

Ю. В. Хомутинин<sup>1</sup>, В. П. Процак<sup>1</sup>, В. Е. Хан<sup>2</sup>, Б. И. Огородников<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Украинский НИИ сельскохозяйственной радиологии НУБиП Украины, Киев

<sup>2</sup>Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНИХ НАБЛЮДЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОАКТИВНОГО АЭРОЗОЛЯ В СИСТЕМЕ «БАЙПАС» ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ»

Проведен статистический анализ динамики параметров радиоактивного аэрозоля в системе «Байпас» за период 2003 - 2010 гг. Оценены корреляционные связи между параметрами и вариабельность их сезонных трендов. Для многолетней динамики объемной активности <sup>137</sup>Cs, <sup>241</sup>Am и суммы бета-излучающих нуклидов установлено наличие четко выраженных локальных, но протяженных по времени трендов, которые удовлетворительно аппроксимируются экспоненциальными зависимостями. Получены количественные оценки влияния метеоусловий в районе ЧАЭС на концентрацию радиоактивного аэрозоля в системе «Байпас».

*Ключевые слова:* система «Байпас», радиоактивные аэрозоли, радионуклиды, АМАД, анализ временных рядов.

### Введение

За время, прошедшее после ввода объекта «Укрытие» в эксплуатацию, исследованию характеристик радиоактивных аэрозолей внутри его помещений уделялось пристальное внимание. Важное место в комплексе мониторинга радиоактивных аэрозолей на объекте «Укрытие» занимает система «Байпас», в которой производится пробоотбор аэрозолей, поступающих из нижних и боковых помещений объекта «Укрытие» в объем развала центрального зала и через систему «Байпас» в вентиляционную трубу ВТ-2.

С 2003 г. сотрудниками отделения ядерной и радиационной безопасности – ИПБ АЭС НАН Украины был начат регулярный пробоотбор аэрозолей в системе «Байпас» с использованием трехслойных фильтров Петрянова, что позволило одновременно определять концентрацию и дисперсный состав радиоактивных аэрозолей. Результаты исследований свойств и характеристик радиоактивных аэрозолей в системе «Байпас» представлены в значительном числе публикаций. Однако накопленные в результате многолетних мониторинговых наблюдений данные позволят провести более детальный статистический анализ динамики их характеристик и связи с внешними факторами.

### Материалы и методы

Предметом исследований были результаты измерений объемной активности <sup>137</sup>Cs, <sup>241</sup>Am, суммы бета-излучающих нуклидов-продуктов Чернобыльской аварии ( $\Sigma\beta$ ), дочерних продуктов распада радона и торона (ДПР), а также значений активностного медианного аэродинамического диаметра (АМАД) аэрозолей  $\Sigma\beta$  и ДПР в системе «Байпас» за период с сентября 2003 г. по декабрь 2010 г. [1 - 7]. Для статистической обработки имеющегося массива данных были использованы методы анализа временных рядов [8], реализованные в пакете «Статистика-7». Целью анализа было выявление многолетних и сезонных трендов характеристик радиоактивных аэрозолей (систематических составляющих) и статистических параметров случайных отклонений (шума) относительно этих трендов, а также оценка связей характеристик радиоактивных аэрозолей с метеоусловиями в районе ЧАЭС.

В связи с тем, что пробоотбор проводился не регулярно, то для анализа динамики изучаемых характеристик аэрозолей были использованы как непосредственно наблюдаемые значения характеристик радиоактивных аэрозолей, так и усредненные за месяц значения. Несмотря на то, что такое усреднение приводит к частичной потере информации (месячной динамике), оно позволяло оценить сезонную компоненту характеристик радиоактивных аэрозолей.

© Ю. В. Хомутинин, В. П. Процак, В. Е. Хан, Б. И. Огородников, 2012

Работа системы пылеподавления существенно влияет на аэрозольную обстановку в системе «Байпас» [9, 10]. Для минимизации этого влияния на результаты анализа из имеющегося массива экспериментальных данных были исключены те результаты, которые были получены в периоды работы системы пылеподавления. Поскольку в большей степени интересовала многолетняя динамика концентрации радиоактивных аэрозолей в системе «Байпас», обусловленная суперпозицией процессов генерации и фиксации аэрозолей в помещениях объекта «Укрытие», то для исключения влияния физического распада радионуклидов в данную динамику значения объемных активностей  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$  и  $\Sigma\beta$ , измеренные за период 2003 – 2010 гг., были пересчитаны на 1 января 2003 г. При этом предполагалось, что основной вклад в  $\Sigma\beta$  вносили  $^{137}\text{Cs}$  (32 %),  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{90}\text{Y}$  (по 27 %) и  $^{241}\text{Pu}$  (14 %) [11], а приращение активности  $^{241}\text{Am}$  обусловлено распадом  $^{241}\text{Pu}$ .

### Результаты и обсуждение

Первым этапом статистического анализа было установление корреляционных связей между характеристиками радиоактивных аэрозолей (рис. 1, табл. 1).

