

**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ  
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 504.5:628.4.047+621.039.584+536.25

**ОСОБЕННОСТИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ  
ПОВЕРХНОСТИ РАДИОАКТИВНОЙ ГАЗОАЭРОЗОЛЬНОЙ  
ПРИМЕСЬЮ ПОСЛЕ ЕЁ ПРОХОЖДЕНИЯ НАД ОБШИРНЫМИ  
АКВАТОРИЯМИ**

© 2017 А.П. Елохин, М.В. Жилина

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

Рассматривается вопрос радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности газоаэрозольной радиоактивной примесью после её прохождения над обширными акваториями в рамках гипотетической радиационной аварии. Особенность прохождения примеси над акваторией состоит в увеличении эффективной высоты факела выбросов в результате взаимодействия струи с конвективным воздушным потоком, возникающим над акваторией в летний сезон. Показано, что осаждение радиоактивной примеси в этом случае над акваторией существенно уменьшается, а над подстилающей поверхностью, которую достигает воздушный поток при своём прохождении – увеличивается. Приводится метод оценки и обоснование этого эффекта, которое требует измерения разности температур конвективного воздушного потока, или непосредственно вертикальной составляющей его скорости, или иных метеорологических характеристик, определяющих указанный параметр.

*Ключевые слова:* подстилающая поверхность, акватория, радиоактивное загрязнение, конвективный воздушный поток; состояние устойчивости атмосферы; приземная концентрация примеси.

Поступила в редакцию: 03.05.2017

Как известно, распространение примесей в атмосфере существенно зависит от гидрометеорологических условий, орографии подстилающей поверхности, трансформации веществ за счет химических и фотохимических превращений, взаимодействия с подстилающей поверхностью или изменения её шероховатости. Несомненный интерес представляет собой распространение примесей над значительным водным пространством – акваторией, характеризующейся особыми метеорологическими условиями особенно в летние месяцы.

Вследствие разницы потока явного тепла между сушей и водной поверхностью в береговой зоне развиваются бризы [1], которые в значительной степени определяют климат прибрежных районов, в частности, уменьшая дневные максимумы температуры над сушей [2]. Кроме того, давно отмечено, что бризовая циркуляция существенно влияет на перенос атмосферных аэрозолей и газовых примесей [1]. Результаты мезомасштабного численного моделирования [3] показали, что наблюдаемые превышения ПДК некоторых загрязняющих веществ в воздухе в городах, стоящих на берегу водоемов, могут быть в значительной мере обусловлены переносом примеси к источнику возвратным течением бризовой ячейки. В свою очередь, уравнение турбулентной диффузии [4], описывающее распространение примеси в атмосфере, учитывает только лишь гравитационную составляющую скорости примеси  $w$ , в то время как конвективная скорость движения частицы в атмосфере, возникающая под действием силы плавучести при сверхадиабатическом вертикальном градиенте температуры, когда отдельные элементарные объемы (воздушные частицы) оказываются теплее и, следовательно, легче окружающего воздуха, считается

пренебрежительно малой по сравнению с гравитационной [5]. Для решения задачи распространения радиоактивной примеси над большими акваториями рассмотрим принцип возникновения атмосферной конвекции и получим выражение для конвективной составляющей вертикальной скорости частицы радиоактивной примеси. Получившееся выражение учтем при оценке радиоактивного загрязнения окружающей среды (подстилающей поверхности).

На развитие конвекции в атмосфере существенно влияют процессы фазовых переходов влаги, мелкомасштабной турбулентности и радиационных потоков тепла (особенно к подстилающей поверхности). Выходной продукцией наиболее полных существующих численных моделей конвекции являются три компонента скорости ( $u$ ,  $v$ ,  $w$ ), температура ( $T$ ), массовая доля влаги ( $q_v$ ), водность облаков ( $q_c$ ), водность осадков ( $q_r$ ) и их интенсивность у поверхности Земли.

В своей основе все математические модели процесса распространения той или иной примеси опираются на полуэмпирическое дифференциальное уравнение турбулентной диффузии [4]:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u(z) \frac{\partial q}{\partial x} + v(z) \frac{\partial q}{\partial y} - w \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k(z) \frac{\partial q}{\partial z} \right) - \sigma q + f \quad (1)$$

с начальными условиями:

$$q(x, y, z, t) \Big|_{t=0} = 0 \quad (2)$$

и граничными условиями [6]:

$$\left. \begin{array}{l} q(x, y, z, t) \Big|_{x=0} = 0; \\ q(x, y, z, t) \Big|_{x=\infty} = 0; \\ q(x, y, z, t) \Big|_{z \rightarrow \infty} = 0; \end{array} \right\} \begin{array}{l} q(x, y, z, t) \Big|_{y=0} = 0; \\ q(x, y, z, t) \Big|_{y=\infty} = 0; \\ k \frac{\partial q}{\partial z} \Big|_{z=z_0} = (\beta - w)q \Big|_{z=z_0}. \end{array} \quad (3)$$

где  $q$  – искомая концентрация примеси;

$t$  – время;

$u(z)$ ,  $v(z)$ ,  $w$  – компоненты скорости ветра по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$  декартовой системы координат соответственно;

$k(z)$  – коэффициент турбулентной диффузии в  $z$ -направлении ( $z$  – высота);

$f$  – функция источника, зависящая в общем случае от координат и времени, то есть  $f = f(x, y, z, t)$ ;

$\sigma$  – величина, связанная с трансформацией (поглощением) субстанции (в общем случае)  $\sigma = \sigma(x, y, z, t)$ ;

$\beta$  – скорость сухого осаждения;

$w$  – гравитационная скорость примеси;

$z_0$  – параметр шероховатости подстилающей поверхности.

Функциональные зависимости величин продольной –  $u(z)$ , поперечной –  $v(z)$  скоростей ветра, а также коэффициента турбулентной диффузии –  $k(z)$  от высоты  $z$  от подстилающей поверхности имеют различный вид в рамках различных метеорологических моделей, например модели пограничного или приземного слоя атмосферы.

При заданных зависимостях  $u(z)$ ,  $v(z)$  и  $k(z)$  в уравнении турбулентной диффузии

(1) и (3) предполагают, что размывание примеси по оси  $Y$  осуществляется по закону Гаусса, определяя, таким образом, объёмную активность радиоактивной примеси выражением [7]:

$$q(x, y, z, t) = \frac{S(x, z, t)}{\sqrt{2\pi\sigma_y(x)}} \exp\left(-y^2/2\sigma_y^2\right), \quad (4)$$

где  $\sigma_y(x)$  – среднеквадратичное отклонение.

Представление объёмной активности радиоактивной примеси в виде выражения (4) позволяет найти функцию двух пространственных переменных и времени  $S(x, z, t)$ , что в дальнейшем может существенно упростить решение задачи. Эту функцию находят, проводя интегрирование (4), согласно выражению:

$$S(x, z, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} q(x, y, z, t) dy = 2 \int_0^{\infty} q(x, y, z, t) dy \quad (5)$$

Интегрируя уравнение турбулентной диффузии (1) в соответствии с (5), получают:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u(z) \frac{\partial S}{\partial x} + v(z) \frac{\partial S}{\partial z} - w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ k(z) \frac{\partial S}{\partial z} \right] - \sigma S + \varphi, \quad (6)$$

где  $S = S(x, z, t)$ ;  $\varphi(x, z, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y, z, t) dy = P_B \delta(x) \delta(z - h_{\text{эф}})$ ;

$h_{\text{эф}}$  – эффективная высота выброса;

$P_B$  – мощность выброса, [Бк/с];

$f = P_B \delta(x) \delta(y) \delta(z - h_{\text{эф}})$  – источник радиоактивной примеси.

В рамках модели пограничного слоя атмосферы [7],  $\sigma_y^2(x) = \bar{b} x^2 / \bar{u}^2 (1 + ax\bar{b} / k\bar{u})$ , где  $\bar{b}, \bar{k}, \bar{u}$  – усредненные по пограничному слою значения: энергии турбулентных пульсаций  $b(z)$ , коэффициента турбулентной диффузии  $k(z)$ , продольной скорости ветра  $u(z)$ . Обработывая граничные и начальные условия аналогично уравнению (3), получают:

$$\left. \begin{aligned} S(x, z, t)|_{t=0} &= 0, \\ S(x, z, t)|_{x=0} &= 0; \quad S(x, z, t)|_{x \rightarrow \infty} = 0; \\ S(x, z, t)|_{z \rightarrow \infty} &= 0; \quad k \frac{\partial S}{\partial z} \Big|_{z=z_0} = (\beta - w) S|_{z=z_0} \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где  $\beta$  – скорость сухого осаждения примеси;

$z_0$  – параметр шероховатости.

