

УДК 574

РАДИАЦИОННЫЙ РИСК ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ ПРИ «ЙОДНОМ УДАРЕ» В ТЕЧЕНИЕ АКТИВНОЙ СТАДИИ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

В.В. ЖУРАВКОВ, В.П. МИРОНОВ

(Международный государственный экологический университет им. А.Д. Сахарова, Минск)

На основании аналитического обзора многочисленных опубликованных экспериментальных и расчетных данных приводится динамика развития радиационной обстановки на территории Беларуси по йоду и формирование дозовых нагрузок населения на активной стадии аварии.

Введение. Сразу после аварии наибольшую опасность для населения представлял йод-131. В связи с относительно небольшим временем жизни йода-131 период «йодного удара» невелик и составляет около недели. Именно в это время необходимы данные о содержании ^{131}I в различных объектах окружающей среды для принятия оперативных решений, которые были получены в середине мая 1986 года. В связи с этим наблюдаемый в настоящее время в Беларуси рост патологии щитовидной железы, обуславливаемой радиационным фактором, привлекает внимание специалистов к проблеме йода-131, поскольку имеющиеся (зачастую противоречивые) расчетные данные по содержанию радиойода в щитовидной железе населения пострадавших от аварии стран не объясняют наблюдаемое явление [1].

Актуальность данной проблемы по отношению к ^{131}I обусловлена его относительно высоким кумулятивным выходом при делении ядер на осколки, физиологическим концентрированием ^{131}I в щитовидной железе, исключительной миграционной подвижностью по цепочкам (например, по цепочке воздух - трава - корова - молоко - человек).

Физико-химические формы радионуклидов и их трансформация в процессе миграции. Основным начальным звеном миграции радиоактивных изотопов йода в окружающей среде является атмосфера, в которую они попадают при испытании ядерного оружия или выбрасываются через вентиляционные системы после очистки и удержания при нормальной эксплуатации предприятий ядерного топливного цикла, а при аварийной ситуации - минуя эти системы. Во всех случаях более 90 % выбросов радионуклидов йода поступает в атмосферу и лишь не более 10 % сбрасывается в пруды-охладители [2].

Радионуклиды йода, так же как и стабильный йод-127, в атмосфере находятся в парогазовом состоянии или в виде аэрозолей. В газообразном состоянии могут находиться как неорганические соединения йода (преимущественно элементарный йод I_2 , температура кипения 184°C ; йодистоводородная кислота HI , температура кипения $35,4^\circ\text{C}$; частично йодаты и периодаты), так и органические соединения (в основном йодистый метил CH_3I температура кипения $42,6^\circ\text{C}$, и другие органические соединения более высокого порядка вплоть до йодистого октила). Эти химические соединения йода в нормальных условиях находятся в твердом состоянии (элементарный йод) или в виде жидкостей (органические соединения йода), но имеют высокое давление насыщенных паров при температурах выше 25°C и при концентрациях ниже 10^{-8} г/м³ (средняя концентрация природного йода в приземном воздухе; допустимая концентрация ^{131}I в воздухе - $1,2 \cdot 10^{-15}$ г/м³) обычно находятся в атмосферном воздухе в газообразном состоянии. Аэрозоли йода - это продукты адсорбции, преимущественно йодидов, йодатов и частично элементарного йода, на поверхности минеральных частиц микронного размера или на частицах органического происхождения (пыльца растений, смолистые частицы над сосновыми лесами и т.п.), которые постоянно находятся в воздухе.

В зависимости от физико-химических особенностей различных источников выбросов радионуклидов йода в атмосферу можно выявить существенные отличия физико-химических форм йода. Йод-131, образующийся при ядерных взрывах, в воздухе находится преимущественно в аэрозольной форме (60...80 %). Это обусловлено тем, что выход ^{131}I непосредственно в реакции деления мал, а образуется он в основном в результате [3-распада одного из продуктов деления - теллура-131 ($T_{1/2} = 25$ мин). Последний как элемент с относительно более низкой летучестью конденсируется в атмосфере после ядерного взрыва на мелкодисперсных твердых частицах, поэтому первичными формами стабилизации теллура-131 и йода-131 в воздухе являются аэрозоли [3].

В выбросах в атмосферу через вентиляционные трубы с АЭС при нормальной эксплуатации ^{131}I преимущественно находится в парогазовом состоянии в виде органических соединений, частично в элементарной форме. Содержание его в аэрозольной форме незначительно [4]. Это объясняется высокой эффективностью существующих на большинстве АЭС систем очистки отходящих газов к улавливанию аэрозольных форм йода, по сравнению с молекулярными и органическими формами. Образование органических соединений йода происходит, по-видимому, в вентиляционных системах АЭС в результате протекания радиационно-химических реакций с участием ^{131}I [5], и в газовых выбросах наблюдается значительное фракционирование ^{131}I по отношению к ^{137}Cs , поскольку ^{137}Cs в отходящих газах находится в аэрозольной форме и эффективно задерживается аэрозольными фильтрами.

