши в аварийных выпадениях, образовавшихся 26.04–27.04 и т.д. при транспортировке ветром облака взрыва ЧАЭС на запад [3]. Измерения показали, что на момент взрыва 26.04 значения объемной активности р/н рутения в инклюзиях достигали 50–60 Бк/мкм³ и более [3–5]¹.

В топливных частицах значения суммарной активности составили ~ 1 Бк/мкм³ [6], поэтому понятие «горячие» частицы по отношению к инклюзиям вполне оправданно.

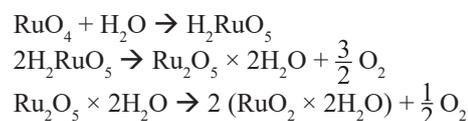
Характерным примером в этом отношении может служить «горячая» частица, фигурирующая в табл. 1 [3] под кодом HS2. Её диаметр 14 мкм, а активность 139 кБк и 28 кБк р/н ^{103}Ru и ^{106}Ru (^{106}Rh) соответственно. Частица была найдена в августе 1986 г. в районе Мазурских озёр в Польше, т.е. на расстоянии ~ 700 км от ЧАЭС. Согласно [7], значения средних ионизационных потерь энергии бета-излучения р/н ^{103}Ru и ^{106}Ru (^{106}Rh) в воздухе $dE/dx \sim 4$ МэВ·см² / г·расп. Соответствующее среднее расчетное значение мощности дозы бета-излучения в слое воздуха толщиной 10 мкм, окружающего эту «горячую» частицу, на начало мая 1986 г. составляло ~ 5 Гр/с.

Проведенные после аварии исследования [8, 9] показали, что в условиях ионизации воздуха бета-излучением мощностью дозы порядка нескольких Гр/с окисление рутения приводит к образованию в воздухе тетраоксида рутения RuO_4 . Понятное дело, что основные выпадения выброшенного взрывом содержимого активной зоны реактора оказались на территории ЧАЭС и в её окрестностях, в том числе и выпадения основной части инклюзий, образовавшихся в топливе за время кампании. Так что разгерметизация ТВЭЛ при взрыве должна была привести к образованию в атмосферном воздухе на поверхности «горячих» частиц (инклюзий) тетраоксида рутения RuO_4 .

Температура разложения тетраоксида рутения составляет 108 °С, а температура кипения 27 °С [10]. Таким образом, летом 1986 г. в местах аварийных выпадений происходило улетучивание р/н ^{103}Ru и ^{106}Ru (^{106}Rh) с поверхности инклюзий.

Респираторы, применявшиеся для защиты от ингаляции аэрозолей людям, работавшим после аварии на ЧАЭС и окрестностях, не могли предотвратить ингаляционное поступление газообразного тетраоксида рутения в органы дыхания.

При попадании в органы дыхания RuO_4 оказывался в среде со 100 % влажностью. Взаимодействие с влагой приводило к оседанию на поверхности органов дыхания нелетучих форм рутения, получение которых в воздухоносных путях из тетраоксида могло происходить по схемам типа:



¹ Везде по тексту, кроме специально оговоренных, значения активности р/н приведены по распаду на 26.04.86 г.

Взаимодействия, приводящие к трансформации «летучего» рутения в органах дыхания в нелетучие формы обусловлены тем, что RuO₄ – сильный окислитель, а поверхность органов дыхания характеризуется восстановительными свойствами.

Интерпретация результатов измерений

Конечно, вряд ли возможно спустя более 30 лет оценить значение дозы на органы дыхания и на ЖКТ, обусловленные ингаляцией летучих радионуклидов рутения, произошедшей в 1986–1987 гг. Но что-то в этом направлении даже сейчас можно оценить путем рассмотрения под определенным углом зрения сохранившихся результатов проведенных тогда измерений.

На рис. 1 приведены результаты проведенных осенью 1986 г. переносными радиометрами полевых стандартизованных измерений скорости счёта α- и β-излучения с поверхности горизонтальных деревянных досок, оказавшихся на западном следе, образовавшемся в ночь на 26.04.1986 выпадениями транспортировавшегося ветром на запад облака взрыва реактора.

