

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING
COMMISSIONING OF EQUIPMENT
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК 551.5:621.311.25:69

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-04>

EDN HZMSUZ

Оригинальная статья / Original paper



Метеорологические особенности регионов строительства АЭС в Нигерии

К.Б. Орумо¹ , А.И. Ксенофонов² , А.П. Елохин²

¹Отдел развития атомных электростанций, Комиссия по атомной энергии Нигерии, Абуджа, Нигерия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

г. Москва, Российская Федерация

elokhin@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается вопрос применения методики оценки метеорологических характеристик в регионах, рекомендуемых к строительству АЭС в Нигерии. В качестве таковых рассматриваются регионы Герегу и Иту, с существенно различающимися метеорологическими характеристиками, поскольку они расположены в различных частях страны (первая в засушливом регионе, в центре страны, вторая – на побережье гвинейского залива в дельте реки Нигер). В рамках методики приводятся математический аппарат, позволяющий вычислять основные характеристики модели приземного слоя атмосферы. Использование этого аппарата позволило оценить общий характер метеорологических характеристик регионов (продольную скорость ветра, коэффициент турбулентной диффузии, параметр, характеризующий поперечное рассеивание примеси) и их усредненные значения, используемые в дальнейшем как некие параметры, позволяющие определить характеристики радиоактивного загрязнения окружающей среды, к которым можно отнести воздушный бассейн и подстилающую поверхность. Использование геофизической модели приземного слоя атмосферы и полученных метеопараметров позволило ответить на ряд вопросов, касающихся особенностей переноса радиоактивной примеси в атмосфере, характерных для того или другого регионов Нигерии, в которых правительство страны намерено построить атомные электростанции. С этой целью в рамках гипотетических радиационных аварий были получены осевые и поперечные распределения радиоактивной примеси в зависимости от состояния устойчивости атмосферы, которые выявили особенности распространения р/а примеси в указанных регионах. Представленные результаты расчетов целесообразно принимать во внимание при оценке размеров санитарно-защитной зоны, располагаемой вокруг АЭС в том и другом регионах, и необходимого и достаточного количества постов радиационного контроля окружающей среды при их размещении в пределах этих зон.

Ключевые слова: метеорологические характеристики регионов, геофизическая модель приземного слоя атмосферы, перенос радиоактивной примеси в атмосфере, санитарно-защитная зона АЭС, состояние устойчивости атмосферы.

Для цитирования: Орумо Б.К., Ксенофонов А.И., Елохин А.П. Метеорологические особенности регионов строительства АЭС в Нигерии. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(3):42–55. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-04>

For citation: Orumo B.K., Ksenafontov A.I., Elokhin A.P. Meteorological features of NPP construction regions in Nigeria. *Global nuclear safety*. 2024;14(3):42–55. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-04>

Meteorological features of NPP construction regions in Nigeria

Kenoll B. Orumo¹ , Alexander I. Ksenafontov² , Alexander P. Elokhin²  

¹Department of Development of Nuclear Power Plants, Nigeria Atomic Energy Commission, Abuja, Nigeria

²National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation

 elokhin@yandex.ru

Abstract. The paper considers the application of meteorological characterisation methodology to the regions recommended for NPP construction in Nigeria. Regions Geregu and Itu are considered as such, with significantly different meteorological characteristics, as they are located in different parts of the country (the former in the arid region, in the centre of the country, the latter - on the coast of the Gulf of Guinea in the Niger Delta). The methodology provides the mathematical apparatus for calculating the main characteristics of the surface layer of the atmosphere model. The use of this apparatus made it possible to estimate the general character of meteorological characteristics of the regions (longitudinal wind speed, turbulent diffusion coefficient, parameter characterising the transverse dispersion of impurity) and their averaged values used further as some parameters allowing to determine the characteristics of environmental radioactive contamination, which can include the air basin and the underlying surface. The use of a geophysical model of the surface layer of the atmosphere and the meteorological parameters obtained made it possible to answer a number of questions concerning the peculiarities of atmospheric transport of radioactive impurity characteristic of the regions of Nigeria in which the Government of Nigeria intends to build nuclear power plants. Therefore, the axial and transverse distributions of radioactive impurity as a function of atmospheric stability were obtained under hypothetical radiation accidents, which revealed the peculiarities of p/a impurity distribution in these regions. The presented results of calculations should be taken into account when estimating the size of the sanitary protection zone around NPPs in one and another region and the necessary and sufficient number of environmental radiation monitoring stations when they are located within these zones.

Keywords: region meteorological characteristics, geophysical model of the atmosphere surface layer, transport of radioactive impurity in the atmosphere, NPP sanitary protection zone, atmospheric stability state.

Введение

Задаваясь вопросом строительства АЭС в каком-либо регионе любой страны в соответствии с нормативными документами необходимо учитывать категорию объекта, его потенциальную радиационную и химическую опасность для населения и окружающей среды^{1, 2}. Согласно п.3.2.2. «Основных санитарных правил» указанного документа, при выборе места размещения радиационных объектов I–III категории должны быть оценены метеорологические, гидрологические, геологические и сейсмиче-

ские факторы, влияющие на безопасность радиационных объектов при их нормальной эксплуатации и при возможных авариях. Метеорологические исследования играют важную роль в определении размеров санитарно-защитной зоны и влияют на характер радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности в условиях радиационных аварий. Основываясь на этих требованиях рассмотрим метеорологические условия регионов «Герегу» и «Иту» в Нигерии, в которых Федеральное правительство страны предполагает строительство АЭС [1].

Основная часть

Общая характеристика метеорологических условий в указанных регионах Нигерии приводится в таблицах 1 и 2.

В целом в климате Нигерии выделяются два ярко выраженных сезона (дождливый и сухой), которые формируют основные типы воздушных масс. Один из них формируется морским экваториальным воздушным потоком, который летом приносит с побережья

¹ Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ 99/2010. – Режим доступа: <http://sanedlab.ru/wp-content/uploads/2014/09/osprb-99-2010-1.pdf> (дата обращения: 26.09.2024).

² Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10. – Режим доступа: https://stroychik.ru/wp-content/uploads/2020/04/osporb_cp2-6-1-2612-10.pdf?ysclid=1zshj4msce874398021 (дата обращения: 26.09.2024).

влажные ветры, а затем над пустыней возникает зона пониженного давления, а другой – континентальный тропический, который переносится из Сахары пыльным воздухом (сухой ветер Хармана). Сезон дождей в стране длится с марта по сентябрь, и только на юге он ненадолго прерывается в августе,

а сухой сезон приходится на остальные месяцы года (на севере он длится дольше, чем в других регионах). Если приведенная информация и даёт какое-то общее представление о метеорологических условиях в указанных регионах, тем не менее, эти данные