В отличие от нормальной эксплуатации АЭС, при аварийной ситуации с разрушением активной зоны реактора продукты деления из повреждённых тепловыделяющих элементов попадают непосредственно в атмосферу, минуя системы очистки и физико-химические формы йода, и изотопные отношения в выбросе могут существенно отличаться от таковых при нормальной эксплуатации АЭС. Так, при аварии на Чернобыльской АЭС в результате неуправляемого резкого повышения нейтронного потока температура в топливе поднялась выше 2500 °С, а в некоторых тепловыделяющих элементах выше 3000 °С. Произошел взрыв или серия взрывов с разрушением активной зоны и кровли здания IV блока, и на высоту выше 1500 м было выброшено не менее 12 % ^{131}I , находившегося в активной зоне реактора на момент аварии [6]. Произошло также разрушение технологических коммуникаций, и в результате взаимодействия воды первого контура в виде перегретого пара с цирконием образовалось значительное количество водорода, т.е. парогазовая среда, в которой оказались продукты деления после разгерметизации тепловыделяющих элементов, была, скорее всего, восстановительной. Длительность этой стадии аварии составляла несколько минут, в течение которых маловероятно изменение физико-химических форм ^{131}I и ^{137}Cs с образованием летучих органических соединений йода. С этого момента процесс образования радионуклидов прекратился, и их соотношения в дальнейшем определялись периодами полураспада, физико-химической трансформацией во время миграции с радиоактивным облаком и в процессах ресуспензии. На этом этапе наиболее вероятно, что физико-химические формы ^{131}I в выбросе были такими же, как в топливе на момент аварии.

Необходимо также учитывать дополнительное поступление радионуклидов в окружающую среду после первичных выпадений йода при распаде его предшественников (Sb и Te).

Цезий и йод являются наиболее подвижными продуктами деления, после образования диффундируют к поверхности микросталлов UO_2 , накапливаются в межкристаллитном пространстве и под оболочкой тепловыделяющих элементов, где взаимодействуют между собой с образованием химически устойчивых и менее агрессивных продуктов [7]. Изучение выхода продуктов деления из UO_2 оказывает,

что при температурах около 1300 °С газовая фаза над UO_2 содержит только Cs, I и благородные газы, причем они при аварии практически полностью переходят в газовую фазу выброса [8, 9]. Следует отметить, что при взрывном характере выброса некоторые различия в летучести радионуклидов не оказывают, по-видимому, существенного влияния на изотопный состав образующегося радиоактивного облака. Поскольку цезия (по массе) в процессе деления образуется значительно больше, чем йода, последний практически полностью находится в связанной форме. Поэтому в топливе при значениях глубины выгорания более 9 МВт-сут/кг урана йод не существует в элементарном виде и связан с цезием в термодинамически стабильное при температуре оболочки соединение CsI [10]. Нестабильность CsI начинает проявляться при наличии кислорода или других окислителей. Отсюда следует, что образование радиоаэрозолей цезия и йода в момент тяжелой аварии, видимо, происходит за счет испарения йодида и оксида цезия из разрушенного тепловыделяющего элемента (ТВЭЛА) при температурах 1000... 1600 °С. Экспериментально показано, что при испарении йодида цезия в условиях, имитирующих проекционную аварию на реакторе, образуются три группы частиц: с размерами 0,001...0,01 мкм, 0,1...5 мкм и 50...200 мкм, причем массовая доля первых представляет значимую величину и на два порядка больше, чем массовая доля остальных. Такие мелкодисперсные частицы обычно обладают гидрофобной природой, и скорости гетерогенных процессов с их участием относительно невысокие [11].

Таким образом, наиболее вероятно, что при взрыве на IV блоке Чернобыльской АЭС и при последующем пожаре в атмосферу на высоту до нескольких километров в течение нескольких дней инжигировались мелкодисперсные аэрозоли йодида и оксида цезия с размерами менее 0,01 мкм в соотношении по активности на момент аварии (I³⁰; 26.04.1986): $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs} = 10,0 \pm 3,1$.

Согласно коллективному мнению международной группы экспертов, характерным для элементарного йода значением скорости осаждения является 210^5 м/с и 5TO^5 для органического йода [2, 12]. В случае аэрозольного йода скорость выпадений на поверхность почвы равна 3TO^4 м/с [13]. В Минске, согласно экспериментальным данным, на 28 - 29 апреля 1986 года суточные выпадения йода-131 составили 34,3 кБк/м², а среднесуточная концентрация этого радионуклида в приземном воздухе в это время была равна 1060 Бк/м³. Из этих данных следует, что скорость осаждения ^{131}I равна 32,4 м/сут или $3,8 \cdot 10^4$ м/с и хорошо совпадает с мнением экспертов (экспериментальные данные, полученные в Братиславе за период с 30 апреля по 5 мая 1986 года).