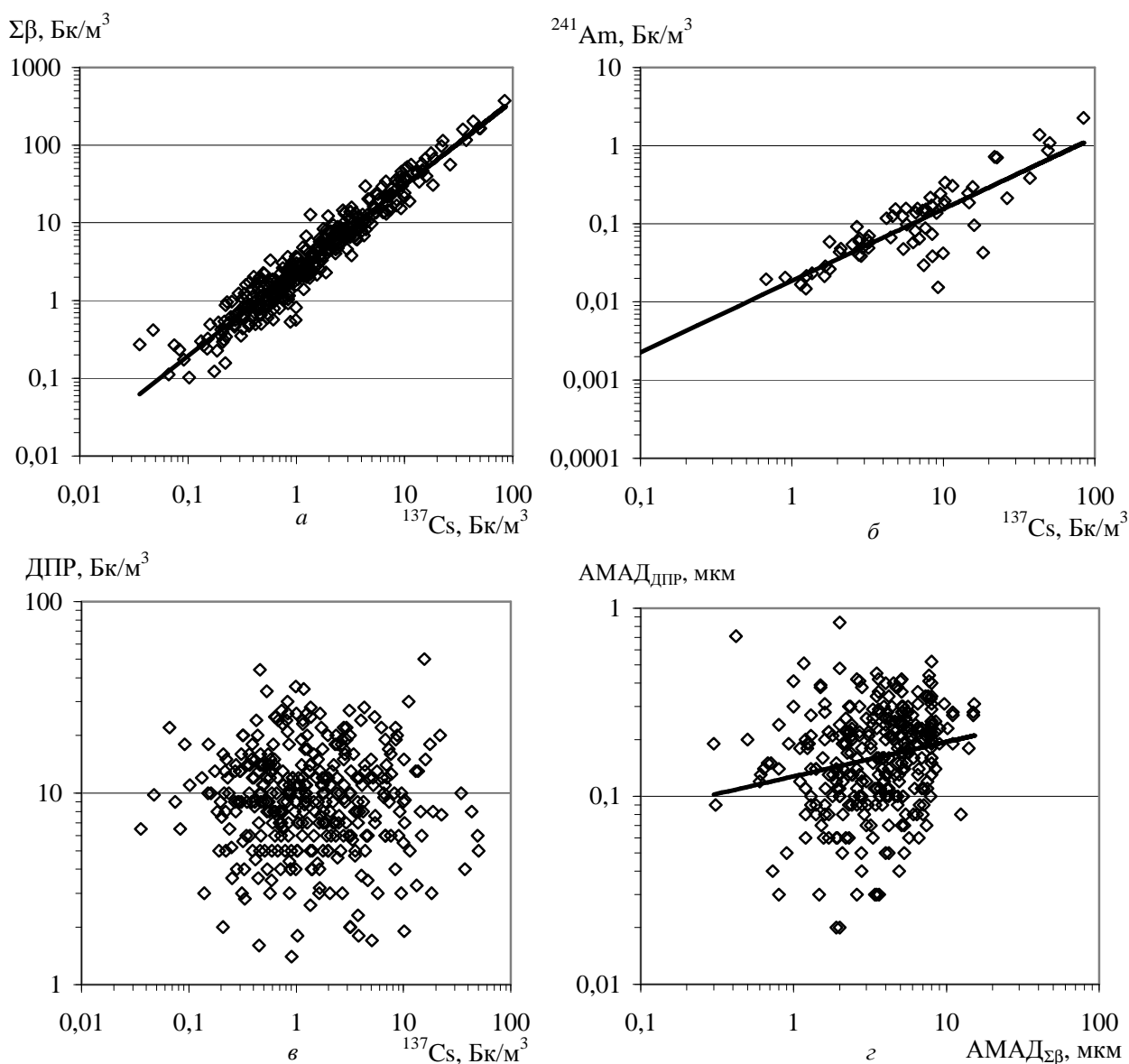


Рис. 1. Корреляция между характеристиками радиоактивных аэрозолей в системе «Байпас»: а – объемными активностями  $\Sigma\beta$  и  $^{137}\text{Cs}$ ; б – объемными активностями  $^{241}\text{Am}$  и  $^{137}\text{Cs}$ ; в – объемными активностями ДПР и  $^{137}\text{Cs}$ ; г – АМАД носителей ДПР и АМАД носителей радионуклидов-продуктов Чернобыльской аварии.

Таблица 1. Корреляционные зависимости между экспериментальными характеристиками радиоактивного аэрозоля в системе «Байпас»

Характеристики аэрозолей ( $Y \Leftrightarrow X$ )	Соотношение $Y = g(X)$	Коэффициент корреляции, R
Объемная активность $^{137}\text{Cs} \Leftrightarrow$ объемная активность $\Sigma\beta$	$Y = 2,4 \cdot X^{1,1}$	0,96
Объемная активность $^{137}\text{Cs} \Leftrightarrow$ объемная активность $^{241}\text{Am}$	$Y = 0,019 \cdot X^{0,92}$	0,84
Объемная активность $\Sigma\beta \Leftrightarrow$ объемная активность $^{241}\text{Am}$	$Y = 0,0056 \cdot X^{0,98}$	0,92
Объемная активность $^{137}\text{Cs} \Leftrightarrow$ объемная активность ДПР		0
Объемная активность $^{137}\text{Cs} \Leftrightarrow$ АМАД $\Sigma\beta$		0
АМАД $\Sigma\beta \Leftrightarrow$ АМАД ДПР	$Y = 0,127 \cdot X^{0,18}$	0,21
АМАД $\Sigma\beta \Leftrightarrow$ объемная активность $^{241}\text{Am}$		0

Полученные результаты говорят о наличии статистически значимой корреляционной связи между объемными активностями  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$  и  $\Sigma\beta$ . Для остальных характеристик статистически значимых корреляционных связей не выявлено.

На втором этапе был проведен статистический анализ динамики характеристик радиоактивного аэрозоля в системе «Байпас». При этом они рассматривались как нестационарные случайные процессы [12]. Для их описания была выбрана мультипликативная модель вида

$$C_i(t) = C_i^T(t) \cdot \Psi_i, \quad (1)$$

где  $C_i^T(t)$  – тренд  $i$ -й характеристики аэрозоля;  $\Psi_i$  – безразмерная случайная величина с математическим ожиданием, равным единице, обусловленная различными неконтролируемыми факторами.

Анализ показал, что случайные величины  $\Psi_i$  не зависят от времени и их значения удовлетворительно аппроксимируются логнормальным распределением вероятности с математическим ожиданием равным 1, плотность которого описывается как

$$f(\Psi_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \Psi_i \cdot s_i} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln(\Psi_i)}{s_i} \right)^2}, \quad (2)$$

где  $s_i$  – стандартное геометрическое отклонение логарифма  $\Psi_i$ . Как пример на рис. 2 приведены характерные распределения вероятностей значений  $\Psi_i$  для значений объемной активности  $^{137}\text{Cs}$  и значений АМАД  $\Sigma\beta$  аэрозолей в системе «Байпаса». Полученные оценки значений  $s_i$  приведены в табл. 2. Их, в первом приближении, можно интерпретировать как коэффициенты вариации характеристик радиоактивного аэрозоля относительно трендов  $C_i^T(t)$ .

### Многолетние тренды характеристик радиоактивного аэрозоля в системе «Байпас»

Многолетние тренды характеристик радиоактивного аэрозоля рассматривались в виде мультипликативной композиции нескольких компонент, среди которых были сезонная компонента и компоненты, обусловленные погодными условиями в районе ЧАЭС. Для оценки сезонных компонент в составе трендов  $C_i^T(t)$  нестационарные логнормальные случайные процессы, описывающие характеристики радиоактивного аэрозоля в системе «Байпас», представлялись в виде

$$C_i(t) = C_i^0(t) \cdot Z_i(t) \cdot \Psi_i, \quad (3)$$

где  $C_i^0(t)$  – основной тренд  $i$ -й характеристики аэрозоля;  $Z_i(t)$  – сезонная компонента тренда – безразмерная функция, описывающая среднюю кратность сезонного отклонения значений той или иной характеристики радиоактивного аэрозоля от основного тренда.

Как уже отмечалось, наблюдения за характеристиками радиоактивного аэрозоля в системе «Байпас» в течение рассматриваемого периода (2003 – 2010 гг.) проводились нерегулярно. В связи с этим для выделения сезонной компоненты были использованы усредненные за месяц значения характеристик. Поскольку усреднение приводит к частичной потере информации, допустимость такого усреднения при оценке сезонной компоненты была проверена на массиве ежедневных наблюдений за среднесуточной скоростью ветра в районе расположения ЧАЭС (данные метеостанции «Чернобыль», расположенной в 18 км на юго-восток от ЧАЭС).