Таблица 1. Ежедневная выписка метеонаблюдений в Герегу штата Когги

Table 1. Daily weather statement in Gerega of Kogi State

Месяц	Темп. макс	Темп. мин.	Темп. средн.	Точка росы	Отн. осадков	Облачность	Отн. влажность	Соля-ция	Ветр. режим	Скорость ветра
Январь	35,5	16,6	26,0	20,8	0	6,8	69	4,2	140	3,0
Февраль	36,0	26,2	31,1	24,9	4,7	6,7	66,5	4,7	180	4,0
Март	35,8	25,6	30,7	25,2	4,8	6,8	69	8,2	210	4,0
Апрель	33,0	25,0	29,0	24,5	2,6	6,5	72	6,7	220	4,5
Май	30,1	24,1	27,1	23,7	6,6	7	74	4,6	180	4,0
Июнь	31,0	24,0	27,5	23,8	14,3	7	76	4,5	190	4,5
Июль	30,6	22,4	26,5	23,3	13,9	7	79	5,8	180	4,0
Август	31,2	23,5	27,4	21,8	11,4	7	83	4,4	210	4,0
Сентябрь	30,2	22,0	26,1	22,2	16,4	7	80	0	210	3,5
Октябрь	32,5	22,6	27,6	21,4	11,4	4,5	72	0	230	4,0
Ноябрь	34,5	22,0	28,3	22,3	4,5	7	65	0	230	4,0
Декабрь	33,8	18,0	25,9	16,8	0	6,2	57	0	210	3,0
Средн.	32,9	22,7	27,8	22,6	7,6	6,6	71,9	3,6	199,2	3,9

Таблица 2. Ежедневная выписка метеорологических наблюдений в Иту штата Аква Ибом

Table 2. Daily extract of meteorological observations in Itu of Akwa Ibom State

Месяц	Темп. макс	Темп. мин.	Темп. средн.	Точка росы	Отн. осадков	Облачность	Отн. влажность	Соля-ция	Ветр. реж.	Скорость ветра	Давление
Январь	33,5	19,5	26,5	17,7	0	6,5	59,0	5,7	120	3,5	13,8
Февраль	35,0	23,2	29,1	17,9	0,7	7	44,5	3,7	80	4,0	13,9
Март	32,5	22,6	27,6	18,6	6,1	7	62	3,2	180	3,0	13,7
Апрель	31,5	21,4	26,5	19,4	3,8	7	66	3,2	210	4,0	12,2
Май	31,2	23,1	27,2	24,0	1,5	7	84	4,2	190	2,8	13,1
Июнь	31,5	22,6	27,1	23,3	4,6	6,3	85	5,5	170	3,0	14,8
Июль	29,5	22,6	26,1	21,1	4,3	7	84	4,8	230	4,0	17,1
Август	27,5	23,0	25,3	24,8	5,2	7	93	1,5	240	3,5	16,4
Сентябрь	29,4	21,8	25,6	21,7	2,0	4,5	78	3,1	200	3,0	14,4
Октябрь	29,7	22,6	26,2	24,2	2,4	7	85	3,6	180	2,5	13,5
Ноябрь	29,5	23,0	26,3	24,3	2,1	7	80	3,8	240	0,5	13,1
Декабрь	33,5	22,0	25,9	21,0	0	6,5	60	5	100	0,6	13,5
Средн.	31,2	22,3	26,8	21,5	2,73	6,7	73,4	3,9	178,5	2,9	14,1

не могут быть применены для построения метеорологической модели, которую можно было бы использовать для оценок радиоактивного загрязнения окружающей среды (воздушного бассейна и подстилающей поверхности) в случае радиационных аварий на АЭС, в том или другом регионах. Поэтому авторы считают целесообразным воспользоваться результатами ряда работ ³

[2,3], в которых были описаны модели приземного и пограничного слоёв атмосферы,

³ Елохин А.П., Жилина М.В., Рау Д.Ф., Иванов Е.А. Положение о повышении точности прогностических оценок радиационных характеристик радиоактивного загрязнения окружающей среды и дозовых нагрузок на персонал и население. РБ – 053 – 09. Режим доступа: <https://docs.secnrs.ru/documents/rbs/%D0%A0%D0%91-053-10/RB053-10.pdf> (дата обращения: 26.05.2024).

используемых в работах [4–6] для описания метеорологических характеристик при строительстве в регионах любых объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) [4] и при строительстве АЭС в Иордании [5] и Иране [6]. Наиболее простое решение задачи определения метеорологических условий регионов, выделенных под строительство АЭС в Нигерии можно найти, используя модель приземного слоя атмосферы, достаточно подробно рассмотренную в работах [2], [3]. Приземный слой атмосферы играет важнейшую роль в формировании метеорологических процессов во всем пограничном слое атмосферы и характеризуется наиболее резкими изменениями метеорологических элементов (скорости ветра, температуры, влажности) с высотой. В этом слое выделяют следующие особенности [2]:

1. Потоки количества движения и тепла в приземном слое считают постоянными.

2. Ускорение силы Кориолиса не оказывает влияния на происходящие в приземном слое процессы и не может входить в решение соответствующих уравнений. Кроме того, рассматривают случай, когда выполняются условия стационарности и горизонтальной однородности подстилающей поверхности. Система уравнений, описывающая состояние приземного слоя, состоит из уравнений*:

- динамики (1)

$$k_n \frac{du_n}{dz_n} = \eta_n = 1; \quad (1)$$

- теплопроводности (2):

$$\alpha_T k_n \frac{dq_n}{dz_n} = \eta_n = 1; \quad (2)$$

- баланса кинетической энергии флуктуации с учетом ее постоянства в области малых z (3):

$$1/k_n - 1 - b_n^2/k_n = 0; \quad (3)$$

- уравнения, связывающего среднюю кинетическую энергию турбулентных пульсаций b_n с коэффициентом турбулентной диффузии k_n и масштабом турбулентных пульсаций l_n (4):

$$k_n = l_n \sqrt{b_n}, \quad (4)$$

а также уравнения для масштаба турбулентных пульсаций (5):

$$l_n = 2 \cdot \frac{k_n(1-k_n)}{2-k_n} \cdot \frac{dz_n}{dk_n}, \quad (5)$$

где $z_n = z/L$ – безмерная высота; L – масштаб Монина–Обухова (масштаб приземного слоя); u_n – безразмерная скорость ветра ($u = v \cdot u_n/k$; v^* – динамическая скорость, $k = 0,4$ – постоянная Кармана); $\alpha_T = k_T/k$ – отношение коэффициента турбулентности для тепла и количества движения (рис. 1).

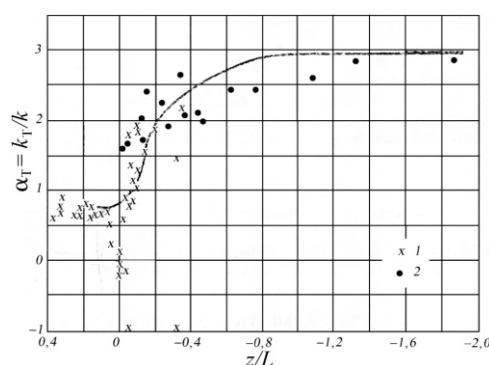


Рисунок 1. Зависимость отношения коэффициентов турбулентности для тепла и количества движения α_m от безразмерной высоты z/L [3]:
1 – Раунд Хилл; 2 – Австралия

Figure 1. Dependence of the turbulence coefficient ratio for heat and quantity of motion α_m on the dimensionless height z/L [3]: 1 – Round Hill; 2 – Australia

Исключая из уравнений (3), (4) величины l_n и b_n , получают уравнение $dk_n/dz_n = 2(1-k_n)^{5/4}/(2-k_n)$, решение которого при условии $\lim_{z_n \rightarrow \infty} (k_n) = 0$ дает (6), (7):

$$z_n = 2/y - 2y^3/3 - 4/3 \quad (6)$$

$$k_n = 1 - y^4, \quad (7)$$

где y – вычисляемые (см. ниже) значения функции y для различных z_n . При этом для u_n , b_n , l_n получают (8)–(13):

$$u_n = 2/y + 2 \arctg(y) + \ln(|1-y|/|1+y|) + C_1; \quad (8)$$

$$b_n = y^2; \quad (9)$$

*Все уравнения приводятся в безразмерных величинах.

$$l_n = (1 - y^4) / y; \quad (10)$$

$$q_n = \int_{z_{0n}}^{z_n} \frac{dz_n}{\alpha_T k_n}; \quad (11)$$

$$k(z) = k \cdot v_* L k_n; \quad u(z) = v_* u_n / k; \quad (12)$$

$$b = v_*^2 c^{-1/2} b_n = 4,6625 v_*^2 b_n.$$

$$L = - \frac{v_*^3}{k \cdot (g/T_0)(P_0/\rho c_p)}, \quad (13)$$

где g – ускорение свободного падения,
 T_0 – температура на уровне земли.