Импакторные измерения дисперсности аэрозолей ^{131}I (Чехословакия, Швеция, Финляндия, Австрия, Германия, Швейцария) показали, что как над развалом IV блока, так и в дальней зоне радиойод был связан с субмикронными частицами менее 0,3 микрон. Аэрозоли таких размеров наиболее устойчивы в свободной атмосфере и могут переноситься на большие расстояния от источника. С позиций радиационной гигиены аэрозоли с размером 0,3...0,5 микрон представляют наибольшую опасность для органов дыхания, поскольку не задерживаются в носоглотке и трахее, проникая в бронхи и альвеолы. Скорость осаждения таких частиц в атмосфере составляет несколько миллиметров в секунду. Поэтому их выпадение на земную поверхность происходит очень медленно. С одной стороны, это приводит к меньшему загрязнению растений и, как следствие, снижению доли ^{131}I , участвующей в миграции по пищевым цепочкам, но с другой стороны - увеличивает ингаляционную опасность и глобальное распространение.

Формирование радиоактивного загрязнения в динамике по суткам на активной стадии аварии. Распространение радионуклидов вследствие хаотичности атмосферных движений может происходить неожиданными путями. Например, распространение радионуклидов в атмосфере после аварии на Чернобыльской АЭС происходило так, как показано на рис. 1.

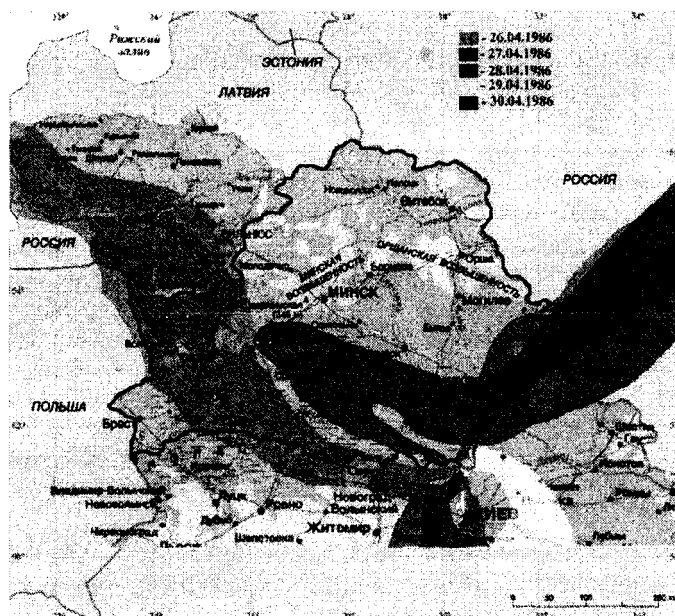


Рис. 1. Распространение радионуклидов вследствие хаотичности атмосферных движений

Сразу после аварии короткоживущие изотопы йода представляли наибольшую радиационную опасность и, кроме того, до аварии на ЧАЭС они не присутствовал в атмосфере, поэтому их наличие явилось хорошим индикатором распространения радиоактивности.

Несмотря на слабые ветры 26 апреля 1986 г., на большой территории был обнаружен йод-131. Основной перенос радиоактивных масс происходил на запад и на северо-запад. На западной границе Беларуси изолиния выпадений 3 мКи/км^2 ($\sim 10^2 \text{ Бк/м}^2$) вышла за пределы страны и распространилась на Польшу. К северу и востоку от ЧАЭС наблюдались местные образования радиоактивных масс к Витебску. Можно предположить, что хотя при взрыве основная часть радиоактивных продуктов была выброшена на высоту до $1,5\text{--}2 \text{ км}$, небольшая часть все же проникла до высот около 5 км , где наблюдался перенос к югу, и, попав в зону грозовых облаков, была быстро вынесена в район Украины.

Уже на следующие сутки, 26 - 27 апреля выпадения йода-131 распространились далеко на северо-запад, вышли за пределы Беларуси и в северо-западном направлении, по-прежнему продолжался их вынос и в западном направлении. В районе Бреста количество йода увеличилось в 10 раз до $0,3 \text{ Ки/км}^2 \cdot \text{сут}$. Намечился вынос радиоактивных масс на запад Беларуси. Одновременно часть радиоактивных масс стала выноситься на север и северо-восток, в направлении Гомеля.

Вынос йода-131 резко увеличился 27-28 апреля в северо-западном направлении. Изолиния $20 \text{ Ки/км}^2 \cdot \text{сут}$ достигла Пинска, на границе от Клайпеды до Бреста выпадения йода-131 превышали $3 \text{ Ки/км}^2 \cdot \text{сут}$. Возросли уровни выпадений в северном и в восточном направлениях. В Гомеле, Могилеве и Минске наблюдались выпадения около $0,3 \text{ Ки/км}^2 \cdot \text{сут}$, на восточном направлении выпадения превышали $30 \text{ мКи/км}^2 \cdot \text{сут}$, такие же уровни наблюдались в пятне, расположенном на западе Беларуси.

За счет ослабления ветра 28 - 29 апреля вынос радиоактивности уменьшился, зато максимальных значений достигли выпадения йода-131 в районе, примыкающем к месту аварии с севера, что было связано с поворотом ветра с юго-востока на юго-запад. В эти сутки в Гомеле выпало 66 Ки/км^2 йода-131, область высоких уровней выпадений была вытянута от Гомеля на запад и доходила до Барановичей, где выпало более $4 \text{ Ки/км}^2 \cdot \text{сут}$.

