

*Г.Г. Шукин, Д.В. Корбан, В.Ю. Жуков*

**РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ, РАСПОЗНАВАНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ РАДИОАКТИВНОГО АЭРОЗОЛЯ В БЕЗОБЛАЧНОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ**

*G.G. Shchukin, D.V. Korban, V.Y. Zhukov*

**RADIO-LOCATION DISCOVERY, RECOGNITION AND MEASURING OF CONCENTRATION OF RADIOACTIVE AEROSOL IN A CLOUDLESS TURBULENT ATMOSPHERE**

*В статье рассмотрена возможность использования фазоразностного метода и поляризационных параметров Стокса для обнаружения, распознавания и измерения концентрации радиоактивного аэрозоля, выбрасываемого из вентиляционных труб АЭС, в безоблачной турбулентной атмосфере.*

*Ключевые слова: метеорологическая радиолокация, поляриметрия, радиоактивный аэрозоль, выбросы атомных электростанций, контроль радиоактивного фона.*

*In the article possibility of using the phase difference method and polarization parameters of Stokes for a discovery, recognition and measuring of concentration of the radioactive aerosol emitted from the vent pipes of nuclear power plants in the cloudless turbulent atmosphere.*

*Key words: meteorological radar, polarimetry, radioactive aerosol, the ejections of atomic power plants, the control of radioactive background.*

Загрязнение окружающей среды радиоактивными выбросами АЭС, влияющими на здоровье людей, растительный и животный мир, является важной социальной проблемой. Для контроля уровня радиоактивного фона в границах санитарно-защитной зоны АЭС в настоящее время используются только контактные приборы. Особенность такого контроля связана с проведением только точечных измерений уровня радиоактивности как на АЭС, так и на прилегающей территории, что не позволяет получить наиболее объективную информацию о радиоактивном загрязнении подстилающей поверхности и атмосферы за пределами санитарно-защитной зоны. Создание системы радиолокационного мониторинга даст возможность реализовать автоматический дистанционный контроль технологического и аварийного режимов работы АЭС как при наличии в атмосфере облаков и осадков, так и в безоблачной турбулентной атмосфере. Радиолокационный мониторинг при любых метеорологических условиях могут осуществлять только когерентные доплеровские поляриметры, в которых информативными параметрами электромагнитной волны являются энергетические поляризационные параметры Стокса и разность фаз между ортогональными составляющими электромагнитной волны.

Целью настоящей статьи является обоснование возможности обнаружения и распознавания радиоактивного аэрозоля в безоблачной турбулентной атмосфере,

а также измерения его концентрации метеорологическими радиолокационными поляриметрами.

В настоящее время имеется незначительное число работ, в которых сделана попытка применения МРЛС для дистанционного обнаружения выбросов АЭС и других химических аэрозолей в атмосфере при различных метеоусловиях [1, 3, 4]. К сожалению, указанные публикации противоречат основным опубликованным результатам, а авторами статей не приведены результаты теоретических исследований возможности дистанционного обнаружения радиоактивного аэрозоля в атмосфере с помощью разработанного мобильного комплекса аппаратуры RIDIM. В данной статье сделана попытка теоретического обоснования возможности обнаружения, распознавания и измерения концентрации радиоактивного аэрозоля, выбрасываемого из вентиляционных труб АЭС в безоблачной турбулентной атмосфере. Будем исходить из того, что реальная атмосфера как среда, в которой распространяются электромагнитные волны, характеризуется своими радиофизическими параметрами: магнитной проницаемостью  $\mu'$ , относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon'$  и удельной проводимостью  $\gamma$ . Реальная атмосфера с точки зрения ее радиофизических свойств представляет собой полупроводящую среду и в диапазоне, используемом в МРЛС, процесс ее взаимодействия с радиоэлектронными волнами определяется значением относительной диэлектрической проницаемости. Значение  $\epsilon'$  для безоблачной турбулентной атмосферы зависит от температуры, давления, удельной влажности и аэрозольных радиоактивных образований. По данным [4], параметры факела выбросов состоят из числа  $N_s$  ионизированных аэрозолей, значение которых при технологических выбросах из труб АЭС составляет  $N_s = 10^9 - 10^{10} \text{ м}^{-3}$ , а при аварийных  $N_s \geq 10^{11} - 10^{16} \text{ м}^{-3}$ . Концентрация твердых аэрозолей при этом  $N = 500 \text{ см}^{-3}$ . За счет приведенных параметров, температурно-влажностного контраста на границе факела выбросов, капель воды и водяного пара изменяется диэлектрическая проницаемость турбулентной атмосферы над вентиляционными трубами АЭС. Если принять значение  $\epsilon'$  чистой сухой атмосферы равным единице, то при технологических и аварийных выбросах оно будет существенно отличаться от этого значения. Этот эффект используется для радиолокационного обнаружения и измерения концентрации радиоактивного аэрозоля, выбрасываемого АЭС и другими источниками ядерной энергетики.

Относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon'$  объема воздуха меняется при перемещении его по вертикали, однако это изменение возникает только тогда, когда имеет место изменение  $\epsilon'$  относительно окружающей среды. Такое изменение существенно и в случае радиоактивных выбросов АЭС. Объем воздуха с определенной диэлектрической проницаемостью назовем отражающим. Определим его диэлектрическую проницаемость  $\epsilon'$ .

Пусть на отражающий объем воздуха падает плоская монохроматическая волна. Компоненты  $E_x(t, z)$  и  $E_y(t, z)$  вектора  $\vec{E}(t, z)$  напряженности электрического поля волны в изотропной среде удовлетворяют уравнениям Максвелла, решение которых совпадает с волновым уравнением [2]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{\epsilon' \mu'}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

где  $u$  – искомая функция;  $\epsilon'$ ,  $\mu'$  – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды;  $c$  – скорость света в вакууме.

Тогда компоненты  $E_x(t, z)$  и  $E_y(t, z)$  как решения уравнения (1) имеют вид:

$$\begin{aligned} E_x(t, z) &= A_1 \cos\left(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda} + \alpha_1\right), \\ E_y(t, z) &= A_2 \cos\left(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda} + \alpha_2\right), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  – амплитуды;  $\omega = 2\pi/T = 2\pi\vartheta$  – круговая частота колебаний;  $T$  – период колебаний;  $\vartheta = c/\sqrt{\epsilon'\mu'}$  – скорость распространения электромагнитной волны в данной среде с  $\epsilon'$ ;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – начальные фазы колебаний.

Пусть в точке  $M$  находится отражающий объем воздуха с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon'$ , расстояние до которого  $z = R$  (рис. 1).

От объема  $M$  будет отражаться электромагнитная волна. Из уравнений (2) составляющие  $E_x^*(t, z)$  и  $E_y^*(t, z)$  вектора  $\vec{E}^*(t, z)$  напряженности электромагнитного поля отраженной волны определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} E_x^*(t, z) &= A_1 \cos\left(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda} + \alpha'_1\right), \\ E_y^*(t, z) &= A_2 \cos\left(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda} + \alpha'_2\right), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\alpha'_1$  и  $\alpha'_2$  – начальные фазы составляющих эхо-сигналов.

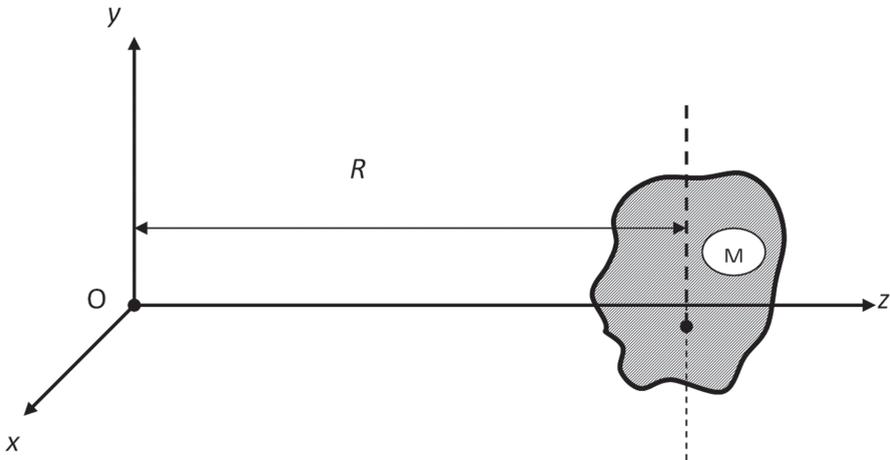


Рис. 1. Процесс отражения электромагнитной волны от объема воздуха  $M$  с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon'$

Будем считать, что процесс отражения от объема  $M$  происходит близко к зеркальному, т.е. в  $M$  прямая и отраженная волны имеют одинаковые фазы, а именно:

$$\begin{aligned}\omega t_1 - \frac{2\pi R}{\lambda} + \alpha_1 &= \omega t_1 + \frac{2\pi R}{\lambda} + \alpha'_1, \\ \omega t_1 - \frac{2\pi R}{\lambda} + \alpha_2 &= \omega t_1 + \frac{2\pi R}{\lambda} + \alpha'_2,\end{aligned}\quad (4)$$

где  $t_1 = R/v$  – время прохождения волны от МРЛС (точка  $O$ ) до объекта  $M$ .