Рассматривая ИРГ как основную составляющую газоаэрозольной радиоактивной примеси, распространяющейся в атмосфере, в результате радиационной аварии на ОИАЭ отметим, что для ИРГ гравитационная скорость осаждения может быть весьма значительной, поскольку их плотность существенно больше плотности воздуха, в результате чего эти газы тонут в воздухе со скоростью, верхняя оценка которой

составляет величину  $w = \sqrt[3]{2g v_k \frac{(\rho_r - \rho_b)}{\rho_r}}$  [8],

где  $v_k$  [см<sup>2</sup>/с] – кинематическая вязкость воздуха;  
 $\rho_b$  – плотность воздуха;  
 $\rho_r$  – плотность ИРГ;  
 $g$  – ускорение свободного падения.

Аналитическое решение стационарного уравнения турбулентной диффузии (6), описывающее перенос радиоактивной примеси в атмосфере и её гравитационное осаждение с высоты  $h_{\text{эф},g} = H_T + \Delta h$  ( $H_T$  – геометрическая высота венттрубы;  $\Delta h$  приращение высоты, обусловленное начальной скоростью воздушного потока, выходящего из устья, его температурой, давлением, а также скоростью ветра в атмосфере  $u(z)$ ) [7, 9], при постоянных: продольной скорости ветра  $\bar{u}$ , коэффициенте турбулентной диффузии  $\bar{k}$ , энергии турбулентных пульсаций  $\bar{b}$ , определяемых, например, в рамках модели приземного слоя атмосферы [10], усредненных по его высоте  $H_{\text{пр}}$ , и равной нулю ( $v=0$ ) поперечной скорости ветра [9, 11-12], выглядит следующим образом:

$$S(x, z) = \frac{M_0}{2} \exp\left(-\left[\frac{\sigma x}{\bar{u}} + \frac{w^2 x}{4\bar{k}\bar{u}} + \frac{w(z-h_{\text{эф}})}{2\bar{k}}\right]\right) \left\{ \frac{\exp(-[z-h_{\text{эф}}]^2 \bar{u}/4\bar{k}x) + \exp(-[z-h_{\text{эф}}]^2 \bar{u}/4\bar{k}x)}{\sqrt{\bar{k}\bar{u}x}} - \right. \\ \left. - \frac{(2b-w)}{\bar{k}\bar{u}} \exp\left[-\frac{(2b-w)(z+h_{\text{эф}})}{2\bar{k}} + (2b-w)^2 \frac{x}{4\bar{k}\bar{u}}\right] \operatorname{erfc}\left[\left(\frac{2b-w}{2\bar{k}}\right)^2 \sqrt{\bar{k}x/\bar{u}} + \frac{(z+h_{\text{эф}})}{2} \sqrt{\bar{k}x/\bar{u}}\right]\right\} \quad (8)$$

При этом оценка объемной активности ИРГ с учётом аналитического решения стационарного уравнения турбулентной диффузии для приземного слоя атмосферы (8) будет иметь аналогичный выражению (4) вид [7]

$$A_v(x, y, z) = \frac{S(x, z)}{\sqrt{2\pi}\sigma_y(x)} \exp\left(-y^2/2\sigma_y^2(x)\right), \quad (9)$$

Исходная система уравнений атмосферной конвекции определяется системой уравнений, определяющих изменение трёхмерной скорости конвективного потока [5]:

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial x} + F_x,$$

где  $p'$ ,  $\rho$  – давление и плотность конвективного воздушного потока.

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial y} + F_y,$$

$$\frac{dw}{dt} = g\left(\frac{\theta'}{\theta} + 0,605 q_v - q_c - q_r\right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial z} + F_z,$$

где  $\theta$ ,  $\theta'$  – потенциальная температура  $\theta = T[p_0/p]^{R/C_p}$ ;  
 $R/C_p = [(\chi-1)/\chi]$ ,  $\chi = C_p/C_v$  – постоянная адиабаты.

Уравнения Пуассона:  $\frac{\partial(\bar{\rho}u)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{\rho}v)}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{\rho}w)}{\partial z} = 0$ ,

где  $\bar{\rho}$  – усреднённое значение плотности.

$$\begin{aligned} \text{Уравнений тепла и влаги: } \frac{d\theta'}{dt} &= -\frac{d\theta}{dz} w + F_T + \varepsilon_{ph} + \varepsilon_r; \\ \frac{dq'}{dt} &= -\frac{d\bar{q}_v}{dz} w + F_q - \left(\frac{dq_r}{dt}\right)_{ph}, \end{aligned}$$

где  $\bar{q}_v, q'$  – усреднённое значение массовой доли влаги в атмосфере и конвективном потоке соответственно.

Уравнения, описывающего перенос водности осадков:

$$\frac{\partial q_r}{\partial t} = \frac{1}{p_0} \frac{\partial(\bar{\rho} q_r u)}{\partial x} + \frac{1}{p_0} \frac{\partial(\bar{\rho} q_r v)}{\partial y} + \frac{1}{p_0} \frac{\partial(\bar{\rho} q_r (w + V_T))}{\partial z} + \left(\frac{dq_r}{dt}\right)_{ph},$$

где  $p_0$  – давление атмосферы;

$x, y, z$  – текущие координаты;

$F_x, F_y, F_z, F_T$  и  $F_q$  – члены, описывающие мелкомасштабную турбулентность в соответствующих уравнениях [5];

$\varepsilon_{ph}$  – притоки тепла за счет фазовых переходов влаги в атмосфере;

$\varepsilon_r$  – радиационные притоки тепла;

$(dq_r/dt)_{ph}$  – фазовые переходы влаги из облачности в осадки или из осадков в водяной пар.

Большая часть физических процессов, описываемых слагаемыми в правых частях уравнений, является микрофизическими по своей сущности. Их точное описание представляет собой самостоятельные задачи как с точки зрения построения самих физических моделей, так и численной их реализации. Поэтому в настоящее время используются приближенные методы представления мелкомасштабной турбулентности, процессов конденсации, коагуляции, испарения осадков, поглощения радиации в различных участках спектра и т.д. Эти приближенные представления называют параметризацией. В последнее время были развиты методы параметризации указанных выше мелкомасштабных процессов, которые хотя и требуют значительного количества вычислений, но могут быть реализованы на современных ЭВМ.

В силу того, что подстилающая поверхность обладает горизонтальной неоднородностью (трава, деревья, здания, водоемы и т.д.) для прогноза следовало бы рассчитывать поля конвективных течений с очень большим числом индивидуальных термиком, представляющих собой массу поднимающегося воздуха, которая при этом может перемешиваться с окружающим воздухом, но данный факт увеличивает время расчета в разы. Но поскольку существует необходимость хотя бы приближенной оценки интенсивности конвективных течений, можно воспользоваться упрощенными способами их расчета.

Предельно простой и вместе тем физически обоснованный подход к расчету конвективных движений состоит в том, чтобы с помощью имеющихся данных вертикального зондирования атмосферы оценить основную движущую силу конвекции – силу плавучести и из упрощенных уравнений динамики атмосферы рассчитать вертикальную скорость конвективных движений [13].

Пренебрегая конвективными пульсациями давления и турбулентным обменом, уравнение движения для вертикальной компоненты скорости  $w$  можно представить в

виде:

$$\frac{dw}{dt} = g \frac{(T' - T)}{T}, \quad (10)$$

где  $T'$  – температура поднимающейся воздушной частицы,  
 $T$  – температура окружающего воздуха,  
 $t$  – время,  
 $g$  – ускорение свободного падения.

В одномерном стационарном случае  $\partial w / \partial t = w \partial w / \partial z$  и тогда уравнение (46) приобретает вид:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial(w^2)}{\partial z} = g \frac{T' - T}{T}.$$

Интегрируют его по высоте от уровня  $z_0$  до уровня  $z$ , получают:

$$w_{kz}^2 = w_{kz_0}^2 + 2g \int_{z_0}^z \frac{T' - T}{T} dz, \quad (11)$$

Где индекс  $k$  означает, что рассчитывается вертикальная скорость конвективного потока. Проведя преобразование уравнения (11) с использованием уравнения статики ( $dp = \rho g dz$ ) и уравнения состояния ( $p = \rho RT$ , где  $R$  – газовая постоянная), получим следующую формулу для определения вертикальной скорости частицы на уровне  $p$ :

$$w_{kp}^2 = w_{kp_0}^2 + 2gp \int_{z_0}^z R(T' - T) d \ln p,$$

или приближенно:

$$w_{kp} = \sqrt{w_{kp_0}^2 + 2R(T' - T) \ln(p/p_0)},$$

где  $p$  и  $p_0$  – давление на нижней и верхней границах рассматриваемого слоя атмосферы,

$w_{kp_0}$  – скорость конвекции на нижнем уровне ( $p_0$ ) слоя.