Уравнение (6) относительно y имеет аналитическое решение Феррари и зависит от z_n следующим образом [3] (14):

$$y = \begin{cases} \frac{-\sqrt{A+B} + \sqrt{(A+B)-4 \cdot \left[\frac{A+B}{2} - \sqrt{\left(\frac{A+B}{2} \right)^2 + 3} \right]}}{2}, & z_n \geq -\frac{4}{3} \\ \frac{\sqrt{A+B} + \sqrt{(A+B)-4 \cdot \left[\frac{A+B}{2} - \sqrt{\left(\frac{A+B}{2} \right)^2 + 3} \right]}}{2}, & z_n \leq -\frac{4}{3} \end{cases}, \quad (14)$$

$$\text{где } A = \sqrt[3]{\frac{(2+1,5z_n)^2}{2} + \sqrt{64 + \frac{(2+1,5z_n)^4}{4}}}, \quad B = \sqrt[3]{\frac{(2+1,5z_n)^2}{2} - \sqrt{64 + \frac{(2+1,5z_n)^4}{4}}}.$$

При $z = -4/3$ $A = 2$, $B = -2$, $A + B = 0$ $y = \sqrt[4]{3}$.

Таким образом, зависимости скорости ветра $u(z)$ и коэффициента турбулентной диффузии $k(z)$ в рамках модели приземного слоя атмосферы могут быть успешно найдены, если известны параметры приземного слоя v_* и L .

Методика обработки градиентных наблюдений

В рамках модели приземного слоя атмосферы вычисления указанных параметров проводят следующим образом [2]. Измеряют скорость ветра и температуру на двух уровнях z_1 и z_2 , используя значения высот, меньшая из которых должна составлять не менее 10 м, поскольку при измерении скорости ветра на малых высотах возникает возмущение профиля ветра за счет влияния изменения шероховатости подстилающей поверхности [8]. Далее находят разности скорости ветра $Du = u(z_1) - u(z_2)$ и потока тепла $Dq = \theta(z_1) - \theta(z_2)$. Используя формулу (13) и выражения для скорости ветра и температуры через безразмерные величины: $u = v_* u_n / k$,

$q = -q_* q_n / k$, $\theta_0 = P_0 / c_p v_*$ (θ – потенциальная температура $\theta = -\theta_* \cdot \theta_n / k$; $q_* = P_0 / (\rho \cdot c_p v_*)$, P_0 – поток тепла, ρ – плотность воздуха, c_p – удельная теплоемкость), с одной стороны, получают выражение для динамической скорости v_* , определяемой через отношение разностей измеряемых и вычисляемых значений скорости ветра, на каждой безразмерной высоте z_n по формуле (8) в виде: $k(Du/Du_n) = v_*$, а с другой, ее квадрат: $v_*^2 = k^2 L(g/\theta_0)(Dq/Dq_n)$, пропорциональный отношению разности измеряемых и вычисляемых значений потоков тепла, также измеряемых и вычисляемых на заданных высотах. При этом разность тепловых потоков Dq_n на двух различных высотах при использовании формулы (11) вычисляется по формуле $Dq_n = -[q(z_{n1}) - q(z_{n2})] = -\int_{z_{n1}}^{z_{n2}} \frac{dz_n}{\alpha_T k(z_n)}$. Таким образом, разность квадратов динамической скорости v_* определится выражением (15):

$$(Du/Du_n)^2 - (g/T_0) \cdot L \cdot (Dq/Dq_n) = 0, \quad (15)$$

где u_n, q_n – значения функций, вычисленных для различных z_n ($z_n = z/L$) по приведенным выше формулам, а Du_n, Dq_n – их разность. Поскольку Du, Dq – измеряемые величины, а Du_n, Dq_n зависят от L , то выражение (15) есть неявная функция L , равенство нулю которой будет иметь место только при определенном значении L , для нахождения которого задаются некоторым значением $L_{\max}$ и варьируют его, например: $L_i = DL \cdot i$, $i = 1, 2, 3, \dots, N$, $DL = L_{\max}/N$, до тех пор, пока разность $\Delta = \left| (Du/Du_n)^2 - (g/T_0) \cdot L \cdot (Dq/Dq_n) \right|$ не будет равна нулю или ее относительная погрешность (16):

$$\varepsilon = \left| \frac{(Du/Du_n)^2 - \left(\frac{g}{T_0} \right) \cdot L \cdot (Dq/Dq_n)}{(Du/Du_n)^2} \right| \cdot 100\% \quad (16)$$

не будет минимальной (в пределе $\varepsilon = 0$). Найденное значение L^* , при котором ε минимальна, и определит искомое значение масштаба приземного слоя L , определяемого через метеорологические параметры: $L = DLi^*$. Определив L и пересчитав z_n при фиксированных z_1 и z_2 , т.е. пересчитав Dq_n, Du_n , найдем v'^* (17):

$$v'^* = k(Du/Du_n). \quad (17)$$

Приведенный метод расчета наиболее целесообразен при расчете метеопараметров на ЭВМ. Поскольку параметр L может быть как $L > 0$, так и $L < 0$ (при $L = 0$ режим движения теряет турбулентный характер [3]), то все возможные вариации L_i должны проводиться по формуле: $L_i = DL(N + L - i)$, $i = 1, 2, 3, \dots, N, N + 1, N + 2, \dots, 2N + 1$. В этом случае, если ε_i при некотором i будет минимальным, то параметр L_i вычисляются по последней формуле. Последнее позволит учесть различную стратификацию слоя атмосферы, задаваемую температурным режимом. Для расчета $u_n(z_n), k_n(z_n)$ при найденном L целесообразно пользоваться не таблицами, представленными в работе [2], а аналитическим выражением для $y(z_n)$ как функции z_n (14) [3]. Безразмерные значения этих параметров определены формулами (8),

(7), а размерные – (12). Выбор u_n, q_n по заданному z_n осуществляется следующим образом: при заданном z_n находят $y(z_n)$, по которому находят соответствующие значения u_n или q_n . Аналогично находят значения u_n, q_n для другого значения z_n (другого уровня), вычисляя затем разности $\Delta u_n, \Delta q_n$. После определения параметров L, v^* значения $u(z), k(z)$ находят по формуле (12). Постоянную c_1 в формуле (8) находят при $z = z_0$ и $u(z)|_{z=z_0} = 0$. Значения метеопараметров, характерных для регионов Герегу и Иту в Нигерии в зависимости от сезонов, приведены в таблицах 3 и 4.

