

Ю. В. Хомутинин¹, В. П. Процак¹, В. Е. Хан², Б. И. Огородников²¹ Український НІІІ сільськогосподарської радіології НУБіП України, Київ² Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Чернівці

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОАКТИВНОГО АЭРОЗОЛЯ В ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЕ «БАЙПАС» ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ» ЗА ПЕРИОД 2003 - 2012 гг.

Представлены результаты статистического анализа динамики параметров радиоактивного аэрозоля в вентиляционной системе «Байпас» за период 2003 - 2012 гг. Для объемной концентрации аэрозольных носителей активности ^{137}Cs , ^{241}Am и суммы β -излучающих нуклидов установлено наличие четко выраженных экспоненциальных глобальных трендов. Получены количественные оценки сезонных компонент трендов характеристик радиоактивного аэрозоля в системе «Байпас».

Ключевые слова: система «Байпас», радиоактивные аэрозоли, радионуклиды, дочерние продукты радона и торона, АМАД, анализ временных рядов.

Введение

Выброс радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в окружающую среду условно разделяют на «организованный» и «неорганизованный». «Организованный» выброс до недавнего времени происходил через вентиляционную систему «Байпас» в высотную трубу ВТ-2, а «неорганизованный» - через неплотности конструкции объекта «Укрытие» (щели, проемы, технологические люки), площадь которых по разным оценкам составляет до 120 м². Мониторинг «неорганизованного» выброса базируется на результатах измерений, полученных с использованием аккумулярующих планшетов, установленных над технологическими люками кровли объекта «Укрытие». Контроль величины «организованного» выброса был основан на отборе аэрозолей непосредственно в вентиляционной системе «Байпас» с круглосуточным контролем расхода воздуха. Данная система представляла собой воздухопровод, соединяющий пространство разрушенного центрального зала, в котором собираются воздушные потоки из нижних и боковых помещений, с высотной трубой ВТ-2. В штатном режиме эксплуатации объекта «Укрытие» вентиляция центрального развала осуществлялась за счет естественной тяги в системе «Байпас», интенсивность которой в значительной степени зависела от сезона года и метеоусловий [1]. Наблюдается статистическая корреляция между параметрами организованных и неорганизованных выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие», что позволяет утверждать об общих источниках их формирования.

Начиная с 2003 г., в системе «Байпас» был начат пробоотбор аэрозолей с использованием

асpirаторов и трехслойных фильтров Петрянова, что позволило одновременно определять концентрацию и дисперсный состав радиоактивных аэрозолей [2]. При этом для обеспечения изокINETического режима пробоотбора перед фильтродержателем устанавливалась конусная насадка, размер и диаметр которой подбирались в зависимости от скорости воздушного потока на момент пробоотбора.

Накопленный за многолетний период мониторинговых наблюдений экспериментальный массив характеристик радиоактивных аэрозолей в системе «Байпас» позволил провести их статистический анализ.

Методы

Предметом исследований были результаты измерений объемной активности ^{137}Cs , ^{241}Am , суммы β -излучающих чернoбыльских нуклидов ($\Sigma\beta$), дочерних продуктов распада (ДПР) радона и торона, а также значений АМАД (активный медианный аэродинамический диаметр) для аэрозолей $\Sigma\beta$ и ДПР радона и торона в системе «Байпас» за период с сентября 2003 г. по декабрь 2012 г. [1 - 8].

Для статистической обработки имеющегося массива данных были использованы методы анализа временных рядов [9], реализованные в пакете «СТАТИСТИКА 7». Целью анализа было выявление многолетних и сезонных трендов характеристик радиоактивного аэрозоля (систематических составляющих) и статистических параметров случайных отклонений (шума) относительно этих трендов.

Поскольку в большей степени интересовала многолетняя динамика концентрации радиоак-

тивного аэрозоля в системе «Байпас», обусловленная суперпозицией природных процессов генерации и фиксации аэрозолей в помещениях объекта «Укрытие», то для исключения влияния спонтанного радиоактивного распада радионуклидов в данную динамику значения активностей ^{137}Cs , ^{241}Am и $\Sigma\beta$, измеренные за период с 2003 по 2012 г., были пересчитаны на 1 января 2003 г. При этом считалось, что основной вклад в суммарное чернобыльское β -излучение вносили ^{137}Cs (38 %), ^{90}Sr и ^{90}Y (по 31%) [10], а приращение активности ^{241}Am обусловлено распадом ^{241}Pu . Также для минимизации влияния на результаты статистического анализа аэрозолеобразования, обусловленного техногенным воздействием, из имеющегося массива данных исключались экспериментальные результаты, полученные в период работы системы пылеподавления.