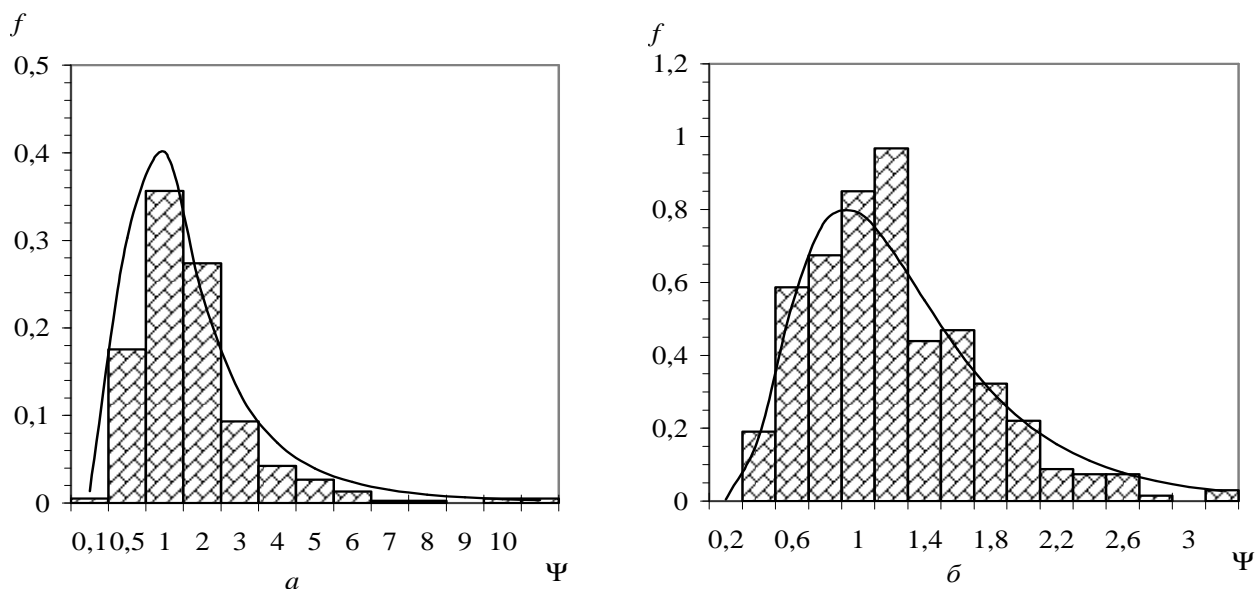


Рис. 2. Распределение случайной величин  $\Psi$  и ее аппроксимация логнормальным законом (сплошная линия): *a* - для значений удельной активности  $^{137}\text{Cs}$ ; *b* - для значений АМАД носителей радионуклидов-продуктов Чернобыльской аварии.

**Таблица 2. Оценки стандартных отклонений ( $s_i$ ) логарифмов случайных величин  $\Psi_i$ , иллюстрирующих вариабельность характеристик радиоактивного аэрозоля как случайных процессов**

Характеристика аэрозолей	$s_i$
Объемная активность $^{137}\text{Cs}$	0,82
Объемная активность $\Sigma\beta$	0,93
Объемная активность $^{241}\text{Am}$	0,73
Объемная активность ДПР	0,43
АМАД носителей $\Sigma\beta$	0,48
АМАД носителей ДПР	0,39

Результаты оценки сезонной компоненты для среднесуточной скорости ветра в районе расположения ЧАЭС, полученные на основе полной выборки (ежедневные наблюдения в период 2003 – 2010 гг.), усредненной выборки (данные полной выборки усреднены помесечно) и усредненной смоделированной выборки приведены на рис. 3. Последняя выборка была сформирована из результатов наблюдений только в те дни, когда производился отбор аэрозоля в системе «Байпас» с последующим помесечным усреднением выбранных значений.

Как видно из приведенного рисунка, усредненная смоделированная выборка удовлетворительно описывает сезонную компоненту тренда. Соответственно имеющийся массив характеристик радиоактивного аэрозоля несмотря на нерегулярность проводимого пробоотбора аэрозоля позволяет достаточно объективно выделить на основе имеющихся наблюдений сезонные составляющие.

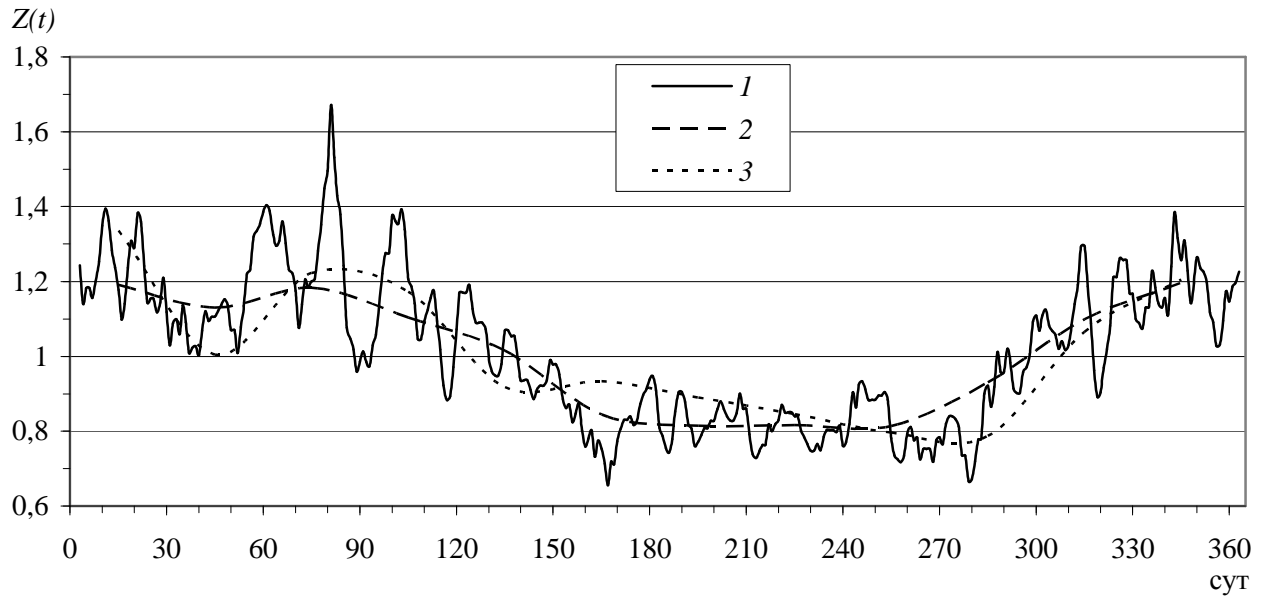


Рис. 3. Сезонная компонента средней скорости ветра в районе расположения ЧАЭС, оцененная по различным выборкам: 1– полная выборка; 2– усредненная выборка; 3– усредненная смоделированная выборка.

В соответствии с таким подходом были получены оценки сезонных компонент трендов характеристик аэрозоля в системе «Байпас» для объемных активностей  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $\Sigma\beta$ , ДПР, а также значений АМАД носителей  $\Sigma\beta$  и ДПР (рис. 4). Общие результаты декомпозиции случайных процессов, описывающих динамику характеристик радиоактивного аэрозоля в системе «Байпас», представлены на рис. 5.

