

ДОЗОВАЯ НАГРУЗКА НА ЧЕЛОВЕКА НА ТЕРРИТОРИИ ВБЛИЗИ АЭС

В статье высветлены результаты многолетних радиэкологических исследований (1980-2005 гг.), выполненных на юге Украины по изучению формирования радиационной нагрузки на человека в результате газоаэрозольных выбросов и жидких сбросов действующих АЭС (Южноукраинской и Запорожской) в режиме нормальной работы. Рассмотрены различные пути миграции во внешней среде радионуклидов, поступающих с газоаэрозольными выбросами и жидкими сбросами АЭС. Определены величины эффективной дозы облучения человека от поступления «станционных» радионуклидов по рассмотренным миграционным цепочкам. Исследования проводились с целью поиска методов и способов снижения радиационной нагрузки на человека в современных условиях. Определены дозиметрические характеристики, позволяющие прогнозировать величину эффективной дозы облучения человека в результате поступления радионуклидов, выбрасываемых с АЭС в воздух и сбрасываемых в водную среду в режиме нормальной работы АЭС.

Ключевые слова: газоаэрозольные выбросы и жидкие сбросы АЭС, миграция, эффективная доза облучения человека.

У статті висвітлені результати багаторічних радіоекологічних досліджень (1980-2005 рр.), виконаних на півдні України по вивченню формування радіаційного навантаження на людину в результаті газоаерозольних викидів і рідких відходів діючих АЕС (Південноукраїнської та Запоріжської) в режимі нормальної роботи. Розглянуті різні шляхи міграції в навколишньому середовищі радіонуклідів. Визначені величини ефективної дози опромінення людини від потрапляння стаціонарних радіонуклідів по розглянутих міграційних ланках. Дослідження проводились з метою знайти методи та способи зниження радіаційного навантаження на людину в сучасних умовах.

Ключові слова: газоаерозольні викиди та рідкі відходи АЕС, міграція, ефективна доза опромінення людини.

By conducted in Southern Ukraine radioecology and dosimetry researches a two factors exposure (industrial and residential environment) of employees granite mining granite processing industry. For operational forecasting radiation exposure at first established the dose coefficients («dose rates») of natural and man-made sources of ionizing radiation in southern Ukraine for the main dose of radiation pollutants; the model of radioecological risk of the influence unit of natural and man-made sources of ionizing radiation are the first time established.

Key words: emissions and liquid discharges, migration, effective dose.

На основе переосмысления и проверки доз, которые получило население в результате аварии на ЧАЭС и других техногенных радиационных аварий, актуальным и достаточно важным считается определение радиационной нагрузки на человека в современных условиях [1; 2]. Особенное внимание в этом вопросе отводят дозиметрии территорий, расположенных в непосредственной близости к АЭС [3-5]. Кроме научной значимости, это несет большой общественный резонанс в районах расположения больших ядерных комплексов, главным

образом и через негативное отношение населения к атомной промышленности, и отнесением всех ухудшений состояния здоровья человеческой популяции к влиянию техногенных источников ионизирующего излучения. В связи с этим определение дозовой нагрузки на население не только при радиационных авариях на ядерных предприятиях, но и в условиях нормальной их эксплуатации занимает ключевое место при прогнозировании рисков возникновения негативных биологических эффектов от действия ионизирующего излучения [4; 5].

Один из путей решения этой проблемы состоит в определении дозы облучения человека от газоаэрозольных выбросов и жидких сбросов АЭС в режиме нормальной ее эксплуатации.

В работе представлены результаты радиоэкологических и дозиметрических исследований, выполненных в районе расположения Южноукраинской и Запорожской атомных электростанций (ЮУ АЭС и ЗАЭС) на протяжении 1980-2005 гг. Проведены исследования формирования дозы облучения человека в результате бета-, гамма-излучения от факела радиоактивных выбросов и ингаляционного поступления человеку выброшенных радионуклидов, а также за счет инкорпорированных в организме человека радионуклидов, поступивших через различные пищевые цепочки. Для этого проведены исследования формирования радиационной ситуации вокруг АЭС: исследовано содержание радионуклидов в приземном слое атмосферы, атмосферных выпадениях, исследованы миграционные процессы «станционных»¹ радионуклидов в водных системах, принимающих жидкие сбросы радиоактивных веществ АЭС.

Материалы и методика

Материалами для определения дозы внешнего облучения человека выступали результаты:

1) измерений мощности экспозиционной дозы (МЭД) на открытой местности в местах расположения стационарных постов наблюдения в 30-км зоне ЮУ АЭС с помощью приборов СРП-88Н и ДБГ-06 [6-12], выполненные лабораторией внешней дозиметрии (ЛВД) ЮУ АЭС за 1999-2005 гг;

2) измерений мощности экспозиционной дозы на открытой местности в местах расположения датчиков системы АСРК [8];

3) измерений интегральной поглощенной дозы в воздухе с помощью термолюминисцентных дозиметров ТЛД-500К в стационарных пунктах наблюдения вокруг ЮУ АЭС [6-12].

Материалами для определения ингаляционной дозы облучения человека в районе АЭС выступали результаты:

1) дозиметрических исследований ЛВД ЮУ АЭС за 1999-2005 гг.: ежемесячных измерений радионуклидного состава атмосферных выпадений седиментационным методом путем радиометрии собранной пыли на спектрометрической установке SBS-50M с полупроводниковым детектором ДГДК-175В-3 [6-12]; измерений радионуклидного состава аэрозолей атмосферного воздуха аспирационным методом в пунктах наблюдения вокруг ЮУ АЭС с еженедельным отбором проб при постоянном режиме работы фильтроэлектроустановки и с последующим ежеквартальным озонением проб, объединенных по пунктам, которые находятся на одинаковых радиусах вокруг АЭС;

2) данные ЛЗД ЮУ АЭС относительно годовых объемов газоаэрозольных выбросов АЭС за 1999-

2005 гг. Моделирование рассеивания выбрасываемой с АЭС смеси радионуклидов выполнено на основании гауссовой модели в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ [14-16]. При определении диффузионных свойств воздушной среды в районе ЮУ АЭС использованы данные многолетних наблюдений метеостанции г. Вознесенска и метеостанции ЮУ АЭС. Оценка выпадений радионуклидов выполнена, учитывая розу ветров для расстояния 2500 м, где расположен ближайший к АЭС населенный пункт.

При определении ингаляционной дозы от ³H параллельно проведенные исследования содержания ³H в приземном слое атмосферы с помощью пробоотборников ПВП-01, выполненные в Николаевской научно-исследовательской лаборатории (НДЛ) «Ларани» МЗ Украины.

При определении эффективной дозы внутреннего облучения человека в результате перорального поступления «станционных» радионуклидов использованы результаты:

1) собственных многолетних (1980-2000 гг.) радиоэкологических и радиационно-гигиенических исследований в районе ЮУ АЭС и ЗАЭС, выполненные в НДЛ «Ларани»: воды прудов-охладителей Южно-Украинской и Запорожской АЭС, прудов-отстойников канализационной системы ПУ АЭС, рек Южный Буг, Арбузинка, Мертвовод, а также в их водоемах оросительных систем; содержания ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs, ³H в питьевой воде и в продуктах питания (хлеб, молоко, мясо, корнеплоды, овощи, рыбы из водоемов АЭС) в населенных пунктах вблизи АЭС;

2) материалы радиометрии проб воды этих водных объектов, выполненных ЛВД ЮУ АЭС в 1999-2005 гг.

Подготовка проб воды, пищевых продуктов (молоко, мясо, хлеб, овощи) для радиохимического анализа и гамма-спектрометрии осуществлялась по методикам [17; 18]. При обработке результатов исследований использованы методы дисперсионного анализа данных. Применены методы многомерного статистического анализа с помощью программного обеспечения STATISTICA 6.0.

Определение дозы за счет инкорпорированных радионуклидов осуществлено согласно существующей в отрасли радиационной безопасности методики вычисления эффективной эквивалентной дозы через суммарное годовое поступление радионуклидов в организм человека [4; 16] с использованием рекомендованных МКРЗ дозовых коэффициентов [19; 20].

Для сравнения полученных результатов использованы материалы радиоэкологических и дозиметрических исследований в доэксплуатационный период (1976-1980 гг.) [21].