Горизонтальные доски – сидения самодельных деревянных скамеек (лавочек), врытых жителями в землю на территории малоэтажных поселений [1]. Каждая точка на рис. 1 – среднее значение скорости счёта α- и β-излучения по измерениям 7–10 скамеек в данном населенном пункте. Поразительно, что статистическая неопределенность каждого из средних значений оказалась не более 15 %. Вариации положения точек на рис. 1 обусловлены несопадением положения данного населенного пункта по отношению к траектории движения облака. Тем не менее, в общем результаты измерений скорости счёта, как и следовало ожидать, спадают с увеличением расстояния от реактора. Исключение составляет лишь значение скорости счёта β-излучения в населенном пункте Весняное на расстоянии около 38 км от реактора. При этом значение скорости счёта α-излучения в населенном пункте Старая Рудня, расположенном на расстоянии примерно 1 км от Весняного, практически такое же, как и в Весняном, а значение скорости счёта β-излучения в Весняном почти в 60 раз больше, чем в Старой Рудне.

Осенью 1987 г. в 55 населенных пунктах, расположенных в пределах около 30 км от реактора, были отобраны по два фрагмента досок размерами ~15×10 см [1]. В табл. 1 приведены результаты измерений активности на поверхности отобранных проб на ППД гамма-спектрометре, проведенные в январе-феврале 1988 г. Эти доски были отобраны в тех же населенных пунктах, что и на рис. 1.

За время кампании в раскаленных герметичных ТВЭЛ накапливаются в газообразной форме «свободные» атомы элементов, температура кипения которых ниже «рабочей» температуры в активной зоне (АЗ), в том числе атомы ¹³⁷Cs и ¹²⁵Sb. Таким образом, в облаке взрыва наряду с водяным паром, топливными и «горячими» частицами вместе с прочими оказались и «свободные» атомы р/н ¹³⁷Cs и ¹²⁵Sb. Генерирование RuO₄ в облаке началось по пути от ЧАЭС только после остывания облака ниже 108 °С.

На рис. 2А,Б представлены отпечатки контактных радиографий, образованных на рентгеновской пленке β-излучением проб досок, отобранных в населенных пунктах Весняное и Ст. Рудня [1], расположенных на расстоянии 38 км и 39 км (табл. 1).

Наряду с радиографиями, приведенными на рис. 2А и 2Б, были сделаны радиографии с других проб, фигурирующих в табл. 1. За исключением пробы на рис. 2А из населенного пункта Весняное, они были такого же вида, как и на рис. 2Б.

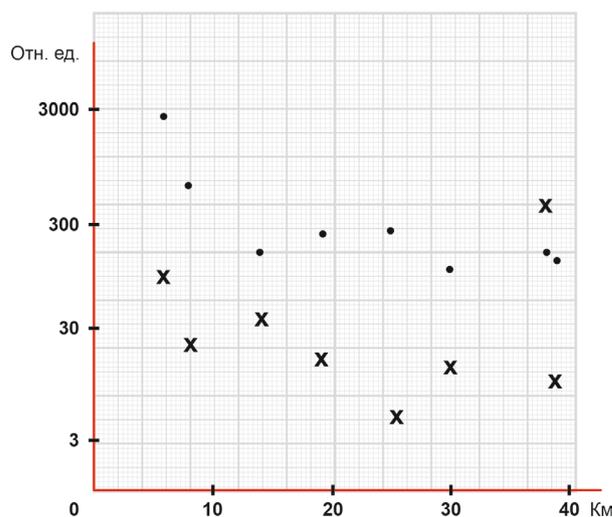


Рис.1. Значения скорости счёта в полевых измерениях α(*)- и β(x)-излучения, проведенных осенью 1987 г. на ночных выпадениях 26.04.86 по пути следования облака взрыва на запад

Fig.1. Counting rates in field measurements of α(*)- and β(x)-radiation, carried out in the autumn of 1987 on night fallout on April 26, 1986 along the path of the explosion cloud to the west

Таблица 1

Обработка результатов гамма-спектрометрических измерений проб выпадений, произошедших ночью 26.04.1986

Processing of the results of gamma-spectrometric measurements of fallout samples that occurred on the night of April 26, 1986