На следующие сутки, 29 - 30 апреля продолжался вынос йода-131 на запад и на север, где область с уровнями выпадений выше $30 \text{ мКи/км}^2 \cdot \text{сут}$ захватила восточные границы и распространилась дальше к северу.

Процесс перестройки направления воздушных потоков начался 30.04 - 1.05.86, вследствие чего граница области выпадений $0,3 \text{ Ки/км}^2 \cdot \text{сут}$ впервые после 26 - 27 апреля отодвинулась от западной государственной границы и сместилась на восток. Область выпадений йода-131 выше $30 \text{ мКи/км}^2 \cdot \text{сут}$ распространилась практически на всю южную и центральную части с северной границей и начала перемещаться к востоку и далее на юг.

В последующие дни этот процесс продолжал развиваться. В период с 30.04 по 2.05.86 северные ветры привели к увеличению в южном направлении выпадений йода-131, которые 1 - 2 мая составили в Чернобыле 55 мКи/км²-сут. Широкомасштабный вынос йода-131 в южном и юго-восточном направлениях наблюдался 2 и 3 мая. Южный сектор выноса йода-131 несколько сузился 3-4 мая, а вынос в северо-восточном направлении сохранялся. В то же время в районах, примыкающих к месту аварии, уровни выпадений резко ушли. Зона выпадений йода-131 локализовалась 4-5 мая на территории Украины и примыкающих к месту аварии районов Белоруссии и центральных областей РСФСР. Уровни выпадений продолжали уменьшаться.

Радиоактивность из воздуха улавливалась посредством фильтрации через фильтроткань Петрянова типа ФПП-15-1,5, что позволяло улавливать йод-131 только в аэрозольной форме, молекулярная и парообразная формы йода фильтром не задерживались. Отдельные измерения йода-131 с помощью последовательно расположенных фильтра и кассеты с активированным углем позволяют оценить долю аэрозольной формы йода-131 приблизительно в 15 % для первых дней после аварии на больших расстояниях от этого места. Однако процентный вклад аэрозольной формы йода-131 в его суммарную активность должен меняться со временем, поэтому здесь мы ограничились рассмотрением только аэрозольной формы йода.

Ввиду большой неравномерности загрязнения территории страны радиоактивными продуктами Чернобыльской аварии содержание радионуклида в почве становится несколько условным и может быть использовано только для проведения сравнительных оценок загрязнения почвы разными изотопами и тенденций изменения загрязнения почвы со временем.

Одновременно с поступлением йода-131 из атмосферы на землю происходит его радиоактивный распад, смыв поверхностными водами, проникновение в глубь почвы, испарение с поверхности почвы в атмосферу, сбор с урожаем и т.п. В первом приближении будем учитывать только выпадения йода-131 и его радиоактивный распад.

Максимальное загрязнение почвы йодом-131 наблюдалось в рассматриваемых пунктах в разное время, в период от 28 апреля до 5 мая. Позднее загрязнение почвы уменьшалось вследствие распада йода-131.

Раньше всех (28.04.86) максимального уровня 21 Ки/км² накопление йода-131 на местности достигло в Пинске, расположенном в северо-западном секторе от зоны аварии. На следующий день (29.04.86) максимальное загрязнение почвы имело место в Гомеле (66 Ки/км²) и в Могилеве (1,6 Ки/км²), расположенных в северном секторе.

Сразу после аварии наиболее сильно почвенно-растительный покров был загрязнен йодом-131, нептунием-239, цирконием-95 с ниобием-95, барием-140 с лантаном-140, иттрием-91. В ближней к месту аварии зоне почвы были обогащены цирконием с ниобием-95 и церием-141, 144, в дальней - йодом-131, цезием-134, 137 и рутением-103, 106.

Загрязнения почвы наиболее опасными нуклидами в Миске и Гомеле представлены в табл. 1. Загрязнения приземного воздуха йодом-131 в областных центрах Беларуси - в табл. 2.

Таблица I

Загрязнения почвы наиболее опасными нуклидами в Миске и Гомеле

Радионуклид	T _{1/2}	Минск	Гомель
		σ _{рнз} , кБк/м ²	σ _{рнз} , кБк/м ²
I-131	8,04 сут	24,0	482,3
Te-132/I-132	78,2 ч	23,2	466,0
I-133	20,8 ч	5,78	116,1
I-135I/Xe135m	6,61 ч	0,03	0,636
Mo-99	66,08 ч	33,4	542,8
Ru-103	39,4 сут	53,9	876,7
Ru-106	368 сут	16,7	271,9
Cs-134	2,062 г	1,8	45,02
Cs-136	12,9 сут	0,8	12,89
Cs-137	30,17 год	3,70	60,20
Zr-95	63,98 сут	13,3	216
Nb-95	35,15 сут	13,7	223,6
Zr-97	17 ч	0,7	10,63
Ba-140	12,8 сут	11,8	191,4
La-140	40,22 ч	5,25	85,37
Ce-141	32,5 сут	12,2	198,7
Ce-143	33 ч	2,64	42,93
Ce-144	284 сут	10,2	165,9
Eu-156	15,2 сут	0,53	8,640
Np-239	2,35 сут	54,3	882,9

