

УДК 621.396.96

В. Х. Корбан, д.т.н., Д. В. Корбан, інженер

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ВЫБРОСОВ АЭС

В статье показана возможность радиолокационного обнаружения радиоактивного аэрозоля, выбрасываемого с вентиляционных труб АЭС и измерение его концентрации с использованием поляризационных параметров эхо-сигналов в безоблачной турбулентной атмосфере.

***Ключевые слова:** радиоактивный аэрозоль, поляризация, радиоактивное загрязнение, экологический контроль.*

Введение. В настоящее время в Украине существует высокий уровень радиационной опасности, обусловленный наличием на ее территории четырех атомных электростанций с тринадцатью энергетическими ядерными реакторами. Общие радиационные аварии на АЭС при разрушении одного реактора с выбросом 10 % радиоактивных продуктов за пределы санитарно-защитных зон станций могут создать зоны радиационного загрязнения общей площадью 430 тыс. кв. км, в которые попадают около 5,2 тыс. населенных пунктов с населением более 22,7 млн. человек [1].

Выброс радиоактивного водяного аэрозоля из вентиляционных труб АЭС приводит к скачку влажности температуры над факелом. Так, по данным [7], изменение температуры в факеле на 0,65°C или влажности на 0,13 мбар, создает эффективную поверхность рассеяния радиоактивного выброса, равную 10^{-3} см² на длине волны МРЛС 3,2 см. ЭПР такого выброса уже достаточно для его радиолокационного обнаружения. В настоящее время радиолокационный контроль на АЭС проводится как самим штатом станции, так и метеослужбой. Однако контроль проводится только в санитарно-защитной зоне АЭС наземными датчиками, т.е. осуществляется точечный контроль. В то же время известно, что радиоактивный аэрозоль, выбрасываемый из вентиляционных труб АЭС, переносится воздушными потоками на многие сотни и тысячи километров, загрязняя облака и подстилающую поверхность. До настоящего времени дистанционный независимый контроль за переносом радиоактивного аэрозоля не осуществляется ни в нашей стране, ни за рубежом. Имеются лишь публикации по разработке как пассивных методов [5, 6], так и активной радиолокации [7] для определения количественного и качественного состава примесей радиоактивных и химических веществ в атмосфере. По мнению авторов статьи, наиболее информативными методами дистанционного контроля радиоактивных выбросов АЭС могут быть поляризационные, реализуемые в активных поляризационных МРЛС.

Использование поляризационной МРЛС позволит повысить контроль экологической обстановки в районах функционирования АЭС и тем самым осуществить независимый оперативный контроль радиоактивного загрязнения атмосферы и местности при технологических и аварийных выбросах АЭС.

Для решения задачи повышения экологического контроля в районах функционирования АЭС необходимо провести как теоретические, так и экспериментальные исследования возможности использования нового поколения МРЛС, что и выполнено в данной статье.

Научная новизна состоит данной статьи в том, что впервые использована радиофизическая модель для диагноза экологического состояния в районе функционирования АЭС и измерения концентрации радиоактивного аэрозоля.

Актуальность данной статьи определяется разработкой теоретической модели и практическими задачами радиолокационного распознавания и прогноза распространения радиоактивного аэрозоля.

Изложение основного материала статьи.

Экспериментальные исследования состояния тропосферы были проведены с 8 по 20 июля 1990 года в районе функционирования Южно-Украинской АЭС. Южно-Украинская АЭС размещена в Николаевской области и оснащена тремя водородными реакторами ВВЭР-1000, мощностью 6000 МВт. В тридцатикилометровой зоне вокруг АЭС проживает больше 130 тыс. человек. Выброс радионуклидов осуществляется из четырех труб высотой 80 и 100 м. Диаметр труб - 1 и 4 м. По многолетним данным метеостанций Первомайск и Вознесенск господствующее направление ветра в районе АЭС ЗЮЗ со среднегодовой скоростью $V = 4,2$ м/с. Зимой, весной и осенью преобладает 4 класс устойчивости атмосферы, а летом – 5 класс. Устойчивость атмосферы и определяет интенсивность диффузии радиоактивной примеси, выбрасываемой из труб АЭС.

Известно, что в реакторе мощностью 100 МВт в течение суток расщепляется около 100 г тяжелых атомов. Такое же количество образуется и продуктов делений. За год работы данного реактора образуется до 160 МКи радиоактивных веществ, в числе которых будет содержаться около 20 МКи изотопа йода, 12 МКи инертных газов и 0,2 МКи ^{90}Sr . При технологическом режиме работы реактора в нем образуется 20 % газообразных и летучих веществ, и около 1 % радиоактивного иттрия (Y) попадает в атмосферу. Через вентиляционные трубы выбрасываются радиоактивные инертные газы. Особые трудности вызывают очистка выходящих газов от ^{131}I [2, 3].

Как и для любого предприятия, деятельность которого связана с загрязнением окружающей среды, так и для АЭС в настоящее время введены предельно допустимые выбросы радиоактивного аэрозоля (ПДВ). Введение ПДВ позволило не только лимитировать количество выбросов, но и осуществлять различными методами и средствами их контроль.

Как теоретически, так и экспериментально установлено, что величина ПДВ определяется типом источника, метеорологическими факторами и топографией местности. Причем ПДВ связано с предельно допустимой концентрацией радиоактивного аэрозоля (ПДК) через коэффициент метеорологического разбавления K_p ($\text{м}^3/\text{с}$), который определяется для каждой конкретной АЭС. ПДК измеряется различными методами и имеет размерность $\text{Ки}/\text{м}^3$ или $\text{г}/\text{м}^3$. В состав службы радиационного контроля Южно-Украинской АЭС входят региональная и специальная метеостанции, основной задачей которых является производство метеонаблюдений для целей оперативного прогноза скорости и направления перемещения выбрасываемых из труб АЭС радиоактивных аэрозолей в атмосфере и уровня радиоактивного загрязнения местности. По данным метеостанций в дневные часы при наличии штиля и ветра со скоростью до 2 м/с атмосфера характеризуется неустойчивым состоянием, а ночью – устойчивым. Нейтральное состояние отмечается при наличии ветра у Земли, скорость которого превышает 10 м/с. В соответствии с техническими условиями эксплуатации станции для 1 и 2 вентиляционных труб рассчитанная среднегодовая максимальная концентрация аэрозольного выброса ^{41}Ar составляет $2 \cdot 10^{-9} \text{Ки}/\text{м}^3$, а для третьей трубы - $5 \cdot 10^{-9} \text{Ки}/\text{м}^3$. Для радиоактивного ^{131}I ,