Для оценки вклада ДПР радона и торона в суммарную β -активность пакет фильтров через 15 - 20 мин после окончания прокачки разделялся на три исходных слоя. Периодическое их измерение на радиометре с экспозицией 100 с и сменой фильтров каждые 120 с позволяло получать для каждого слоя фильтра кривую спада

активности на протяжении 1 - 1,5 ч. Это позволяло при повторном измерении фильтров через 4 - 5 сут определять β -активность как долгоживущих, так и короткоживущих радионуклидов. Дальнейшую идентификацию радионуклидного состава выполняли на полупроводниковом γ -спектрометре.

При анализе влияния метеоусловий на параметры радиоактивного аэрозоля в системе «Байпас» использовались метеоданные с метеостанции «Чернобыль», расположенной в 18 км на юго-восток от ЧАЭС.

Результаты и обсуждения

Первым этапом анализа было установление корреляционных связей среди пар следующих характеристик радиоактивного аэрозоля: объемных активностей ^{137}Cs , ^{241}Am , $\Sigma\beta$, ДПР радона и торона, а также значений АМАД для аэрозолей $\Sigma\beta$ и ДПР радона и торона. Проведенный анализ показал наличие статистически значимой корреляционной связи между объемными активностями ^{137}Cs , ^{241}Am и $\Sigma\beta$ в аэрозолях. Результаты этого анализа приведены на рис. 1 и в табл. 1.

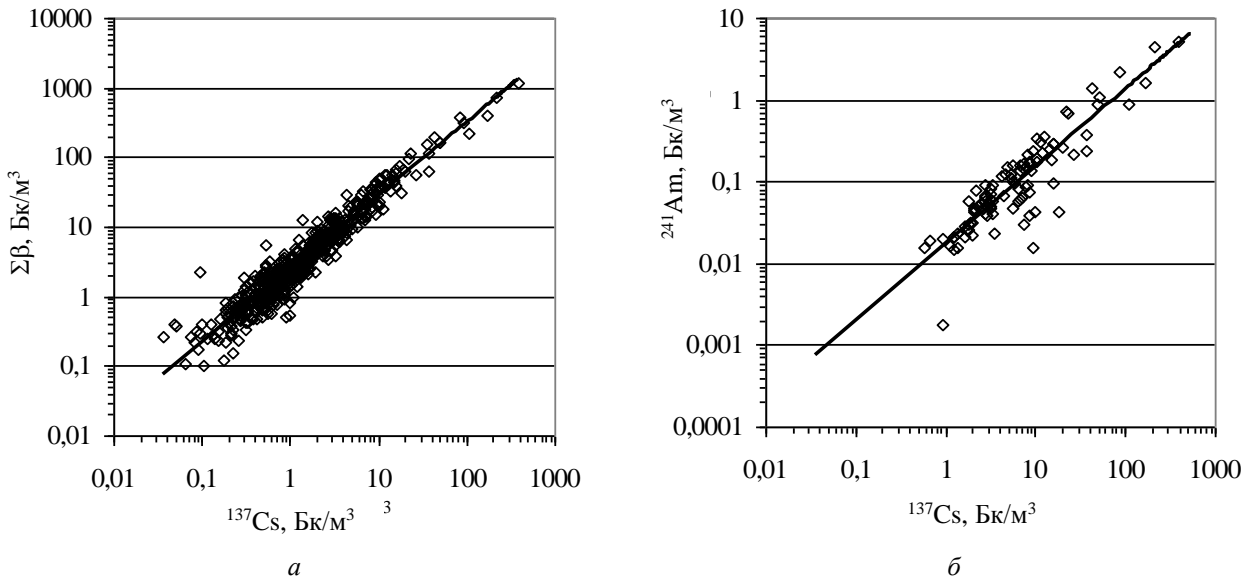


Рис. 1. Статистически значимая корреляция в аэрозолях системы «Байпас» за период 2003 - 2012 гг. (с вычетом вклада спонтанного радиоактивного распада радионуклидов) между объемной β -активностью чернобыльских радионуклидов и ^{137}Cs (а) и объемной активностью ^{241}Am и ^{137}Cs (б).