Средняя скорость конвекции для частицы, поднимающейся с уровня  $p_0$  до уровня  $p$ , на котором  $(T' - T) = 0$ , в предположении, что на уровне Земли ( $p_0$ ) благодаря трению  $w_{kp_0} = 0$  определяется из следующего уравнения [5]:

$$\bar{w}_{kp} = \sqrt{R(T' - T) \ln(p/p_0)}. \quad (12)$$

На рисунке 1 представлен график для определения средней вертикальной скорости конвекции при подъеме частицы с уровней атмосферы 1000 ГПа в соответствии с формулой (12). Значения  $\bar{w}_{kp}$  по графику можно рассчитать по известным значениям  $\overline{(T' - T)}$  в слое от начального уровня подъема частицы ( $p_0$ ) до конечного уровня ( $p$ ). Как видно из рисунка 1, при одном и том же значении  $\overline{(T' - T)}$  величина  $\bar{w}_{kp}$  меняется в довольно широких пределах в зависимости от высоты уровне  $p_0$  и  $p$  и разности  $p_0 - p$ . [5]. Изобарическая поверхность 1000 гПа проходит вблизи уровня моря. Изобарическая поверхность 700 гПа располагается около высоты 3 км. Но поскольку высота пограничного слоя составляет от 100 м до 2 км в зависимости от состояния устойчивости атмосферы [7], то для решения поставленной задачи следует

определить среднюю скорость конвекции для частицы, поднимающейся с уровня Земли ( $p_0=1000$  гПа) до изобарической поверхности 800 гПа. Значения средней скорости конвекции  $\overline{w_{kp}}$  для различных значений  $(T' - T)$  приведены в табл.1. Однако, поскольку для исследования эффекта используется модель приземного слоя атмосферы, то здесь достаточно показать его наличие при значительно меньших значениях скорости конвективного потока.

Определение вертикальной конвективной скорости воздушного потока в атмосфере при распространении в ней радиоактивной газоаэрозольной примеси над большими акваториями (озера, водохранилища и т.д.) позволяет произвести более точную оценку радиоактивного загрязнения окружающей среды.

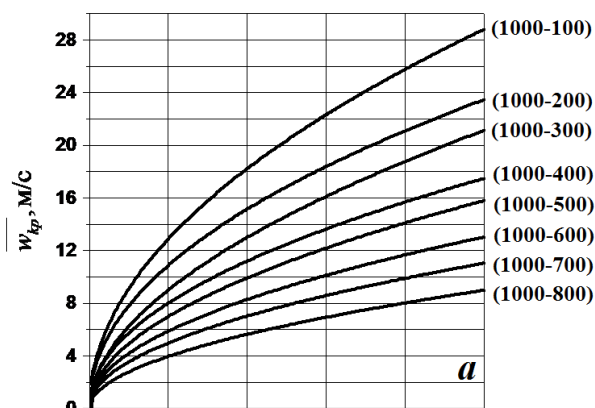


Рис. 1. – Графики для определения средней вертикальной скорости конвекции при подъёме частицы с уровней атмосферы 1000 (а), 900(б), 850(в) ГПа

Таблица 1.				
Значения средней скорости конвекции $\overline{w_k}$ для различных значений разности $(T' - T)$				
№	$p_0$ , гПа	$p$ , гПа	$(T' - T)$ , °С	$\overline{w_{kp}}$ , м/с
1	1000	900	1	13
			2	18
			3	22
			4	26
			5	29
2	1000	800	1	11
			2	15
			3	18
			4	21
			5	24
3	900	800	1	12
			2	16,5
			3	20,5
			4	24
			5	28

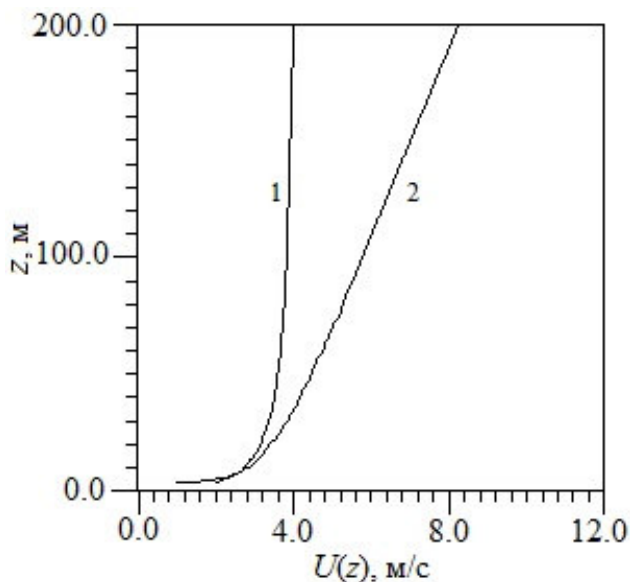


Рис. 2. – Зависимость скорости приземного ветра  $U(z)$  от высоты от подстилающей поверхности (модель приземного слоя атмосферы): 1 – неустойчивое состояние

$(L_0 = -18, v_* = 0,32 \text{ м/с}, \bar{u} = 3,8 \text{ м/с}, \bar{b} = 1,424 ;$   
 2 – устойчивое состояние  $(L_0 = 30, v_* = 0,26 \text{ м/с},$   
 $\bar{u} = 5,66 \text{ м/с}, \bar{b} = 0,097 )$ , [12]

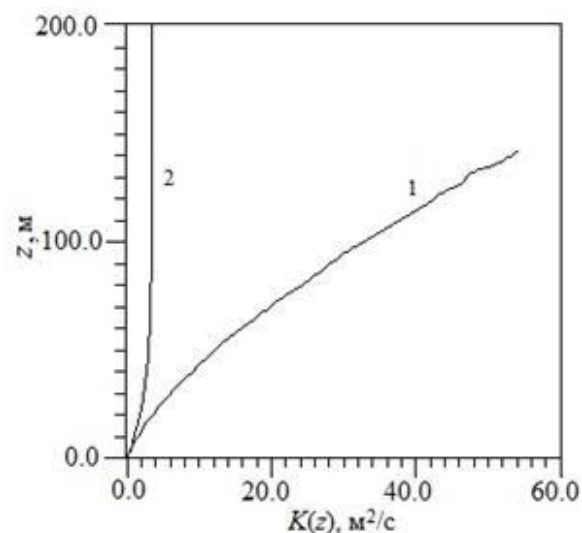


Рис. 3. – Зависимость коэффициента турбулентной диффузии  $K(z)$  от высоты от подстилающей поверхности при различных состояниях устойчивости атмосферы (в рамках модели приземного слоя атмосферы): 1 – неустойчивое состояние  $L_0 = -18, \bar{k} = 17,0 \text{ м}^2/\text{с}$ ; 2 – устойчивое состояние  $L_0 = 30, \bar{k} = 3,5 \text{ м}^2/\text{с}$ , [12]

Для решения этой задачи воспользуемся выражением (9), которое описывает перенос радиоактивной примеси в атмосфере, ограничиваясь двумя случаями устойчивости её приземного слоя (см. рис.2 и 3) [12]. Для этого в формуле (8), представляющей собой решение краевой задачи уравнения турбулентной диффузии в рамках приземного слоя атмосферы, сделаем поправку, т.е. вместо гравитационной скорости осаждения частиц  $w$  подставим выражение  $w = w - \overline{w_{kp}}$  и проведем расчёт объемной активности радиоактивной примеси (9) для неустойчивого ( $L_0 = -18$ ,  $v_* = 0,32$  м/с) и устойчивого состояний ( $L_0 = 30$ ,  $v_* = 0,26$  м/с) приземного слоя атмосферы [12], каждый из которых характеризуется своими зависимостями скорости воздушного потока  $u(z)$  и коэффициента турбулентной диффузии  $k(z)$ , где  $L_0$  – масштаб Монина-Обухова;  $v_*$  – динамическая скорость (см. рис.2, 3).

Согласно [11, 14] основными радионуклидами в выбросах АЭС и других ОИАЭ в атмосферу являются ИРГ и аэрозоли  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{60}\text{Co}$ . При этом, как отмечалось выше, основной дозообразующий вклад внешнего облучения создают ИРГ, радиационные характеристики которых приведены в [8].

В расчетах объемной активности радиоактивной примеси, распространяющейся вблизи и над большими акваториями, полагаем, что в атмосферу поступают радионуклиды  $^{85}\text{Kr}$  с общей активностью  $2 \cdot 10^5$  Ки. Это позволяет пренебречь постоянной распада  $\lambda$  в уравнении (8), в силу того, что этот радионуклид относится к долгоживущим с  $T_{1/2} = 10,7$  лет. Результаты расчетов должны:

1) Уточнить различие характера радиоактивного загрязнения подстилающей или водной поверхности для устойчивого и неустойчивого состояний атмосферы.

2) Определить особенности пространственных распределений радиоактивной примеси, распространяющейся в атмосфере, в зависимости от величины скорости конвективного подъема воздушного потока, возникающего над акваторией.