Из условий (4) находим  $\alpha'_1$  и  $\alpha'_2$ :

$$\begin{aligned}\alpha'_1 &= \alpha_1 - \frac{4\pi R}{\lambda}, \\ \alpha'_2 &= \alpha_2 - \frac{4\pi R}{\lambda}.\end{aligned}\quad (5)$$

Будем считать, что прямая и отраженная волны линейно поляризованы. Тогда они будут складываться, образуя стоячие волны, как суперпозицию волн (2) и (3). Вычислим компоненты  $E_{xc}(t, z)$  и  $E_{yc}(t, z)$  вектора  $\vec{E}_c(t, z)$  напряженности стоячих волн:

$$\begin{aligned}E_{xc}(t, z) &= E_x(t, z) + E_x^*(t, z) = 2A_1 \cos\left(\omega t + \frac{\alpha'_1 + \alpha_1}{2}\right) \times \cos\left(\frac{2\pi z}{\lambda} + \frac{\alpha'_1 - \alpha_1}{2}\right), \\ E_{yc}(t, z) &= E_y(t, z) + E_y^*(t, z) = 2A_2 \cos\left(\omega t + \frac{\alpha'_2 + \alpha_2}{2}\right) \times \cos\left(\frac{2\pi z}{\lambda} + \frac{\alpha'_2 - \alpha_2}{2}\right).\end{aligned}\quad (6)$$

Определим разность фаз в точке  $O$  каждой компоненты (прямой и отраженной) стоячей волны. Из (2) следует, что при  $t = 0$

$$\begin{aligned}E_x(0, 0) &= A_1 \cos \alpha_1, \\ E_y(0, 0) &= A_2 \cos \alpha_2,\end{aligned}$$

при  $t = 2t_1 = 2R/v$ , где  $t_1 = R/v$  – время прохождения волны от точки  $O$  до  $M$ .

$$\begin{aligned}E_{xc}(2t_1, 0) &= 2A_1 \cos\left(2\omega t_1 + \frac{\alpha'_1 + \alpha_1}{2}\right) \cos \frac{\alpha'_1 - \alpha_1}{2}, \\ E_{yc}(2t_1, 0) &= 2A_2 \cos\left(2\omega t_1 + \frac{\alpha'_2 + \alpha_2}{2}\right) \cos \frac{\alpha'_2 - \alpha_2}{2}.\end{aligned}\quad (7)$$

Тогда разности фаз  $\Delta\Phi_x$  для компонент  $E_{cx}$  и  $E_x$  и  $\Delta\Phi_y$  для компонент  $E_{cy}$  и  $E_y$  имеют вид:

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_x &= 2\omega t_1 + \frac{\alpha'_1 + \alpha_1}{2} - \alpha_1 = \frac{2R\omega}{v} + \frac{\alpha'_1 - \alpha_1}{2} = \frac{2R}{v} \cdot \frac{2\pi}{T} + \frac{\alpha'_1 - \alpha_1}{2} = \frac{4\pi R}{\lambda} + \frac{\alpha_1 - \frac{4\pi R}{\lambda} - \alpha_1}{2} = \\ &= \frac{4\pi R}{\lambda} - \frac{2\pi R}{\lambda} = \frac{2\pi R}{\lambda} = \frac{2\pi R}{vT} = \frac{2\pi R\vartheta}{v} = \frac{2\pi\vartheta R\sqrt{\varepsilon'\mu'}}{c}, \\ \Delta\Phi_y &= 2\omega t_1 + \frac{\alpha'_2 + \alpha_2}{2} - \alpha_2 = \frac{2R\omega}{v} + \frac{\alpha'_2 - \alpha_2}{2} = \frac{2R}{v} \cdot \frac{2\pi}{T} + \frac{\alpha'_2 - \alpha_2}{2} = \frac{4\pi R}{\lambda} + \frac{\alpha_2 - \frac{4\pi R}{\lambda} - \alpha_2}{2} = \\ &= \frac{4\pi R}{\lambda} - \frac{2\pi R}{\lambda} = \frac{2\pi R}{\lambda} = \frac{2\pi R}{vT} = \frac{2\pi R\vartheta}{v} = \frac{2\pi\vartheta R\sqrt{\varepsilon'\mu'}}{c}. \end{aligned} \quad (8)$$