выбрасываемого из всех 4-х труб АЭС среднегодовая концентрация составляет $18,7 \cdot 10^{-12}$ Ки/м³. Предельно допустимый выброс радиоактивного ⁴¹Ar из 1 и 2 вентиляционных труб составляет 172,8 Ки/сут. и третьей вентиляционной трубы - 51,8 Ки/сут., а радиоактивного ¹³¹I из 1-3 вентиляционных труб – 1,55 Ки/сут., из 4-й вентиляционной трубы – 1,3 Ки/сут. ПДВ по 4-м вентиляционным трубам распределяется следующим образом (табл.1).

Соотношение активности нуклидов в выбрасываемой газоаэрозольной смеси вентиляционными трубами АЭС представлено в табл.2.

Размер санитарно-защитной зоны для 4-х вентиляционных труб составляет по осям 2 × 3 км.

Для исследования была использована поляризационная МРЛС, разработанная в Одесском гидрометеорологическом институте. Основным достоинством такой МРЛС являлась возможность осуществления полного поляризационного анализа электромагнитной волны. Конструктивные особенности ПМРЛС позволили излучать электромагнитную волну любой поляризации, принимать две ортогональные составляющие отраженной волны с измерением их амплитуд и разности фаз между ними [4]. Выходными параметрами являлись энергетические параметры Стокса и дифференциальная фаза.

Таблица 1 - Распределение ПДВ по 4-м вентиляционным трубам

Труба	⁴¹ Ar		¹³¹ I	
	Доля в суммарном выбросе	ПДВ, Ки / сут	Доля в суммарном выбросе	ПДВ, Ки / сут
1	0,39	$3,5 \cdot 10^3$	0,15	$8,1 \cdot 10^{-3}$
2	0,39	$3,5 \cdot 10^3$	0,15	$8,1 \cdot 10^{-3}$
3	0,22	$1,9 \cdot 10^3$	0,24	$13,3 \cdot 10^{-3}$
4	-	-	0,46	$26,1 \cdot 10^{-2}$

Таблица 2 - Соотношение активности нуклидов в газоаэрозольной смеси, выбрасываемой через вентиляционные трубы Южно-Украинской АЭС

Радио-нуклид	Активность	Радио-нуклид	Активность	Радио-нуклид	Активность
⁴¹ Ar	$7,31 \cdot 10^3$	⁸⁸ Kr	$3,06 \cdot 10^6$	⁹⁵ Sr	61,2
⁸¹ Kr	$8,16 \cdot 10^6$	¹³³ Xe	$9,18 \cdot 10^7$	¹³¹ I	1020
⁸⁵ Kr	$7,31 \cdot 10^6$	¹³⁵ Xe	$16,3 \cdot 10^6$	¹³⁷ Cs	108,8
⁸⁷ Kr	$13,6 \cdot 10^5$	⁹⁰ Sr	1,7	¹⁴⁴ Cs	23,8

Рассмотрим методику радиолокационного обнаружения радиоактивных веществ в атмосфере с помощью поляризационной МРЛС. Электромагнитную волну на излучение и прием зададим с помощью энергетических параметров Стокса, которые записываются в виде [4]:

$$\begin{aligned} I &= E_x^2 + E_y^2, & Q &= E_x^2 - E_y^2, \\ U &= 2 E_x E_y \cos \Phi_{xy}, & V &= 2 E_x E_y \sin \Phi_{xy}, \end{aligned} \quad (1)$$

где E_x и E_y - ортогональные амплитуды волны,

Φ_{xy} - разность фаз между ними (дифференциальная фаза).

Излучаемую и отраженную волну представим в виде матрицы S , коэффициентами которой являются параметры Стокса:

$$[S_{изл}] = \begin{bmatrix} I_{изл} \\ Q_{изл} \\ U_{изл} \\ V_{изл} \end{bmatrix}, \quad [S_{отр}] = \begin{bmatrix} I_{отр} \\ Q_{отр} \\ U_{отр} \\ V_{отр} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

а отражающие свойства турбулентного радиоактивного объема представим в виде матрицы, состоящей из 16 коэффициентов

$$[T] = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} \\ T_{41} & T_{42} & T_{43} & T_{44} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Тогда связь между излученной и отраженной волной и характеристиками объекта запишется в виде произведения приведенных матриц

$$[S_{отр}] = [T] \cdot [S_{изл}] \quad (4)$$

или в развернутом виде:

$$\begin{bmatrix} I_{отр} \\ Q_{отр} \\ U_{отр} \\ V_{отр} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} \\ T_{41} & T_{42} & T_{43} & T_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{изл} \\ Q_{изл} \\ U_{изл} \\ V_{изл} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Проведя процедуру перемножения матриц, получим 4 линейные уравнения:

$$\begin{aligned} I_{отр} &= T_{11} I_{изл} + T_{12} Q_{изл} + T_{13} U_{изл} + T_{14} V_{изл}, \\ Q_{отр} &= T_{21} I_{изл} + T_{22} Q_{изл} + T_{23} U_{изл} + T_{24} V_{изл}, \\ U_{отр} &= T_{31} I_{изл} + T_{32} Q_{изл} + T_{33} U_{изл} + T_{34} V_{изл}, \\ V_{отр} &= T_{41} I_{изл} + T_{42} Q_{изл} + T_{43} U_{изл} + T_{44} V_{изл}. \end{aligned} \quad (6)$$