3) Подготовить методическую базу для разработки методики оценки повышения объемной активности при «забросе» радиоактивной примеси, проходящей над обширными акваториями.

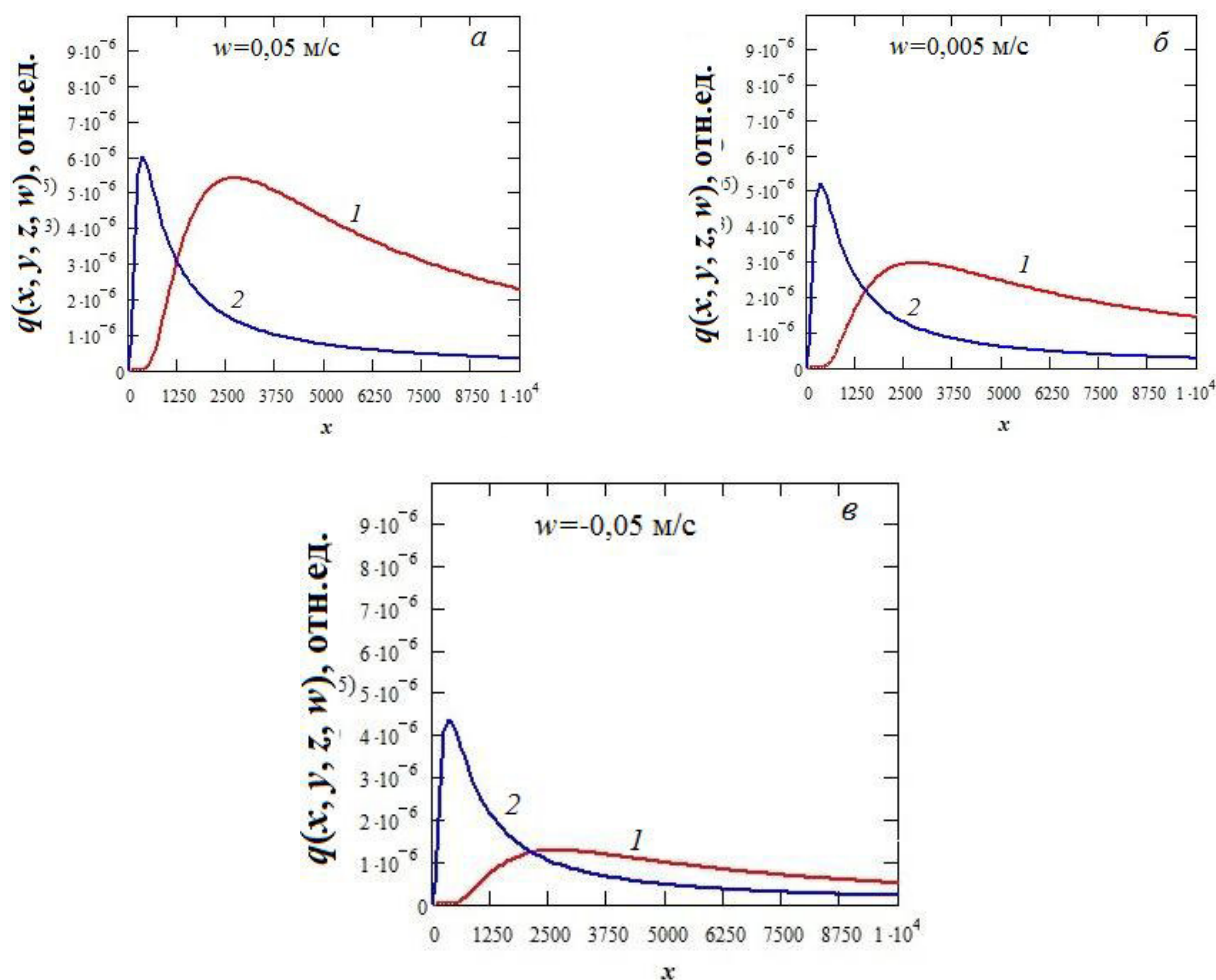
Результаты расчетов приведены на рисунке 4 (а, б, в) на высоте  $z = 1,5$  м при эффективной высоте выброса  $H_{эф} = 100$  м.

Из представленных рисунков следует, что пространственное распределение объемной активности имеет один и тот же характер. При этом максимум распределения в зависимости от состояния устойчивости атмосферы располагается на различных расстояниях от источника, т.е. при устойчивом состоянии сдвигается в сторону больших  $x$ . Распределение объемной активности вдоль оси  $x$  при устойчивом состоянии атмосферы является более пологим по сравнению с аналогичным распределением при неустойчивом состоянии атмосферы, которое резко падает, после того как достигает максимума. Эффект значительного сдвига максимума в пространственном распределении объемной активности и пологость её распределения при устойчивом состоянии атмосферы обусловлены значительно большей скоростью воздушного потока, чем при неустойчивом состоянии. Эти эффекты хорошо известны [7, 9, 12] и приводятся здесь с целью подтверждения корректности расчётов. С ростом скорости гравитационного осаждения с 0,005 м/с до 0,05 м/с сравнимой со скоростью сухого осаждения (рис. 4 а, б) величина объемной активности вблизи подстилающей поверхности увеличивается, что также не вызывает сомнений, поскольку свидетельствует о том, что величина поверхностного загрязнения радиоактивной примесью также будет расти.

На рисунке 4 в также представлены распределения объемной активности для устойчивого и неустойчивого состояний атмосферы при скорости конвективного



потока равной скорости гравитационного осаднения, но взятой с обратным знаком, т.е. при наличии воздушного потока, поднимающего шлейф радиоактивных выбросов. Несмотря на то, что характер этих распределений подобен распределениям, приведенным на рисунке 4 *a, б*, особенность распределений состоит в том, что значение объемной активности при устойчивом состоянии атмосферы в отличие от неустойчивого значительно уменьшается, чем в распределениях рисунка 4 *б*. Из последнего следует, что плотность поверхностного загрязнения подстилающей поверхности в этом случае также будет падать.



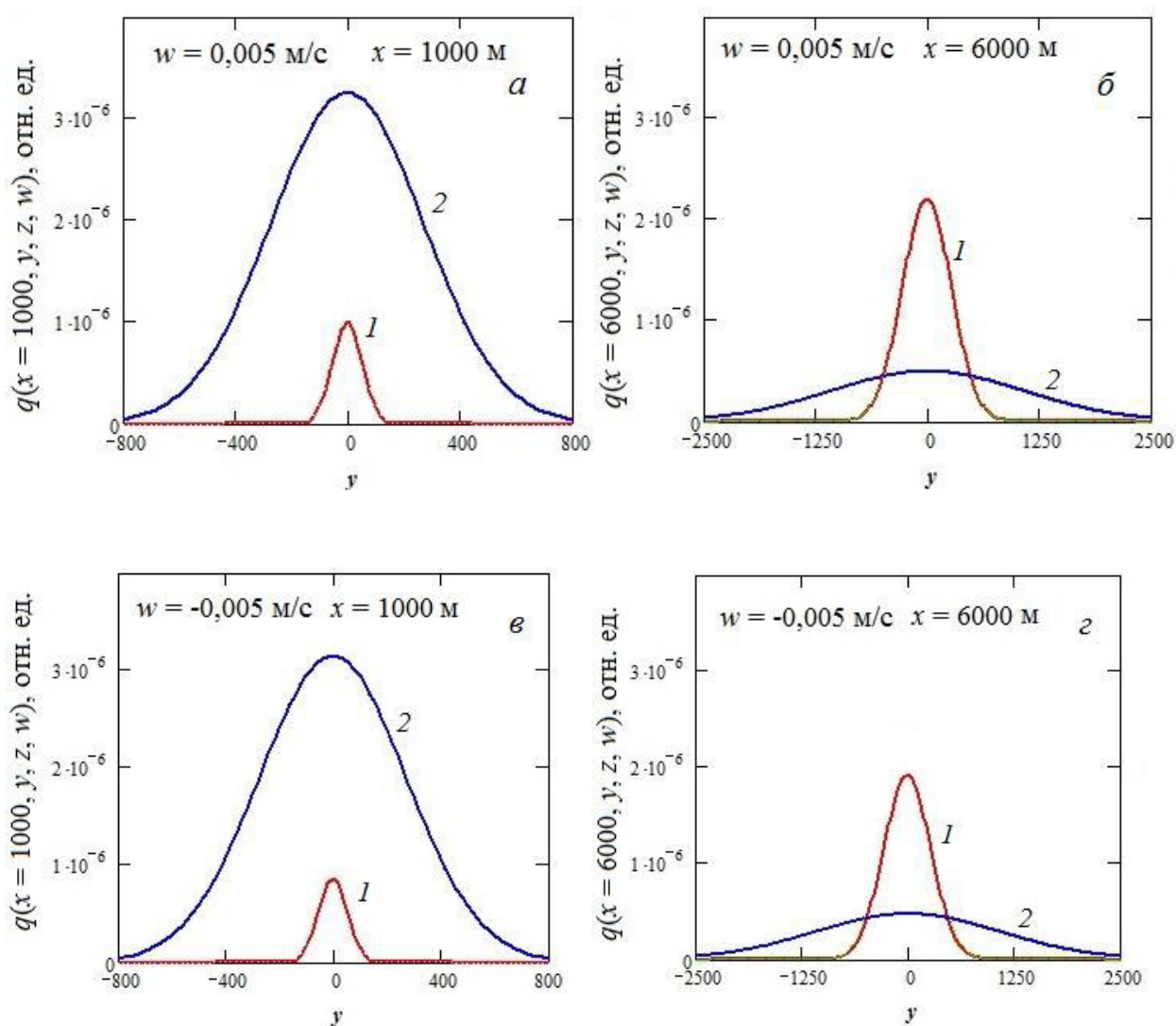
**Рис. 4.** – Осевое распределение радиоактивной примеси для устойчивого (1) и неустойчивого (2) состояний атмосферы при гравитационной скорости осаднения  $w$  радиоактивной примеси равной: 0,05 м/с (*a*); 0,005 м/с (*б*) и при наличии скорости конвективного подъёма  $w = -0,05$  м/с (*в*) на высоте  $z = 1,5$  м