Таблица 1. Статистически значимые корреляционные зависимости между экспериментальными характеристиками радиоактивного аэрозоля в системе «Байпас»

Характеристики аэрозолей (Y ↔ X)	Соотношение Y = g(X)	Коэффициент корреляции, r
Объемная активность суммы β -излучающих нуклидов ↔ объемная активность ^{137}Cs	$Y = (2,5 \pm 0,1) \cdot X^{1,05 \pm 0,03}$	0,96
Объемная активность ^{241}Am ↔ объемная активность ^{137}Cs	$Y = (0,018 \pm 0,004) \cdot X^{0,93 \pm 0,01}$	0,89
Объемная активность ^{241}Am ↔ объемная активность суммы β -излучающих нуклидов	$Y = (0,0049 \pm 0,0012) \cdot X^{0,996 \pm 0,078}$	0,94

Для объемной активности ДПР радона и торона, а также АМАД аэрозолей и для суммы β -излучающих нуклидов и для ДПР радона и торона статистически значимых корреляционных связей выявлено не было.

На втором этапе был проведен статистический анализ динамики характеристик радиоактивного аэрозоля в системе «Байпас». При этом характеристики радиоактивного аэрозоля рассматривались как нестационарные случайные процессы [11]. Для описания таких процессов была выбрана мультипликативная модель вида

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

где $C_i^T(t)$ - тренд i -й характеристики аэрозоля, выделение которого проводилось стандартным методом скользящей медианы; Ψ_i - безразмерная случайная величина с математическим ожидани-

ем, равным единице, обусловленная неконтролируемыми факторами.

Анализ показал, что случайные величины Ψ_i при использовании трендов, выделенных методом скользящей медианы, не зависят от времени и их значения удовлетворительно аппроксимируются логнормальным распределением вероятности с математическим ожиданием, равным 1. Как пример на рис. 2 приведены характерные распределения вероятностей значений Ψ_i для объемной активности ^{137}Cs и АМАД по сумме β -излучающих черномыльских нуклидов в аэрозолях системы «Байпас». Полученные оценки значений стандартного отклонения логарифма случайных величин Ψ_i (s_i) приведены ниже. Их, в первом приближении, можно интерпретировать как коэффициенты вариации характеристик радиоактивного аэрозоля относительно трендов $C_i^T(t)$.