Результаты расчетов метеорологических характеристик

Рассчитанные значения метеопараметров v^* и L и средние величины высотных распределений $u(z), k(z)$ и $b(z)$ для выделенных условий в регионах Герегу и Иту в Нигерии приводятся в таблице 5, а для двух различных сезонов в виде графиков на рисунках 2–9.

При расчетах метеопараметров использовались два уровня 30 м и 57 м, а значение температуры уровня земли для соответствующих времен года брали из таблиц 3 и 4. Краткий анализ содержания данных этих таблиц показывает, что основное состояние устойчивости атмосферы можно отнести как к слабоустойчивому. На это указывает небольшая скорость ветра на высоте $z_1 = 57$ м, невысокая разность по температуре и скорости ветра по высоте. На этом, достаточно однородном фоне, наиболее ярко выглядят данные таблицы по региону Герегу в сухой сезон в марте, в котором разность температуры и скорости ветра весьма значительны. В этом месяце характер состояния устойчивости атмосферы соответствует наиболее устойчивому, которое по своим характеристикам существенно отличается от подобных параметров в иные месяцы года (см. рис. 2). Результаты расчета показывают, что минимум $\varepsilon(i) = \varepsilon_{\min}$ составляет 2,69 при $i = 33$. Вторая характерная особенность, представляющая собой «зигзаг» в области индексов $i \sim 70 - 76$, обусловлена условием расчета, возникающим при переходе от $L_i > 0$ к $L_i < 0$, которую

Таблица 3. Средние метеорологические данные для проектируемой АЭС в регионе Герегу (Штата) Когги, Нигерия (Nimet)**Table 3.** Average meteorological data for the projected NPP in the Geregu (State) region of Kogi, Nigeria (Nimet)

Месяц	Время года	Температура на высоте 57 м, °C	Скорость ветра на высоте 57 м, м/с	Направление ветра на высоте 57 м, °C	Температура на высоте 40 м, °C	Скорость ветра на высоте 40 м, м/с	Направление ветра на высоте 40 м, град	Температура на высоте 30 м, °C	Скорость ветра на высоте 30 м, м/с	Направление ветра на высоте 30 м, °C	Температура на высоте 0 м, °C
Январь	Сухой сезон	32,5	3,5	181,3	30,3	2,9	146,7	30,5	2,7	137,8	28,3
Февраль		36,2	3,2	197,6	36,0	2,7	155,4	34,2	2,4	150,2	28,4
Март		36,0	5,4	260,3	35,8	4,1	238,8	33,0	3,1	197,8	28,9
Апрель	Сезон дождей	32,2	5,4	285,3	33,0	2,9	252,2	30,2	4,1	216,8	28,8
Май		30,4	4,7	281,6	30,1	3,5	250,2	29,4	3,6	214,0	28,7
Июнь		29,1	4,1	279,3	31,0	3,2	248,9	30,1	3,1	212,3	27,1
Июль		30,0	4,6	301,3	28,6	4,5	260,7	28,0	3,5	228,9	26,7
Август		27,6	4,5	294,2	26,2	2,4	256,9	26,6	3,4	223,6	26,0
Сентябрь		28,7	3,7	292,0	30,2	3,0	255,7	27,7	2,8	221,9	26,1
Октябрь		29,9	3,0	241,9	28,5	2,6	229,0	26,9	2,3	183,8	25,6
Ноябрь	Сухой сезон	33,1	3,5	217,0	30,5	2,9	215,7	29,1	2,7	164,9	28,1
Декабрь		33,3	3,5	190,9	32,8	2,8	151,8	30,3	2,7	145,1	28,3

Таблица 4. Средние метеорологические данные для проектируемой АЭС Сайт в Иту штата Аква Ибом, Нигерия (Nimet)**Table 4.** Average meteorological data for the projected NPP Site at Itu in Akwa Ibom State, Nigeria (Nimet)

Месяц	Время года	Температура °C на высоте 57 м,	Скорость ветра на высоте 57 м, м/с	Направление ветра на высоте 57 м, °C	Температура °C на высоте 40 м	Скорость ветра на высоте 40 м, м/с	Направление ветра на высоте 40 м, (град)	Температура на высоте 30 м, °C	Скорость ветра на высоте 30 м, м/с	Направление ветра на высоте 30 м, °C	Температура °C на высоте 0 м
Январь	Сухой сезон	28,5	3,5	150	26,0	3,0	130	24,0	2,5	120	23,5
Февраль		29,0	3,8	130	27,0	3,4	110	26,0	3,0	100	25,0
Март		28,9	3,0	200	27,7	2,1	200	26,2	2,0	190	24,9
Апрель	Сезон дождей	27,5	4,0	220	25,5	2,8	210	23,5	2,6	200	24,5
Май		26,2	2,8	190	24,2	2,5	170	22,2	2,2	160	23,2
Июнь		25,1	3,0	185	25,5	2,0	165	25,0	2,0	155	24,1
Июль		24,1	3,7	230	24,5	3,1	220	22,5	2,4	210	23,1
Август		25,3	3,5	240	23,3	2,8	215	22,3	2,3	205	22,0
Сентябрь		24,6	3,0	210	22,6	2,0	200	21,2	2,0	190	20,6
Октябрь		25,2	2,5	190	25,5	1,9	170	24,0	1,7	160	23,2
Ноябрь	Сухой сезон	26,0	1,5	240	24,0	1,2	200	23,0	1,2	200	22,0
Декабрь		27,9	1,6	110	25,4	1,3	100	24,0	1,2	100	24,6

Таблица 5. Средние значения метеорологических параметров, определяющих перенос субстанции в атмосфере в регионах Герегу и Иту (Нигерия)**Table 5.** Mean values of meteorological parameters determining atmospheric transport of substance in the Geregu and Itu regions (Nigeria)

Месяц	Сезон	V_*	L	$\bar{u}$	$\bar{k}$	$\bar{b}$
Март	Сухой (Гер)	0,149	38	3,175	1,382	0,06
Октябрь	Сухой (Гер)	0,141	1,714	0,56	0,017	0,005
Апрель	Сезон дождей (Иту)	0,03	1,0	1,692	0,034	0,052
Ноябрь	Сухой (Иту)	0,036	4,0	0,567	0,035	0,0035

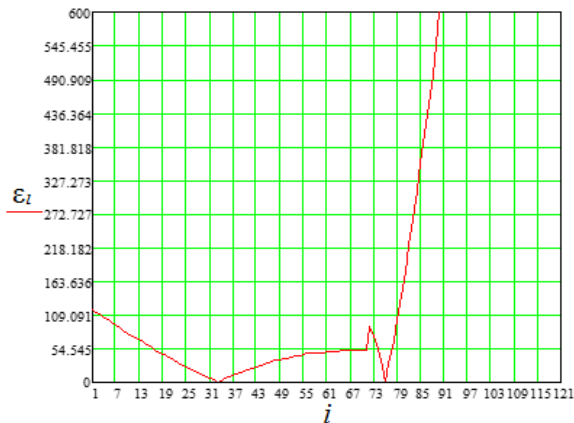


Рисунок 2. Оценка масштаба приземного слоя атмосферы L по индексу i , в котором $\varepsilon(i)$ минимально. Регион Герегу, март (сухой сезон)
Figure 2. Estimation of the scale of the surface atmospheric layer L at index i , where $\varepsilon(i)$ is minimised. Geregu region, March (dry season)