Поперечные распределения объемной активности, полученные на различных расстояниях (см. рис. 5, *a – г*), не противоречат результатам, полученным выше. На небольших расстояниях от источника выбросов ( $x = 1000$  м) объемная активность в распределении 2 (неустойчивое состояние атмосферы) оказывается больше, чем в распределении 1 (устойчивое состояние атмосферы). Напротив, при больших  $x$  ( $x \geq 3000$  м) объемная активность в распределении 1 оказывается выше, чем в распределении 2. Последнее обусловлено также тем, что при большой скорости ветра радиоактивная примесь подхватывается ветром (сдувается от источника) и переносится на большие расстояния, а при малой скорости ветра основная масса оседает вблизи источника. Следует также отметить, что при скорости конвективного потока сравнимой

с гравитационной скоростью (по абсолютной величине), значение объемной активности в приземном слое ( $z = 1,5$  м) при устойчивом состоянии атмосферы оказывается меньше, чем при гравитационной, что не противоречит ранее полученным результатам. Наиболее заметно это на больших расстояниях от источника.

С ростом скорости конвективного потока осаждение радиоактивной примеси заметно уменьшается. Эти результаты приведены на рис.6 *а, б*. Сравнение результатов расчётов, приведенных на рис. 5 (*в, г*) и 6 (*а, б*) подтверждают этот вывод. Следует также обратить внимание на слабую зависимость величины объемной активности от скорости гравитационного осаждения и скорости конвективного потока, особенно, на больших расстояниях от источника при неустойчивом состоянии атмосферы, в отличие от устойчивого состояния.

Этот вывод следует из результатов расчётов как осевого, так и поперечного распределений радиоактивной примеси, представленных на рис. 5 (*а – г*) и 6 (*а, б*).



**Рис. 5.** – Поперечное распределение объемной активности приземного слоя ( $z = 1,5$  м) для различных состояний устойчивости атмосферы на различных расстояниях от источника выбросов ( $x = 1000, 6000$  м) при гравитационной скорости осаждения радиоактивной примеси  $w = 0,005$  м/с (*а, б*) и скорости конвективного потока  $w = -0,005$  м/с (*в, г*)

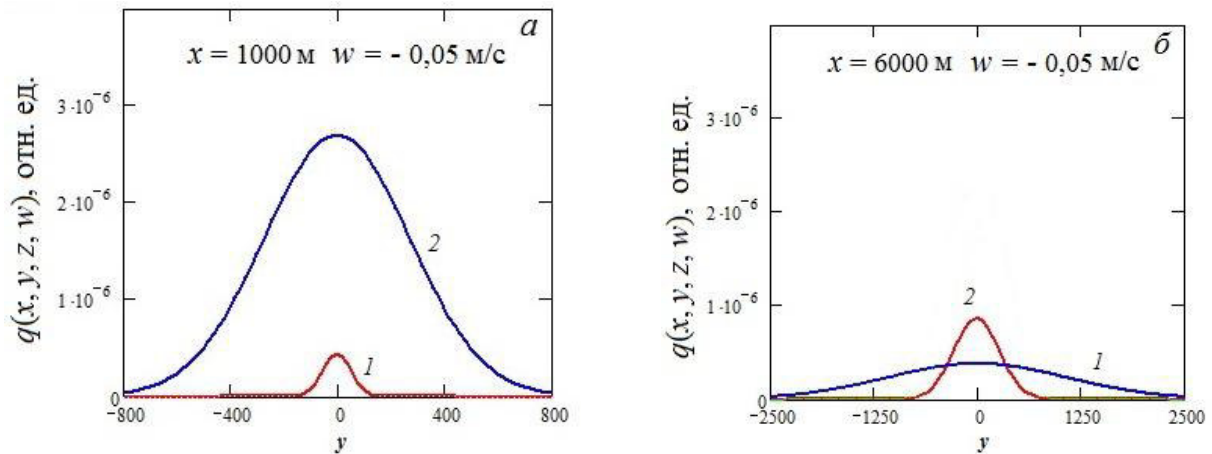


Рис. 6. – Поперечное распределение объемной активности приземного слоя ( $z = 1,5$  м) устойчивого (1) и неустойчивого (2) состояний атмосферы на различных расстояниях от источника выбросов ( $x = 1000, 6000$  м) при скорости конвективного потока  $w = -0,05$  м/с (а, б)

На рисунке 7 (а – е) приведены результаты расчётов высотного распределения объемной активности  $q(x = const, y = 0, z, w)$  для устойчивого (1, 2) и неустойчивого (3) состояний атмосферы при различной скорости конвективного потока  $w$ .

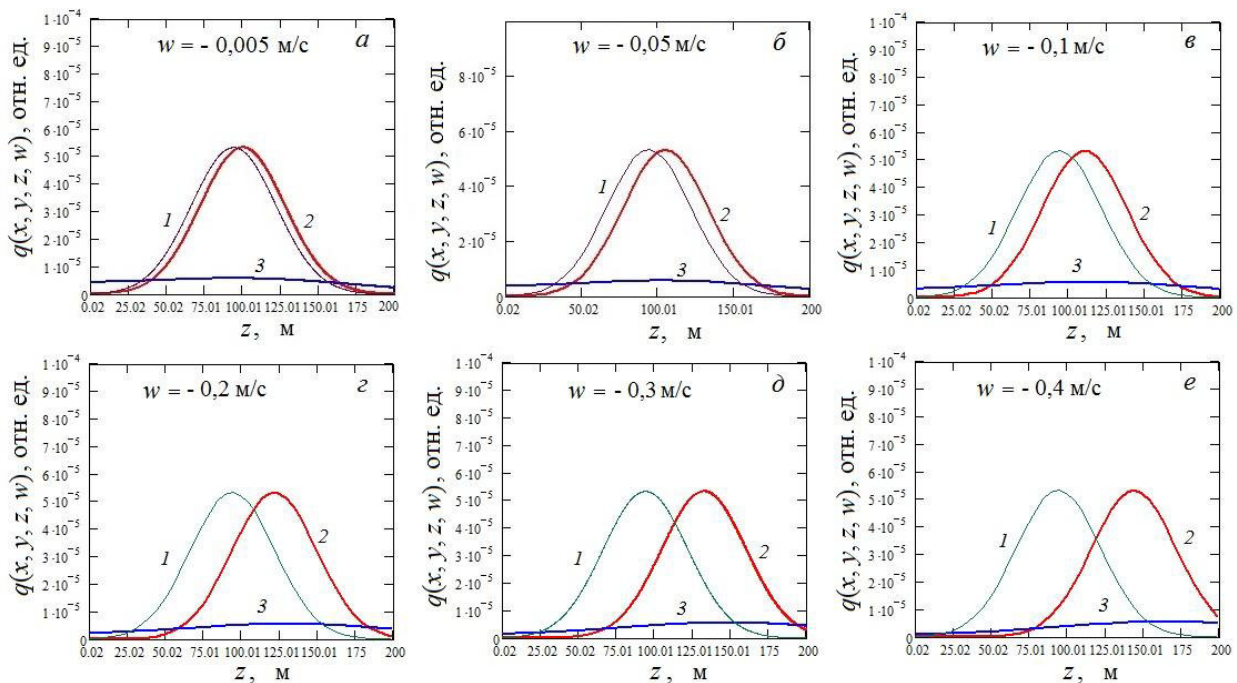


Рис. 7. – Высотное распределение объемной активности радиоактивной примеси  $q(x, y, z, w)$ , распространяющейся над обширной акваторией при различной скорости конвективного потока  $w_k$ , представленной как параметр, для устойчивого (1, 2) и неустойчивого (3) состояний атмосферы при  $y = 0$  и фиксированном  $x$ . Распределение 1 на рис. а–е получено при скорости конвективного потока равной нулю