При прогнозировании ожидаемой за 70 лет эффективной дозы облучения человека от «станционных» радионуклидов использован метод камерных моделей. Разработка дозиметрических моделей выполнялась на основе известных принципов построения таких моделей [22]:

¹ радионуклид, который поступает во внешнюю среду в результате выбросов и сбросов АЭС

1) принцип базового (реперного) радионуклиду (*BR – basic radionuclide*)²;

2) принцип базовых радиологических характеристик фактора облучения (*BRD – basic radiological description*)³;

3) принцип дозовой цены загрязнения объекта окружающей среды⁴.

Результаты

По результатам измерений мощности экспозиционной дозы на открытой местности вокруг ЮУ АЭС в течение 1980-2005 гг. радиационный фон находился на уровне 15-22 мкР·час⁻¹, что соответствует естественным величинам для региона. Аналогичные исследования на территории вокруг ЗАЭС показали величины 13-15 мкР·час⁻¹. На основании приведенных результатов годовая эффективная доза внешнего облучения человека при пребывании человека на открытой местности составила 0,23-0,40 мЗв·год⁻¹. Пользуясь данными наших исследований формирования радиационной нагрузки на человека от техногенно-усиленных источников природного происхождения [13], средняя величина полной дозы внешнего облучения для населения, проживающего в 30-км зоне, ЮУ АЭС составила $0,80 \pm 0,05$ мЗв·год⁻¹; для 30-км территории вокруг ЗАЭС – $0,97 \pm 0,05$ мЗв·год⁻¹. По данным измерений поглощенной в воздухе дозы гамма-излучения на местности вблизи АЭС [6-12] в среднем за период 1999-2005 гг. эта доза составила $0,85 \pm 0,30$ мГр·год⁻¹ и не превышала «допусковые» уровни (1,13 мГр) [21]. Верхние границы интервала разброса значений дозы внешнего облучения обусловлены геологическими особенностями территории в районе расположения ЮУ АЭС, состоящими в том, что основными подстилающими породами в этом регионе выступают гнейсы, магматиты, граниты, отличающиеся повышенным содержанием U, Ra, Th. Также тут наблюдаются разломы коренных пород с выходом гранитных пластов на поверхность, что способствует формированию повышенных уровней природного радиационного фона, а при использовании таких материалов в жилищном строительстве – к повышенным уровням радиационного фона внутри помещений.

Результаты наблюдений суммарной β -активности и содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs в пробах оседающей пыли на территории вокруг ЮУ АЭС в среднегодовой динамике на протяжении 1999-2005 гг. свидетельствовали о характерных незначительных увеличениях суммарной β -активности атмосферных выпадений в марте – августе. Это связано с сезонными явлениями и местными метеохарактеристиками. Среднегодовые величины суммарной

β -активности атмосферных выпадений на территории стационарных постов практически не отличались от данных «нулевого фона» за 1976-1980 гг. (до пуска АЭС в эксплуатацию суммарная β -активность атмосферной пыли находилась в пределах $(2,2-5,2) \cdot 10^7$ Бк·км⁻² в месяц) [21].

По среднегодовым (за период 1999-2005 гг.) данным исследования содержания радионуклидов в атмосферном воздухе приземного слоя в районах обеих АЭС радионуклидный состав приземного слоя атмосферного воздуха был обусловлен, в основном, ^{137}Cs , содержание которого $((3-6) \cdot 10^{-6}$ Бк·м⁻³) находилось на достаточно низком уровне по отношению к величинам в доэксплуатационный период. Содержание ^{60}Co , ^{54}Mn в воздухе был значительно ниже допустимых значений в соответствии с нормами радиационной безопасности Украины. Содержание ^{90}Sr в воздухе находилось на одном уровне и не зависело от расстояния от АЭС. Кроме этого, результаты наблюдений содержания радионуклидов (в первую очередь ^{131}I) в атмосферном воздухе вокруг ЮУ АЭС в определенных точках находились в зависимости от величины выбросов из вентиляционной трубы АЭС во время проведения ремонтных работ оборудования блоков АЭС и благоприятных для этих мест метеорологических условий.

Исходя из данных [6-12], осаждение на почве выброшенных с АЭС радионуклидов для расстояния 2,5 км от ЮУ АЭС ответственно за формирование дозы внешнего облучения человека $(2,1-2,9) \cdot 10^{-6}$ мЗв·год⁻¹.

Рассеянные в воздухе радионуклиды, выброшенные из вентиляционных труб АЭС, кроме фотонного облучения, могут быть ответственными также за внутреннее облучение в результате попадания их к человеку через дыхательные пути и через желудочно-кишечный тракт. По результатам радиозоологических исследований на территории, прилегающей к ЮУ АЭС, установлены пути формирования полной (интегральной) дозы внутреннего облучения человека от «станционных» радионуклидов (рис. 1). Так, формирование дозы внутреннего облучения человека из-за газоаэрозольных выбросов АЭС осуществляется как результат миграции радионуклидов по цепочкам:

- газоаэрозольные выбросы АЭС – атмосферный воздух – человек;
- газоаэрозольные выбросы АЭС – атмосферный воздух – почва (листья растений) – сельскохозяйственные растения, молоко, мясо – человек;
- а в результате поступления их во внешнюю среду с жидкими сбросами АЭС – по следующим миграционным цепочкам:
- жидкие сбросы АЭС – технологические водоемы – атмосферный воздух – человек (для ^3H);
- жидкие сбросы АЭС – технологические водоемы – поверхностные водоемы – оросительная вода (разбрызгивание, вторичное пылеобразование) – человек;

² *BR* – радионуклид, который в целом может определять радиационную ситуацию от выбрасываемой смеси радионуклидов;

³ *BRD* – характеристика, которая является основной и ответственной за формирование дозы от фактора облучения человека;

⁴ эффективная доза, формируемая у человека в результате всех событий в экосистеме при радиационном загрязнении отдельного ее звена [6].

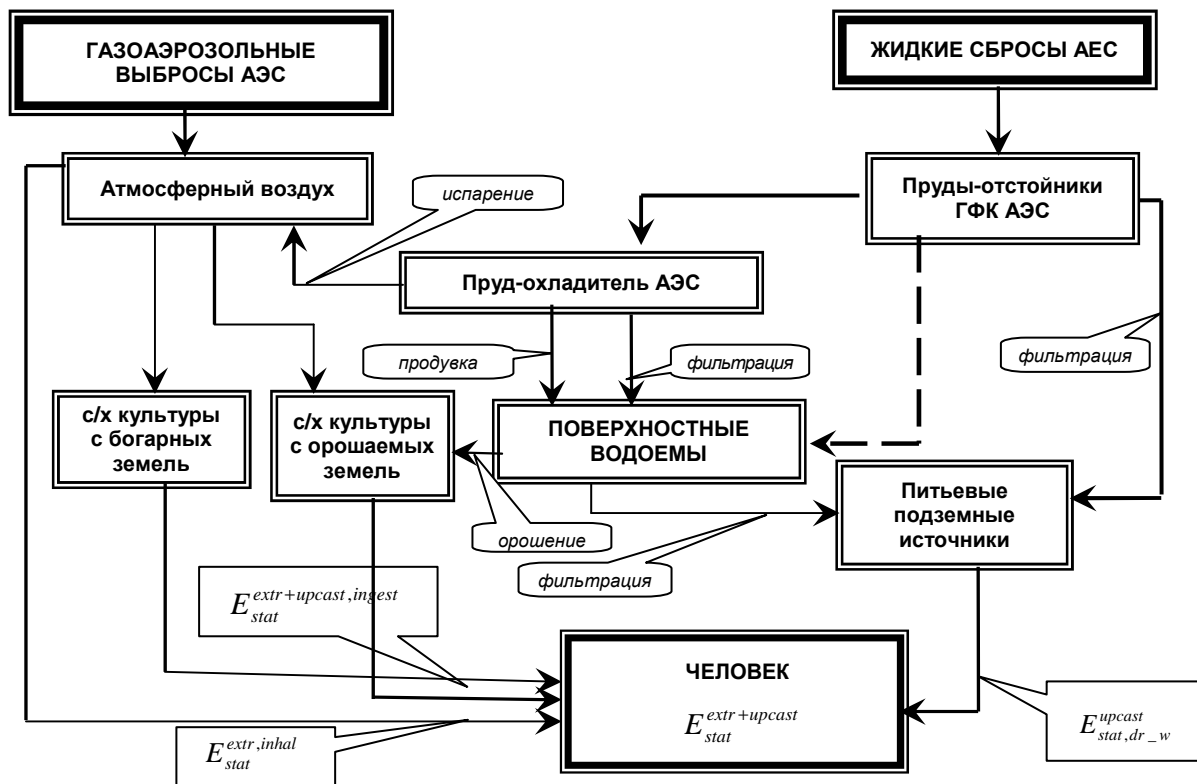


Рис. 1. Блок-схема формирования интегральной дозы внутреннего облучения человека от радионуклидов, поступающих во внешнюю среду с газоаэрозольными выбросами и жидкими сбросами ЮУ АЭС

- жидкие сбросы АЭС – технологические водоемы – поверхностные водоемы – оросительная вода – почва (листья растений) – сельскохозяйственные растения, молоко, мясо – человек;
- жидкие сбросы АЭС – технологические водоемы – подземные воды – питьевая вода – человек.