Для получения 16 коэффициентов матрицы необходимо провести 4 измерения параметров Стокса отраженной волны, а радиоактивный объем облучить последовательно электромагнитными волнами линейной горизонтальной, линейной вертикальной, линейной с наклоном вектора под углом 45° и круговой поляризациями (возможны и другие комбинации). Тогда матрица рассеяния турбулентного радиоактивного объема запишется в виде

$$[T] = \begin{bmatrix} \frac{I^{90^\circ} + I^{0^\circ}}{2} & \frac{I^{90^\circ} - I^{0^\circ}}{2} & I^{45^\circ} - T_{11} & I^{kn} - T_{11} \\ \frac{Q^{90^\circ} + Q^{0^\circ}}{2} & \frac{Q^{90^\circ} - Q^{0^\circ}}{2} & Q^{45^\circ} - T_{21} & Q^{kn} - T_{21} \\ \frac{U^{90^\circ} + U^{0^\circ}}{2} & \frac{U^{90^\circ} - U^{0^\circ}}{2} & U^{45^\circ} - T_{31} & U^{kn} - T_{31} \\ \frac{V^{90^\circ} + V^{0^\circ}}{2} & \frac{V^{90^\circ} - V^{0^\circ}}{2} & V^{45^\circ} - T_{41} & V^{kn} - T_{41} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Наблюдения проводились в безоблачной атмосфере, температура приземного слоя атмосферы составляла $25-35^\circ\text{C}$. Выброс ^{41}Ar и ^{131}I осуществлялся из труб 1-3, а ^{131}I только из четвертой трубы (в соответствии с техническими условиями эксплуатации АЭС).

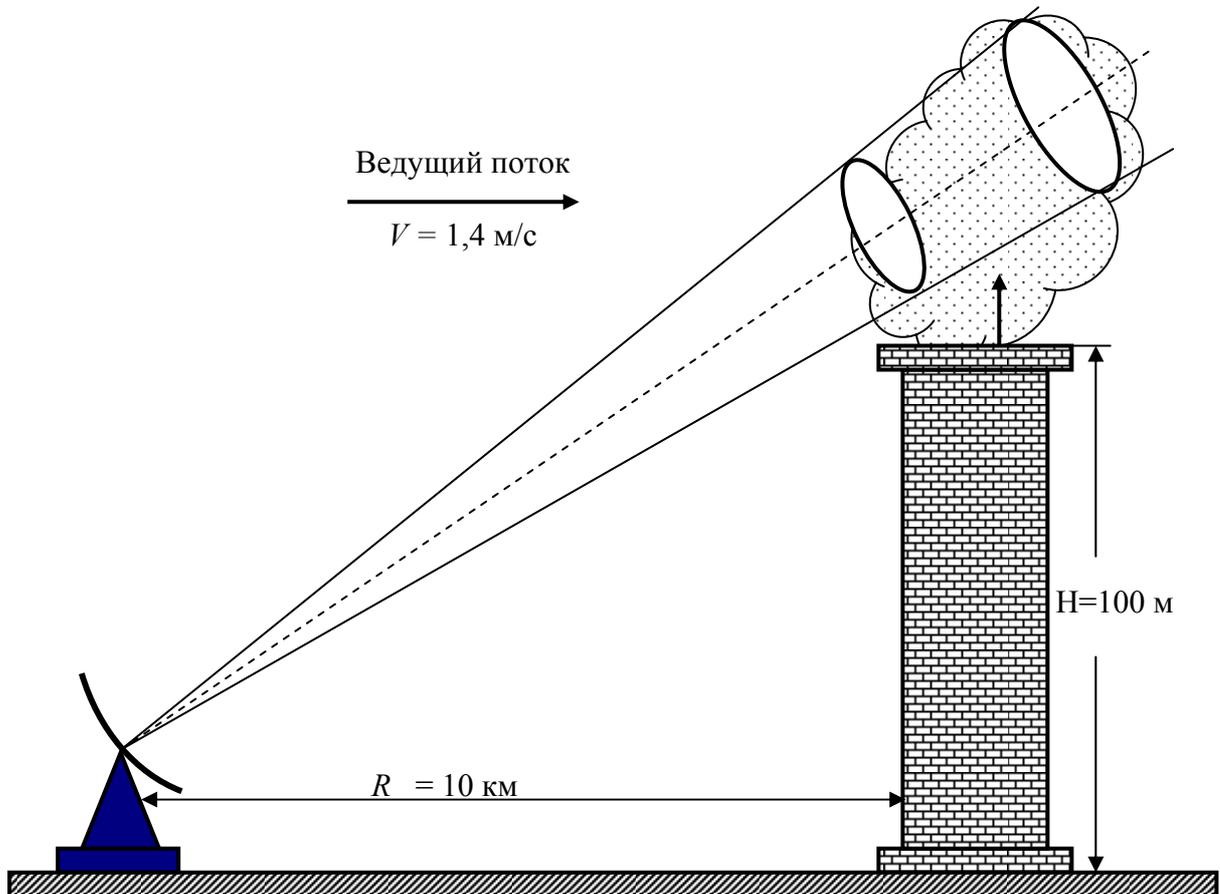


Рис.1 - Размещение МРЛС на местности.

Расстояние между 1 и 2 трубами 200 м, между 2 и 3, 3 и 4 - 1 км. Господствующее направление ветра ЗЮЗ, среднегодовая скорость – 2,8 м/с. Высота 1, 2, 3 труб – 100 м, 4-ой – 80 м. Диаметр устья труб – 4 м. Среднегодовая концентрация выброса ^{41}Ar составляет $4 \cdot 10^{-9}$ Ки/м³ для труб 1, 2 и $5 \cdot 10^{-9}$ Ки/м³ из 3-ей трубы, а радиоактивного йода ^{131}I $15,2 \cdot 10^{-2}$ Ки/м³ для 1-3 труб и $3,5 \cdot 10^{-2}$ Ки/м³ для 4-ой трубы для технологического режима работы АЭС.

Методика радиолокационного наблюдения за выбросами из 4-х труб Южно-Украинской АЭС заключалась в следующем. Наблюдения начались в 6 часов утра 8 июля 1990 года и продолжались до 18 часов 15 июля. Радиолокационный поляриметр находился на расстоянии 10 км от труб АЭС. При наблюдении антенна устанавливалась выше труб АЭС так, чтобы отраженный от них сигнал отсутствовал на индикаторе МРЛС (рис.1).