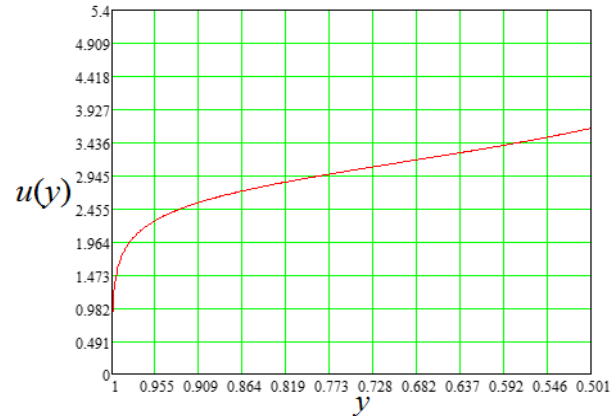


Рисунок 3. Зависимость скорости ветра от высоты. Регион Герегу, март (Сухой сезон)
Figure 3. Dependence of wind speed on altitude. Geregu region, March (Dry season)

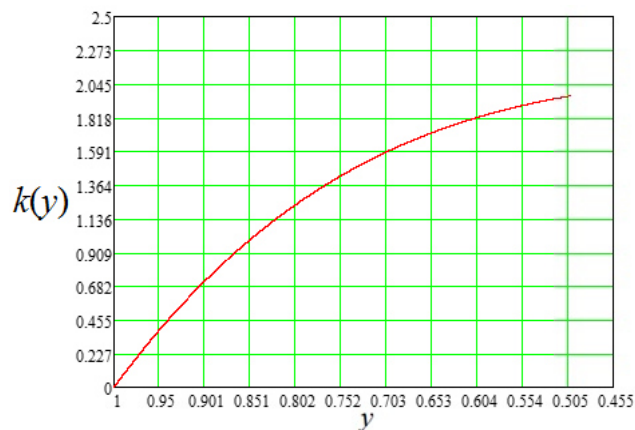


Рисунок 4. Зависимость коэффициента турбулентной диффузии от высоты. Регион Герегу, март (сухой сезон)
Figure 4. Dependence of the turbulent diffusion coefficient on altitude. Geregu region, March (dry season)

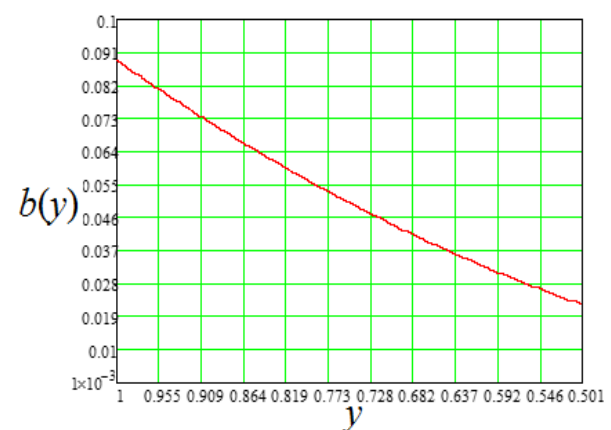


Рисунок 5. Зависимость энергии турбулентных пульсаций от высоты. Регион Герегу, март (сухой сезон)
Figure 5. Dependence of turbulent pulsation energy on altitude. Geregu region, March (dry season)

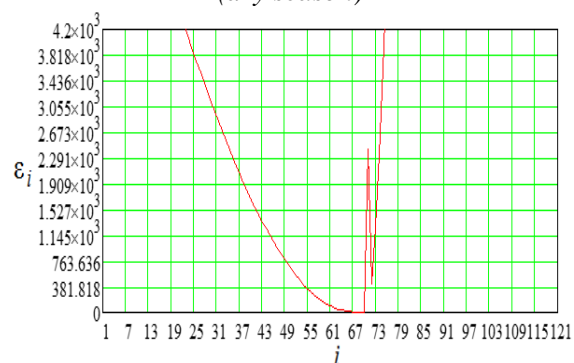


Рисунок 6. Оценка масштаба приземного слоя атмосферы L по индексу i , в котором $\varepsilon(i)$ минимально. Регион Иту, апрель (сезон дождей)
Figure 6. Estimation of the atmospheric surface layer scale L at index i , where $\varepsilon(i)$ is minimised. Itu region, April (rainy season)

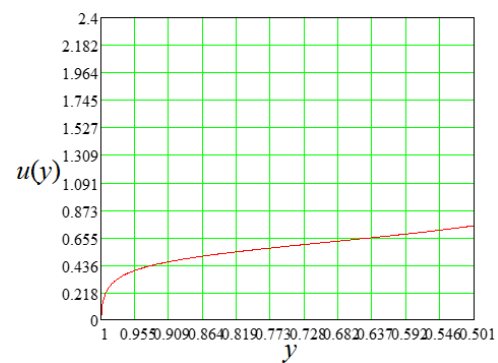


Рисунок 7. Зависимость скорости ветра от высоты. Регион Иту, апрель (сезон дождей)
Figure 7. Dependence of wind speed on altitude. Itu region, April (rainy season)

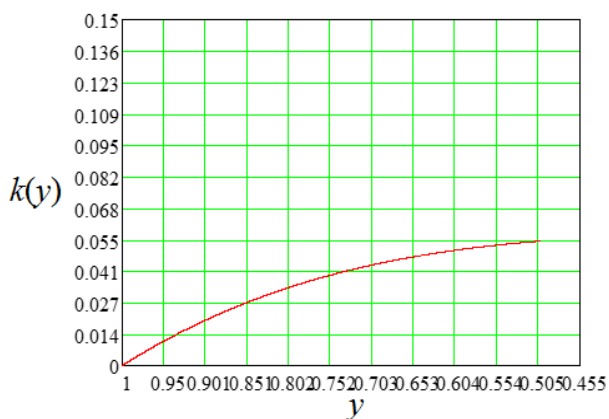


Рисунок 8. Зависимость коэффициента турбулентной диффузии от высоты. Регион Иту, апрель (сезон дождей)
Figure 8. Dependence of turbulent diffusion coefficient on altitude. Itu region, April (rainy season)

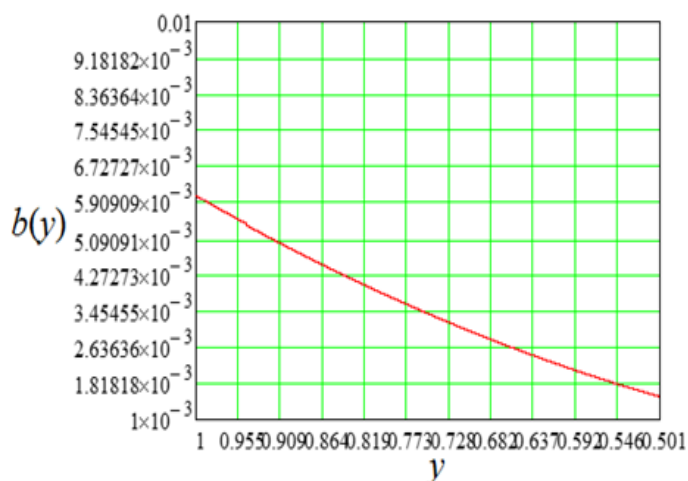


Рисунок 9. Зависимость энергии турбулентных пульсаций от высоты. Регион Иту, апрель (сезон дождей)
Figure 9. Dependence of turbulent pulsation energy on altitude. Itu region, April (rainy season)

при решении рассматриваемых задач не следует принимать во внимание. В дальнейших расчетах получили данные, приведенные в таблице 5 (март), которые позволили провести расчеты скорости ветра, температуры, коэффициента турбулентной диффузии и энергии турбулентных пульсаций как функции высоты, используя формулы (12) (см. рис. 3–5), а на рисунках 6–9 представлены аналогичные графики в сезон дождей в регионе Иту (см. табл. 5). При расчетах использовался пакет Mathcad.