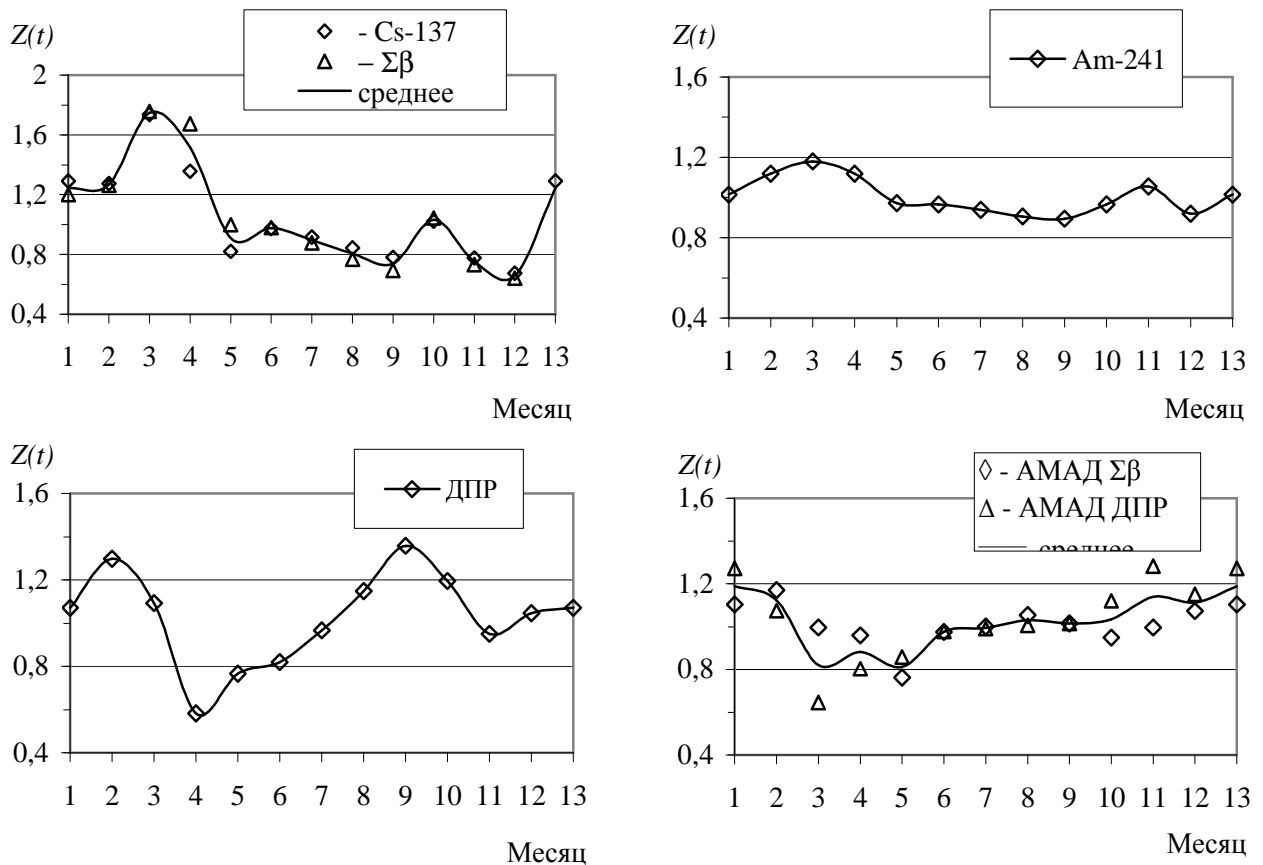


Рис. 4. Сезонные компоненты трендов характеристик радиоактивного аэрозоля в системе «Байпас».

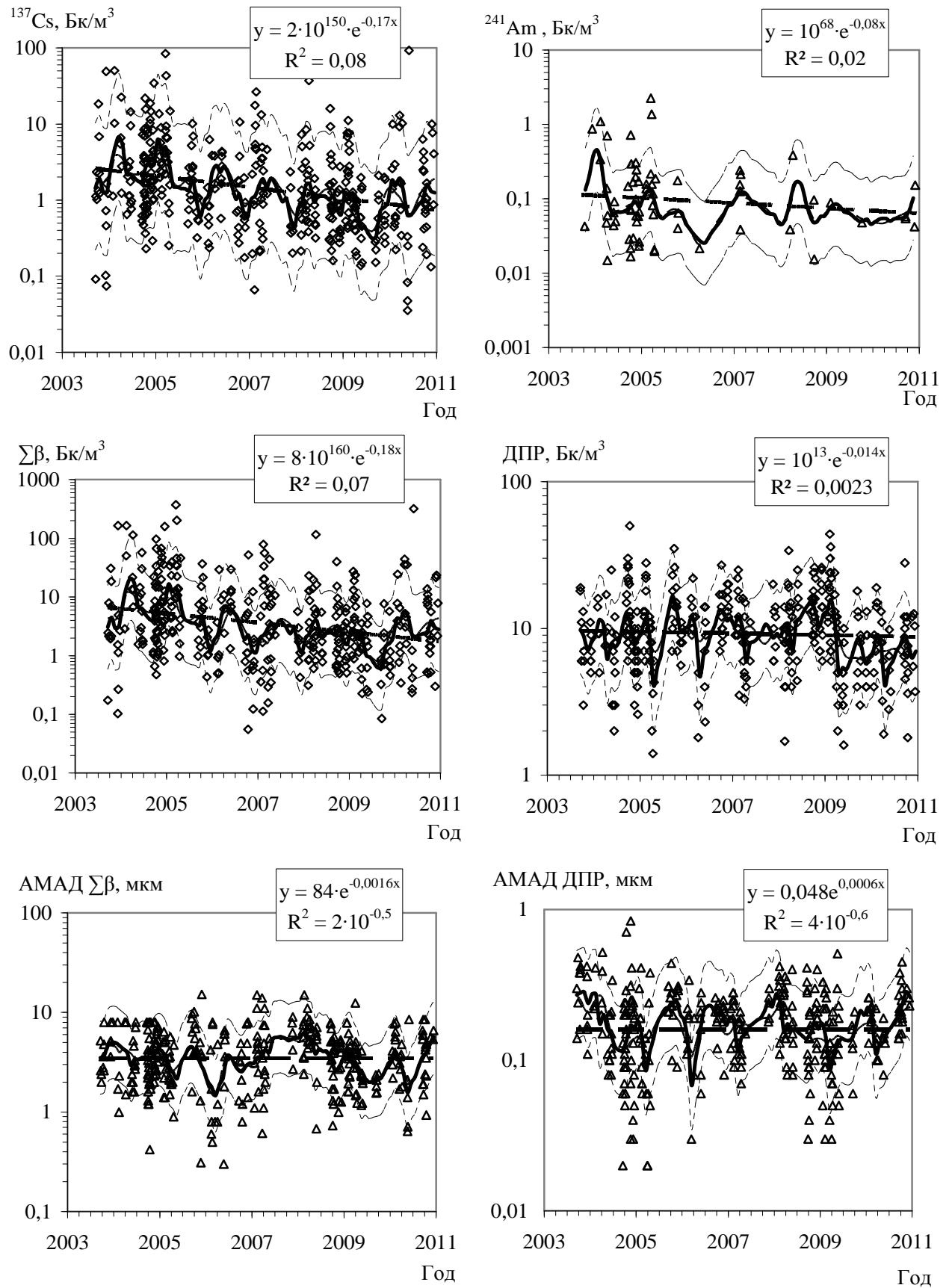


Рис. 5. Динамика характеристик аэрозоля в системе «Байпас»: — — — экспоненциальный глобальный тренд (y); — — — многолетний тренд с сезонной компонентой; — — — многолетний тренд без сезонной компоненты; - - - толерантные границы уровня 0,95.

Из полученных результатов видно, что для временной динамики объемной активности  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $\Sigma\beta$  четко выражены глобальные тренды, которые удовлетворительно аппроксимируются экспоненциальными зависимостями типа  $C(t) = A \cdot \exp(-b \cdot t)$ . Причем параметр  $b$  (интенсивность спада активности) для  $^{137}\text{Cs}$  и  $\Sigma\beta$  статистически не различаются. Для объемной активности  $^{241}\text{Am}$  она несколько ниже, что может быть обусловлено ограниченным количеством измерений  $^{241}\text{Am}$ , по сравнению с  $^{137}\text{Cs}$  и  $\Sigma\beta$ , особенно в последние три года проводимых наблюдений.