Распределение (1), приведенное на графиках, представляет собой высотное распределение радиоактивной примеси при гравитационной скорости оседания примеси равной  $w = 0,05$  м/с на фиксированном расстоянии от источника выбросов. Из рисунков следует, что распределение характеризуется максимумом, расположенным на эффективной высоте источника выбросов, что не противоречит известным из

литературы результатам [14]. С ростом расстояния от источника выбросов высотное распределение начинает размываться, но положение максимума изменяется слабо. Кроме того, результаты расчётов показали, что с ростом скорости конвективного потока максимум распределения сдвигается в сторону больших высот (см. распределения (2) на рисунке 7 ( $a - e$ )), а значение крайне низкой объемной активности ( $q(x, y, z, w) \sim 0$ ) оказывается на более высоких уровнях по  $z$ , в чем нетрудно убедиться, сравнивая характер распределений объемной активности примеси в области небольших  $z$ . При неустойчивом состоянии атмосферы характер распределений также изменяется, но значительно менее заметно (см. распределения 3 на рисунке 7 ( $a - e$ )), чем при устойчивом.

Приведенные результаты расчёта приводят к мысли, что перенос радиоактивной примеси над поверхностью акваторий, над которой может возникать конвективный воздушный поток со значительной вертикальной скоростью, подобен *эффекту каналирования*, соответствующего переносу радиоактивной примеси в направлении распространения воздушного потока (по ветру) и незначительному осаждению на подстилающую поверхность, которое прекращается (каналирование) по мере того, как воздушный поток, в котором переносится радиоактивная примесь, достигает побережья, где скорость конвективного потока значительно уменьшается или вообще становится равной нулю, в результате чего выпадение примеси на подстилающую поверхность осуществляется обычным образом, но при эффективной высоте  $h_{эф,k}$  (см. рис. 8):

$$h_{эф,k} = h_{эф,g} + \Delta h_k, \quad (13)$$

где  $\Delta h_k$  – приращение высоты подъёма струи, обусловленной её «подбросом» конвективным воздушным потоком, возникающей над акваторией, см. рис.7 ( $a - e$ ).

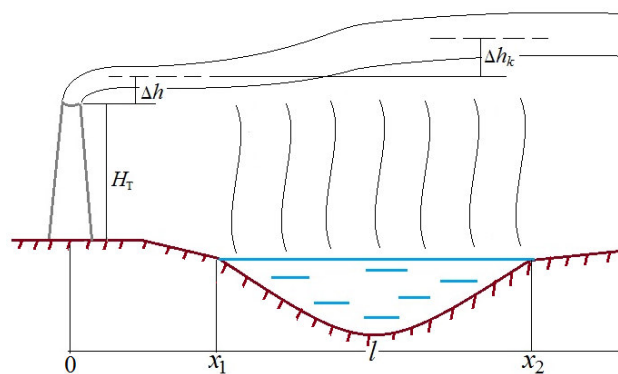
Но поскольку общая масса радиоактивных выбросов должна сохраняться, то при достижении побережья общая активность радиоактивной примеси, осаждающейся на побережье (и далее), должна быть выше, чем в случае её осаждения на подстилающую поверхность, располагающуюся на таком же расстоянии от источника выбросов, при отсутствии акватории. Кроме того необходимо учитывать, что эффективная высота факела выброса ( $h_{эф}$ ) после прохождения его над акваторией также увеличится, в чем нас убеждают результаты расчёта, приведенные на рисунке 7 ( $a, e$ ), в результате чего радиоактивная примесь может осаждаться на значительно больших расстояниях от источника выброса, определяя эффект её «заброса». Такая ситуация приводит к необходимости определения вертикальной скорости конвективного воздушного потока по разности температуры, поднимающегося воздушного потока и окружающего воздуха, (по меньшей мере, в летние месяцы) над акваторией, согласно выражения (12), наряду со стандартными метеорологическими измерениями скорости, температуры и влажности атмосферного воздушного потока, измеряемого на метеоплощадке, относящейся к АЭС и находящейся в ведении лаборатории внешней дозиметрии.

Таким образом, анализ результаты расчётов, приведённых на рисунках 4–7, приводит к следующим выводам:

1) Характер радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности существенно зависит от состояния устойчивости атмосферы, температурного режима подстилающей поверхности и температурного режима акватории, располагающихся вблизи АЭС.

2) Особенности пространственных распределений радиоактивной примеси, распространяющейся в атмосфере через акваторию на побережье, наиболее характерны

для устойчивого состояния атмосферы и, в зависимости от величины вертикальной скорости конвективного подъема воздушного потока, возникающего над акваторией, существенно уменьшают скорость осаждения и величину объемной активности в приземном слое атмосферы, но на подстилающей поверхности побережья, куда распространяется выброс конвективный эффект будет падать, а осаждение примеси – осуществляться традиционно, но эффективная высота распространения факела выбросов после его прохождения над акваторией увеличится на величину  $\Delta h_k$  (см. рис. 8), определяемой формулой (13).



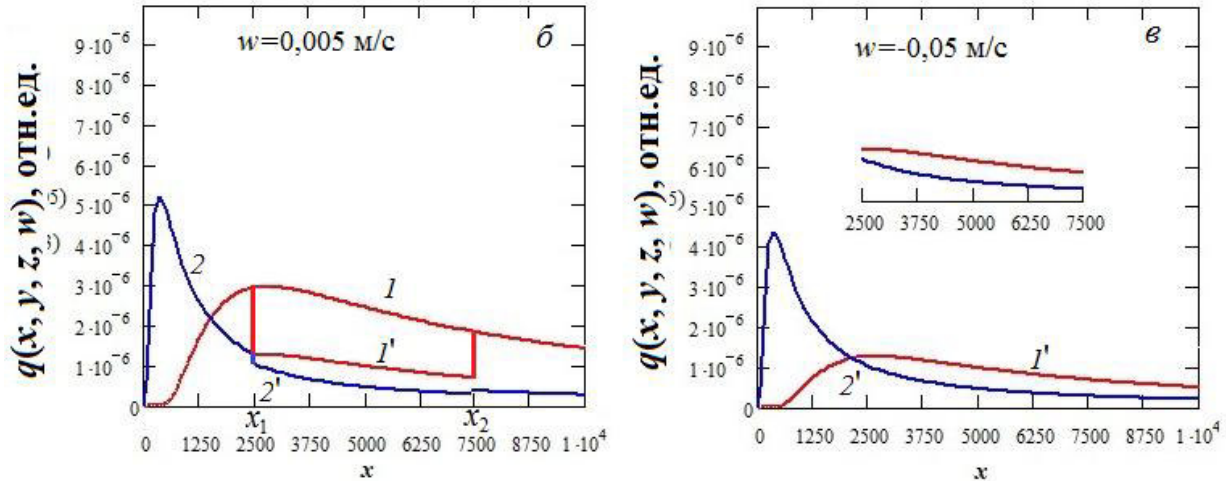
**Рис. 8.** – Иллюстрация к задаче оценки особенностей загрязнения газоаэрозольной примесью подстилающей поверхности после её прохождения над обширной акваторией

Полученные выводы дают основания получить оценку повышенных значений радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности, радиоактивной примесью распространяющейся в атмосфере, при её переносе через обширные акватории.

Для оценки величины повышенного значения радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности в указанной выше ситуации воспользуемся следующей моделью. Будем рассматривать, что стационарный источник радиоактивных выбросов располагается на левом берегу акватории, находящемся на расстоянии  $x_1$  от побережья. Ширина акватории составляет  $l$  м. и, соответственно, правый берег расположен на расстоянии  $x_2$  от источника, т.е.  $x_2 = x_1 + l$ . Наша задача состоит в оценке повышенного значения радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности, располагающейся на правом берегу, радиоактивной примесью распространяющейся в атмосфере, при её переносе через рассматриваемую акваторию, т.е. в результате её «заброса». Далее воспользуемся осевыми распределениями, приведенными на рисунке 4 (б и в) и положим  $x_1 = 2500$  м,  $l = 5000$  м и  $x_2 = 7500$  м. При этом положим, что в отсутствие акватории, т.е. на левом ( $0 \leq x \leq x_1$ ) и правом ( $x_2 \leq x \leq \infty$ ) берегах загрязнение радиоактивной примесью, перенос которой происходит слева направо от источника выбросов, осуществляется обычным образом при её гравитационном осаждении со скоростью  $w_g = 0,005$  м/с, а над акваторией ( $x_1 \leq x \leq x_2$ ) возникает вертикальная составляющая скорости конвективного воздушного потока  $w_k = -0,05$  м/с, препятствующего осаждению радиоактивной примеси (см. рис. 9 б, в).