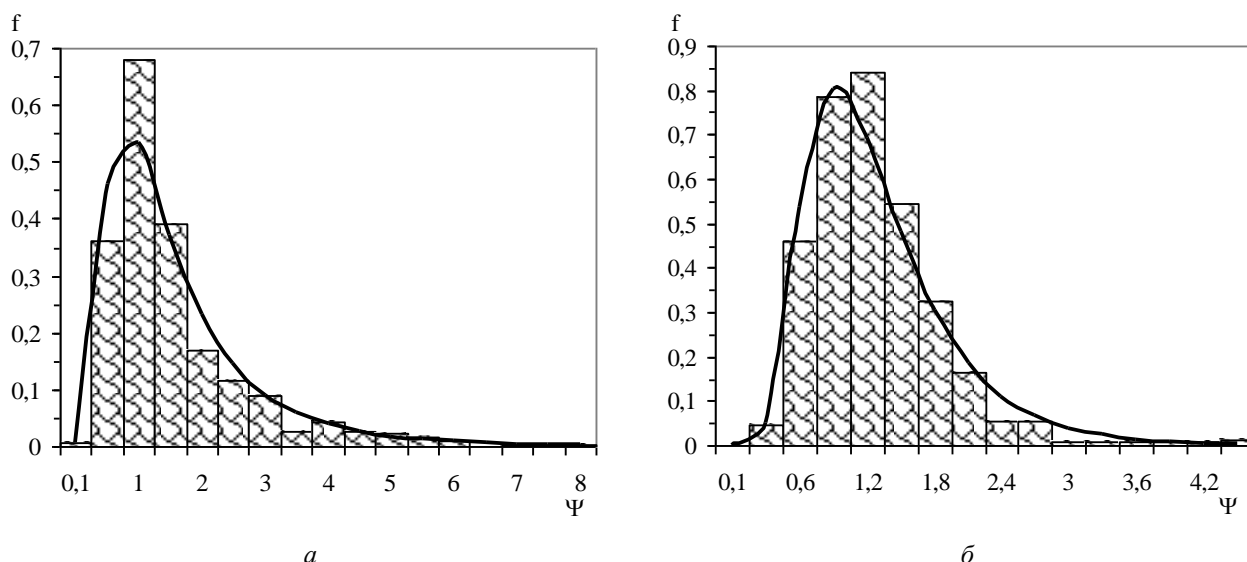


Рис. 2. Распределение случайных величин Ψ и ее аппроксимация логнормальным законом (сплошная линия): а - для значений удельной активности ^{137}Cs ; б - для значений АМАД аэрозоля по сумме β -излучающих нуклидов.

Значения стандартных отклонений (s_i) логарифмов случайных величин Ψ_i , иллюстрирующих вариабельность характеристик радиоактивного аэрозоля, как случайных процессов

Характеристика аэрозолей	s_i
Объемная активность ^{137}Cs	0,84
Объемная активность $\sum\beta$	0,91
Объемная активность ^{241}Am	0,73
Объемная активность ДПР радона и торона	0,41
Значения АМАД для $\sum\beta$	0,50
Значения АМАД для ДПР радона и торона	0,43

Многолетние тренды характеристик радиоактивного аэрозоля в системе «Байпас»

Следующим шагом анализа была оценка сезонных составляющих в составе трендов $C_i^T(t)$, выделенных методом скользящей медианы. Для этого нестационарные логнормальные случайные

процессы, описывающие характеристики радиоактивного аэрозоля в системе «Байпас», рассматривались в виде мультипликативной композиции глобального экспоненциального тренда и сезонной компоненты

$$C_i(t) = C_{0,i}(t) \cdot Z_i(t) \cdot \Psi_i, \tag{1}$$

где $C_{0,i}(t)$ – глобальный экспоненциальный тренд i -й характеристики аэрозоля; $Z_i(t)$ – сезонная компонента тренда (отношение сезонного отклонения значений i -й характеристики радиоактивного аэрозоля от основного тренда) – безразмерная функция.

Как уже отмечалось, наблюдения за характеристиками радиоактивного аэрозоля в системе «Байпас» в течение рассматриваемого периода (2003 - 2012 гг.) проводились не регулярно. В связи с этим для выделения сезонной компоненты использовались усредненные за месяц значения характеристик. Поскольку усреднение приводит к частичной потере информации, допус-

тимось такого усреднения при оценке сезонной компоненты была проверена на массиве ежедневных наблюдений за средней скоростью ветра в районе расположения ЧАЭС.

На рис. 3 приведены оценки сезонной компоненты для средней скорости ветра в районе расположения ЧАЭС, полученные на основе полной выборки (ежедневные наблюдения в период 2003 - 2012 г.), усредненной выборки (данные полной выборки усреднены помесячно) и усредненной смоделированной выборки. Последняя выборка была сформирована из результатов наблюдений только в дни проведения отбора аэрозоля в системе «Байпас» с последующим помесячным усреднением выбранных значений.