Из графика рисунка 6 следует, что $\varepsilon_{\min}$ достигает минимального значения при $i = 67$, а масштаб приземного слоя составляет $L = 4$, остальные средние значения метеопараметров приведены в таблице 5.

Несложный анализ приведенных зависимостей показывает, что метеопараметры, характеризующие состояние устойчивости атмосферы и особенности распространения р/а примеси в условиях радиационных аварий, будут существенно различаться: в сезон дождей приведенные характеристики $\bar{u}$, $\bar{k}$, $\bar{b}$ значительно меньше, чем в сухой сезон. Ниже приведем математический аппарат, описывающий перенос примеси в атмосфере в рамках модели турбулентной диффузии.

В рамках этой модели перенос радиоактивной примеси в атмосфере рассчитывают, используя уравнение турбулентной диффузии, полагая при этом,

что размывание примеси по оси Y осуществляется по закону Гаусса, определяя, таким образом, объемную активность примеси выражением (18):

$$\Phi(x, y, z) = \frac{S(x, z)}{\sqrt{2\pi}\sigma_y(x)} \exp(-y^2/2\sigma_y^2), \quad (18)$$

где $\sigma_y(x)$ – среднеквадратичное отклонение; функция $S(x, z)$ определяется выражением (19):

$$S(x, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(x, y, z) dy = 2 \int_0^{+\infty} \Phi(x, y, z) dy. \quad (19)$$

Таким образом, для объемной активности газоаэрозольной примеси получают уравнение (20):

$$u \frac{\partial S}{\partial x} - w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(z) \frac{\partial S}{\partial z} \right] - \sigma S + \varphi, \quad (20)$$

где $\varphi(x, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y, z) dy = M\delta(x)\delta(z - h_{эф})$,

$f = M\delta(x)\delta(y)\delta(z - h_{эф})$ – источник газоаэрозольной примеси, загрязняющий окружающую среду;

M – мощность выброса (Бк/с);

$h_{эф}$ – эффективная высота выброса;

σ – постоянная релаксации радиоактивной газоаэрозольной примеси, представляющая собой сумму постоянной вымывания примеси из атмосферы σ_0 (с^{-1}) и постоянной радиоактивного распада, которой пренебрегают, рассматривая перенос радионуклидов с большим периодом полураспада.

В конечном итоге принимают, что $\sigma = \sigma_0$; w – гравитационная скорость осаждения примеси. В рамках рассматриваемой модели переноса величину $\sigma_y^2(x)$ представляют в виде: $\sigma_y^2(x) = \bar{b}x^2/\bar{u}^2(1 + \alpha x\bar{b}/\bar{k}\bar{u})$, где $\bar{b}$, $\bar{k}$, $\bar{u}$ – усредненные по приземному слою высотой $H_{\text{пр}} \approx 100$ м значения энергии турбулентных пульсаций $b(z)$, коэффициента турбулентной диффузии $k(z)$ и скорости ветра $u(z)$, $\alpha = 0,015$:

$$\bar{b} = \frac{\int_0^{H_{\text{пр}}} b(z) dz}{H_{\text{пр}}}; \quad \bar{k} = \frac{\int_0^{H_{\text{пр}}} k(z) dz}{H_{\text{пр}}}; \quad \bar{u} = \frac{\int_0^{H_{\text{пр}}} u(z) dz}{H_{\text{пр}}}.$$

$$S(x, z) = \frac{M}{2} \exp\left(-\left[\frac{\sigma_0 x}{\bar{u}} + \frac{w^2 x}{4\bar{k}\bar{u}} + \frac{w(z - h_{\text{эф}})}{2\bar{k}}\right]\right) \left\{ \frac{\exp\left(-[z + h_{\text{эф}}]^2 \bar{u}/4\bar{k}x\right) + \exp\left(-[z - h_{\text{эф}}]^2 \bar{u}/4\bar{k}x\right)}{\sqrt{\pi\bar{k}\bar{u}x}} - \frac{(2\beta - w)}{\bar{k}\bar{u}} \exp\left[-\frac{(2\beta - w)(z + h_{\text{эф}})}{2\bar{k}} + \left(\frac{2\beta - w}{2\bar{k}}\right)^2 \frac{\bar{k}x}{\bar{u}}\right] \times \right. \\ \left. \times \operatorname{erfc}\left[\left(\frac{2\beta - w}{2\bar{k}}\right)\sqrt{\bar{k}x/\bar{u}} + \frac{(z + h_{\text{эф}})}{2\sqrt{\bar{k}x/\bar{u}}}\right] \right\}, \quad (25)$$

Результаты приведенных на рисунках 2–9 зависимостей дают основание для сравнения осевых ($y = 0$) и поперечных ($x = \text{const}$) распределений радиоактивной примеси при ее распространении в атмосфере с аналогичным распределением, полученным при наличии осадков в сезон дождей в апреле в регионе Иту (Аква Ибом) (рис. 10, 11). Такое сравнение приобретает особую важность, поскольку рассматривается характер распространения р/а примеси при сухом сезоне и в сезоне дождей, в котором следует учитывать вымывания р/а примеси, характеризующееся постоянной σ_0 , что соответствует метеороло-

Граничные условия определяются выражениями (21) – (24):

$$S(x, z)|_{x=0} = 0; \quad (21)$$

$$S(x, z)|_{x \rightarrow \infty} = 0; \quad (22)$$

$$S(x, z)|_{z \rightarrow \infty} = 0; \quad (23)$$

$$k \frac{\partial S}{\partial z} \Big|_{z=z_0} = (\beta - w)S \Big|_{z=z_0}, \quad (24)$$

где β – скорость сухого осаждения газоаэрозольной примеси на подстилающую поверхность; z_0 – параметр шероховатости подстилающей поверхности. Аналитическое решение задачи (20) – (24) дается выражением (25), а объемная активность газоаэрозольной примеси радиоактивной примеси, распространяющейся в атмосфере, вычисляется по формуле (18) [5], [6]:

гическим условиям выбранных регионов в Нигерии.

Из представленных на графиках 10, 11 распределений следует, что зависимость объемной активности, распространяющейся в атмосфере, существенно зависит от значения ее постоянной вымывания из атмосферы σ_0 .