Так как трубы 1 и 2 находятся на расстоянии, не превышающем 4-х их высот, то они сведены в одну трубу. В связи с тем, что из 1, 2, 3 труб выбрасывался ^{41}Ar и ^{131}I , а из четвертой трубы только ^{131}I , то измерения проводились вначале над трубами 1, 2, 3, затем над трубой 4 по 10 мин каждый час. При этом регистрировались усредненные параметры Стокса на индикаторах ИКО и ИДВ нормированные к первому параметру, их мгновенные значения с помощью аппаратуры поимпульсной регистрации и разность фаз как усредненную, так и мгновенную между каждым импульсами. По значениям дифференциальной фазы на экране монитора ПЭВМ определялась концентрация радиоактивного аэрозоля, выбрасываемого из вентиляционных труб АЭС.

По полученным значениям параметров Стокса вычислялись коэффициенты матрицы Мюллера для каждой реализации. Значения коэффициентов матрицы в качестве примера за 8.07.90 и за 15.07.90 г. приведены в табл.3.

Таблица 3 - Значения коэффициентов матрицы Мюллера при работе Южно-Украинской АЭС

№ реал.	Дата и время	Труба 1, 2, 3	Труба 4
1	2	3	4
1	8.07.1990 6 ⁰⁰ – 6 ¹⁰	$T = \begin{bmatrix} 1,9 & 0,7 & -0,3 & -0,3 \\ 0,2 & 0,01 & -0,1 & -0,1 \\ 1,2 & 0,25 & 0,15 & 0,15 \\ 0,15 & 0,05 & 0,02 & 0,02 \end{bmatrix}$	$T = \begin{bmatrix} 1,0 & 0,5 & -0,2 & -0,2 \\ 0,1 & 0,0 & 0,0 & 0,0 \\ 1,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 \\ 0,1 & 0,0 & 0,0 & 0,0 \end{bmatrix}$
2	8.07.1990 9 ⁰⁰ – 9 ¹⁰	$T = \begin{bmatrix} 1,7 & 0,7 & 0,0 & 0,0 \\ 0,1 & 0,0 & 0,0 & 0,0 \\ 1,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 \\ 0,1 & 0,0 & 0,0 & 0,0 \end{bmatrix}$	$T = \begin{bmatrix} 1,0 & 0,4 & -0,2 & -0,2 \\ 0,0 & 0,1 & 0,1 & 0,0 \\ 0,9 & 0,0 & 0,0 & 0,0 \\ 0,1 & 0,1 & 0,0 & 0,0 \end{bmatrix}$
3	8.07.1990 12 ⁰⁰ – 12 ¹⁰	$T = \begin{bmatrix} 1,5 & 0,6 & -0,12 & -0,12 \\ 0,1 & -0,02 & -0,01 & -0,01 \\ 0,9 & 0,3 & 0,3 & 0,3 \\ 0,8 & 0,3 & 0,3 & 0,3 \end{bmatrix}$	$T = \begin{bmatrix} -1,1 & 0,4 & -0,1 & -0,1 \\ 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 \\ 1,1 & 0,0 & 0,0 & 0,1 \\ 0,3 & 0,2 & 0,2 & 0,1 \end{bmatrix}$
4	8.07.1990 15 ⁰⁰ – 15 ¹⁰	$T = \begin{bmatrix} 1,5 & 0,3 & 0,1 & 0,1 \\ 0,4 & 0,2 & -0,2 & -0,2 \\ 1,2 & 0,1 & 0,1 & 0,1 \\ 0,4 & 0,1 & 0,1 & 0,1 \end{bmatrix}$	$T = \begin{bmatrix} 0,8 & 0,1 & 0,1 & 0,1 \\ 0,1 & 0,2 & -0,2 & -0,2 \\ 0,7 & 0,4 & 0,4 & -0,2 \\ 0,3 & 0,2 & 0,2 & 0,2 \end{bmatrix}$