Нами изучалось формирование радиационной нагрузки на человека от «станционных» радионуклидов по этим путям их поступления к человеку. Сначала рассмотрим формирование дозы облучения, связанной с газоаэрозольными выбросами ЮУ АЭС. Радионуклидный состав газоаэрозольных выбросов ЮУ АЭС, по данным 1999-2005 гг., приведен на рис. 2.

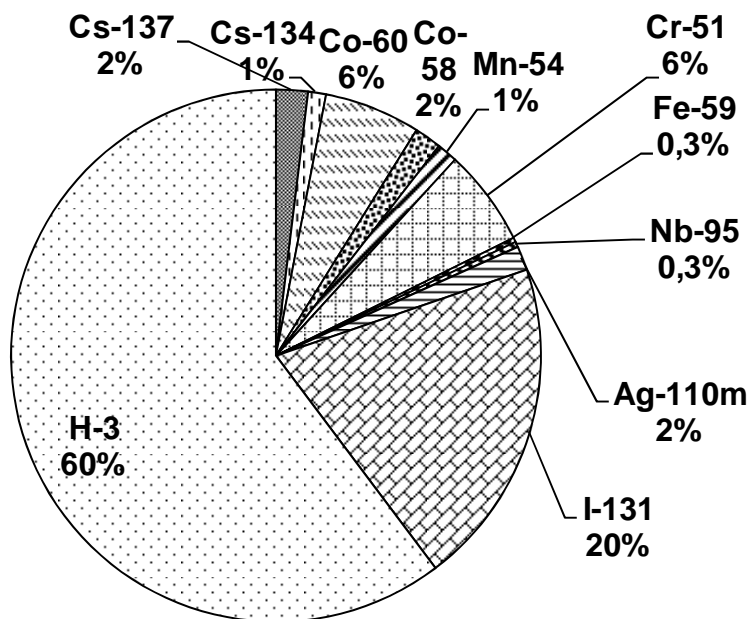


Рис. 2. Радионуклидный состав газоаэрозольных выбросов ЮУ АЭС

Формирование радиационной нагрузки на человека в результате миграции «станционных» радионуклидов по цепочке: газоаэрозольные выбросы АЭС – атмосферный воздух – человек. Эффективная доза внутреннего облучения человека при ингаляционном поступлении «станционных» Радионуклидов, попадающих во внешнюю среду с газоаэрозольными выбросами ЮУ АЭС – $E_{st-extr}^{inhal}$ – вычислена по результатам гамма-спектрометрических и радиохимических анализов проб атмосферного воздуха за период 1999-2005 гг. в стационарных постах 30-и км зоны вокруг ЮУ АЭС. Эффективная доза $E_{st-extr}^{inhal}$ от присутствующих в воздухе радионуклидов составила в интервале значений $(10-100) \cdot 10^{-12}$ Зв·год⁻¹.

Для уточнения выполнен расчет дозы, исходя из данных о годовых выбросах радионуклидов ЮУ АЭС за 1999-2005 гг. и литературных сведений относительно годовых выбросов ³H и РБГ с АЭС с реакторами ВВЭР. При определении диффузионных свойств воздушной среды района АЭС использованы данные многолетних наблюдений метеостанции г. Вознесенска и метеостанции ЮУ АЭС. Определена повторяемость категорий стойкости атмосферы, средняя скорость ветра для 16 категорий направления ветра и, на основании

этих данных рассчитан фактор метеорологического разбавления для расстояния $x = 2500$ м от ЮУ АЭС, выбранного исходя из того, что ближайший к АЭС населенный пункт – г. Южноукраинск – расположен на этом расстоянии. По результатам расчета интервал значений фактора метеорологического разбавления для 16 румбов направления ветра составил $(2,4-8,8) \cdot 10^{-8}$ с.м⁻³. Принимая в расчет максимальные величины фактора метеорологического разбавления и исходя из данных выбросов ЮУ АЭС за 1999-2005 гг. эффективная доза от ингаляционного поступления радиоактивных веществ $E_{st-extr}^{inhal}$ составила $(10-200) \cdot 10^{-12}$ Зв·год⁻¹.

Структура этой дозы по радионуклидам представлена на рис. 3, которая свидетельствует, что основным дозообразующим радио-нуклидом при ингаляционном их поступлении человеку в результате газоаэрозольных выбросов ЮУ АЭС выступал ¹³¹I (63 %). Именно широкий диапазон данных о годовых выбросах этого радионуклида АЭС за 1999-2005 гг. обусловил этой широкий интервал ингаляционной дозы. Должны отметить, что эти величины, определенные расчетным методом, как видно, хорошо согласовываются с результатами вычисления ингаляционной дозы по данным натурных исследований, приведенных выше.

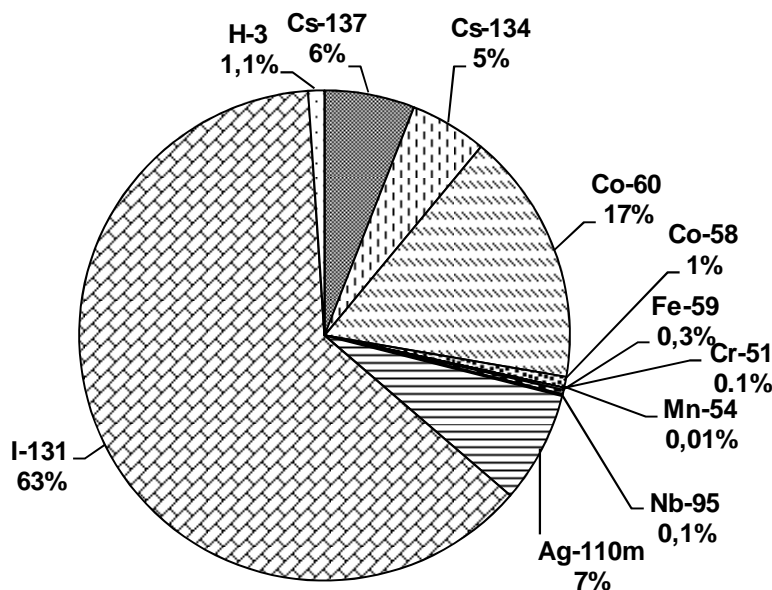


Рис. 3. Структура эффективной дозы $E_{st-extr}^{inhal}$ по вкладам радионуклидов

Формирование радиационной нагрузки на человека в результате миграции «станционных» радионуклидов по цепочке: газоаэрозольные выбросы радионуклидов – атмосферный воздух – почва (листья растений) – сельскохозяйственные растения, молоко, мясо – человек. Для вычисления эффективной дозы внутреннего облучения человека, формируемой в результате этого пути миграции «станционных» радионуклидов, определение их содержания в продукции сельскохозяйственного производства выполнено двумя способами:

- по среднегодовым данным газоаэрозольных выбросов ЮУ АЭС за 1999-2005 гг. [6-12] с помощью гауссовой модели распространения примесей в атмосфере и используя известную модель переноса радионуклидов в растения через корневой и стеблевой пути из-за их оседания на поверхности почвы и растениях [16];
- по результатам исследований содержания ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs, ³H в сельскохозяйственной продукции с личных и коллективных хозяйства в 1991-2000 гг. и в продуктах из рациона питания интернатов и

объектов общественного питания г. Вознесенска и пгт. Арбузинка в 1993-1995 гг.