Для объемной активности ДПП и значений АМАД радиоактивного аэрозоля временная динамика отсутствует. При этом среднее значение АМАД для  $\Sigma\beta$  составляет  $\sim 3,5$  мкм, а для ДПП –  $\sim 0,15$  мкм.

### Влияние погодных условий на характеристики радиоактивного аэрозоля в системе «Байпас»

Анализ вариабельности многолетних трендов показал, что она не может быть объяснена только сезонной компонентой. В то же время во многих работах сообщается о влиянии погодных условий на аэрозольную обстановку внутри объекта «Укрытие» [5, 6, 13 - 15]. Поэтому были проведены исследования по установлению связей этой вариабельности с погодными условиями. Среди работ, посвященных этому вопросу, следует отметить сообщение [16], в котором анализируется влияние скорости и направления ветра на величину выброса радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» за сентябрь 2003 - декабрь 2004 гг. В работе [17] путем статистической обработки многолетних рядов наблюдений (2003 – 2006 гг.) выявлена корреляция между колебаниями концентрации радиоактивного аэрозоля в системе "Байпас" и скоростью ветра. При этом необходимо отметить, что изложенные результаты носят в основном качественный характер.

В данной работе мы постарались проанализировать и получить количественные соотношения между рассматриваемыми характеристиками аэрозоля в системе «Байпаса» и метеорологическими параметрами в районе ЧАЭС (направление ветра, средняя скорость ветра, относительная влажность и температура воздуха) по результатам наблюдений на протяжении 2003 – 2010 гг.

Для проведения данного анализа, с учетом выше полученных результатов, формула (1) случайных процессов, описывающая характеристики радиоактивного аэрозоля в системе «Байпас», представлялась в виде композиции

$$C_i(t) = A_i \cdot \exp(-b_i \cdot t) \cdot \exp\left(b_0^i(\varphi) + \sum_{j=1}^3 b_j^i(\varphi) \cdot X_j\right) \cdot \Psi_{1,i}, \quad (4)$$

где  $A_i$ ,  $b_i$  – параметры глобального тренда  $i$ -й характеристики аэрозоля;  $\varphi$  – направление ветра, град.;  $\exp\left(b_0^i(\varphi) + \sum_{j=1}^3 b_j^i(\varphi) \cdot X_j\right)$  – компонента, учитывающая влияние погодных условий при заданном направлении ветра ( $X_1$  – средняя скорость ветра,  $X_2$  – температура воздуха,  $X_3$  – относительная влажность);  $\Psi_{1,i}$  – случайная компонента, учитывающая остаток, обусловленный воздействием других факторов.

В процессе статистического анализа наблюдаемые характеристики радиоактивного аэрозоля нормировались на соответствующие значения глобальных трендов и сортировались по восьми секторам направления ветра. Оценки коэффициентов  $b_j^i$  ( $j = 1 \dots 3$ ) проводились для каждого направления отдельно. Наиболее статистически значимые оценки коэффициентов  $b_j^i$  приведены в табл. 3, где  $b_0^i$  – коэффициент, учитывающий направление ветра, град.;  $b_1^i$  – среднюю скорость ветра, м/с;  $b_2^i$  – относительную влажность, %;  $b_3^i$  – температуру воздуха, °С. Для  $^{241}\text{Am}$  провести аналогичные оценки не удалось. Это вызвано тем, что в каждой из сформированных в зависимости от направления ветра групп оказалось недостаточно данных для проведения такого анализа.

**Таблица 3. Значения коэффициентов для компоненты, описывающей влияние погодных условий на характеристики радиоактивного аэрозоля в системе «Байпас»**

Направление ветра, град	$b_0^i$	$b_1^i$	$b_2^i$	$b_3^i$
Для объемной активности $^{137}\text{Cs}$				
0	$0,75 \pm 0,19$			$-0,0631 \pm 0,02$
45	$0,72 \pm 0,32$			$-0,069 \pm 0,03$
90	$0,43 \pm 0,18$			
135		$-0,41 \pm 0,22$		
180				
225				
270	$-1,75 \pm 0,83$	$0,78 \pm 0,32$		
315	$-3,7 \pm 1,9$	$0,64 \pm 0,30$	$0,038 \pm 0,019$	$-0,028 \pm 0,018$
Для объемной активности $\Sigma\beta$				
0	$0,69 \pm 0,26$			$-0,053 \pm 0,027$
45				
90	$0,38 \pm 0,19$			$-0,035 \pm 0,021$
135		$-0,54 \pm 0,28$		
180				
225				
270	$-2,20 \pm 0,99$	$0,91 \pm 0,39$		
315	$-1,27 \pm 0,58$	$0,96 \pm 0,32$		$-0,054 \pm 0,023$
Для объемной активности ДПР				
0				
45				
90	$-2,78 \pm 0,54$		$0,039 \pm 0,006$	
135				
180	$-2,08 \pm 0,78$		$0,025 \pm 0,009$	
225				
270				
315	$-1,46 \pm 0,98$	$-0,32 \pm 0,15$	$0,025 \pm 0,010$	
Для значений АМАД $\Sigma\beta$				
0				
45				
90	$2,39 \pm 0,68$	$-0,29 \pm 0,14$	$-0,026 \pm 0,007$	
135	$-3,96 \pm 1,32$	$0,40 \pm 0,19$	$0,038 \pm 0,014$	
180	$-2,41 \pm 1,34$		$0,029 \pm 0,016$	
225	$-2,7 \pm 0,79$	$0,28 \pm 0,12$	$0,025 \pm 0,010$	
270	$-1,61 \pm 0,73$		$0,021 \pm 0,009$	
315				
Для значений АМАД ДПР				
0	$-1,89 \pm 0,69$		$0,024 \pm 0,009$	
45	$-1,86 \pm 0,82$		$0,026 \pm 0,010$	
90	$0,61 \pm 0,22$	$-0,17 \pm 0,12$		
135				$-0,052 \pm 0,014$
180	$-1,13 \pm 0,54$		$0,015 \pm 0,006$	
225	$1,29 \pm 0,47$	$-0,48 \pm 0,17$		$-0,048 \pm 0,028$
270				
315				

На рис. 6 сплошными линиями показаны тренды рассматриваемых характеристик радиоактивного аэрозоля в системе «Байпас», полученные как композиции глобальных экспоненциальных трендов и компонент, обусловленных метеоусловиями. Как видно из рисунка,



такие тренды достаточно объективно отражают реальную динамику характеристик радиоактивного аэрозоля в системе «Байпас».