1	2	3	4
5	8.07.1990 18 ⁰⁰ -18 ¹⁰	$T = \begin{bmatrix} 1,4 & 0,2 & 0,2 & 0,2 \\ 0,2 & 0,1 & 0,1 & 0,1 \\ 1,2 & 0,0 & 0,0 & 0,0 \\ 0,12 & 0,11 & 0,12 & 0,11 \end{bmatrix}$	$T = \begin{bmatrix} 0,8 & 0,2 & -0,1 & -0,1 \\ 0,02 & 0,0 & 0,02 & 0,02 \\ 0,7 & 0,1 & 0,1 & -0,1 \\ 0,3 & 0,1 & 0,1 & 0,1 \end{bmatrix}$
6	8.07.1990 21 ⁰⁰ -21 ¹⁰	$T = \begin{bmatrix} 1,2 & 0,2 & 0,2 & 0,2 \\ 0,1 & 0,01 & 0,01 & 0,02 \\ 0,3 & 0,02 & 0,02 & 0,01 \\ 0,3 & 0,01 & 0,0 & 0,0 \end{bmatrix}$	$T = \begin{bmatrix} 0,7 & 0,1 & 0,1 & 0,1 \\ 0,12 & 0,12 & 0,0 & 0,0 \\ 0,5 & 0,0 & 0,1 & 0,1 \\ 0,2 & 0,11 & 0,11 & 0,0 \end{bmatrix}$
7	8.07.1990 24 ⁰⁰ -24 ¹⁰	$T = \begin{bmatrix} 1,1 & 0,0 & 0,0 & 0,0 \\ 0,1 & 0,2 & 0,2 & 0,2 \\ 0,8 & 0,11 & 0,12 & 0,12 \\ 0,2 & 0,13 & 0,13 & 0,13 \end{bmatrix}$	$T = \begin{bmatrix} 0,6 & 0,1 & 0,1 & 0,0 \\ 0,1 & 0,1 & 0,12 & 0,0 \\ 0,4 & 0,2 & 0,02 & 0,1 \\ 0,3 & 0,1 & 0,11 & 0,11 \end{bmatrix}$
8	15.07.1990 6 ⁰⁰ -6 ¹⁰	$T = \begin{bmatrix} 2,5 & 1,4 & -1,1 & -1,1 \\ 0,9 & 0,1 & -0,7 & -0,7 \\ 2,0 & 0,7 & 0,4 & 0,4 \\ 0,4 & 0,2 & 0,3 & 0,3 \end{bmatrix}$	$T = \begin{bmatrix} 2,2 & 1,1 & -0,9 & -0,9 \\ 1,0 & 0,2 & -0,5 & -0,5 \\ 2,4 & 0,8 & 0,5 & 0,5 \\ 0,6 & 0,3 & 0,3 & 0,3 \end{bmatrix}$
9	15.07.1990 12 ⁰⁰ -12 ¹⁰	$T = \begin{bmatrix} 3,5 & 2,0 & 2,0 & 1,9 \\ 1,1 & 0,5 & 1,1 & 1,1 \\ 2,5 & 1,0 & 0,8 & 0,8 \\ 0,6 & 0,6 & 0,6 & 0,6 \end{bmatrix}$	$T = \begin{bmatrix} 2,8 & 0,9 & -0,5 & -0,5 \\ 0,5 & 0,5 & 0,4 & 0,4 \\ 2,9 & 0,4 & 0,4 & 0,4 \\ 0,3 & 0,2 & 0,2 & 0,2 \end{bmatrix}$
10	15.07.1990 18 ⁰⁰ -18 ¹⁰	$T = \begin{bmatrix} 3,0 & 1,9 & 1,9 & 1,8 \\ 1,0 & 1,0 & 1,1 & 1,1 \\ 2,0 & 0,9 & 0,9 & 0,9 \\ 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 \end{bmatrix}$	$T = \begin{bmatrix} 2,5 & 1,4 & -0,3 & -0,3 \\ 0,8 & 0,7 & 0,9 & 0,9 \\ 1,8 & 0,5 & 0,5 & 0,5 \\ 0,2 & 0,2 & 0,2 & 0,2 \end{bmatrix}$
11	15.07.1990 24 ⁰⁰ -24 ¹⁰	$T = \begin{bmatrix} 1,95 & 0,7 & -0,2 & -0,2 \\ 0,3 & 0,1 & -0,1 & -0,1 \\ 1,1 & 0,3 & 0,1 & 0,1 \\ 0,1 & 0,05 & 0,02 & 0,02 \end{bmatrix}$	$T = \begin{bmatrix} 1,6 & 0,4 & -0,1 & -0,1 \\ 0,1 & 0,0 & 0,0 & 0,0 \\ 0,9 & 0,1 & 0,1 & 0,1 \\ 0,1 & 0,1 & 0,0 & 0,0 \end{bmatrix}$

Анализ матриц рассеяния турбулентного объема над трубами АЭС показал, что 15.07.90 г. Южно-Украинская АЭС по всей видимости работала в аварийном режиме, т.к. значения коэффициентов матриц рассеяния при неизменных метеорологических условиях существенно отличаются от значений, полученных за период с 8.07.90 г. по 15.07.90 г.

За указанный период были получены выборочные характеристики параметров Стокса, приведенные в табл.4 и 5.

С помощью формул:

$$\Delta \Phi_{x\tau} = \Phi_{xx} - \Phi_{xx\tau},$$

$$\Delta \Phi_{y\tau} = \Phi_{yy} - \Phi_{yy\tau} \quad (8)$$

и

$$\Delta \Phi_{xy\tau} = \Delta \Phi_{x\tau} - \Delta \Phi_{y\tau}, \quad (9)$$

и полученных радиолокационных значений параметров Стокса, нами произведено распознавание режима работы Южно-Украинской АЭС, используя в качестве признака распознавания четвертый параметр Стокса (можно любой из 4-х), т.е.

$$0,5 V^2 + 2V - 7 \geq \ln \frac{0,4}{0,36}.$$

Решая неравенство, находим

$$V_{1кр} = -6,22, \quad V_{2кр} = 2,22.$$

Значение $V_{1кр} = -6,22$ отбрасываем по физическому смыслу. Получаем критериальное значение четвертого параметра Стокса $V_{2кр} = 2,22$ с которым и сравниваем измеренные с помощью МРЛС значения четвертого параметра Стокса. Сравнивая полученные выборочные характеристики V за период с 8.07 по 15.07.90 г. с $V_{кр}$, принимаем решение, что 15.07.90 г. Южно-Украинская АЭС работала в аварийном режиме.

Одновременно с измерением параметров Стокса на радиолокационном поляриметре с 8.07.90 г. по 15.07.90 г. производилось измерение разности фаз электромагнитной волны. Так как обратное рассеяние обусловлено флуктуациями диэлектрической проницаемости радиоактивного турбулентного объема, а фаза принимаемого сигнала пропорциональна структурному параметру C_ε^2 , который с учетом коэффициента перехода определяет концентрацию радиоактивной примеси, выбрасываемой из труб АЭС, то измерив разность фаз отраженного сигнала можно получить величину концентрации радиоактивной примеси. Для технологического и аварийного режимов работы Южно-Украинской АЭС полученные концентрации радиоактивного аэрозоля приведены в табл.6 и 7. Из таблиц видно, что технологическому режиму работы АЭС соответствует концентрация выбрасываемого радиоактивного аэрозоля $P = 2,2 \cdot 10^{-9} \div 2,4 \cdot 10^{-9}$ Ки/м³, а аварийному режиму - $P = 1,5 \cdot 10^{-8} \div 2,4 \cdot 10^{-8}$ Ки/м³.

Анализ таблиц 6 и 7 показывает, что радиолокационные параметры для указанных режимов работы АЭС существенно отличаются, что позволяет использовать $\Delta\Phi_x$ или $\Delta\Phi_y$ для измерения концентрации радиоактивного аэрозоля.

Заключение.

1. Выполненные теоретические и экспериментальные исследования, представленные в данной статье, показали возможность дистанционного независимого радиолокационного контроля экологической обстановки в районах функционирования АЭС.

2. Впервые получена концентрация радиоактивного аэрозоля, выбрасываемого из труб АЭС, радиолокационным методом.