L, км	A _{изм} , Бк				A _м , Бк			η		
	¹⁴⁴ Ce	¹⁰⁶ Ru	¹³⁷ Cs	¹²⁵ Sb	¹⁰⁶ Ru	¹³⁷ Cs	¹²⁵ Sb	¹⁰⁶ Ru	¹³⁷ Cs	¹²⁵ Sb
5	1980	530	109	9,12	518	131	9,70	0,12	-0,17	-0,06
8,1	346	89,5	20,9	1,49	90,6	22,8	1,70	-0,01	-0,08	-0,12
13,8	24,9	7,71	2,79	0,19	6,51	1,64	0,12	0,19	0,70	0,58
19,2	193	45,3	11,9	0,89	50,5	12,7	0,95	-0,10	-0,06	-0,06
25,4	48,6	11,8	4,29	0,33	12,7	3,21	0,24	-0,07	0,34	0,38
30	46,0	13,6	11,2	0,57	12,0	3,04	0,23	0,13	2,17	1,48
38	70,9	51,3	381	16,1	18,6	4,68	0,35	1,8	80	45,0
39	59,4	14,0	9,03	0,54	15,5	3,92	0,29	-0,10	1,81	0,76

Примечание:

A_{изм} – измеренное значение активности данного р/н в пробе;
 A_м = K × Ce-144A_{изм} – расчетное значение активности данного р/н в топливных частицах в данной пробе, здесь K – среднее по АЗ значение в топливных частицах отношения активности данного р/н к активности р/н ¹⁴⁴Ce. Согласно [1, 6, 11]

$${}_{Ru-106}K = 0,262; {}_{Cs-137}K = 0,066; {}_{Sb-125}K = 0,0049;$$

η = (A_{изм} - A_м)/A_м – отношение в пробе «свободной» активности данного р/н к его активности в топливных частицах

Совокупность представленных результатов позволяет утверждать, что выпадение в населенном пункте Весняное в отличие от Ст.Рудни и остальных в табл. 1 обусловлены тем, что ранним утром 26.04.1986 в приземном слое воздуха облака взрыва, проследовавшего через населенный пункт Весняное, оказалась точка росы.

Возможно, этому способствовал микрорельеф места отбора пробы. Проба была отобрана на кладбище, расположенном на невысоком холме посередине поляны диаметром примерно 100–150 м, окружающей тогда со всех сторон высокорослым лесным массивом, в то время как остальные пробы отбирались непосредственно в населенных пунктах.

Ранним утром 26.04.1986 во время прохождения облака через населенный пункт Весняное при конденса-

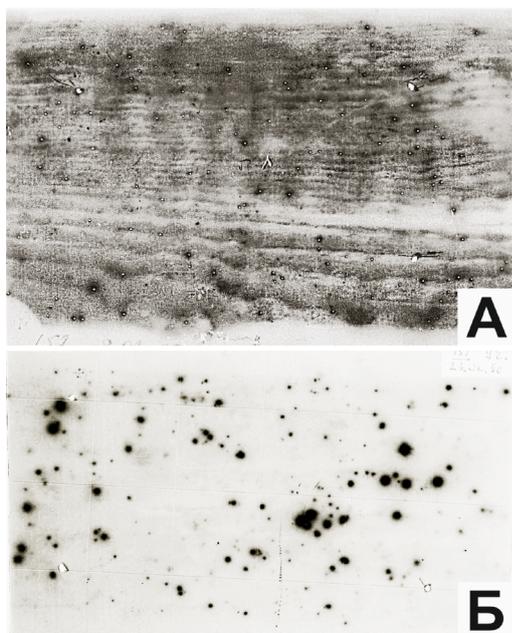


Рис. 2А,Б. Отпечатки с радиографий проб (январь 1988 г.), отображенных в населенных пунктах Весняное (А) и Старая Рудня (Б) (сентябрь 1987 г.). Время экспозиции радиографий 13 ч и 9 ч соответственно

Fig. 2A,B. Imprints from radiographs (January 1988) taken in the settlements of Vesnyanoye (A) and Staraya Rudnya (B) (September 1987). Exposure time radiography 13 h. and 9 h. respectively

ции воды в капли росы были захвачены и «свободные» атомы р/н ^{137}Cs и ^{125}Sb , и «летучие» молекулы RuO_4 . Смазывание поверхности проб росой привело к затеканию воды в поры древесины, где и закрепились р/а осадки после высыхания воды. Практическое совпадение значений активности р/н ^{144}Ce в пробах и скорости счета α -излучения на рис. 1, в Весняном и Ст. Рудне, расположенных рядом, свидетельствует о том, что конденсация воды в капли росы утром 26.04.1986 не повлияла на седиментацию нерастворимых топливных и «горячих» частиц на поверхность проб.