Осевые распределения радиоактивной примеси для каждого из состояний устойчивости атмосферы приведены на рисунке 9.

Для указанной оценки ограничимся лишь устойчивым состоянием атмосферы, поскольку отличия в распределениях 2 и 2' для неустойчивого состояния слабо выражены (см. распределения 2' на рис. 9 б). Над акваторией вместо распределения 1 на интервале  $x_1 \leq x \leq x_2$  будет иметь место распределение 1' (см. рис. 9 б). Но поскольку масса примеси должна сохраняться, она должна быть выброшена на правобережье.



**Рис. 9.** – Иллюстрация к оценке повышенного значения радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности, располагающейся на правом берегу, радиоактивной примесью распространяющейся в атмосфере, при её переносе через рассматриваемую акваторию. Распределения  $I, I'$  характеризуют объемную активность в приземном слое атмосферы ( $z = 1,5$  м) при устойчивом, а  $2, 2'$  – неустойчивом состоянии атмосферы при  $y = 0$

Общую массу радиоактивной примеси, заброшенной на правый берег, найдем как разность между как бы осаждающейся (см. распределение  $I$  на рис. 9 б) на подстилающую поверхность при отсутствии акватории (распределение этой объемной активности описывается функцией  $q(x, y, z, h_{эф,г})$ ) и осаждающейся на воду, когда она проходит над акваторией  $q(x, y, z, h_{эф,к})$ .

$$\Delta q = \int_{x_1}^{x_2} dx \int_{-\infty}^{+\infty} dy \int_0^{\infty} [q(x, y, z, h_{эф,г}) - q(x, y, z, h_{эф,к})] dz. \quad (14)$$

Относительную величину этой разности найдем как отношение:

$$\delta = \frac{\Delta q}{\int_{x_2}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} dy \int_0^{\infty} q_g(x, y, z, h_{эф,к}) dz}, \quad (15)$$

где  $\int_{x_2}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} dy \int_0^{\infty} q_g(x, y, z, h_{эф,к}) dz$  – общая величина радиоактивной примеси, которая осаждается на интервале  $x_2 \leq x \leq \infty$ , причём функция  $q_g(x, y, z, h_{эф,к})$  на этом интервале рассчитывается при скорости конвективного потока  $w_k = 0$ , т.е. при его отсутствии над правобережьем, но при  $h_{эф,к}$ , определяемой формулой (13). Тогда значение объемной активности в области  $x_2 \leq x \leq \infty$  с учётом эффекта «заброса» радиоактивной примеси найдем в виде произведения:

$$q_g(x, y, z, h_{эф,к})(1 + \delta). \quad (16)$$

Очевидно, что подобный метод оценки является весьма упрощенным, но, тем не менее, дает реальную возможность получить представление об избыточной величине загрязнения подстилающей поверхности и воздушного бассейна радиоактивной примесью в случае выполнения указанных условий. Несомненно, что для более корректной оценки расчёты следует проводить, используя, по меньшей мере, модель пограничного слоя атмосферы, учитывать топографию подстилающей поверхности, особенности формирования конвективного потока, эффективную высоту его подъема, глубину проникновения на побережье, взаимодействие с воздушным потоком,

формирующим перенос примеси в атмосфере и другие метеорологические характеристики. Как отмечалось выше, для оценки скорости воздушного потока могут быть использованы измерения разности температуры над акваторией. Для этой цели можно использовать современное, но далеко не дешевое оборудование (сонары, лидары)\*, позволяющее измерять температуру [15] и трёхмерную скорость воздушного потока в 800 метровом слое атмосферы [16], начиная где-то с 20 м, или просто измерять температуру воздушной среды, используя шаропилотное зондирование атмосферы [17, 18].

Необходимо отметить, что подобные проблемы «заброса» примеси, распространяющейся через обширную акваторию, характерны не только для радиационных аварий, но, скорее всего, для штатной работы предприятий химической, черной и цветной металлургической промышленности [19]. Своевременное принятие мер, позволяющих учесть этот эффект на указанных производствах, даст возможность улучшить экологию окружающей среды, производственные условия для сотрудников указанных производств, что, в конечном итоге, приведет к повышению качества общих жизненных условий и увеличению продолжительности жизни населения РФ, проживающего в регионах, где располагаются подобные производства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурман, А. Местные ветры [Текст] / А. Бурман. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 341 с.
2. Вальтищев, Н.Ф. Мезометеорология и краткосрочное прогнозирование [Текст] / Н.Ф. Вальтищев. Сб. лекций. – Женева, 1988. – 136 с.
3. Eastman J.L., Pielke R.A., Lyons W.A. Comparison of lake-breeze model simulations with tracer data. J. Appl. Meteor., 1995, Vol. 34, pp. 1398–1418.
4. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей [Текст] / Под. ред. Ньистадта Ф.Т.М., Ван-Допа Х. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 350 с.
5. Руководство по краткосрочным прогнозам [Текст]. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – Ч.1. – С. 91.
6. Бызова, Н.Л. и др. О граничном условии в задачах рассеяния примеси в атмосфере [Текст] / Н.Л. Бызова, М.А. Кротова, Г.А. Натанзон // Метеорология и гидрология. – 1980. – №2. – С. 14–20.
7. Лайхтман, Д.Л. Физика пограничного слоя атмосферы [Текст] / Д.Л. Лайхтман. – Л.: Гидромет. изд-во, 1970. – 340 с.
8. Елохин, А.П. и др. К вопросу об использовании криогенных технологий для утилизации ИРГ и радиоактивных аэрозолей при выбросах ОИАЭ [Текст] / А.П. Елохин, М.В. Жилина, Г.Ю. Цфасман, В.Б. Воротынцев, А.Л. Шуяков, С.В. Семенов // Nuclear Measurement & Information Technologies. Ядерные измерительно-информационные Технологии. – 2012. – №3(43). – С. 4–20.
9. Елохин, А.П. Методы и средства систем радиационного контроля окружающей среды : Монография [Текст] / А.П. Елохин. – М.: НИЯУ МИФИ, 2014. – 520 с.
10. Бобылева, М.М. Расчет характеристик турбулентности в планетарном пограничном слое атмосферы // Труды Ленинградского Гидрометеорологического института. – Вып. 40 (Некоторые вопросы физики пограничного слоя в атмосфере и море). – Л., 1970. – С. 64–73.
11. Елохин, А.П. и др. Положение о повышении точности прогностических оценок радиационных характеристик радиоактивного загрязнения окружающей среды и дозовых нагрузок на персонал и население [Текст] / А.П. Елохин, М.В. Жилина, Д.Ф. Рау, Е.А. Иванов. РБ–053–10. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, М., 2010. – 79 с.

---

\*Содар – метеорологический акустический доплеровский локатор предназначен для оперативной дистанционной диагностики высотно-временной структуры области интенсивного турбулентного теплообмена в нижнем слое атмосферы над точкой наблюдения, а также измерения профилей скорости и направления ветра.

Лидары – лазерные локаторы, работающие в видимом или ближнем ИК-диапазонах длин волн. В 1960–1970 гг. лидары использовались в основном в военной технике. В настоящее время они с успехом применяются для решения многих атмосферных задач: мониторинга состояния атмосферы, измерения скорости ветра и т.п. Основой аппаратуры лидара служит импульсный CO<sub>2</sub>-лазер с поперечной накачкой, одномодовым излучением и длиной волны 10,6 мкм.

12. Елохин, А.П. Автоматизированные системы контроля радиационной обстановки окружающей среды : Учебное пособие [Текст] / А.П. Елохин. – М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 316 с.
13. Матвеев, Л.Т. Физика атмосферы [Текст] / Л.Т. Матвеев. – СПб.: Гидрометеоздат, 2000. – 701 с.
14. Гусев, Н.Г. и др. Радиоактивные выбросы в биосфере. Справочник [Текст] / Н.Г. Гусев, В.А. Беляев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 224 с.
15. Комплексные измерения климатических параметров атмосферы [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: URL: <http://researchpark.spbu.ru/equipment-geomodel-rus/1274-geomodel-izmereniye-klimaticheskikh-parametrov-atmosferi> – 03.05.2017.
16. Стерлядкин, В.В. и др. Обзор методов и средств ветрового зондирования атмосферы [Электронный ресурс] / В.В. Стерлядкин, А.Г. Горелик, Г.Г. Щукин. – Режим доступа: URL: [www.mivlgu.ru/conf/armand2013/lection-2013/pdf/lec\\_2.pdf](http://www.mivlgu.ru/conf/armand2013/lection-2013/pdf/lec_2.pdf).12 – 03.05.2017.
17. Иванов, В.Э. и др. Радиозондирование атмосферы [Текст] / В.Э. Иванов, М.Б. Фридзон, С.П. Ессяк. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2004. – С. 596.
18. Sun B., Reale A., Seidel D.J., Hunt D.C. Comparing radiosonde and COSMIC atmospheric profile data to quantify differences among radiosonde types and the effects of imperfect collocation on comparison statistics. *Journal of Geophysical Research*, 2010, Vol.115, pp. 1–16.
19. Стародубцев, И.А. и др. К вопросу об использовании автоматизированных систем контроля экологической обстановки на территориях, прилегающих к предприятиям черной, цветной металлургической и атомной промышленности [Текст] / И.А. Стародубцев, А.П. Елохин // Глобальная ядерная безопасность. – 2015. – №4(17). – С. 15–34.