Верхние оценки радиационной нагрузки по этому пути поступления человеку «станционных» радионуклидов получим, используя в расчетах величину фактора метеорологического разбавления для расстояния 2,5 км от ЮУ АЭС и предполагая, что человек на 100 % использует для питания продукцию, выращиваемую на этом расстоянии от АЭС. При таком подходе эффективная доза внутреннего облучения человека $E_{st-extr}^{int(ing)}$ от ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{54}Mn , ^{51}Cr , ^{59}Fe , ^{95}Nb , ^{110m}Ag , ^{131}I , ^3H составила $6,7 \pm 1,2$ мкЗв·год⁻¹, при разбросе значений (6-10) мкЗв·год⁻¹. Основной вклад (60 %) в формирование дозы $E_{st-extr}^{int(ing)}$ вносили радиоизотопы цезия (^{137}Cs , ^{134}Cs) и ^{131}I (29 %).

По результатам исследований содержания «станционных» радионуклидов в сельскохозяйственной продукции, отобранной из личных и коллективных хозяйств в 1991-2000 гг., из рациона питания интернатов и объектов общественного питания г. Вознесенска и пгт. Арбузинка в 1993-1995 гг., ^{90}Sr в зерновых и хлебе регистрировался на уровне 0,1-0,2 Бк·кг⁻¹, ^{137}Cs на уровне 0,5-1,0 Бк·кг⁻¹, ^3H на уровне 13-18 Бк·кг⁻¹. Овощи (капуста, помидоры, огурцы, картошка) содержали ^{90}Sr от 0,1 до 0,3 Бк·кг⁻¹, ^{137}Cs – от 0,5 до 1 Бк·кг⁻¹, ^3H – от 20 до 25 Бк·кг⁻¹. В корнеплодах (морковь, свекла) содержание этих радионуклидов существенно отличалось от овощей: по ^{90}Sr в 4-8 раз, по ^{137}Cs в 2-3 раза. Содержание радионуклидов в молоке составляло: ^{90}Sr 0,05-0,10 Бк·л⁻¹, ^{137}Cs 0,5-1,5 Бк·л⁻¹, ^3H 15-20 Бк·л⁻¹.

При этом следует отметить, что содержание ^{90}Sr , ^{137}Cs в продуктах питания, производимых вблизи ЮУ АЭС в доэксплуатационный период (1977-1980 гг.), когда загрязнение ^{90}Sr , ^{137}Cs продукции было связано с глобальным осаждением этих радионуклидов на поверхность почвы, также находилось на уровне $n \cdot 10^{-2} \div n \cdot 10^{-1}$ Бк·кг⁻¹ (л⁻¹), хотя и имела место тенденция не быстрого, но постоянного из года в год снижения уровня содержания в них глобальных радионуклидов.

Исходя из этого, суточное количество радионуклидов, которое могло поступить человеку с продуктами сельскохозяйственного производства в условиях нормальной работы АЭС, составило по ^{90}Sr 0,04-0,2 Бк, по ^{137}Cs 0,4-1 Бк. Годовая эффективная доза ($E^{int(ing)}$) от поступления радионуклидов человеку с сельскохозяйственными продуктами питания составила: по ^{137}Cs 7-40 мкЗв·год⁻¹, по ^{90}Sr 3-6 мкЗв·год⁻¹, по ^3H 0,6-2,5 мкЗв·год⁻¹. В структуре формирования этой дозы главная роль приходилась на молочные продукты: по ^{137}Cs до 70 % в 1991 г. и около 30 % в 2000 г., по ^{90}Sr – от 27 % в 1991 г. и около 21 % в 2000 г. Снижение вклада молочных продуктов может свидетельствовать о том, что в начале 90-х годов формирование радиационной нагрузки на человека от ^{137}Cs и ^{90}Sr было обусловлено не только «станционным», а также черномыльским происхождением присутствия этих радионуклидов в молоке.

Сравнение величин доз $E_{st-extr}^{int(ing)}$ и $E^{int(ing)}$

указало, что верхние оценки эффективной дозы $E_{st-extr}^{int(ing)}$ не превышают величины дозы, определенной по результатам натуральных исследований ($E^{int(ing)}$). Таким образом, формирование содержания радионуклидов в сельскохозяйственных растениях происходит не только через оседание с радиоактивными аэрозолями, а также благодаря существованию других миграционных цепочек: например, при попадании «станционных» радионуклидов в растения благодаря их орошению водой, которая для этих целей отбирается из поверхностных водоемов, куда могут поступать жидкие сбросы радионуклидов с АЭС. Кроме того, поступление в растения таких радионуклидов, как ^{90}Sr и ^{137}Cs , возможно также из-за наличия в этих районах участков, загрязненных «аварийно-черномыльским» выбросом радионуклидов.

Рассмотрим формирование дозы облучения человека в результате поступления во внешнюю среду жидких сбросов АЭС.

Формирование радиационной нагрузки на человека в результате миграции «станционных» радионуклидов по цепочке: жидкие сбросы АЭС – технологические водоемы – атмосферный воздух – человек. Эта цепочка миграции «станционных» радионуклидов является наиболее характерной для ^3H , т. к. известно, что из-за поступления загрязненных подогретых вод в непроточные водоемы для их охлаждения происходит наибольшая миграция ^3H в воздух, а этот процесс, в свою очередь, является характерным для АЭС, использующих для охлаждения воду открытых водоемов. По нашим наблюдениям [5], за время эксплуатации ЮУ АЭС (начиная с 1983 г.) имели место существенные изменения содержания ^3H в воде пруда-охладителя (особенно после переноса в 1993 г. сброса в него после очистки жидких сбросов ЮУ АЭС), а из-за высокой температуры воды этого водоема (даже в зимние месяцы), вместе с парами воды в воздух постоянно поступали пары окиси ^3H . Величина эффективной дозы облучения от ^3H в результате поступления радионуклида в воздух при испарении с поверхности пруда-охладителя ЮУ АЭС рассчитана для людей, проводящих длительное время в районе пруда-охладителя ЮУ АЭС – это рыбаки, а также спортсмены (например, занимающиеся греблей). Учитывая среднестатистические данные длительности пребывания человека в районе пруда-охладителя АЭС: при рыбной ловле 320 часов (из расчета пребывания человека 2 раза в неделю по 8 часов в сутки на протяжении 5 месяцев); при спортивных занятиях 360 часов (по 2 часа ежедневно на протяжении 6 месяцев) – среднегодовая величина эффективной дозы облучения человека при ингаляционном поступлении ^3H составила ($E_{3\text{H-evap}}^{inhal}$) 0,06-0,17 мкЗв·год⁻¹.

Формирование радиационной нагрузки при поступлении «станционных» радионуклидов человеку по цепочке: жидкие сбросы АЭС – технологические

водоемы – рыба – человек. По результатам исследования ихтиофауны пруда-охладителя ЮУ АЭС, представленной, в основном, карасем (*Carassius carassius L.*), карпом (*Cyprinus carpio L.*), судаком (*Stizostedion luzio-perca L.*) [5] в 1983-1985 гг. в мышцах карася содержание радионуклидов составляло: ^{90}Sr 0,2-0,4 Бк·кг⁻¹, ^{137}Cs 2,2-2,3 Бк·кг⁻¹. С 1986 г. активность этих радионуклидов в рыбе возросла в 2-10 раз. С 1989 г. по 1997 г. содержание ^{90}Sr в рыбе уменьшилось до 0,3-0,5 Бк·кг⁻¹, а ^{137}Cs до 11,6-22,6 Бк·кг⁻¹. В 1997-2004 гг. содержание ^{90}Sr в рыбе колебалось от 0,3 до 0,5 Бк·кг⁻¹, ^{137}Cs – от 6,8 до 8,5 Бк·кг⁻¹, ^3H – от 56 до 75 Бк·кг⁻¹. Особенностью последних лет было то, что в рыбе регистрировались еще ^{54}Mn , ^{60}Co на уровне 0,2-0,8 Бк·кг⁻¹. Эффективная доза облучения человека от поступления этих радионуклидов при потреблении рыбы из пруда-охладителя ЮУ АЭС составляла 6-10 мкЗв·год⁻¹.