Как уже отмечалось, осевое распределение, полученное в сухой сезон в регионе Герегу (кривая 1), практически не отличается от распределения, слабоустойчивого состояния атмосферы, характерного для Русской равнины. Напротив, в сезон дождей в

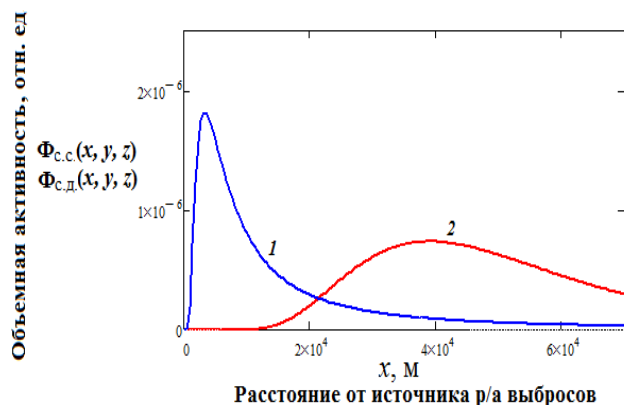


Рисунок 10. Осевые распределения ($y = 0$) объемной активности в регионах Герегу, март (1, сухой сезон, $\sigma_0 = 0$) и Иту, апрель (2, сезон дождей, $\sigma_0 = 0,87 \cdot 10^{-5}$); $z = 1,5$ м

Figure 10. Axial distributions ($y = 0$) of volume activity in the regions of Geregu, March (1, dry season, $\sigma_0 = 0$) and Itu, April (2, rainy season, $\sigma_0 = 0,87 \cdot 10^{-5}$); $z = 1.5$ m

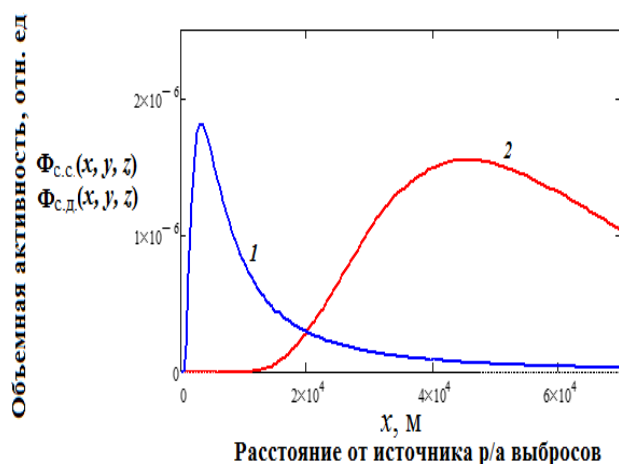


Рисунок 11. Осевые распределения ($y = 0$) объемной активности в регионах Герегу, март (1, сухой сезон, $\sigma_0 = 0$) и Иту, апрель (2, сезон дождей, $\sigma_0 = 0,57 \cdot 10^{-5}$); $z = 1,5$ м

Figure 11. Axial distributions ($y = 0$) of volume activity in the regions of Geregu, March (1, dry season, $\sigma_0 = 0$) and Itu, April (2, rainy season, $\sigma_0 = 0,57 \cdot 10^{-5}$); $z = 1.5$ m

регионе Иту (кривая 2) характер распределения имеет существенное отличие, состоящее в том, что в осевом распределении наблюдается широкий максимум, сопровождающийся медленным спадом объемной активности. При высоком значении постоянной вымывания $\sigma_0 = 0,87 \cdot 10^{-5}$ объемная активность быстро падает (см. рис. 10), хотя характер распределения имеет такой же вид,

как и при меньшем значении постоянной вымывания $\sigma_0 = 0,57 \cdot 10^{-5}$ (см. рис. 11), но максимум распределения оказывается сдвинутым в сторону больших расстояний от источника выбросов. Некоторое сомнение вызывает «нулевое» значение распределения объемной активности в начале своего распространения. Последнее обусловлено тем, что приведенное распределение характерно для высоты $z = 1.5$ м, где плотность объемной активности на такой высоте еще достаточно низкая, поскольку коэффициент турбулентной диффузии $k(y)$ наряду с поперечным рассеянием примеси $b(y)$ невелики (см. табл. 5). В связи с чем выпадения примеси в этой области под действием гравитационной скорости осаждения w (см. комментарии к формуле (20)), также является низким, что и определяет малое значение величины объемной активности в указанной области.

Прогностические поперечные распределения р/а примеси в выбранных регионах на расстояниях от источника выбросов $x = 4,0 \cdot 10^3$ м (рис. 12) и $x = 3,5 \cdot 10^4$ м (рис. 13) для регионов Герегу и Иту представлены на соответствующих рисунках.

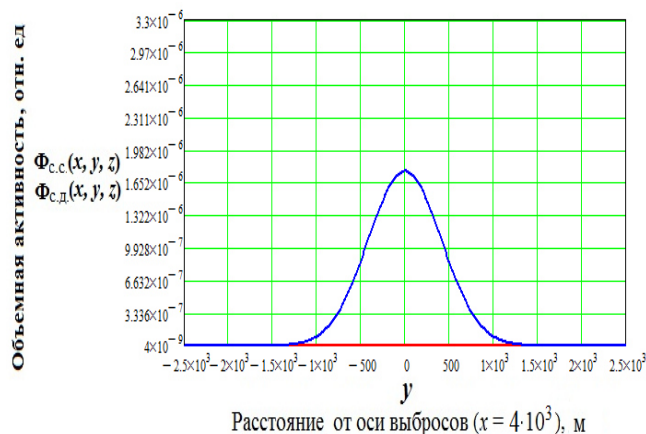


Рисунок 12. Поперечные распределения объемной активности в регионах Герегу, март (1, сухой сезон, $\sigma_0 = 0$) и Иту, апрель (2, сезон дождей, $\sigma_0 = 0,57 \cdot 10^{-5}$); $z = 1,5$ м

Figure 12. Transverse distributions of volumetric activity in the regions of Geregu, March (1, dry season, $\sigma_0 = 0$) and Itu, April (2, rainy season, $\sigma_0 = 0,57 \cdot 10^{-5}$); $z = 1.5$ m

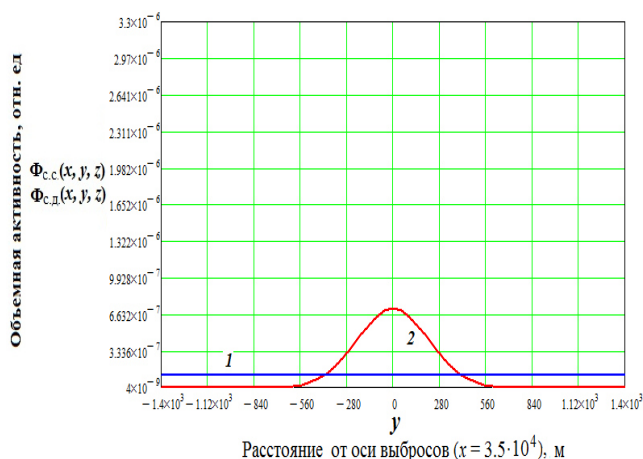


Рисунок 13. Поперечные распределения объемной активности в регионах Герегу, март (1, сухой сезон, $\sigma_0 = 0$) и Иту, апрель (2, сезон дождей, $\sigma_0 = 0,87 \cdot 10^{-5}$); $z = 1,5$ м

Figure 13. Transverse volume activity distributions in the regions of Geregu, March (1, dry season, $\sigma_0 = 0$) and Itu, April (2, rainy season, $\sigma_0 = 0,87 \cdot 10^{-5}$); $z = 1.5$ m

Как следует из представленных графиков распространения примеси в атмосфере в зависимости от ее состояния устойчивости носит совершенно различный характер. При слабоустойчивом состоянии в сухой сезон в регионе (Герегу) на малых расстояниях характеризуется максимумом (см. рис. 10, 11) и быстро спадает на больших расстояниях (см. рис. 12, 13). Распределение примеси в атмосфере в сезон дождей на небольших расстояниях от источника выбросов пред-

ставляет собой незначительную величину (см. рис. 10, 12) и резко возрастает по мере увеличения расстояния от источника выбросов, достигая своего максимального значения, которое зависит от величины постоянной вымывания примеси дождем, и затем быстро спадает. Максимумы поперечных распределений соответствуют значениям осевых распределений при соответствующих величинах x .