Что касается «летучего» RuO_4 , то из данных, приведенных в табл.1, следует, что за время транспортировки облака взрыва от ЧАЭС до Весняного «наработка» RuO_4

на поверхности «горячих» частиц превысила в 1,8 раз оставшееся содержание р/н рутения в топливных и «горячих» частицах.

«Чернобыльский» кашель (свидетельство А.П. Ермилова)

Я был командирован на ЧАЭС в конце июля 1986 г. По свидетельствам очевидцев, к этому времени «эпидемия» мучительного «чернобыльского» кашля ослабла. Тем не менее, практически все, включая новоприбывших, покашливали. Я закашлял примерно через неделю после того, как занялся исследованиями активности р/н плутония в верхнем слое почвы в г. Чернобыль. Вернулся домой в середине ноября. В основном кашель ослаб через ~3 мес после возвращения, но обнаружилось практически полная и, к сожалению, безвозвратная потеря обоняния.

Выводы

Преждевременная или аварийная разгерметизация отработанного или рабочего топлива приводит к генерированию «летучего» RuO_4 . При ингаляции газообразного RuO_4 р/н рутения оседают на поверхности органов дыхания в виде нелетучего RuO_2 .

Послесловие

По прошествии времени следует отметить, что в настоящее время не так уж часто удается установить существование дотоле не отмеченного факта детерминированного воздействия ионизирующих излучений на человека. В данной ситуации удалось установить причинно-следственную связь между симптомами и обусловившими их факторами.

Применительно к катастрофе на ЧАЭС ингаляционное поступление бета-излучающих р/н рутения обусловило тотальное распространение «чернобыльского кашля», имевшего место весной и летом 1986 г. на территориях, примыкавших к ЧАЭС и на других, подвергшихся интенсивным выпадениям аварийных выбросов ЧАЭС. При этом, из общих соображений представляется очевидным, что массовое распространение детерминированного эффекта воздействия ионизирующих излучений на ликвидаторов и население обязательно должно было привести к повышению вероятности соответствующих онкологических последствий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ермилов А.П. Феномен топливных частиц в последствиях аварии на ЧАЭС. URL: https://medradiol.fmbafmbc.ru/journal_medradiol/abstracts/2021/6/ap_ermilov.pdf.
2. Дегальцев Ю.Г., Пономарев-Степной Н.Н., Кузнецов В.Ф. Поведение высокотемпературного ядерного топлива при облучении. М.: Энергоатомиздат, 1987. С.14, С.10.
3. Pöllänen R. Highly Radioactive Ruthenium Particles Released from Chernobyl Accident: Particle Characteristics and Radiological Hazard // Radiation Protection Dozimetry. 1997. V.71, No. 1. P. 23-32.
4. Rolf Falk, Irma Suomela, Andor Kerekes. A Study of “Hot Particles” Collected in Sweden One Year after the Chernobyl Accident // Proceedings of the 1988 European Aerosol Conference 30 August – 2 September 1988. Pergamon Press, P. 1339-1342.
5. Devell L., Tovedal H., Bergstrom U., Appelgren A., Chissler J., Andersson L. Initial Observations of Fallout from the Reactor Accident at Chernobyl // Nature. 1986. V.324, No. 6067. P. 192-193.
6. Бегичев С. Н., Боровой А. А., Бурлаков Е.В., Гаврилов С.Л., Довбенко А.А., Левина А.А., Маркушев В.М., Марченко А.Е., Строганов А.А., Татауров А.Л. Топливо реактора 4-го блока ЧАЭС: Краткий справочник. ИАЭ-5268/3. М., 1990.
7. Машкович В.П., Кудрявцева А.В. Защита от ионизирующих излучений: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1995. С. 422.
8. Mun C., Cantrel L., Madic C. Radiolytic Oxidation of Ruthenium Oxide Deposits // Nuclear Technology. 2008. No. 164.
9. Madic C., Mun C., Cantrel L. Review of Literature on Ruthenium Behaviour in Nuclear Power Plant Severe Accidents // Nuclear Technology American Nuclear Society. 2017. V.156, No. 3. P. 332-346. 10.13182/NT156-332. irsn-00177621v2.
10. Химическая энциклопедия. М.: Научное издательство «Большая Российская Энциклопедия», 1998.
11. Кутяков В.Н. Радионуклидное загрязнение воздушной среды в результате аварии на Чернобыльской АЭС и облучение легких. Р. 1 // Патология органов дыхания у ликвидаторов аварии на Чернобыльской АЭС: Монография / Под ред. Чучалина А.Г., Черняева А.Л., Вуазена К. М.: ГРАНТЪ, 1998. С. 10-43. ISBN5-89135-051-3.