Формирование радиационной нагрузки на человека в результате миграции «станционных» радионуклидов по цепочке: жидкие сбросы АЭС – технологические водоемы – поверхностные водоемы – оросительная вода – атмосферный воздух – человек. Радиационная нагрузка на человека при ингаляционном пути поступления «станционных» радионуклидов к человеку в условиях использования поверхностных водоемов для потребностей орошения сельскохозяйственных угодий может создаваться непосредственно при разбрызгивании оросительной воды и при пылеобразовании. Формирование радиационной нагрузки по этим путям поступления человека «станционных» радионуклидов характерно для людей, задействованных в полевых и агротехнических работах на поливных землях. Основным источником попадания радиоактивных веществ в оросительную воду являются жидкие сбросы АЭС, среди которых, как нами показано, преобладает ^3H . Поэтому формирование ингаляционной дозы по этому пути поступления человеку «станционных» радионуклидов рассмотрено для ^3H .

На основе результатов исследований содержания ^3H в воде Южно-Бугской и Белоусовской оросительных систем – оросительных систем, использующих воду поверхностных водоемов в районе расположения ЮУ АЭС, а также Каховской и Краснознаменской оросительных систем – оросительных систем, использующих воду поверхностных водоемов в районе расположения ЗАЭС [5], эффективная доза внутреннего облучения человека от поступления ^3H к человеку из-за разбрызгивания поливной воды $E_{^3\text{H-ir}}^{\text{inhal(aer)}}$ составила от 0,1 до 4,0 мкЗв за сезон в зависимости от содержания ^3H в оросительной воде.

Формирование радиационной нагрузки на человека при миграции «станционных» радионуклидов по цепочке: жидкие сбросы АЭС – технологические водоемы – подземные воды – питьевая вода – человек. В связи с тем, что ^3H является особенно хорошим мигрантом в водной среде, формирование дозы внутреннего облучения человека через питьевую воду рассмотрено для этого радионуклида.

в сельскохозяйственных растениях, выращенных в условиях орошения [23], установлено, что формирование внутреннего облучения человека от поступления ^{90}Sr , ^{137}Cs или ^3H человеку через продукты питания, производимые в условиях орошаемого земледелия (хлеб, овощи, корнеплоды, молоко, мясо) ($E_{\text{ir}}^{\text{int(ing)}}$) совершалось под влиянием

разнообразия факторов. Во-первых, это радиационная ситуация в водоемах, питающих оросительную систему: так, прекращение в 1993 г. поступления в р. Арбузинку сбросных вод хозяйственно-фекальной канализации (ХФК) ЮУ АЭС привело к снижению активности ^{137}Cs , ^3H в оросительной воде, а из-за этого – к снижению радиационной нагрузки на человека при потреблении сельскохозяйственных культур с полей Белоусовской оросительной системы. Во-вторых, это влияние процессов сорбции-десорбции радионуклидов донными отложениями. Так повышение во второй половине 90-х годов радиационной нагрузки на человека от ^{137}Cs «в результате орошения» в районах Белоусовской и Южнобугской оросительных систем связано с перемещением десорбированного из мулов р. Арбузинки ^{137}Cs в р. Южный Буг и Таборовское водохранилище. В-третьих, изменения в радиационной нагрузке на человека от ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^3H при потреблении орошаемых сельхозкультур тесно связаны с физико-химическими процессами в биоценозе орошаемых массивов. Так, сброс в реки разных поллютантов (ПАР, кислоты) может приводить к повышению десорбции радионуклидов из мулов, а это, в свою очередь – к повышению радиационной нагрузки на человека.

Используя результаты исследований содержания ^{137}Cs , ^{90}Sr в сельскохозяйственных культурах, выращенных на поливных угодьях Южнобугской, Белоусовской, Каховской, Краснознаменской оросительных систем за 1991-2004 гг., годовая эффективная доза внутреннего облучения $E_{\text{ir}}^{\text{int(ing)}}$ составила 2-60 мкЗв·год⁻¹. Коллективная доза, формирующаяся в результате попадания радионуклидов населению с орошаемыми сельскохозяйственными культурами – составила 2-60 чел·Зв·год⁻¹.

Обобщая эти результаты с полученными выше имеем, что основным путем поступления «станционных» радионуклидов к человеку через продукты питания является поступление их в результате орошения сельхозугодий, когда для этих целей используется вода поверхностных водоемов, куда возможно поступление «станционных» радионуклидов при сбросах АЭС.

Формирование радиационной нагрузки на человека при миграции «станционных» радионуклидов по цепочке: жидкие сбросы АЭС – технологические водоемы – подземные воды – питьевая вода – человек. В связи с тем, что ^3H является особенно хорошим мигрантом в водной среде, формирование дозы внутреннего облучения человека через питьевую воду рассмотрено для этого радионуклида.

Результаты исследований относительно распространения ^3H в поверхностных водоемах и подземных питьевых источниках в районе ЮУ АЭС частично высветлено в других наших работах [5; 23], где показано, что за период эксплуатации АЭС произошли некоторые изменения в «три-тиевой» нагрузке на водную систему региона. Эти изменения касались повышения уровня ^3H в поверхностных водах еще в начале 90-х годов, что связано с фильтрацией радионуклида из пруда-охладителя и прудов-отстойников АЭС и с большими объемами сбросов канализационных вод АЭС после очистки в прилегающую маловодную речку. Фильтрация ^3H сквозь подземные водоносные горизонты способствовала также повышению его уровня в подземных водах, расположенных ниже природного стока от прудов-отстойников АЭС.

Обобщая результаты исследований содержания ^3H в подземных водных источниках нами установлено существование следующей дифференциации территории по величине эффективной дозы облучения от ^3H через питьевой путь поступления радионуклида человеку $E_{^3\text{H},dr-w}^{upcast,ing}$:

- для населения, проживающего в районе, расположенном выше водоемов, куда сбрасывались загрязненные ^3H воды – эффективная доза не превышала $0,16 \text{ мкЗв} \cdot \text{год}^{-1}$;
- для населения, проживающего в районе до 10 км ниже по природному стоку от пруда-охладителя

ЮУ АЭС – эффективная доза составляла величины до $0,27 \text{ мкЗв} \cdot \text{год}^{-1}$;

- для населенных пунктов, расположенных ниже по природному стоку от прудов-отстойников ГФК ЮУ АЭС – эффективная доза составляла величины $0,25-0,60 \text{ мкЗв} \cdot \text{год}^{-1}$, при максимальных значениях $2,0-2,2 \text{ мкЗв} \cdot \text{год}^{-1}$.

На основании полученных результатов структуры дозы внутреннего облучения человека от газоаэрозольных выбросов и жидких сбросов радионуклидов с ЮУ АЭС можно представить в виде, изображенном на рис. 4. Как видно, более весомая роль в формировании дозы облучения человека принадлежит поступлению «станционных» радионуклидов во внешнюю среду с жидкими сбросами АЭС (рис. 4, А), причем основное место (более 99 %) в формировании дозы внутреннего облучения человека из-за газоаэрозольных выбросов в условиях нормальной эксплуатации АЭС принадлежит пероральному пути поступления (с продуктами питания и с питьевой водой) (рис. 4, Б). При поступлении «станционных» радионуклидов человеку из-за сбросов в прилегающую водную систему, кроме перорального пути, на долю которого приходится 50-55 % (рис. 4, Б), весомый вклад в дозу облучения человека (до 30 %) приходится на ингаляционную составляющую от вдыхания ^3H за счет его испарения с поверхности пруда-охладителя ЮУ АЭС.