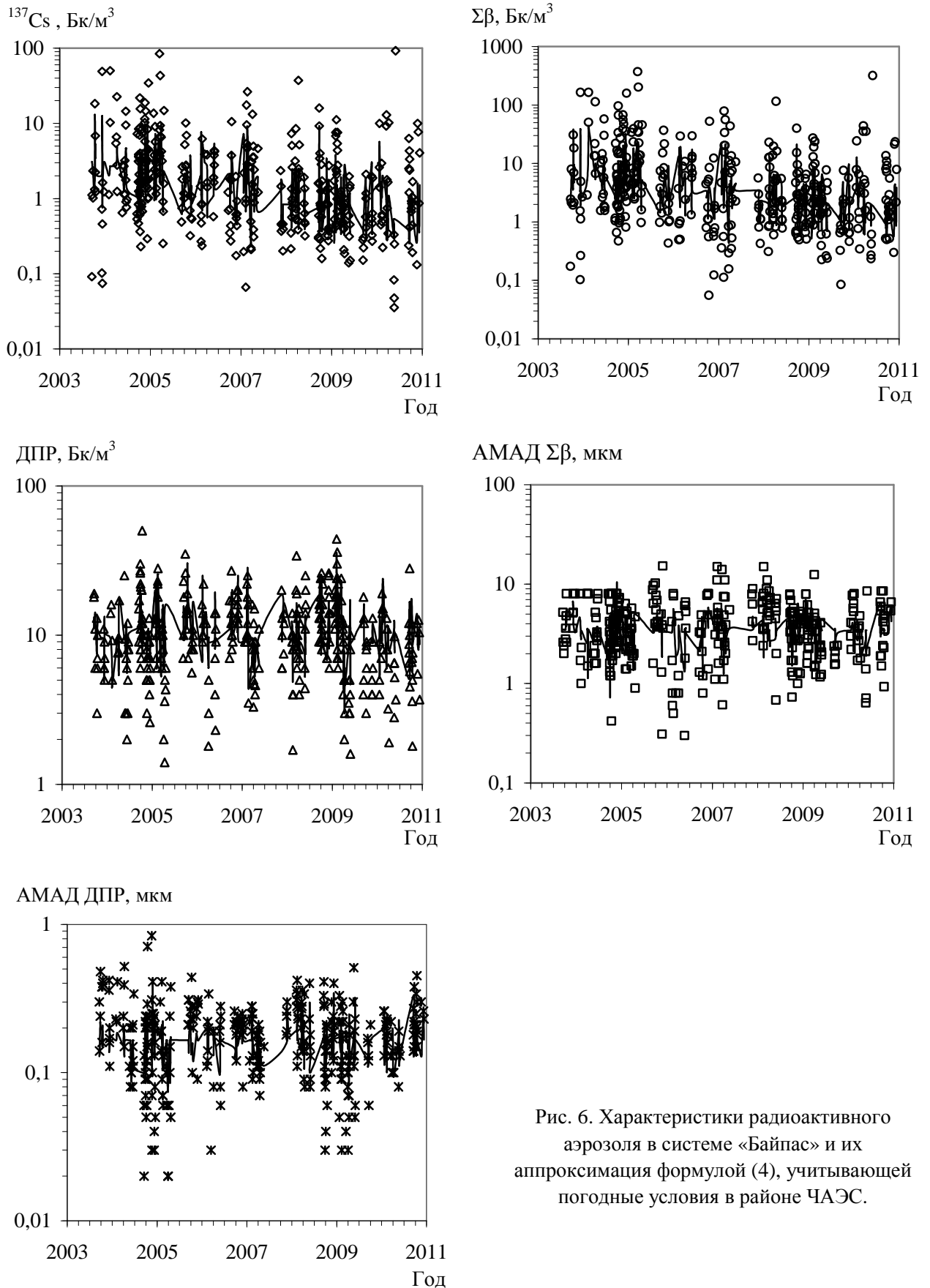


Рис. 6. Характеристики радиоактивного аэрозоля в системе «Байпас» и их аппроксимация формулой (4), учитывающей погодные условия в районе ЧАЭС.

Представляет интерес анализ остатков после вычитания из наблюдаемых значений характеристик радиоактивного аэрозоля соответствующих трендов, обусловленных влиянием погодных условий (4). Для этого рассмотрим случайную компоненту величину  $\Psi_i$ , характеризующую влияние неучтенных остатков. Оценки стандартных отклонений  $s_{1,i}$  логарифмов случайных величин  $\Psi_{1,i}$  приведены в табл. 4. Там же для сравнения приведены оценки  $s_i$  (см. табл. 2) и оценки стандартных отклонений  $s_{0,i}$  остатков полученных после вычитания соответствующих экспоненциальных глобальных трендов характеристик радиоактивного аэрозоля.

Как видно из табл. 4, оценки стандартных отклонений  $s_{1,i}$  логарифмов случайных величин  $\Psi_{1,i}$  для удельных активностей меньше, чем соответствующие оценки  $s_0$  стандартных отклонений остатков, полученных после вычета экспоненциальных глобальных трендов. Это говорит о том, что вариабельность объемных активностей радионуклидов в аэрозолях системы «Байпас» зависит от метеопараметров, а на значения АМАД они практически не влияют. Однако оценки стандартных отклонений  $s_1$  существенно отличаются от величин  $s$  – оценок стандартных отклонений логарифмов соответствующих случайных процессов. Следовательно, тренд, обусловленный влиянием погодных условий на характеристики радиоактивного аэрозоля, не полностью объясняет их наблюдаемую вариабельность. Это говорит о влиянии иных факторов на динамику характеристик радиоактивного аэрозоля в системе «Байпас», среди которых может быть и фактор, связанный с проведением различных технологических работ. Это предположение согласуется с выводами, представленными в работе [18].

Таблица 4. Остаточная вариабельность характеристик радиоактивного аэрозоля

Характеристика радиоактивного аэрозоля системы «Байпаса»	$s$	$s_0$	$s_1$
Объемная активность $^{137}\text{Cs}$	0,82	1,23	1,18
Объемная активность $\Sigma\beta$	0,93	1,42	1,34
Объемная активность ДПР	0,73	0,62	0,56
Значения АМАД $\Sigma\beta$	0,48	0,70	0,68
Значения АМАД ДПР	0,39	0,62	0,51

#### Влияние погодных условий на объемную активность $^{137}\text{Cs}$ и $\Sigma\beta$ в системе «Байпас»

Из полученных результатов следует, что наиболее значимо погодные условия влияют на объемную активность  $^{137}\text{Cs}$  и  $\Sigma\beta$  в системе «Байпас». Как видно из табл. 4, учет этого влияния существенно снижает вариабельность остатков  $C(t_n) - A \cdot \exp(-b \cdot t_n)$  для удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $\Sigma\beta$ . Для других характеристик радиоактивного аэрозоля существенного снижения вариабельности указанных остатков за счет учета влияния погодных условий на основе имеющейся информации получить не удалось. Возможно, это связано с «засоренностью» имеющихся данных влиянием на характеристики радиоактивного аэрозоля в системе «Байпас» технологических работ или иных неучтенных факторов. Поэтому приведенные в табл. 4 коэффициенты отражают общие тенденции влияния метеоусловий на характеристики радиоактивного аэрозоля. В связи с этим более детально проанализируем влияние погодных условий на объемную активность  $^{137}\text{Cs}$  и  $\Sigma\beta$  в системе «Байпас».

Напомним, что степень отклонения характеристики радиоактивного аэрозоля в системе «Байпас» от глобального экспоненциального тренда вследствие тех или иных погодных условий в нашем случае определяется соотношением  $\exp\left(b_0^i(\varphi) + \sum_{j=1}^3 b_j^i(\varphi) \cdot X_j\right)$ , где  $X_1$  – средняя скорость ветра,  $X_2$  – температура воздуха,  $X_3$  – относительная влажность. Однако очень важно оценить количественно степень влияния каждого из рассматриваемых метеопараметров на характеристики радиоактивного аэрозоля в системе «Байпас». Для этого мультипликативную модель (4) динамики характеристик радиоактивного аэрозоля в системе «Байпас» запишем в виде

$$C_i(t) = A_i \cdot \exp(-b_i \cdot t) \cdot \prod_{j=0}^3 k_j^i(\varphi) \cdot \Psi_{1,i}, \quad (5)$$

где  $k_j^i(\varphi)$  – безразмерные коэффициенты, характеризующие степень влияния  $j$ -го метеопараметра на тренды характеристик радиоактивного аэрозоля:  $k_0^i = \exp(b_0^i(\varphi))$ , и  $k_j^i = \exp(b_j^i(\varphi) \cdot X_j)$ . Значения  $k_0^i(\varphi)$  постоянные при заданном направлении ветра. Вариативность значений  $k_j^i(\varphi)$  ( $j = 1...3$ ) определяется вариативностью  $j$ -го параметра при заданном направлении ветра.