Рекомендации и заключение

Таким образом, полученные результаты расчетов дают наглядное представление об особенностях распространения радиоактивной примеси в атмосфере регионов Герегу и Иту в Нигерии с учетом ее вымывания осадками.

Представленные результаты расчетов следует принимать во внимание при оценке размеров санитарно-защитной зоны, располагаемой вокруг АЭС в том и другом регионах, и необходимого и достаточного количества постов радиационного контроля окружающей среды при их размещении в пределах этих зон, в соответствии с нормативными документами (ОСПОРБ-99/2010, СП 2.6.1.2612-10), а также при определении оптимального пути при эвакуации населения из загрязненного радиоактивными осадками региона [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Орумо К.Б., Елохин А.П., Ксенофонтов А.И. Экологические и социально-экономические аспекты возможного развития атомной энергетики в Федеративной Республике Нигерия. *Глобальная ядерная безопасность*. 2019;4(33):96–109. Режим доступа: http://gns.mephi.ru/sites/default/files/journal/file/4_2_4.pdf (дата обращения: 13.05.2024).
- Orumo K.B., Elokhin A.P., Ksenofontov A.I. Ecological and socio-economic aspects of the possible development of nuclear energy in the Federal Republic of Nigeria. *Global nuclear safety*. 2019;4(33):96–109. (In Russ.). Available at: http://gns.mephi.ru/sites/default/files/journal/file/4_2_4.pdf (accessed: 13.05.2024).
2. Лайхтман Д.Л. Физика пограничного слоя атмосферы. Ленинград: Гидрометеиздат, 1970. 340 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_007147806/ (дата обращения: 13.05.2024).
- Laichtman D.L. Physics of the boundary layer of the atmosphere. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1970. 340 p. Available at: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_007147806/ (accessed: 13.05.2024).
3. Елохин А.П. Методы и средства систем радиационного контроля окружающей среды. Москва: НИЯУ МИФИ, 2014. 520 с. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/103213?ysclid=lzv8g88c6w341484126> (дата обращения: 13.05.2024).

Elokhin A.P. Methods and means of environmental radiation control systems. Moscow: NRNU MEPhI, 2014. 520 p. (In Russ.). Available at: <https://e.lanbook.com/book/103213?ysclid=lzv8g88c6w341484126> (accessed: 13.05.2024).

4. Орумо К.Б., Елохин А.П., Ксенофонтов А.И. Особенности воздействия ионизирующего излучения на биологические объекты и методы его радиационного контроля на ядерных объектах (Аналитический обзор). *Глобальная ядерная безопасность*. 2020;2(35):16–40. <https://doi.org/10.26583/gns-2020-02-02>

Orumo K.B., Elokhin A.P., Ksenofontov A.I. Features of the effect of ionizing radiation on biological objects and methods of its radiation control on nuclear facilities (Analytical review). *Global nuclear safety*. 2020;2(35):16–40. <https://doi.org/10.26583/gns-2020-02-02>

5. Елохин А.П., Исса Алалем, Ксенофонтов А.И., Федоров П.И. Метеорологические характеристики района АЭС в Иордании. *Глобальная ядерная безопасность*. 2017;3(24):19–34. Режим доступа: <https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/gyb2017.3.pdf?ysclid=lzv8sqb9wu517276396> (дата обращения: 13.05.2024).

Elokhin A.P., Issa Al alem, Ksenofontov A.I., Fedorov P.I. Meteorological characteristics of the nuclear power plant construction area in Jordan. *Global nuclear safety*. 2017;3(24):19–34. (In Russ.). Available at: <https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/gyb2017.3.pdf?ysclid=lzv8sqb9wu517276396> (accessed: 13.05.2024).

6. Елохин А.П., Исса Алалем, Ксенофонтов А.И. Метеорологические характеристики района АЭС «Бушер» в Иране. *Глобальная ядерная безопасность*. 2017;4(25):23–47. Режим доступа: <https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/gyb.2017.4.pdf?ysclid=lzv9320yav258090254>

Elokhin A.P., Issa Alalem, Ksenofontov A.I. Meteorological Conditions of the BushehrNPP area? Iran. *Global nuclear safety*. 2017;4(25):23–47. (In Russ.). Available at: <https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/gyb.2017.4.pdf?ysclid=lzv9320yav258090254>

8. Елохин А.П., Холодов Е.А., Жилина М.В. Влияние изменения шероховатости подстилающей поверхности на формирование следа при её радиоактивном загрязнении. *Метеорология и гидрология*. 2008;5:81–91.

Elokhin A.P., Kholodov E.A., Zhilina M.V. The effect of changes in the roughness of the underlying surface on the formation of a trace during its radioactive contamination. *Meteorology and hydrology*. 2008;5:81–91. (In Russ.).

9. Елохин А.П. Выбор оптимального пути следования при эвакуации населения из загрязнённого района. *Атомная энергия*. 1999;87(4):314–316.

Elokhin A.P. Choosing the optimal route for the evacuation of the population from a polluted area. *Atomic Energy*. 1999;87(4):314–316. (In Russ.).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Орумо Б.К. – подготовка метеорологических данных по регионам Нигерии;
Ксенофонтов А.И. – постановка задачи, редактирование текста;
Елохин А.П. – написание статьи, математическая реализация решения задачи.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Александр Прокопьевич Елохин, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Orumo B.K. – preparation of meteorological data by region of Nigeria;
Ksenafontov A.I. – setting the problem, editing the text;
Elokhin A.P. – writing a paper, mathematical implementation of the problem solution.

FUNDING:

The authors state that there are no sources of funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Alexander P. Elokhin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Associate Member of Russian Academy of Natural Sciences, National Research Nuclear University

член-корреспондент РАЕ, г. Москва, Российская Федерация.

<http://orcid.org/0000-0002-7682-8504>

WoS ResearcherID: F-9573-2017

e-mail: elokhin@yandex.ru

Александр Иванович Ксенафонов кандидат физико-математических наук, профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-6864-9805>

e-mail: seulin@gmail.com

Кенолл Бьенмотей Орумо, заместитель главного научного сотрудника отдела развития атомных электростанций. Комиссия по атомной энергии Нигерии, Абуджа, Нигерия.

<https://orcid.org/0000-0001-6251-1736>

e-mail: orumokenoll@yahoo.com

«MEPhI», Moscow, Russian Federation.

<http://orcid.org/0000-0002-7682-8504>

WoS ResearcherID: F-9573-2017

e-mail: elokhin@yandex.ru

Aleksander I. Ksenafontov Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-6864-9805>

e-mail: seulin@gmail.com

Kenoll B. Orumo, Deputy Chief Research Officer of the Department for the Development of Nuclear Power Plants. Nigeria Atomic Energy Commission, Abuja, Nigeria.

<https://orcid.org/0000-0001-6251-1736>

e-mail: orumokenoll@yahoo.com

Поступила в редакцию 17.07.2024

После доработки 05.09.2024

Принята к публикации 10.09.2024

Received 17.07.2024

Revision 05.09.2024

Accepted 10.09.2024