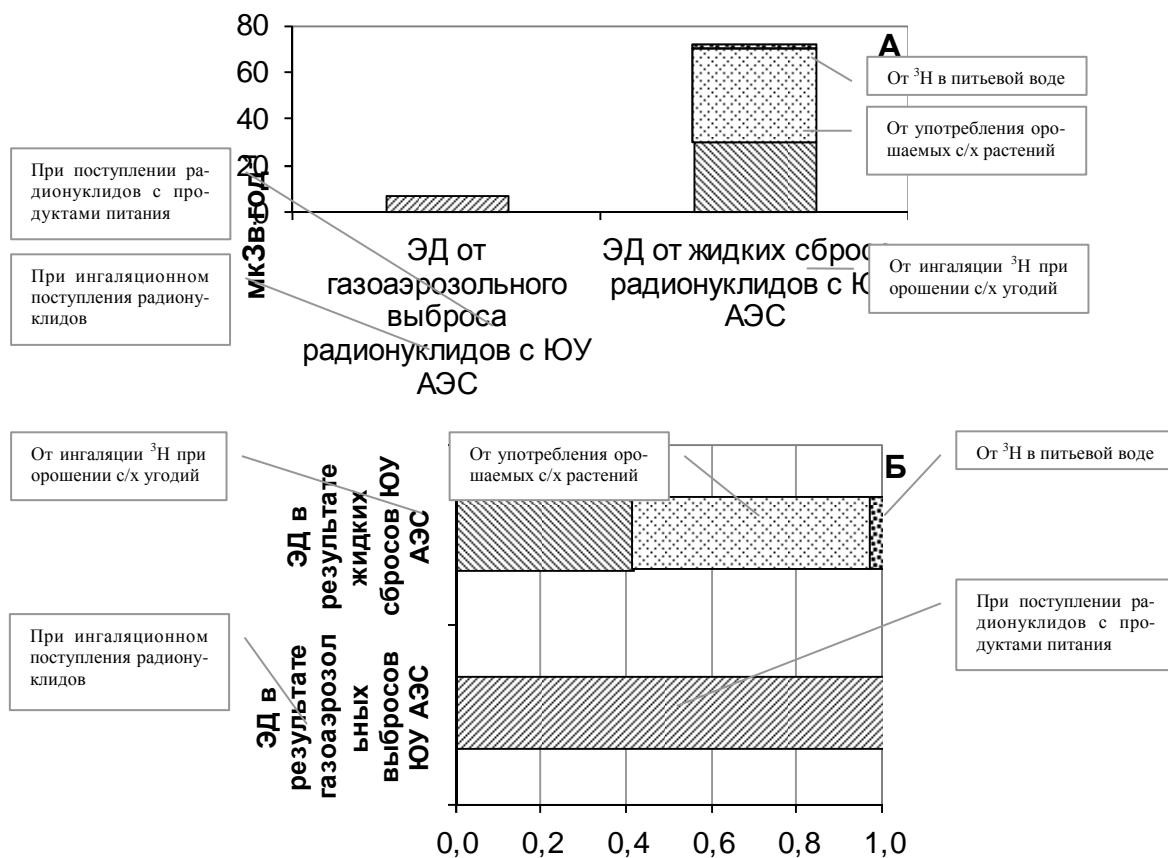


Рис. 4. Формирование дозы внутреннего облучения человека от радиоактивности, поступающей во внешнюю среду с газоаэрозольными выбросами и жидкими сбросами ЮУ АЭС: А – величина годовой эффективной дозы (ЭД) внутреннего облучения человека, Б – структура годовой эффективной дозы внутреннего облучения человека

Эти результаты исследований путей формирования дозы облучения человека, проживающего в районе расположения ЮУ АЭС, были взяты за основу при определении величин нормализованных доз – как параметров, позволяющих прогнозировать уровни дозовой нагрузки на человека от «станционных» радионуклидов, поступающих человеку в результате миграции по рассмотренным пищевым и ингаляционным цепочкам. Нормализация выполнена по параметру BRD , который характеризует определенную цепочку миграции во внешней среде «станционных» радионуклидов в результате газоаэрозольных выбросов и жидких сбросов АЭС:

- при моделировании формирования дозы облучения человека в результате газоаэрозольных выбросов АЭС ($E_{st-extr}$) в качестве BRD принята интенсивность выброса радионуклидов Q_i^{extr} , $Бк \cdot c^{-1}$;
- при моделировании формирования дозы облучения человека от 3H в результате испарения пруда-охладителя ЮУ АЭС (E_{H-evap}^{inhal}) в качестве BRD принято содержание 3H в технологических водоемах АЭС C_{p-cool}^{3H} , $Бк \cdot л^{-1}$;
- при моделировании формирования дозы облучения человека от 3H в результате фильтрации вод технологических водоемов АЭС сквозь подземные горизонты (E_{H-dr-w}^{upcast}) в качестве BRD принято содержание 3H в пруде-охладителе C_{p-cool}^{3H} (прудах-отстойниках C_{p-bio}^{3H}) АЭС, $Бк \cdot л^{-1}$;
- при моделировании формирования дозы облучения человека в результате поступления «станционных» радионуклидов в сельхозрастения при орошении ($E_{ir-w}^{upcast,ing}$) в качестве BRD принято содержание радионуклида BR в оросительной воде $C_{BR,ir-w}$, $Бк \cdot л^{-1}$;
- при моделировании формирования дозы облучения человека в результате поступления «станционного» 3H в сельхозрастения из поливной воды ($E_{H,ir-w}^{upcast,ing}$) в качестве BRD принято содержание 3H в поливной воде C_{ir-w}^{3H} , $Бк \cdot л^{-1}$;
- при моделировании формирования дозы облучения человека в результате поступления «станционного» 3H в приземный слой атмосферы из оросительной воды во время проведения поливных работ ($E_{H,ir}^{upcast,inhal}$) в качестве BRD принято содержание 3H в поливной воде C_{ir-w}^{3H} , $Бк \cdot л^{-1}$.

В результате получены величины нормализованных доз ($e_{i,st}^{extr(upcast)}$) – дозы, приведенные к единице содержания «станционного» радионуклида

i в объекте внешней среды, характеризующем начало дозообразующей цепи. Из-за того, что показатель $e_{i,st}^{extr(upcast)}$ по своему содержанию выражает эффективную дозу облучения человека от радионуклида i , поступившего человеку в результате газоаэрозольных выбросов (или жидких сбросов) АЭС, отнесенную к определенной характеристике распространения во внешней среде газоаэрозольных выбросов (жидких сбросов) АЭС, то этот показатель можно назвать «дозовой ценой поступления радионуклида i при газоаэрозольных выбросах (жидких сбросах) АЭС».

Этот показатель введен для возможности прогнозирования дозовой нагрузки на человека из-за поступления радионуклидов во внешнюю среду с газоаэрозольными выбросами и жидкими сбросами АЭС:

1. Если моделируется формирование эффективной дозы облучения человека от смеси выброшенных (сброшенных) АЭС радионуклидов $E_{st}^{extr(upcast)}$:

$$E_{st}^{extr(upcast)} = e_{BR}^{*extr(upcast)} \cdot BRD_{st}^{extr(upcast)},$$

где $e_{st}^{*extr(upcast)}$ – эффективная дозовая цена облучения человека при поступлении смеси радионуклидов во внешнюю среду в результате выбросов или сбросов АЭС (диагностируется по реперному радионуклиду BR), $Зв/Бк \cdot c^{-1}$, $Зв \cdot год^{-1}/Бк \cdot л^{-1}$ ($Зв \cdot год^{-1}/Бк \cdot c^{-1}$); $BRD_{st}^{extr(upcast)}$ – базовая радиологическая характеристика загрязнения «станционным» радионуклидом BR объекта n внешней среды, как звена дозообразующей цепочки, $Бк/л^{-1}$, $Бк \cdot c^{-1}$.

2. Если моделируется формирование эффективной дозы облучения человека от одного выброшенного (сброшенного) АЭС радионуклида i :

$$E_{st}^{i,extr(upcast)} = e_{st}^{i,extr(upcast)} \cdot BRD_{st}^{i,extr(upcast)},$$

где $e_{st}^{i,extr(upcast)}$, $BRD_{st}^{i,extr(upcast)}$ – приведенные выше показатели, рассчитанные соответственно для одного радионуклида i .

Эффективная дозовая цена $e_{BR}^{*inhal(ing)}$ представлена как взвешенная сумма дозовых цен по каждому радионуклиду i из смеси, используя при этом принцип реперного радионуклида BR (*basic radionuklid*):

$$e_{BR,n}^{*inhal(ing)} = e_{BR,n}^{inhal(ing)} + \sum_{i \neq BR} e_{i,n}^{inhal(ing)} \cdot \frac{BRD_{i,n}}{BRD_{BR,n}}$$

На основании такого подхода и пользуясь приведенными выше результатами определены величины эффективных дозовых цен для различных миграционных путей радионуклидов, поступивших во внешнюю среду с газоаэрозольными выбросами и жидкими сбросами АЭС, как интервал значений за период 1980-2005 гг.:

e_{st}^{*extr} , эффективная дозовая цена газоаэрозольных выбросов АЭС (для территорий радиусом 2,5 км от АЭС): $(0,05-0,7) \cdot 10^{-6}$ $Зв \cdot год^{-1}$ на 1 $Бк \cdot c^{-1}$ выброса ^{131}I ;

$e_{H, \text{evap}}^{\text{upcast, inhal}}$, дозовая цена испарения «станционного» ^3H из пруда-охладителя:
 $(3-5) \cdot 10^{-11} \text{ Зв} \cdot \text{год}^{-1}$ на $1 \text{ Бк} \cdot \text{л}^{-1} \text{ } ^3\text{H}$ в ставке-охладителе ЮУ АЭС;

$e_{H, \text{dr}_w}^{\text{upcast, ing}}$, дозовая цена поступления «станционного» ^3H в подземные источники питьевой воды на расстоянии до 15 км ниже по природному стоку от технологических водоемов (пруда-охладителя, прудов-отстойников) ЮУ АЭС: $(0,08-0,41) \cdot 10^{-6} \text{ Зв} \cdot \text{год}^{-1}$ на $1 \text{ Бк} \cdot \text{л}^{-1} \text{ } ^3\text{H}$ в технологических водоемах АЭС.