Таблица 4 - Выборочные характеристики распределения параметров Стокса при технологическом режиме работы Южно-Украинской АЭС

I_T	0,2 ÷ 0,6	> 0,6 ÷ 1,0	> 1,0 ÷ 1,4	> 1,4 ÷ 1,8	> 1,8 ÷ 2,2	> 2,2 ÷ 2,6	> 2,6 ÷ 3,0
N	30	10	5	8	4	11	7
Q_T	0,01 ÷ 0,05	> 0,05 ÷ 0,09	> 0,09 ÷ 0,13	> 0,13 ÷ 0,17	> 0,17 ÷ 0,21	> 0,21 ÷ 0,25	> 0,25 ÷ 0,29
N	40	15	6	10	12	8	7
U_T	0,3 ÷ 0,7	> 0,7 ÷ 1,1	> 1,1 ÷ 1,5	> 1,5 ÷ 1,9	> 1,9 ÷ 2,3	> 2,3 ÷ 2,7	> 2,7 ÷ 3,1
N	27	11	8	10	5	7	3
V_T	0,1 ÷ 0,5	> 0,5 ÷ 0,9	> 0,9 ÷ 1,3	> 1,3 ÷ 1,7	> 1,7 ÷ 2,1	> 2,1 ÷ 2,5	> 2,5 ÷ 2,9
N	4	8	11	9	5	7	6

$$\bar{I}_T = 1,23 \quad \sigma_T^2 = 0,12 \quad \sigma_T = 0,34 ; \quad \bar{Q}_T = 0,10 \quad \sigma_T^2 = 0,001 \quad \sigma_T = 0,04$$

$$\bar{U}_T = 1,23 \quad \sigma_T^2 = 0,04 \quad \sigma_T = 0,19 ; \quad \bar{V}_T = 1,8 \quad \sigma_T^2 = 0,13 \quad \sigma_T = 0,36$$

Таблица 5 - Выборочные характеристики распределения параметров Стокса при аварийном режиме работы Южно-Украинской АЭС

I_R	1,1 ÷ 1,5	> 1,5 ÷ 1,9	> 1,9 ÷ 2,3	> 2,3 ÷ 2,7	> 2,7 ÷ 3,1	> 3,1 ÷ 3,5	> 3,5 ÷ 3,9
N	35	11	6	8	5	12	4
Q_R	0,05 ÷ 0,09	> 0,09 ÷ 0,13	> 0,13 ÷ 0,17	> 0,17 ÷ 0,21	> 0,21 ÷ 0,25	> 0,25 ÷ 0,30	> 0,30 ÷ 0,34
N	25	8	14	7	10	12	6
U_R	1,2 ÷ 1,6	> 1,6 ÷ 2,0	> 2,0 ÷ 2,4	> 2,4 ÷ 2,8	> 2,8 ÷ 3,2	> 3,2 ÷ 3,6	> 3,6 ÷ 4,0
N	18	11	14	9	4	13	7
V_R	1,25 ÷ 1,65	> 1,65 ÷ 2,25	> 2,25 ÷ 2,65	> 2,65 ÷ 3,25	> 3,25 ÷ 3,65	> 3,65 ÷ 4,25	> 4,25 ÷ 4,65
N	10	11	22	30	9	8	4

$$\bar{I}_R = 2,05 \quad \sigma_R^2 = 0,29 \quad \sigma_R = 0,54 ; \quad \bar{Q}_R = 0,16 \quad \sigma_R^2 = 0,006 \quad \sigma_R = 0,024 ;$$

$$\bar{U}_R = 2,39 \quad \sigma_R^2 = 0,27 \quad \sigma_R = 0,52 ; \quad \bar{V}_R = 2,42 \quad \sigma_R^2 = 0,15 \quad \sigma_R = 0,38$$

Таблица 6 - Технологический режим работы Южно-Украинской АЭС

Дата	1-2 трубы			3-я труба					
	ε'	$\bar{P}_1, \text{Ки/м}^3$	$\Delta\Phi_X^\circ$	ε'	$\bar{P}_1, \text{Ки/м}^3$	$\Delta\Phi_X^\circ$	ε'	$\bar{P}_2, \text{Ки/м}^3$	$\Delta\Phi_X^\circ$
8.07	1,0	$2,2 \cdot 10^{-9}$	10,0	2,10	$3 \cdot 10^{-9}$	13,1	-	-	-
	1,01	$2,2 \cdot 10^{-9}$	10,0	2,10	$3 \cdot 10^{-9}$	13,1	-	-	-
	1,02	$2,21 \cdot 10^{-9}$	10,0	2,10	$3 \cdot 10^{-9}$	13,1	-	-	-
9.07	1,03	$2,21 \cdot 10^{-9}$	10,0	2,10	$3 \cdot 10^{-9}$	13,1	-	-	-
	1,04	$2,21 \cdot 10^{-9}$	10,0	2,10	$3 \cdot 10^{-9}$	13,1	-	-	-
	1,05	$2,21 \cdot 10^{-9}$	10,0	2,12	$3 \cdot 10^{-9}$	13,2	-	-	-
10.07	1,06	$2,21 \cdot 10^{-9}$	10,0	2,13	$3 \cdot 10^{-9}$	13,2	-	-	-
	1,10	$2,3 \cdot 10^{-9}$	11,0	2,10	$3,3 \cdot 10^{-9}$	13,2	-	-	-
	1,12	$2,3 \cdot 10^{-9}$	11,0	2,11	$3,2 \cdot 10^{-9}$	13,0	-	-	-
11.07	1,15	$2,3 \cdot 10^{-9}$	11,0	2,09	$3,3 \cdot 10^{-9}$	13,2	-	-	-
	1,18	$2,3 \cdot 10^{-9}$	11,0	2,10	$3,3 \cdot 10^{-9}$	13,3	-	-	-
	1,20	$2,4 \cdot 10^{-9}$	12,0	2,11	$3,4 \cdot 10^{-9}$	13,3	-	-	-
12.07	1,18	$2,3 \cdot 10^{-9}$	11,0	2,00	$3,2 \cdot 10^{-9}$	13,0	-	-	-
	1,17	$2,4 \cdot 10^{-9}$	11,0	2,12	$3,3 \cdot 10^{-9}$	13,2	-	-	-
	1,19	$2,4 \cdot 10^{-9}$	11,0	2,10	$3,3 \cdot 10^{-9}$	13,2	-	-	-
13.07	1,21	$2,4 \cdot 10^{-9}$	12,0	2,10	$3,5 \cdot 10^{-9}$	13,2	-	-	-
	1,17	$2,4 \cdot 10^{-9}$	11,0	2,12	$3,2 \cdot 10^{-9}$	13,2	-	-	-
	1,10	$2,3 \cdot 10^{-9}$	11,0	2,17	$3,3 \cdot 10^{-9}$	13,0	2,35	$1,1 \cdot 10^{-8}$	14,2
14.07	1,14	$2,4 \cdot 10^{-9}$	11,0	2,18	$3,3 \cdot 10^{-9}$	13,7	-	-	-
	1,13	$2,4 \cdot 10^{-9}$	11,0	2,19	$3,3 \cdot 10^{-9}$	13,8	-	-	-
	1,18	$2,4 \cdot 10^{-9}$	12,0	2,20	$3,4 \cdot 10^{-9}$	13,9	2,35	$1,1 \cdot 10^{-8}$	14,2