Так как магнитная проницаемость атмосферы  $\mu' = 1$ , то

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_x &= \frac{R\sqrt{\varepsilon'}2\pi\vartheta}{c} = \frac{R\sqrt{\varepsilon'}2\pi}{cT}, \\ \Delta\Phi_y &= \frac{R\sqrt{\varepsilon'}2\pi\vartheta}{c} = \frac{R\sqrt{\varepsilon'}2\pi}{cT}. \end{aligned} \quad (9)$$

Измерив с помощью когерентной МРЛС  $\Delta\Phi_x$  или  $\Delta\Phi_y$  и расстояние  $R$ , легко определить  $\varepsilon'$ . Разность фаз в (9) зависит только от  $R$  и  $\varepsilon'$ , так как величины  $\vartheta$  и  $c$  постоянны в процессе радиолокационного наблюдения.

Рассчитаем разность фаз  $\Delta\Phi_x$  в зависимости от изменения  $\varepsilon'$  от 1 до 30 и расстояния  $R$  от 1 км до 20 км. Полученные значения  $\Delta\Phi_x$  приведены в табл. 1–5.

Анализ результатов выполненных расчетов изменения разности фаз  $\Delta\Phi_x$  в зависимости от изменения диэлектрической проницаемости  $\varepsilon'$  для определенного расстояния от МРЛС до отражающего объема атмосферы позволяет сделать вывод о том, что с помощью когерентной МРЛ легко осуществляется измерение диэлектрической проницаемости атмосферы в районе функционирования АЭС. Значения диэлектрической проницаемости атмосферы, незначительно превышающие единицу, соответствуют отсутствию радиоактивных выбросов АЭС, а значения  $\varepsilon'$  больше двух характеризуют наличие в ней радиоактивного аэрозоля. Таким образом, можно осуществлять радиолокационный контроль за состоянием безоблачной турбулентной атмосферы в районе функционирования АЭС с помощью когерентных МРЛС, а также прогнозировать направление и скорость распространения облака радиоактивного аэрозоля [2].

Таблица 1

**Зависимость  $\Delta\Phi_x$  от  $\epsilon'$  при  $R = 1$  км**

$\epsilon'$	$\Delta\Phi_x$	$\epsilon'$	$\Delta\Phi_x$
1	1,0	16	4,0
2	1,41	17	4,12
3	1,73	18	4,24
4	2,0	19	4,35
5	2,23	20	4,47
6	2,44	21	4,58
7	2,64	22	4,69
8	2,82	23	4,79
9	3,0	24	4,89
10	3,16	25	5,0
11	3,31	26	5,09
12	3,46	27	5,19
13	3,60	28	5,29
14	3,74	29	5,38
15	3,87	30	5,47

Таблица 2

**Зависимость  $\Delta\Phi_x$  от  $\epsilon'$  при  $R = 5$  км**

$\epsilon'$	$\Delta\Phi_x$	$\epsilon'$	$\Delta\Phi_x$
1	5,0	16	20,0
2	7,07	17	20,6
3	8,65	18	21,2
4	10,0	19	21,7
5	11,15	20	22,35
6	12,20	21	22,90
7	13,20	22	23,45
8	14,10	23	23,95
9	15,0	24	24,45
10	15,80	25	25,0
11	16,50	26	25,45
12	17,30	27	25,95
13	18,0	28	26,45
14	18,70	29	26,90
15	19,35	30	27,35

Таблица 3

Зависимость  $\Delta\Phi_x$  от  $\varepsilon'$  при  $R = 10$  км

$\varepsilon'$	$\Delta\Phi_x$	$\varepsilon'$	$\Delta\Phi_x$
1	10,0	16	40,0
2	14,1	17	41,2
3	17,3	18	42,4
4	20,0	19	43,6
5	22,4	20	44,7
6	24,5	21	45,8
7	26,5	22	46,9
8	28,3	23	48,0
9	30,0	24	49,0
10	31,6	25	50,0
11	33,2	26	51,0
12	34,6	27	52,0
13	36,1	28	52,9
14	37,4	29	53,9
15	38,7	30	54,8