$e_{ir}^{\text{upcast, ing}}$, эффективная дозовая цена поступления «станционных» радионуклидов в сельхозрастения из оросительной воды: $(90-195) \cdot 10^{-3} \text{ Зв} \cdot \text{год}^{-1}$ на $1 \text{ Бк} \cdot \text{л}^{-1} \text{ } ^{137}\text{Cs}$ в оросительной воде и $1 \text{ м}^2/\text{кг}$ перехода ^{137}Cs из оросительной воды в сельхозрастения (люцерну);

$e_{H, \text{ir}}^{\text{upcast, ing}}$, дозовая цена поступления «станционного» ^3H в сельхозрастения из поливной воды: $(0,01-0,04) \cdot 10^{-6} \text{ Зв} \cdot \text{год}^{-1}$ на $1 \text{ Бк} \cdot \text{л}^{-1} \text{ } ^3\text{H}$ в оросительной воде;

$e_{H, \text{ir}}^{\text{upcast, inhal}}$, $\text{Зв} \cdot \text{год}^{-1}/\text{Бк} \cdot \text{л}^{-1}$ – дозовая цена поступления «станционного» ^3H в приземный слой атмосферы из оросительной воды в период поливных работ: $(0,005-0,014) \cdot 10^{-6} \text{ Зв} \cdot \text{год}^{-1}$ на $1 \text{ Бк} \cdot \text{л}^{-1} \text{ } ^3\text{H}$ в оросительной воде.

Отдельно следует остановиться на формировании ингаляционной дозы $e_{st}^{\text{extr, inhal}}$ (как компоненты e_{st}^{extr}) от газоаэрозольных выбросов АЭС, преимущество при формировании которой, как показано, принадлежит ^{131}I . На рис. 5 показана динамика $e_{st}^{\text{extr, inhal}}$ для одного из направлений ветра. Как видно, величина этого показателя подвергалась определенным изменениям в период наблюдений, которые можно объяснить отсутствием стабильности содержания радионуклида в воздухе, потому что именно для ^{131}I в 2000, 2001 гг. «взвешивающие» коэффициенты

$$\frac{BRD_{131, J}^{\text{extr, inhal}}}{BRD_{BR, st}^{\text{extr, inhal}}} = \frac{Q_{131, J}^{\text{extr}}}{Q_{BR}^{\text{extr}}}$$

$\gg 1$ (при $BR - ^{137}\text{Cs}$). На рис. 6 отображена динамика формирования ингаляционной дозы облучения человека от выбросов смеси радионуклидов, вычисленную по формуле (1), в сравнении с динамикой дозы от ^{137}Cs , избранного в качестве базового радионуклида. Этот рисунок хорошо иллюстрирует важность учета полного спектра радионуклидов, выбрасываемых ЮУ АЭС в окружающую среду (особенно короткоживущих, таких как ^{131}I); и размер дозы, и характер динамики ее формирования существенно отличаются от соответствующих характеристик, определенных только для ^{137}Cs .

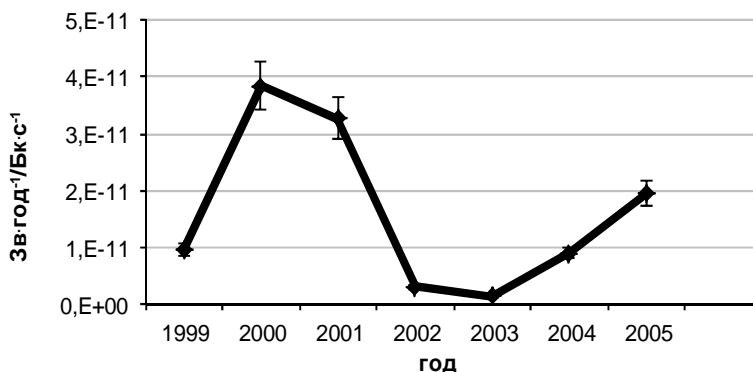


Рис. 5. Динамика $e_{st}^{\text{extr, inhal}}$ для одного из 16 румбов направления ветра – ССВ

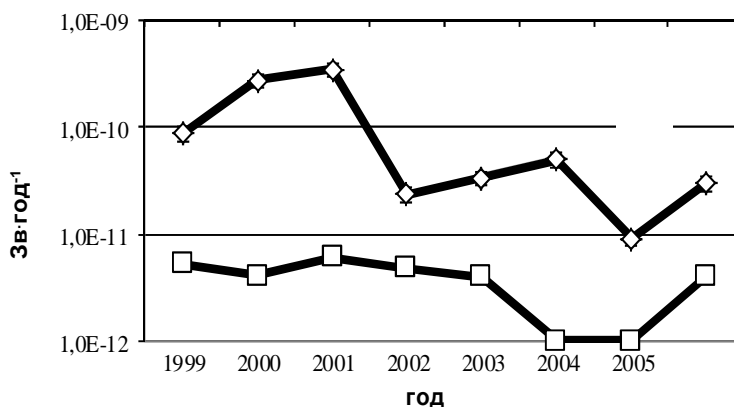


Рис. 6. Динамика дозы E_{stat}^{inhal} (1) и $E_{stat}^{\text{Cs, inhal}}$ (2) за период 1999-2005 гг.

Эти результаты использованы, как указано выше, для прогнозной оценки величины эффективной дозы, получаемой человеком за весь период его жизни (70 лет) из-за газо-аэрозольных выбросов и жидких сбросов АЭС в условиях нормальной ее эксплуатации – $E_{st,70,T}^{extr(upcast)}$, $E_{st,70,T}^{i,extr(upcast)}$. В результате такого подхода получены следующие величины ожидаемой за 70-летний период эффективной дозы облучения человека:

- в результате ингаляционного и перорального поступления человеку радионуклидов газоаэрозольных выбросов ЮУ АЭС и ЗАЭС $E_{st,70,T}^{extr}$ (для территорий радиуса 2,5 км от АЭС) – 70 ± 25 мкЗв, доза $e_{stat,70,T}^{*extr}$ – 10 ± 4 мкЗв/Бк·с⁻¹ ¹³⁷Cs;
- в результате фильтрации «станционного» ³H из технологических водоемов АЭС в подземные питьевые источники $E_{H,dr,70,T}^{upcast}$ не превышает 30 ± 15 мкЗв;
- в результате поступления «станционных» радионуклидов в продукты питания за счет орошения E_{ir}^{upcast} , составила в интервале значений 0,45–1,60 мЗв;
- интегральная величина дозы облучения человека от «станционных» радионуклидов по разным путям их миграции в объектах внешней среды $E_{st,70,T}$ не превышает 2 мЗв.

Обсуждение

Полученные результаты дозиметрии территории вблизи ЮУАЭС и ЗАЭС за многолетний период (1980-2005 гг.) свидетельствуют, что доза внешнего облучения человека в районе ЮУ АЭС и ЗАЭС составляла 0,10-0,35 мЗв·год⁻¹ и не превышала величин доэксплуатационного периода. Основное место (более 99 %) в формировании дозы внутреннего облучения человека в результате газоаэрозольных выбросов радионуклидов в условиях нормальной эксплуатации АЭС (на примере исследования территорий в районе

ЮУ АЭС и ЗАЭС) принадлежит пероральному поступлению этих радионуклидов человеку (с продуктами питания и питьевой водой). Это согласуется с результатами, полученными для Ровенской АЭС [24].