Таблица 7 - Аварийный режим работы Южно-Украинской АЭС 15.07.90 г.

Время наблюд.	1-2 трубы								
	ε'	$\bar{P}_1, \text{ Ки/м}^3$	$\Delta\Phi_X^\circ$	ε'	$\bar{P}_2, \text{ Ки/м}^3$	$\Delta\Phi_X^\circ$	ε'	$\bar{P}_3, \text{ Ки/м}^3$	$\Delta\Phi_X^\circ$
6–6 ¹⁰	1,03	$2,20 \cdot 10^{-9}$	9,8	2,30	$1,10 \cdot 10^{-8}$	14,2	2,50	$1,50 \cdot 10^{-8}$	15,1
	1,02	$2,21 \cdot 10^{-9}$	9,8	2,31	$1,10 \cdot 10^{-8}$	14,2	2,55	$1,53 \cdot 10^{-8}$	15,2
	1,04	$2,21 \cdot 10^{-9}$	9,9	2,32	$1,12 \cdot 10^{-8}$	14,3	2,60	$1,54 \cdot 10^{-8}$	15,3
	1,03	$2,20 \cdot 10^{-9}$	9,8	2,31	$1,11 \cdot 10^{-8}$	14,3	2,62	$1,55 \cdot 10^{-8}$	15,5
	1,02	$2,22 \cdot 10^{-9}$	9,8	2,30	$1,10 \cdot 10^{-8}$	14,2	2,64	$1,58 \cdot 10^{-8}$	15,8
12–12 ¹⁰	1,05	$2,22 \cdot 10^{-9}$	10,0	2,32	$1,13 \cdot 10^{-8}$	14,4	2,65	$1,59 \cdot 10^{-8}$	15,9
	1,05	$2,24 \cdot 10^{-9}$	10,0	2,32	$1,13 \cdot 10^{-8}$	14,4	2,60	$1,59 \cdot 10^{-8}$	15,9
	1,06	$2,23 \cdot 10^{-9}$	9,9	2,33	$1,14 \cdot 10^{-8}$	14,4	2,70	$1,60 \cdot 10^{-8}$	16,0
	1,04	$2,23 \cdot 10^{-9}$	9,9	2,31	$1,12 \cdot 10^{-8}$	14,4	2,70	$1,60 \cdot 10^{-8}$	16,0
	1,07	$2,24 \cdot 10^{-9}$	9,8	2,31	$1,12 \cdot 10^{-8}$	14,3	2,70	$1,60 \cdot 10^{-8}$	16,0
18–18 ¹⁰	1,10	$2,30 \cdot 10^{-9}$	10,7	2,34	$1,14 \cdot 10^{-8}$	14,5	2,71	$1,65 \cdot 10^{-8}$	16,2
	1,10	$2,31 \cdot 10^{-9}$	10,8	2,35	$1,15 \cdot 10^{-8}$	14,6	2,75	$1,66 \cdot 10^{-8}$	16,3
	1,12	$2,30 \cdot 10^{-9}$	10,8	2,35	$1,15 \cdot 10^{-8}$	14,6	2,80	$1,66 \cdot 10^{-8}$	16,4
	1,11	$2,32 \cdot 10^{-9}$	10,7	2,36	$1,16 \cdot 10^{-8}$	14,7	2,78	$1,66 \cdot 10^{-8}$	16,3
	1,13	$2,33 \cdot 10^{-9}$	10,9	2,37	$1,17 \cdot 10^{-8}$	14,7	2,90	$1,70 \cdot 10^{-8}$	16,8
24–24 ¹⁰	1,15	$2,39 \cdot 10^{-9}$	11,0	2,38	$1,20 \cdot 10^{-8}$	14,8	2,91	$1,68 \cdot 10^{-8}$	16,5
	1,17	$2,40 \cdot 10^{-9}$	11,0	2,39	$1,25 \cdot 10^{-8}$	14,8	2,93	$1,70 \cdot 10^{-8}$	16,8
	1,17	$2,39 \cdot 10^{-9}$	11,1	2,39	$1,26 \cdot 10^{-8}$	14,9	2,92	$1,70 \cdot 10^{-8}$	16,8
	1,19	$2,40 \cdot 10^{-9}$	11,2	2,40	$1,30 \cdot 10^{-8}$	14,8	2,98	$1,70 \cdot 10^{-8}$	16,8
	1,19	$2,40 \cdot 10^{-9}$	11,8	2,40	$1,30 \cdot 10^{-8}$	14,9	3,00	$1,71 \cdot 10^{-8}$	16,9