REFERENCES

1. Yermilov A.P. The Phenomenon of Fuel Particles in the Consequences of the Chernobyl Accident. URL: https://medradiol.fmbafimbc.ru/journal_medradiol/abstracts/2021/6/ap_ermilov.pdf. (In Russ.).
2. Degalcev Yu.G., Ponomarev-Stepnoy N.N., Kuznecov V.F. *Povedeniye Vysokotemperaturnogo Yadernogo Topliva pri Obluchenii* = Behavior of High-Temperature Nuclear Fuel Under Irradiation. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. P.14, P.10 (In Russ.).
3. Pöllänen R. Highly Radioactive Ruthenium Particles Released from Chernobyl Accident: Particle Characteristics and Radiological Hazard. *Radiation Protection Dozimetry*. 1997;71;1:23-32.
4. Rolf Falk, Iorma Suomela, Andor Kerekes. A Study of “Hot Particles” Collected in Sweden One Year after the Chernobyl Accident. Proceedings of the 1988 European Aerosol Conference 30 August – 2 September 1988. Pergamon Press, P. 1339-1342.
5. Devell L., Tovedal H., Bergstrom U., Appelgren A., Chissler J., Andersson L. Initial Observations of Fallout from the Reactor Accident at Chernobyl. *Nature*. 1986;324;6067:192-193.
6. Begichev S. N., Borovoy A. A., Burlakov YE.V., Gavrilov S.L., Dovbenko A.A., Levina A.A., Markushev V.M., Marchenko A.YE., Stroganov A.A., Tataurov A.L. *Toplivo reaktora 4-go bloka CHAES* = Fuel of the Reactor of the 4th Block of the Chernobyl Nuclear Power Plant. A Quick Guide. IAE-5268/3. Moscow Publ., 1990 (In Russ.).
7. Mashkovich V.P., Kudryavceva A.V. *Zashchita ot Ioniziruyushchikh Izlucheniy* = Protection from Ionizing Radiation. A Handbook. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1995. P. 422 (In Russ.).
8. Mun C., Cantrel L., Madić C. Radiolytic Oxidation of Ruthenium Oxide Deposits. *Nuclear Technology*. 2008;164.
9. Madić C., Mun C., Cantrel L. Review of Literature on Ruthenium Behaviour in Nuclear Power Plant Severe Accidents. *Nuclear Technology American Nuclear Society*. 2017;156;3:332-346. 10.13182/NT156-332. irsn-00177621v2.
10. *Khimicheskaya Enciklopediya* = Chemical Encyclopedia. Moscow, Publ., 1998 (In Russ.).
11. Kutkov V.N. Radionuclide Air Pollution as a Result of the Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant and Lung Exposure. Section 1. *Patologiya Organov Dykhaniya u Likvidatorov Avarii na Chernobylskoy AES* = Pathology of the Respiratory Organs in the Liquidators of the Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant. Monograph. Ed / Под ред. Chuchalin A.G., Chernyayev A.L., Vuazen K. Moscow, GRANT Publ., 1998. P. 10-43. ISBN5-89135-051-3 (In Russ.).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.
Поступила: 20.07.2022. Принята к публикации: 25.09.2022.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
Financing. The study had no sponsorship.
Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.
Article received: 20.07.2022. Accepted for publication: 25.09.2022.