Формирование дозы внутреннего облучения человека в результате поступления радионуклидов в прилегающую водную систему с жидкими сбросами АЭС изучено на примере исследования миграции «станционных» радионуклидов, поступающих с жидкими сбросами ЮУ АЭС и ЗАЭС:

1) поступления ³H в приземный слой атмосферы в результате испарения с поверхности пруда-охладителя АЭС;

2) поступления «станционных» ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ³H в орошаемые сельхозрастения, когда для нужд орошения используется вода из водных объектов в районе АЭС;

3) поступления ³H в подземные питьевые источники в результате фильтрации из технологических водоемов АЭС;

Установлено, что насыщение воздуха ³H в районе пруда-охладителя ЮУ АЭС в результате постоянного поступления в последний подогретых вод является ответственным за формирование радиационной нагрузки на человека ингаляционным путем. Величина эффективной дозы облучения человека по этому пути поступления «станционного» ³H, рассчитанная для людей, проводящих продолжительное время в районе пруда-охладителя (рыболовы, спортсмены), составляет $0,010 \pm 0,004$ мкЗв·год⁻¹.

Основным путем поступления «станционных» радионуклидов к человеку пероральным путем выступают орошаемые сельскохозяйственные культуры, когда для целей орошения используется вода поверхностных водоемов, в которые возможно поступление «станционных» радионуклидов при сбросах АЭС. Эффективная доза облучения человека в результате поступления «станционных» радионуклидов на сельскохозяйственные угодья при орошении сельхозкультур, по данным проведенных исследований на территории Южно-Бугской, Белоусовской, Краснознаменской и Каховской оросительных систем в 1991-2004 гг., составляет 20-100 мкЗв·год⁻¹. Результаты дозиметрических исследований на территории этих оросительных систем свидетельствовали, что весомым является поступление человеку «станционного» ³H из оросительной воды при проведении поливных работ (при разбрызгивании и вторичном пылеобразовании): эффективная доза внутреннего облучения составила 10-35 мкЗв·год⁻¹.

Фильтрация ³H из технологических водоемов ЮУ АЭС сквозь подземные водоносные горизонты ответственна за эффективную дозу в диапазоне 0,3-2,2 мкЗв·год⁻¹.

Непредсказуемость выбросов короткоживущих радионуклидов (в первую очередь ¹³¹I) во время проведения ремонтных и профилактических работ на АЭС осложняет прогноз интегральной ингаляционной дозы облучения человека от смеси выбрасываемых с АЭС радионуклидов, а также указывает на необходимость повышенного внимания к разработке контрмер в отношении облучения человека от выбросов АЭС. В качестве таких контрмер нами предложено усовершенствование системы проведения йодной профилактики населения при возникновении необходимости ее проведения, что изложено в других наших работах [13].

Рассчитанные по результатам многолетних исследований величины дозовых цен поступления «станционных» радионуклидов по рассмотренным дозообразующим цепочкам дают возможность делать оперативный прогноз радиационной ситуации в районе влияния газоаэрозольных выбросов и жидких сбросов АЭС.

Прогнозная оценка величины ожидаемой интегральной дозы облучения человека в результате всех указанных путей поступления к нему «станционных» радионуклидов в обычных условиях эксплуатации АЭС указывает на величину 2 мЗв.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кравець О.П., Гродзинський Д.М. Екологічний прогноз розвитку радіаційної ситуації в Україні та формування доз людини від внутрішнього опромінення // Гигиена населених мест. – К., 2000. – Вип. 36. Ч. 1. – С. 306-320.
2. Яблоков А.В., Нестеренко В.Б., Нестеренко А.В. Чернобыль: последствия катастрофы для человека и природы. – СПб.: Наука. – 2007. – 339 с.
3. Измestьев К.М. и др. Реконструкция доз облучения населения от газоаerosольных выбросов, содержащих радиоактивный йод, в период 1961-1969 гг. (Оценка метеорологических факторов, расчет ингаляционной дозы облучения) // Бюллетень сибирской медицины – № 2. – 2005. – С. 105-109.
4. Кутлахмедов Ю.О. та ін. Основи радіоекології: навч. посіб. / Ю.О. Кутлахмедов, В.І. Корогодін, В.К. Кольтовер; за ред. В.П. Зотова. – К.: Вища шк., 2003. – 319 с.
5. Томілін Ю.А., Григор'єва Л.І. Радіонукліди у водних екосистемах південного регіону України: міграція, розподіл, накопичення, дозове навантаження на людину і контрзаходи: монографія. – Миколаїв: Вид-во МДГУ ім. Петра Могили, 2008. – 270 с.
6. Отчет по радиационной обстановке в районе расположения ЮУ АЭС: Отчет ЛВД ОРБ ОП ЮУ АЭС – 1999. – 23 с.
7. Отчет по радиационной обстановке в районе расположения ЮУ АЭС: Отчет ЛВД ОРБ ОП ЮУ АЭС – 2000. – 28 с.
8. Отчет по радиационной обстановке в районе расположения ЮУ АЭС: Отчет ЛВД ОРБ ОП ЮУ АЭС – 2001. – 24 с.
9. Отчет по радиационной обстановке в районе расположения ЮУ АЭС: Отчет ЛВД ОРБ ОП ЮУ АЭС – 2002. – 27 с.
10. Отчет по радиационной обстановке в районе расположения ЮУ АЭС: Отчет ЛВД ОРБ ОП ЮУ АЭС – 2003. – 26 с.
11. Отчет по радиационной обстановке в районе расположения ЮУ АЭС: Отчет ЛВД ОРБ ОП ЮУ АЭС – 2004. – 25 с.
12. Отчет по радиационной обстановке в районе расположения ЮУ АЭС: Отчет ЛВД ОРБ ОП ЮУ АЭС – 2005. – 29 с.
13. Григор'єва Л.І., Томілін Ю.А. Формування радіаційного навантаження на людину в умовах півдня України: чинники, прогнозування, контрзаходи: монографія. – Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2009. – 370 с.
14. IAEA, 1980. Atmospheric Dispersion in Nuclear Power Plant Siting. A Safety Guide. IAEA Safety series № 50-SG-S3.
15. IAEA, 1982. Generic Models and Parameters for Assessing the Environmental Transfer of Radionuclides from Routine Releases. Exposures of critical groups. IAEA Safety series № 57.
16. Методика расчета распространения радиоактивных веществ с АЭС и облучение окружающего населения // НТД «Безопасность в атомной энергетике». – Т. 1. – Ч. 1. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 112 с.
17. Методические рекомендации по оценке радиационной обстановки окружающей среды. – К.: МС УССР, 1988. – 49 с.
18. Методические рекомендации по санитарному контролю за содержанием радиоактивных веществ в объектах внешней среды / под ред. А.Н. Марья, А.С. Зыковой – М., 1980. – 336 с.
19. ICRP Publication 66. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. – Oxford: Pergamon Press, 1994. – 482 p. (Публикация 66 МКРЗ, Модель респираторного тракта человека для радиологической защиты).
20. ICRP Publication 67. Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 2. Ingestion Dose Coefficients. – Oxford: Pergamon Press, 1993. – 166 p. (Публикация 67 МКРЗ, Возраст-зависимые дозы лиц из населения от поступления радионуклидов. – Ч. 2: Дозовые коэффициенты при пероральном поступлении).
21. Радиационная обстановка вокруг Южно-Украинской атомной электростанции в предпусковой период (снятие нулевого фона) // Отчет по НИР – К., 1980 г. – 147 с.
22. Георгиевский В.Б. Экологические и дозовые модели при радиационных авариях – Монография. – К.: Наукова думка – 1994 р. – 237 с.
23. Григор'єва Л.І., Томілін Ю.А. Радіоекологічні та радіобіологічні аспекти зрешуваного землеробства півдня України: монографія. – Миколаїв: Вид-во МДГУ ім. Петра Могили, 2006. – 264 с.
24. Бончук Ю.В., Ратиа Г.Г., Кашпаров А.В. Выбросы при нормальной эксплуатации АЭС и облучение населения // Ядерна та радіаційна безпека. – № 1. – 2009. – С. 12-17.

Рецензенти: Гродзинський Д.М., академік НАНУ, д.б.н., професор;
Кутлахмедов Ю.О., д.б.н., професор, Інститут клітинної біології та генної інженерії НАН України.

© Григор'єва Л.І., Томилині Ю.А., 2010

Стаття надійшла до редколегії 10.06.2010 р.