На рис. 1 и в табл. 1 отражена тесная корреляционная связь между удельными активностями  $^{137}\text{Cs}$  и  $\Sigma\beta$  в системе «Байпас». Следовательно, их зависимость от погодных условий должна быть идентичной. Отсутствие статистически значимых различий между  $b_1$  (степенью влияния скорости ветра в заданном направлении) подтверждает это.

Проведенный нами анализ имеющихся данных не выявил статистически значимого влияния влажности и температуры воздуха на характеристики радиоактивного аэрозоля. Это может быть связано с некоторой наблюдаемой корреляционной зависимостью между скоростью ветра и влажностью и температурой воздуха в районе ЧАЭС, а также «засоренностью» имеющихся данных влиянием иных факторов. Поэтому на основе проведенного анализа имеющихся экспериментальных данных достоверно можно говорить только об установлении количественной зависимости между объемными активностями  $^{137}\text{Cs}$  и  $\Sigma\beta$  в системе «Байпас» со среднесуточной скоростью и направлением ветра в районе ЧАЭС. Необходимо отметить, что анализ проводился для метеопараметров в день отбора аэрозоля, за день и за два дня до отбора аэрозоля. При этом корреляция между характеристиками радиоактивного аэрозоля и метеопараметрами, имеющими место в день отбора и за день до отбора аэрозоля, была статистически неразличимой, а корреляция с метеопараметрами, имевшими место за два дня до пробоотбора, была заведомо хуже. Возможно это связано с тем, что пробоотбор аэрозоля, как правило, проводился с 10 до 12 ч дня и поэтому частично сказывалось влияние метеопараметров за предыдущие сутки. В дальнейшем при анализе использовался среднесуточный набор метеопараметров в день проведения пробоотбора аэрозоля. Отсутствие статистически значимых различий между  $b_1$  для этих характеристик позволяет их усреднить и говорить об идентичном влиянии среднесуточной скорости ветра на объемные активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $\Sigma\beta$ .

В рамках полученной модели, описывающей влияние метеопараметров на характеристики радиоактивного аэрозоля в системе «Байпас», был проведен расчет кратности изменения значений объемной активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $\Sigma\beta$  относительно глобального тренда в зависимости от среднесуточной скорости и направления ветра в районе ЧАЭС. Результаты расчета представлены на рис. 7.

Из полученных результатов следует, что западные ( $270^\circ$ ) и северо-западные ( $315^\circ$ ) ветры приводят к существенному возрастанию объемной активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $\Sigma\beta$  в системе «Байпас». При среднесуточной скорости ветра с этих направлений 10 м/с активность может увеличиваться на три порядка величины относительно значений глобальных трендов. Это может объясняться тем, что с севера, запада и юга ветер легко проникает через неплотности и щели под кровлю объекта «Укрытие», в частности в центральный зал и смежные помещения [1]. Юго-восточные ветры ( $135^\circ$ ) наоборот приводят к снижению объемной концентрации  $^{137}\text{Cs}$  и  $\Sigma\beta$  в системе «Байпас». Частично это можно объяснить экранировкой объекта «Укрытие» зданием 3-го энергоблока и разделительной стеной между 3-м и 4-м энергоблоками. Однако, как видим на рис. 7, увеличение средней скорости ветра приводит к еще большему снижению объемной концентрации  $^{137}\text{Cs}$  и  $\Sigma\beta$  в системе «Байпасе». Скорее всего, это связано с тем, что с увеличением среднесуточной скорости ветров восточной четверти происходит выдувание аэрозоля из объекта «Укрытие» через щели и неплотности здания (неконтролируемый выброс), уменьшая тем самым величину выноса радиоактивного аэрозоля через систему «Байпас».

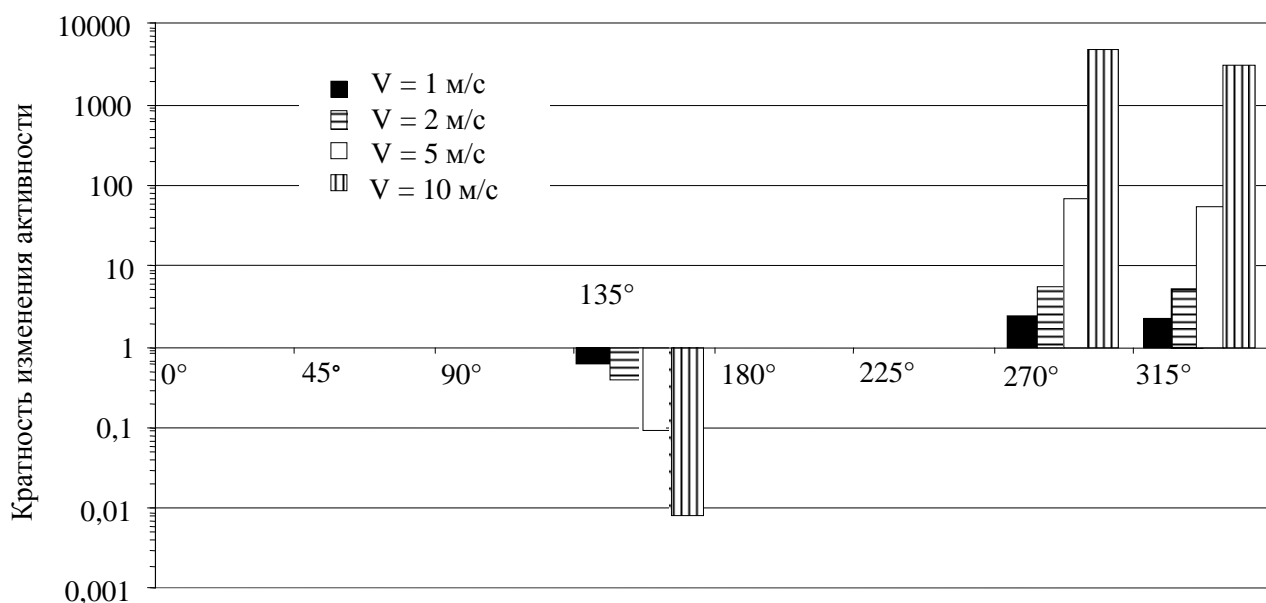


Рис. 7. Влияние среднесуточной скорости и направления ветра на объемную активность  $^{137}\text{Cs}$  и  $\Sigma\beta$  в системе «Байпас».

### Заключение

Использование методов анализа временных рядов позволило провести статистические исследования экспериментальных параметров радиоактивного аэрозоля в системе «Байпас» и их связи с состоянием внешней атмосферы в районе ЧАЭС за период 2003 – 2010 гг.

Установлено наличие статистически значимой корреляционной связи между объемными активностями  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$  и  $\Sigma\beta$  в аэрозолях системы «Байпас». Для остальных исследуемых характеристик (объемная активностями ДПР радона и торона, значения АМАД аэрозоля  $\Sigma\beta$  и по ДПР) статистически значимых корреляционных связей не выявлено.