Продолжение табл.7

Время наблюд.	3 груба								
	ε'	$\bar{P}_1, \text{ Ки/м}^3$	$\Delta\Phi_X^\circ$	ε'	$\bar{P}_2, \text{ Ки/м}^3$	$\Delta\Phi_X^\circ$	ε'	$\bar{P}_3, \text{ Ки/м}^3$	$\Delta\Phi_X^\circ$
6–6 ¹⁰	1,02	$2,22 \cdot 10^{-9}$	9,8	2,31	$1,12 \cdot 10^{-8}$	14,3	3,30	$2,00 \cdot 10^{-8}$	17,9
	1,03	$2,21 \cdot 10^{-9}$	9,7	2,32	$1,11 \cdot 10^{-8}$	14,3	3,30	$2,90 \cdot 10^{-8}$	17,9
	1,03	$2,20 \cdot 10^{-9}$	9,7	2,31	$1,11 \cdot 10^{-8}$	14,2	3,40	$2,10 \cdot 10^{-8}$	18,0
	1,05	$2,22 \cdot 10^{-9}$	9,9	2,31	$1,12 \cdot 10^{-8}$	14,2	3,49	$2,14 \cdot 10^{-8}$	18,8
	1,07	$2,21 \cdot 10^{-9}$	9,6	2,33	$1,13 \cdot 10^{-8}$	14,4	3,48	$2,14 \cdot 10^{-8}$	18,8
12–12 ¹⁰	1,05	$2,23 \cdot 10^{-9}$	9,9	2,32	$1,13 \cdot 10^{-8}$	14,4	3,52	$2,15 \cdot 10^{-8}$	19,0
	1,05	$2,22 \cdot 10^{-9}$	9,8	2,32	$1,14 \cdot 10^{-8}$	14,4	3,54	$2,16 \cdot 10^{-8}$	19,8
	1,04	$2,22 \cdot 10^{-9}$	9,8	2,34	$1,14 \cdot 10^{-8}$	14,5	3,49	$2,17 \cdot 10^{-8}$	20,0
	1,06	$2,24 \cdot 10^{-9}$	9,6	2,33	$1,15 \cdot 10^{-8}$	14,5	3,56	$2,18 \cdot 10^{-8}$	20,2
	1,06	$2,24 \cdot 10^{-9}$	9,7	2,34	$1,14 \cdot 10^{-8}$	14,6	3,71	$2,20 \cdot 10^{-8}$	21,0
18–18 ¹⁰	1,11	$2,30 \cdot 10^{-9}$	10,0	2,34	$1,15 \cdot 10^{-8}$	14,5	3,82	$2,29 \cdot 10^{-8}$	21,5
	1,12	$2,33 \cdot 10^{-9}$	10,0	2,35	$1,15 \cdot 10^{-8}$	14,6	3,79	$2,30 \cdot 10^{-8}$	21,6
	1,12	$2,31 \cdot 10^{-9}$	10,2	2,35	$1,16 \cdot 10^{-8}$	14,7	3,80	$2,39 \cdot 10^{-8}$	21,8
	1,13	$2,32 \cdot 10^{-9}$	10,2	2,36	$1,17 \cdot 10^{-8}$	14,7	3,92	$2,39 \cdot 10^{-8}$	21,9
	1,15	$2,34 \cdot 10^{-9}$	10,3	2,35	$1,16 \cdot 10^{-8}$	14,8	3,94	$2,39 \cdot 10^{-8}$	21,9
24–24 ¹⁰	1,17	$2,38 \cdot 10^{-9}$	10,9	2,37	$1,22 \cdot 10^{-8}$	14,8	3,93	$2,39 \cdot 10^{-8}$	21,9
	1,18	$2,28 \cdot 10^{-9}$	11,0	2,37	$1,25 \cdot 10^{-8}$	14,9	3,91	$2,38 \cdot 10^{-8}$	21,7
	1,19	$2,40 \cdot 10^{-9}$	11,2	2,39	$1,26 \cdot 10^{-8}$	14,9	3,99	$2,38 \cdot 10^{-8}$	21,7
	1,16	$2,39 \cdot 10^{-9}$	11,3	2,38	$1,26 \cdot 10^{-8}$	14,8	4,00	$2,39 \cdot 10^{-8}$	21,8
	1,17	$2,38 \cdot 10^{-9}$	11,7	2,39	$1,29 \cdot 10^{-8}$	14,9	4,20	$2,40 \cdot 10^{-8}$	22,0

Список литературы

1. Доповідь Мінекобезпеки України «Про стан ядерної та радіаційної безпеки в Україні за 1997 р.». - Київ, 1998. - 68 с.
2. Израэль Ю.А., Теверовский Е.И. Возможности широкого мирного использования атомной энергии при обеспечении безопасности населения // Атомная энергия. 1971. - Т.31, вып. 6, № 12. – с.54-98.
3. Кароль И.Л. Радиоактивные изотопы и глобальный перенос в атмосфере. – Л.:Гидрометеиздат, 1972. – 366 с.
4. Корбан В.Х. Поляризаційна селекція хмар і опадів. Монографія. – Одеса.: Зовнішрекламасервіс, 2004. – 248 с.
5. Кононов Е.Н., Решетняк С.А., Шелепин Л.А., Щеглов В.А. Применение радиолокационных средств для дистанционного контроля радиационной обстановки // Письма в ЖТФ, Т.22, вып. 17, 1996. – с.86-90.
6. Протасевич Е.Т. Метод определения радиоактивного загрязнения среды по свечению воздуха // Оптика атмосферы и океана, Т.7, № 5, 1994. – с.667-670.
7. Асанов В.Д., Белокуров А.А., Канарейкин Д.Б., Блюм В.С. Результаты испытаний стационарного и мобильного комплексов аппаратуры RIDIM в режиме мониторинга атмосферных загрязнений // Труды Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред», Санкт-Петербург, вып.1, 1998. – с.194-206.

Експериментальне радіолокаційне виявлення радіоактивних викидів АЕС.

Корбан В.Х., Корбан Д.В.

В статті показана можливість радіолокаційного виявлення радіоактивного аерозолю, який викидається з вентиляційних труб АЕС та вимірювання його концентрації з використанням поляризаційних параметрів луно-сигналів в безхмарній турбулентній атмосфері.

Ключові слова: радіоактивний аерозоль, поляризація, радіоактивне забруднення, екологічний контроль.

Experimental radar-tracking detection of radioactive ejections from atomic power station.

Korban V.Kh., Korban D.V.

This article shows an opportunity of detection by a method of a radar-location radioactive aerosols that are ejected from pipes of atomic power stations. Their concentration can be measured with polarising parameters of echo - signals in turbulent atmosphere.

Keywords: radioactive aerosol, polarization, radioactive contamination, ecological monitoring.