Таблица 2

Загрязнение приземного воздуха йодом-131 в областных центрах Беларуси, кБк/м³

Дата	Минск	Гомель	Могилев	Брест	Витебск	Гродно
26.04.86	0,001	0,003	0,003	0,012	0,003	0,01
27.04.86	0,002	0,01	0,002	0,5	0,001	0,05
28.04.86	0,02	0,3	0,8	3,5	0,001	3,1
29.04.86	1,06	75	1,1	1,2	0,003	2,1
30.04.86	0,3	5	0,05	0,5	0,009	0,01
01.05.86	0,2	0,4	0,2	0,2	0,09	0,3
02.05.86	0,06	0,2	0,1	0,06	0,06	0,03
03.05.86	0,02	0,03	0,04	0,01	0,02	0,04
04.05.86	0,02	0,2	0,04	0,02	0,004	0,02
05.05.86	0,01	0,1	0,008	0,02	0,02	0,04

Обобщенная база данных и геоинформационные системы. На основании имеющихся экспериментальных и расчетных данных авторами была сформирована информационная база данных для всей Беларуси (более 19000 населенных пунктов), содержащая информацию о населении, загрязнении почвы и воздуха короткоживущими изотопами.

При создании информационной базы данных использовались экспериментальные данные планшетных измерений суточных выпадений изотопов йода [14], экспериментальные данные прямых измерений загрязнения территории Беларуси ¹³¹I и ¹³⁷Cs [15], данные реконструкции загрязнения ¹³¹I по прямым измерениям ¹²⁹I [16], а также предполагалось, что средние уровни глобального загрязнения по ¹³⁷Cs непосредственно перед аварией на ЧАЭС составляли 2,2 кБк/м² (0,059 Ки/км²) на широтах 50..60° [17]. В качестве базовой единицы временного масштаба приняты сутки, в течение которых радиационный параметр остается неизменным.

В качестве объектов, по которым собирается информация в банке данных, присутствуют территории (районы, области, зоны), населенные пункты, объекты окружающей среды (почва, атмосфера, поверхностные воды), сельскохозяйственные угодья, леса, продукция растениеводства и животноводства, продукты питания, население (население территорий, населенных пунктов, группы населения, и лица из населения, проходившие дозиметрическое обследование), социально-экономические объекты (промышленные предприятия, объекты строительства и др.).

При создании банка данных ставилась задача обеспечения следующих принципов:

- комплексность информации (данные должны обеспечивать весь комплекс задач, связанных с минимизацией последствий аварии для населения и окружающей среды);
- полнота информации (по каждому разделу информация должна охватывать максимальное количество объектов, по которым принимается решение о проведении защитных мероприятий);
- надежность информации (все данные, особенно обобщенные, должны быть верифицированы, в наибольшей степени это относится к данным, которые являются официальными критериями на проведение защитных мероприятий);
- актуальность информации (на момент принятия решения должны быть обеспечены наиболее современные данные);
- ретроспективность (длительный характер мероприятий, особенно на поздней фазе аварии, определяет необходимость накопления данных за весь период, предшествовавший текущему моменту).

Обобщение данных о накоплении выпадений отдельных изотопов на почве позволило построить карты радиоактивного загрязнения территории Беларуси.

Для построения таких карт мы использовали данные о суточных выпадениях отдельных изотопов в каждом пункте сбора радиоактивных выпадений. Интегрирование выпадений по времени как текущей координате позволяло проследить за динамикой процесса загрязнения почвы.

Карты загрязнения йодом-131 почвы Беларуси с 27 апреля 1986 по 30 апреля 1986 г. (кБк/м²) приведены на рис. 2. Существуют пункты, где йод-131 не измерялся. Эти данные рассчитаны по накоплению цезия-137 на почве. При построении карты в тех местах, где планшетная сеть оказалась слишком редкой, для интерполяции использованы данные наблюдений в близлежащих пунктах, так как предполагалось, что находящиеся рядом пункты будут иметь одинаковое загрязнение.

Карта загрязнения почвы йодом-131 со временем быстро меняется вследствие радиоактивного распада йода-131. Поскольку динамика накопления йода-131 известна, нетрудно получить коэффициенты для пересчета чисел, указанных на изолиниях карты, на другие сроки. Видно, что к августу почти повсюду загрязнение почвы йодом-131 практически исчезло.