Таблица 4

Зависимость  $\Delta\Phi_x$  от  $\varepsilon'$  при  $R = 15$  км

$\varepsilon'$	$\Delta\Phi_x$	$\varepsilon'$	$\Delta\Phi_x$
1	15,0	16	60,0
2	21,15	17	61,8
3	25,95	18	63,6
4	30,0	19	65,4
5	33,6	20	66,9
6	36,75	21	68,7
7	39,75	22	70,35
8	42,45	23	72,0
9	45,0	24	73,5
10	47,4	25	75,0
11	49,8	26	76,5
12	51,8	27	78,0
13	47,4	28	79,35
14	56,1	29	80,85
15	58,01	30	82,2

Зависимость  $\Delta\Phi_x$  от  $\epsilon'$  при  $R = 20$  км

$\epsilon'$	$\Delta\Phi_x$	$\epsilon'$	$\Delta\Phi_x$
1	20,0	16	80,0
2	28,2	17	82,4
3	34,6	18	84,8
4	40,0	19	87,2
5	44,8	20	89,4
6	49,0	21	91,6
7	53,0	22	93,8
8	56,6	23	96,0
9	60,0	24	98,0
10	63,2	25	100,0
11	66,4	26	102,0
12	69,2	27	104,0
13	72,2	28	105,8
14	74,8	29	107,8
15	77,4	30	109,6

Отметим еще одну очень важную особенность измерения разности фаз. Используя решение уравнений Максвелла для безоблачной турбулентной атмосферы и осуществив с помощью радиолокационного метеорологического поляриметра пространственно-временную фильтрацию во временной области и реальном масштабе времени, можно обнаруживать и сопровождать радиоактивный объем на фоне естественных облаков и выпадающих осадков, что недоступно импульсной некогерентной МРЛС. При этом на выходе приемников метеорологического поляриметра будут измеряться разности фаз только от исследуемого объема, т.е.

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_{x\tau} &= \Phi_{xx} - \Phi_{xx\tau}, \\ \Delta\Phi_{y\tau} &= \Phi_{yy} - \Phi_{yy\tau}, \end{aligned} \tag{10}$$

а разность фаз двух ортогональных приемных каналов определяет набег фазы, равный элементу разрешения по дальности:

$$\Delta\Phi_{xy\tau} = \Delta\Phi_{x\tau} - \Delta\Phi_{y\tau}. \tag{11}$$

Преобразовав  $\Delta\Phi_{xy\tau}$  в амплитуду, получим фазоконтрастный сигнал на ИКО и ИДВ.

Для радиолокационного распознавания радиоактивного аэрозоля, выбрасываемого из вентиляционных труб АЭС при технологическом и аварийном режимах, нами использован Байесовский алгоритм распознавания, в котором в качестве предикторов

выбраны безразмерные энергетические параметры Стокса  $I, Q, U, V$ , определяемые с помощью следующей зависимости в линейном базисе:

$$I = E_x^2 + E_y^2; \quad Q = E_x^2 - E_y^2, \quad (12)$$

где  $I$  – полная интенсивность электромагнитной волны;  $Q$  – разность интенсивностей ортогональных компонент;  $U$  и  $V$  – корреляционные функции интенсивности ортогональных компонент и разности фаз между ними.

Для решения задачи распознавания можно использовать любой из приведенных параметров Стокса или одновременно все четыре. Тогда закон распределения, например, четвертого параметра Стокса запишется в виде:

$$\frac{W\left(\frac{V}{\varepsilon'_p}\right)}{W\left(\frac{V}{\varepsilon'_T}\right)} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_p}} e^{-\frac{(v-m_p)^2}{2\sigma_p^2}}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_T}} e^{-\frac{(v-m_T)^2}{2\sigma_T^2}}}, \quad (13)$$

где  $\varepsilon'_p, \varepsilon'_T$  – диэлектрические проницаемости при аварийном и технологическом режимах АЭС;  $m_p, m_T$  – математические ожидания параметра  $V$  для аварийного и технологического режимов работы АЭС;  $\sigma_p^2, \sigma_T^2$  – дисперсии четвертого параметра Стокса при аварийных и технологических режимах АЭС.