Получены количественные оценки сезонных компонент трендов характеристик аэрозоля в системе «Байпас» для объемной активности  $^{137}\text{Cs}$ ,  $\Sigma\beta$ ,  $^{241}\text{Am}$ , ДПР, а также значений АМАД аэрозоля  $\Sigma\beta$  и ДПР (см. рис. 5).

Для динамики объемной активности  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $\Sigma\beta$  установлено наличие четко выраженных трендов, которые удовлетворительно аппроксимируются экспоненциальными зависимостями вида  $C(t) = A \cdot \exp(-b \cdot t)$ . В соответствии с ними с 2003 по 2011 гг. объемная активность  $^{137}\text{Cs}$  в аэрозолях системы «Байпаса» уменьшилась в 3,3 раза а  $\Sigma\beta$  в 3,6 раза. Для  $^{241}\text{Am}$ , по сравнению с  $^{137}\text{Cs}$  и  $\Sigma\beta$ , получено снижение в 1,75 раза. Однако отличие в поведении  $^{241}\text{Am}$  может быть обусловлено ограниченным количеством его измерений, особенно в последние три года проводимых наблюдений, и требует дополнительных исследований. Данные объемной активности дочерних продуктов распада радона и торона и значений АМАД радиоактивного аэрозоля не обнаруживают каких-либо трендов, что свидетельствует о неизменности данных параметров за исследуемый период.

Получены достоверные количественные оценки влияния средней скорости и направления ветра на объемную активность  $^{137}\text{Cs}$  и  $\Sigma\beta$  в аэрозолях системы «Байпас».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Огородников Б. И., Пазухин Э. М., Ключников А. А. Радиоактивные аэрозоли объекта «Укрытие»: 1986 – 2006 гг. Монография. – Чернобыль: ИПБ АЭС НАН Украины. – 2008. – 456 с.
2. Павлюченко Н. И., Хан В. Е., Криницын А. П. и др. Контроль неорганизованных сбросов и выбросов из объекта «Укрытие» в 2004 г. // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. – 2005. – Вип. 2. – С. 22 - 32.
3. Хан В. Е., Огородников Б. И., Калиновский А. К. и др. Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в 2005 г. // Там же. – 2006. – Вип. 6. – С. 85 - 94.

4. Хан В. Е., Огородников Б. И., Калиновский А. К. и др. Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в 2006 г. // Там же. - 2007. - Вып. 7. - С. 116 - 121.
5. Хан В. Е., Огородников Б. И., Калиновский А. К. и др. Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в 2007 г. // Там же. - 2008. - Вып. 9. - С. 48 - 53.
6. Хан В. Е., Огородников Б. И., Калиновский А. К. и др. Контроль выброса радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в 2008 г. // Там же. - 2009. - Вып. 12. - С. 154 - 162.
7. Хан В. Е., Огородников Б. И., Калиновский А. К. и др. Контроль выброса радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в 2009 г. // Там же. - 2010. - Вып. 13. - С. 111 - 122.
8. Makridakis S., Wheelwright S.C. Forecasting methods for management.— J.Wiley & Sons, New York, 1989.
9. Краснов В. А., Крыницын А. П., Огородников Б. И. и др. Оценка воздействия модернизированной системы пылеподавления на радиационную обстановку внутри объекта «Укрытие» и на окружающую среду // Проблемы Чернобиля. - 2004. - Вып. 15. - С. 14 - 23.
10. Огородников Б. И., Павлюченко Н. И., Бudyка А. К., Краснов В. А. Пылеобразование в объекте «Укрытие» под воздействием техногенных и природных факторов // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. - 2005. - Вып. 3. - С. 31 - 44.
11. Бегичев С. Н., Боровой А. А., Строганов А. А. и др. Топливо реактора 4-го блока ЧАЭС (краткий справочник). – Москва, 1990. – 21 с. – (Препр. Ин-т атомной энергии им. И.В. Курчатова, ИАЭ 5268/3).
12. Венцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения.– М.: Наука, 1991.–384 с.
13. Скорбун А. Д., Огородников Б. И. Связь долговременных характеристик скорости ветра во внешней среде и концентрации радиоактивных аэрозолей в объекте «Укрытие» // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. – 2008. – Вып. 9. – С. 66 – 73.
14. Огородников Б. И., Бudyка А. К., Хан В. Е. и др. Аэрозоли-носители  $^{212}\text{Pb}$  в объекте «Укрытие» // Там же. - С. 55 - 65.
15. Огородников Б. И., Павлюченко Н. И., Хан В. Е., Краснов В. А. Связь концентраций радиоактивных аэрозолей в «Байпасе» объекта «Укрытие» с погодными условиями // Проблемы Чернобиля. - 2004. - Вып. 15. - С. 14 - 23.
16. Огородников Б. И., Павлюченко Н. И., Бudyка А. К., Краснов В. А. Пылеобразование в объекте «Укрытие» под воздействием техногенных и природных факторов // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. - 2005. - Вып. 3, ч. 1. - С. 31 - 44.
17. Огородников Б. И., Скорбун А. Д. Связь выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» с метеорологической ситуацией. Влияние скорости ветра // Там же. - 2007. - Вып. 7. - С. 103 – 109.
18. Огородников Б. И., Скорбун А. Д. О возможности прогнозирования уровня активности аэрозолей в вентиляционной системе объекта «Укрытие» // Там же - 2006. - Вып. 4. - С. 121 - 124.

**Ю. В. Хомути́н, В. П. Процак, В. Є. Хан, Б. І. Огородников**

**СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ БАГАТОРІЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ХАРАКТЕРИСТИК РАДІОАКТИВНОГО АЕРОЗОЛЮ В СИСТЕМІ «БАЙПАС» ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ»**

Проведено статистичний аналіз динаміки параметрів радіоактивного аерозолю в системі «Байпас» за період 2003 - 2010 рр. Оцінено кореляційні зв'язки між параметрами та варіабельність їхніх сезонних трендів. Для багаторічної динаміки об'ємної активності  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$  та суми бета-випромінюючих нуклідів встановлено наявність чітко виражених глобальних трендів, що задовільно апроксимуються експоненціальними залежностями. Отримано кількісні оцінки впливу метеоумов у районі ЧАЕС на концентрацію радіоактивного аерозолю в системі «Байпас».

*Ключові слова:* система «Байпас», радіоактивні аерозолі, радіонукліди, АМАД, аналіз часових рядів.

**Y. V. Khomutinin, V. P. Protsak, V. Y. Khan, B. I. Ogorodnikov**

**STATISTICAL ANALYSIS OF THE LONG-TERM OBSERVATIONS OF THE CHARACTERISTICS OF RADIOACTIVE AEROSOL IN THE BYPASS SYSTEM OF “UKRYTTYA”**

Statistical analysis of dynamics of the radioactive aerosol parameters in the Bypass system for the period of 2003 - 2010 has been performed. The correlations between the parameters and variability of their seasonal trends have been estimated. For the long-term dynamics of the airborne concentrations of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$  and sum of  $\beta$ -emitting radionuclides the well-expressed global trends have been found, which can be approximated with the exponential dependences. The impact of the weather conditions near the ChNPP on the radioactive aerosol concentration in the Bypass system has been quantified.

*Keywords:* Bypass system, radioactive aerosols, radionuclides, AMAD, analysis of the time series.

Надійшла 02.08.2011  
Received 02.08.2011