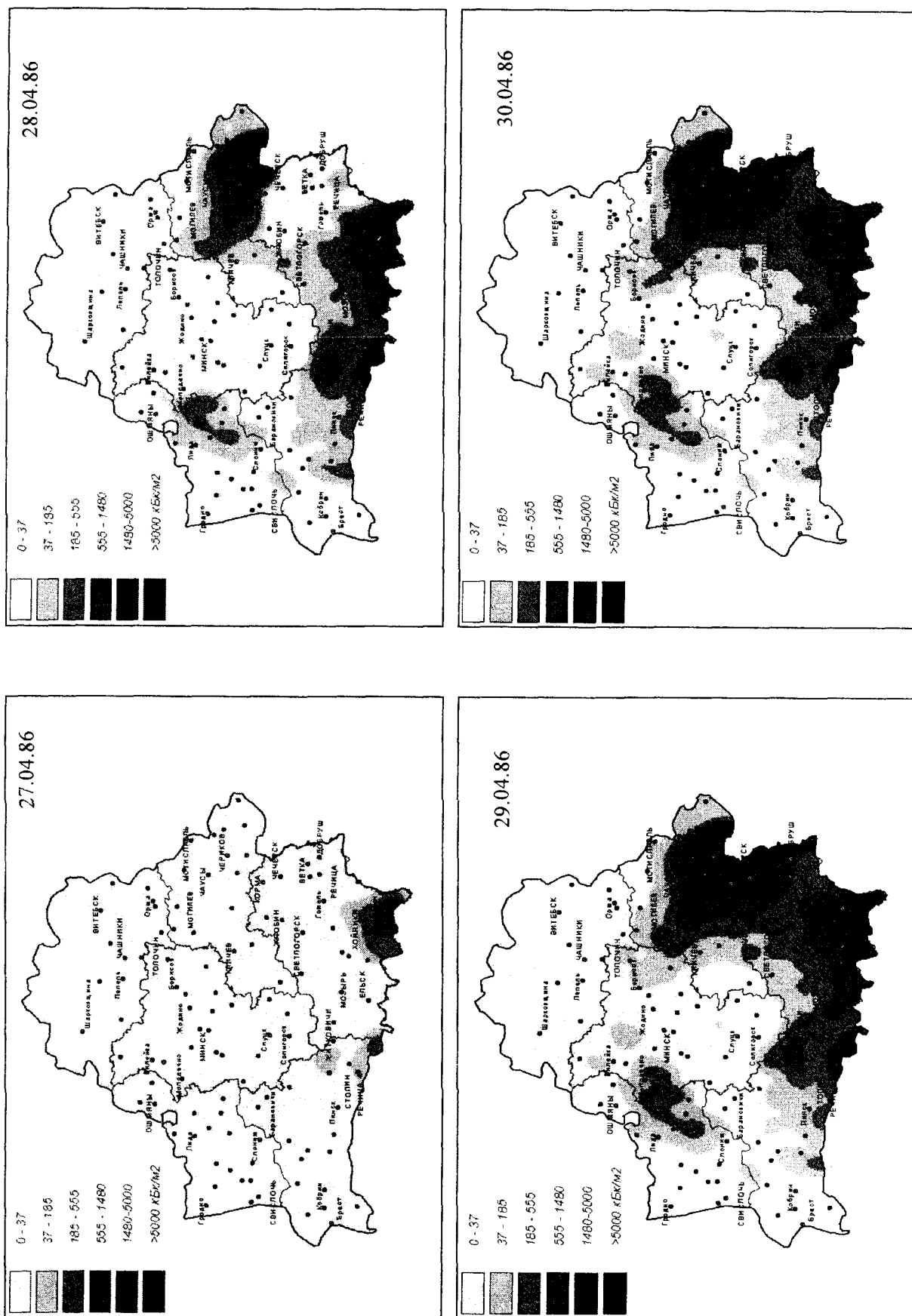


Рис. 2. Динамика загрязнения поверхности территории Беларуси 1-131, кБк/м² (27.04.86-30.04.86)

При расчетах накопления выпадений изотопов учитывалось фоновое загрязнение почвы, но поскольку карты имеют оценочный характер, величина фона для простоты принималась везде одинаковой. При построении изолиний проводилась их генерализация, мелкие отклонения и детали на карте опускались, а изолинии сглаживались. Построенная таким способом карта из-за ограниченности исходного массива данных, разумеется, является предварительной и может использоваться только в качестве основы для выбора районов, которые необходимо в первую очередь подвергнуть более детальному прямому обследованию.

Формирование дозовых нагрузок населения. При рассмотрении дозовых нагрузок на щитовидную железу жителей Беларуси были использованы следующие экспериментальные данные и положения:

- в соответствии с последними рекомендациями НКДАР [18] население Беларуси было разбито на 3 возрастные группы: дети (0...5 лет), подростки (5... 15 лет), взрослые (>15 лет);
- доза облучения щитовидной железы формируется за счет внутреннего облучения инкорпорированного в организм йода-131;
- реализуются только два пути поступления йода-131 в организм человека: ингаляционный и пероральный;
- источниками перорального поступления йода-131 в организм представителей названных возрастных групп являются: молоко, молочные продукты и листовые овощи;
- по особенностям перорального поступления йода-131 в организм человека выделяются два типа населенных пунктов: городские и сельские. Для жителей населенных пунктов городского типа источником поступления продуктов питания является магазин, для жителей сельских - личное хозяйство (местное производство);
- поступление ¹³¹I в щитовидную железу ингаляционным путем происходило только в период нахождения радиоактивного облака над территорией населенного пункта. Ингаляционное поступление ¹³¹I в щитовидную железу за счет вторичного подъема выпавшего ¹³¹I не учитывается;
- на территории Беларуси наблюдались радиоактивные выпадения «мокрого», «сухого» и «смешанного» типа. Однако в связи с недостаточностью сведений о типе выпадений в каждом населенном пункте выбрана скорость осаждения выпадений «сухого» типа;
- поверхностное загрязнение листовых овощей йодом-131 - основной путь радиоактивного загрязнения. Корневой путь поступления ¹³¹I не рассматривается в виду его незначительности в йодный период [19];
- значения массы щитовидной железы и биологического периода полувыведения йода-131 из щитовидной железы для представителей каждой возрастной группы взяты в соответствии с Публикацией 56 МКРЗ [20];
- средние геометрические оценки величин потребления молока, молочных продуктов и листовых овощей для каждой возрастной группы, полученные по результатам опросов нескольких тысяч городских и сельских жителей, проживающих на территориях радиоактивного загрязнения, распространяются на все населенные пункты Беларуси [21];
- интенсивность дыхания: дети 5 м³/сут, подростки 17 м³/сут, взрослые 22,3 м³/сут [22];
- среднее значение коэффициента задержки ¹³¹I травой при расчетах принимается 0,25 [2, 12]. Это значение может быть отнесено к влажным выпадениям радиойода. Для сухих выпадений оно близко к 1;
- использовались дозовые коэффициенты за счет ингаляции: дети - 2,1 мЗв/кБк, подростки - 0,56 мЗв/кБк, взрослые - 0,28 мЗв/кБк [23];
- дозовые коэффициенты за счет перорального поступления: дети - 3,1·10⁻⁶ Зв/Бк, подростки - 10⁻⁶ Зв/Бк, взрослые - 4,4·10⁻⁷ Зв/Бк [23];
- защитные мероприятия на активной стадии аварии отсутствовали;
- эвакуация населения происходила в три этапа: - мае, июне и августе - сентябре. Принимались следующие даты эвакуации по каждому населенному пункту: дети 3-7 мая, взрослые 4-12 мая; 10 июня; 1 сентября;
- был учтен вклад отдельных короткоживущих радионуклидов (¹³²I, ¹³³I, ¹³⁵I, ¹³²Te) в дозу облучения щитовидной железы от длительности поступления (табл. 3).

Таблица 3

Вклад (%) отдельных короткоживущих радионуклидов в дозу облучения щитовидной железы от длительности поступления, относительно ¹³¹I [12]

Нуклид	Длительности поступления, ч					
	1	5	10	20	36	96
¹³² I	0,87	0,54	0,33	0,18	0,1	0,042
¹³³ I	35	33	31	27	22	13
¹³⁵ I	5,9	4,9	3,9	2,8	1,8	0,76
¹³² Te	24	23	23	22	21	19
Сумма	66	62	58	52	45	32

На основании восстановления динамики загрязнения территории Беларуси радионуклидами йода за каждые сутки с 26.04.86 по 5.05.86 восстановлены дозовые нагрузки на щитовидную железу (табл. 4, 5).

Таблица 4

Коллективная доза на щитовидную железу при ингаляционном поступлении I-131 для жителей Беларуси с 26.04.86 по 05.05.86 (чел.·Зв).

Области Беларуси	Дети (0...5 лет)	Подростки (5...15 лет)	Взрослые (> 15 лет)	Общая
Гомельская	10446	56826	80754	148026
Могилевская	8415	45775	65050	119240
Минская	2293	12475	17728	32496
Брестская	2225	12105	17202	31532
Гродненская	1868	10164	14445	26477
Витебская	1051	5717	8124	14892
				372 663

Таблица 5

Коллективная доза на щитовидную железу при пероральном поступлении I-131 для жителей Беларуси с 26.04.86 по 05.05.86 (чел.·Зв).

Области Беларуси	Дети (0...5 лет)	Подростки (5...15 лет)	Взрослые (> 15 лет)	Общая
Гомельская	31340	139757	136865	307962
Могилевская	6205	28780	27084	62068
Минская	1364	6321	6796	14481
Брестская	2404	11136	10531	24071
Гродненская	1516	7018	6643	15178
Витебская	406	1870	862	3137
				426897

Выводы. На основании прямых измерений йода-131 и цезия-137, дополнительных уточнений по йоду-129 и с учетом коэффициента фракционирования йода-131, йода-132 к цезию-137 была реконструирована радиационная обстановка на активной стадии аварии по дням с 26 апреля 1986 г.

Радиоактивное загрязнение территории Беларуси началось 26 апреля 1986 г. для южных территорий, 28 - апреля для северо-западного и северного направлений и 29 - 30 апреля - для северо-восточного направления. Основное загрязнение местности происходило в результате однократных выпадений. Дополнительные выпадения, вследствие изменения направления ветра, условно отнесены к дате прохождения первичного облака.

Максимальные уровни загрязнения Радин - Крюки (северо-восточный след, 4-10⁸ Бк/м²) и далее - в направлении Гомеля, восточные районы Могилева, северо-западный - в направлении Пинска.