После соответствующих преобразований закона распределения (13) получим критериальные значения  $V_{кр}$ . Измерив с помощью радиолокационного метеорологического поляриметра четвертый параметр Стокса и сравнив его с критериальным, получим, что при всех значениях  $V_{изм} \geq V_{кр}$  АЭС работает в аварийном режиме и выбрасывает из вентиляционных труб радиоактивный аэрозоль. Если  $V_{изм} < V_{кр}$  АЭС работает в технологическом режиме.

Известно уравнение радиолокации:

$$\overline{P}_{Пр} = \Pi_M \frac{0,38\lambda^{\frac{1}{3}} a^2 \varepsilon^{-\frac{1}{3}} K_q \left(\frac{dQ}{dz}\right)^2}{R^2}, \quad (14)$$

где  $\overline{P}_{Пр}$  – средняя отраженная мощность от радиоактивного объема атмосферы, Вт;  $\lambda$  – длина волны, на которой работает МРЛС, см;  $a$  – безразмерная величина, значение которой находится в пределах от 3,2 до 4,0;  $\varepsilon$  – скорость диссипации турбулентной энергии на единицу массы,  $c^{-1}$ ;  $K_q$  – коэффициент турбулентной диффузии, величина которого для турбулентной атмосферы находится в пределах от 0,3 до 0,6  $см^2/с$ ;  $R$  – расстояние до радиоактивного объема атмосферы, км.

Учитывая равенство

$$\left(\frac{dq}{dz}\right)^2 = \left(\frac{d\varepsilon}{dz}\right)^2,$$

говорящее о том, что концентрация радиоактивного аэрозоля  $q$  на измеряемой высоте  $z$  определяется значением диэлектрической проницаемости  $\varepsilon'$ , перепишем уравнение (14) в виде:

$$\overline{P}_{\text{Пр}} = \Pi_M \frac{0,38\lambda^{-\frac{1}{3}} a^2 \varepsilon^{-\frac{1}{3}} K_\varepsilon \left(\frac{d\varepsilon'}{dz}\right)^2}{R^2}, \quad (15)$$

Следовательно, измерив  $\varepsilon'$  и решив уравнение (14) относительно  $q$ , получим значение концентрации радиоактивного аэрозоля, выбрасываемого из вентиляционных труб АЭС.

Проведенные экспериментальные радиолокационные измерения радиоактивного аэрозоля, выбрасываемого из вентиляционных труб Южно-Украинской АЭС, показали, что при ее технологическом режиме работы  $q$  находится в пределах от  $2,2 \cdot 10^{-9}$  Ки/м<sup>3</sup> до  $2,4 \cdot 10^{-9}$  Ки/м<sup>3</sup>, а при аварийном от  $1,1 \cdot 10^{-8}$  Ки/м<sup>3</sup> до  $2,39 \cdot 10^{-8}$  Ки/м<sup>3</sup>.

### **Выводы**

1. Современные метеорологические радиолокационные станции с режимом измерения поляризационных характеристик сигнала способны обнаруживать и распознавать наличие радиоактивного аэрозоля, выбрасываемого из вентиляционных труб АЭС, в безоблачной турбулентной атмосфере, а также измерять его концентрацию.
2. Существует возможность радиолокационного дистанционного контроля режимов работы АЭС.
3. Правильность сделанных выводов подтверждается экспериментальными исследованиями.

### **Литература**

1. Асанов В.Д., Белокуров А.А., Канарейкин Д.Б., Блом В.С. Результаты испытаний стационарного и мобильного комплексов аппаратуры RIDIM в режиме мониторинга атмосферных загрязнений. // Труды Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред», 1998, вып. 1, с. 194–206.
2. Готтор И.А., Жуков В.Ю., Кулешов Ю.В., Чернышев С.В., Шукин Г.Г. Допплеровский радиолокационный метод определения характеристик поля ветра и некоторые результаты. // Ученые записки РГГМУ, 2011, № 21, с. 66–75.
3. Канарейкин Д.Б., Павлов Н.Ф., Потехин В.А. Поляризация радиолокационных сигналов. – М.: Советское радио, 1966.
4. Савченко И.А., Степаненко В.Д. Возможности радиолокационного обнаружения выбросов АЭС и других источников ядерной энергетики. // Труды Всероссийского симпозиума. «Радиолокационное исследование природных сред», 1998, вып.1, с. 190–194.