## REFERENCES

- [1] Burman A. Mestnye vetry [Local Winds]. Leningrad. Pub. Gidrometeoizdat [Gidrometeoizdat], 1969. 341 p. (in Russian)
- [2] Valtishhev N.F. Mezometeorologiya i kratkosrochnoe prognozirovanie. Sbornik lekcij [Mesometeorology and Short-Term Forecasting]. Zheneva, 1988, 136 p. (in Russian)
- [3] Eastman J.L., Pielke R.A., Lyons W.A. Comparison of lake-breeze model simulations with tracer data. *J. Appl. Meteor.*, 1995, Vol. 34, pp. 1398–1418. (in English)
- [4] Atmosfernaya turbulentnost i modelirovanie rasprostraneniya primesej [Atmospheric Turbulence and Modeling of Impurity Distribution]. Pod redakciej [Edited by] Nistadt F.T.M., Van-Dop KH. Leningrad. Pub. Gidrometeoizdat [Gidrometeoizdat], 1985, 350 p. (in Russian)
- [5] Rukovodstvo po kratkosrochnym prognozam [Guide to Short-Term Forecasts]. Leningrad. Pub. Gidrometeoizdat [Gidrometeoizdat], 1986, Part 1, p. 91. (in Russian)
- [6] Byzova N.L., Krotova M.A., Natanzon G.A. O granichnom uslovii v zadachakh rasseyaniya primesi v atmosfere [On the Boundary Condition in Problems of Impurity Scattering in the Atmosphere]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology], 1980, №2, pp. 14–20. (in Russian)
- [7] Lajkhtman D.L. Fizika pogranichnogo sloya atmosfery [Physics of Atmosphere Boundary Layer]. Leningrad. Pub. Gidrometeorologicheskoe izdatelstvo [Hydrometeorological Publishing House], 1970, 340 p. (in Russian)
- [8] Elokhin A.P., Zhilina M.V., Cfasman G.Yu., Vorotyncev V.B., Shuyakov A.L., Semenov S.V. K voprosu ob ispol'zovanii kriogennykh tekhnologij dlya utilizacii IRG i radioaktivnykh ae'rozolej pri vybrosakh OIAE [The Issue of the Use of Cryogenic Technologies for the IRH Disposal and Radioactive Aerosols during OIAE Emissions] *Nuclear Measurement & Information Technologies. Yadernye izmeritel'no-informacionnye Tekhnologii*, 2012, №3(43), pp. 4–20. (in Russian)
- [9] Elokhin A.P. Metody i sredstva sistem radiacionnogo kontrolya okruzhayushhej sredy : Monografiya [Methods and Means of Radiation Monitoring Systems of the Environment: Monograph]. M. Pub. NIYaU MIFI [NRNU MEPhI], 2014, 520 p. (in Russian)
- [10] Bobyleva M.M. Raschet kharakteristik turbulentnosti v planetarnom pogranichnom sloe atmosfery [Calculation of Turbulence Characteristics in a Planetary Boundary Layer of the Atmosphere]. *Trudy Leningradskogo Gidrometeorologicheskogo institute* [Works of the Leningrad Hydrometeorological institute]. Issue 40. Leningrad. 1970, pp. 64–73. (in Russian)
- [11] Elokhin A.P., Zhilina M.V., Rau D.F., Ivanov E.A. Polozhenie o povyshenii tochnosti prognosticheskikh ocenok radiacionnykh kharakteristik radioaktivnogo zagryazneniya okruzhayushhej sredy i dozovykh nagruzok na personal i naselenie. RB-053-10. Federal'naya sluzhba po e'kologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru [Regulation on Improving the Accuracy of Predictive Estimates of Radiation Characteristics of Environment Radioactive Contamination and Dose Loads on Personnel and Population. RB-053-10. Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision]. M. 2010, 79 p. (in Russian)
- [12] Elokhin A.P. Avtomatizirovannye sistemy kontrolya radiacionnoj obstanovki okruzhayushhej



- sredy : Uchebnoe posobie [Automated Systems for Monitoring the Radiation Environment: Textbook]. M. Pub. NIYaU MIFI [NRNU MEPhI], 2012, 316 p. (in Russian)
- [13] Matveev L.T. Fizika atmosfery [Atmosphere Physics]. SPb. Pub. Gidrometeoizdat [Gidrometeoizdat], 2000, 701 p. (in Russian)
- [14] Gusev N.G., Belyaev V.A. Radioaktivnye vybrosy v biosfere. Spravochnik [Radioactive Emissions in the Biosphere. Reference book]. M. Pub. Energoatomizdat [Energoatomizdat], 1986, 224 p. (in Russian)
- [15] Kompleksnye izmereniya klimaticheskikh parametrov atmosfery [Complex Measurements of Climatic Parameters of the Atmosphere]. 2017. Available at: <http://researchpark.spbu.ru/equipment-geomodel-rus/1274-geomodel-izmereniye-klimaticheskikh-parametrov-atmosferi> (in Russian)
- [16] Sterlyadkin V.V., Gorelik A.G., Shhukin G.G. Obzor metodov i sredstv vetrovogo zondirovaniya atmosfery [Review of Methods and Means of Atmosphere Wind Intubation]. Available at: [www.mivlgu.ru/conf/armand2013/lection-2013/pdf/lec\\_2.pdf](http://www.mivlgu.ru/conf/armand2013/lection-2013/pdf/lec_2.pdf).12 (in Russian)
- [17] Ivanov V.E., Fridzon M.B., Essyak S.P. Radiozondirovanie atmosfery [Radio Intubation of the Atmosphere]. Ekaterinburg: Pub. UrO RAN [Ural Branch of the Russian Academy of Sciences], 2004, pp. 596. (in Russian)
- [18] Sun B., Reale A., Seidel D.J., Hunt D.C. Comparing radiosonde and COSMIC atmospheric profile data to quantify differences among radiosonde types and the effects of imperfect collocation on comparison statistics. *Journal of Geophysical Research*, 2010, Vol.115, pp. 1–16. (in English)
- [19] Starodubcev I.A., Elokhin A.P. K voprosu ob ispol'zovanii avtomatizirovannykh sistem kontrolya e'kologicheskoy obstanovki na territoriyakh, prilgayushhikh k predpriyatiyam chernoj, cvetnoj metallurgicheskoy i atomnoj promyshlennosti [The issue of the Use of Automated Environmental Monitoring Systems in the Territories Adjacent to the Enterprises of the Black, Non-Ferrous Metallurgical and Nuclear Industries]. *Globalnaya yadernaya bezopasnost* [Global nuclear safety]. 2015, №4(17), eISSN 2499-9733, ISSN 2305-414X, pp. 15–34. (in Russian)

## Peculiarities of Underlying Surface Pollution by Radioactive Gasoerosol Impurity after its Passage over Extensional Water Areas

**A.P. Elokhin\*, M.V. Zhilina\*\***

*National Research Nuclear University «MEPhI»,  
Kashirskoye shosse, 31, Moscow, Russia 115409*

*\* e-mail: [elokhin@yandex.ru](mailto:elokhin@yandex.ru)*

*ORCID: 0000-0002-7682-8504*

*WoS ResearcherID: G-9573-2017*

*\*\* e-mail: [mashazhilina@mail.ru](mailto:mashazhilina@mail.ru)*

*ORCID:0000-0002-7752-6727*

*WoS ResearcherID : K-5685-2017*

**Abstract** – The issue of radioactive contamination of the underlying surface with a gas-aerosol radioactive admixture after its passage over vast water areas within the framework of a hypothetical radiation accident is considered. The peculiarity of passing the admixture over the water area consists in increasing the effective altitude of the emission flare due to the interaction of the jet with the convective airflow emerging over the water area in the summer season. It is shown that the deposition of a radioactive impurity in this case decreases significantly over the water area and it increases over the underlying surface which reaches the air flow during its passage. The article gives a method of estimating and substantiating this effect, which requires measuring the temperature difference of the convective airflow, or directly the vertical component of its velocity, or other meteorological characteristics determining this parameter.

**Keywords:** underlying surface, water area, radioactive contamination, convective airflow, atmosphere stability state, surface impurity concentration.