Коллективная доза облучения щитовидной железы для жителей Беларуси всех возрастных групп за счет поступления йода-131 на активной стадии аварии равна 799 560 чел·Зв.

Мощность экспозиционной дозы для дальнего следа определялась $^{132}\text{Te}/^{132}\text{I}$ (более 80 %), а для южных районов – $^{95}\text{Zr}/^{95}\text{Nb}$ и $^{140}\text{La}/^{140}\text{Ba}$.

Вклад в дозу на щитовидную железу за период с 26.04.86 по 5.05.86 составил около 70 % от общей дозы на щитовидную железу за всё время действия йода-131.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чернобыльская авария: последствия и их преодоления: Национальный доклад / М-во по чрезвычайным ситуациям, НАН Беларуси. 1998. - С. 54.
2. Стыро Б.И., Недвецкайте Т.Н., Филистович В.И. Изотопы йода и радиационная безопасность. - СПб.: Гидрометеонаиздат, 1992. - С. 47, 74.
3. Hull A.P. Environmental monitoring of ^{131}I in small concentrations and some comparisons with meteorological calculations // Health Physics. - 1966. - V. 12, № 9. - P. 1317 - 1325.
4. Соловьёв В.А., Толстых В.Д. Некоторые результаты исследования изотопов йода в различных физико-химических формах // Радиационная безопасность и защита АЭС: Сб. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - Вып. 9. - С. 273 -279.
5. Kircher J.F., Barnes R.H. Methyl iodine formation under postulated nuclear reactor accident conditions. Treatment airborne radioactive wastes. - Vienna: IAEA, 1968. - P. 137 - 152.
6. Summary report on the Post-Accident Review Meeting on the Chymobyl Accident. Safety series No 75-INSAG-I. - Vienna: IAEA, 1986.
7. Павленко В.И., Антонов С.Н. Обоснование методики оценки радиационных последствий аварий на ЯЭУ // Препринт 3140 / ИАЭ. - М., 1979. - 8 с.
8. Aubert M., Calais D. Role de l'iodure de cesium sur le development des reactions combustiblegaine // J. Nucl. Mat. - 1976. - V. 60. - P. 279 - 290.
9. Malinauskas A.P., Bell J.T. The chemistry of fission-product iodine under nuclear reactor accident conditions // Nuclear Safety. - 1987. - V. 28, № 4. - P. 505 - 514.
10. Давыдов Е.Ф., Шамардин В.К., Крюков Ф.Н. Коррозия материалов оболочек ТВЭЛов в результате физико-химического взаимодействия с оксидным топливом: Обзорная информация / НИИАР. - Дмитровград, 1984. - 96 с.
11. Михеев Н.Б., Мелихов И.В. Изучение агломерации йодида цезия в газовой фазе при его испарении с металлической поверхности // Радиохимия. - 1996. - Т. 38, вып. 5. - С. 464 - 470.
12. Тихомиров Ф.А. Радиэкология йода. - М.: Энергоатомиздат, 1983.
13. Environmental Health Criteria 25, Selected radionuclides: iodine, Published under the joint sponsorship of the United Nations Environment Programme, the International Labour Organization, and the Word Health Organization, Word Health Organization. - Geneva, 1983.
14. Махонько В.А., Козлова Е.Г. Динамика накопления радиойода на почве после аварии на ЧАЭС // Радиация и риск. - 1996. - Вып. 7.
15. Нестеренко В.Б., Миронов В.П. Отчет о научно-исследовательской работе ИЯЭ АН БССР, выполненной по исследованию радиационной обстановки на территории БССР после аварии на ЧАЭС. - Мн., 1988.
16. Use of ^{129}I and ^{137}Cs in soils for the estimation of ^{131}I deposition in Belarus / V. Mironov, V. Kudrjashov, F. Yiou, G.M. Raisbeck.
17. Cesium deposition on Europe after the Chernobyl accident, EUR 16733. - Brussels-Luxembourg, 1998.
18. SOURCTS AND EFFECTS OF IONIZING RADIATION Report of the United Nation Scientific Committee on the effects of Atomic Radiation to the General Assembly, 2000.
19. Руководство по оценке доз облучения щитовидной железы при поступлении радиоактивных изотопов йода в организм человека. - М.: Энергоатомиздат, 1988.
20. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part I: A report of Task Group of Committee 2 of the International Commission on Radiological Protection. Publication 56 / International Commission on Radiological Protection. - Oxford: Pergamon Press, 1990. - 122 p.
21. Миненко В.Ф. Анализ результатов опроса субъектов Белорусско-американского проекта «Исследование рака и других заболеваний щитовидной железы в Беларуси после чернобыльской катастрофы»: Докл. на шестом Украинско-Белорусско-Российском совещании по дозиметрии щитовидной железы, Киев, 21 июня 2001 г. - Киев, 2001.
22. Человек. Медико-биологические данные. Публикация МКРЗ 23. - М.: Медицина, 1997.
23. Международные основные нормы безопасности для защиты от ионизирующих излучений и безопасного обращения с источниками излучения: Серия изданий по безопасности № 115, МАГАТЭ. - Вена, 1997.