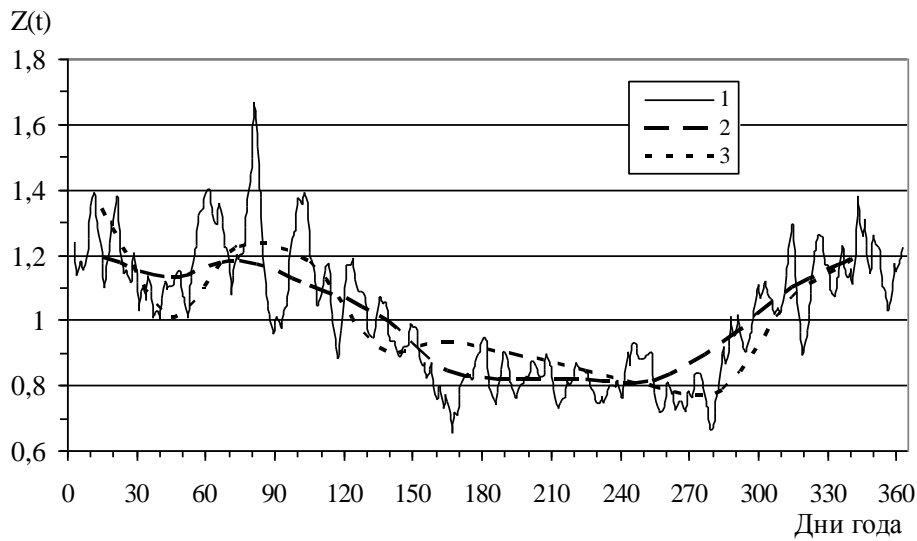
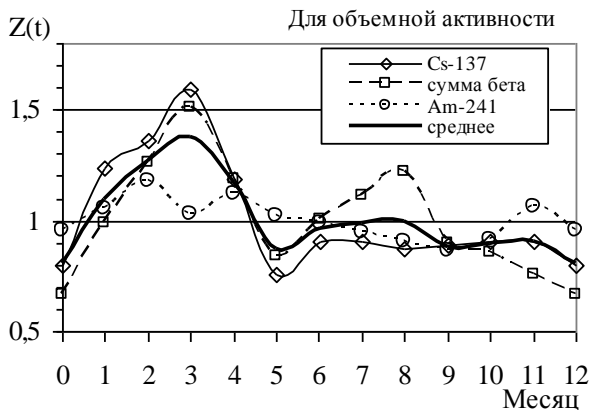


Рис. 3. Сезонная компонента средней скорости ветра в районе расположения ЧАЭС, оцененная по различным выборкам: 1 – полная выборка; 2 – усредненная выборка; 3 – усредненная смоделированная выборка.

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

В соответствии с таким подходом были получены оценки сезонных компонент трендов характеристик аэрозоля в системе «Байпас» для объемных активностей ^{137}Cs , ^{241}Am , ДПР радона и торона, суммы β -излучающих нуклидов, а также значений АМАД аэрозоля по сумме β -излучающих нуклидов и по ДПР радона и торона (рис. 4). (Продолжение рис. 4 см. на с. 384.)



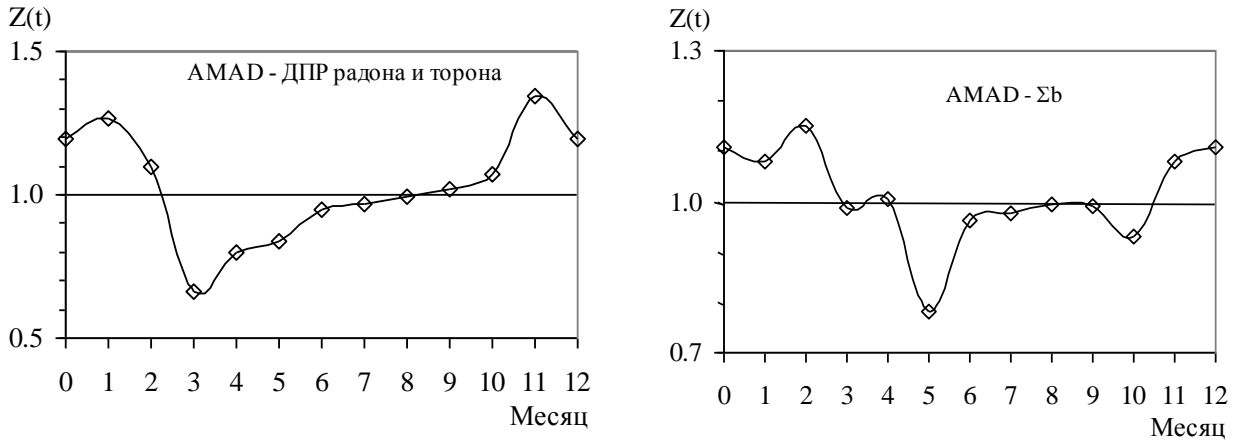
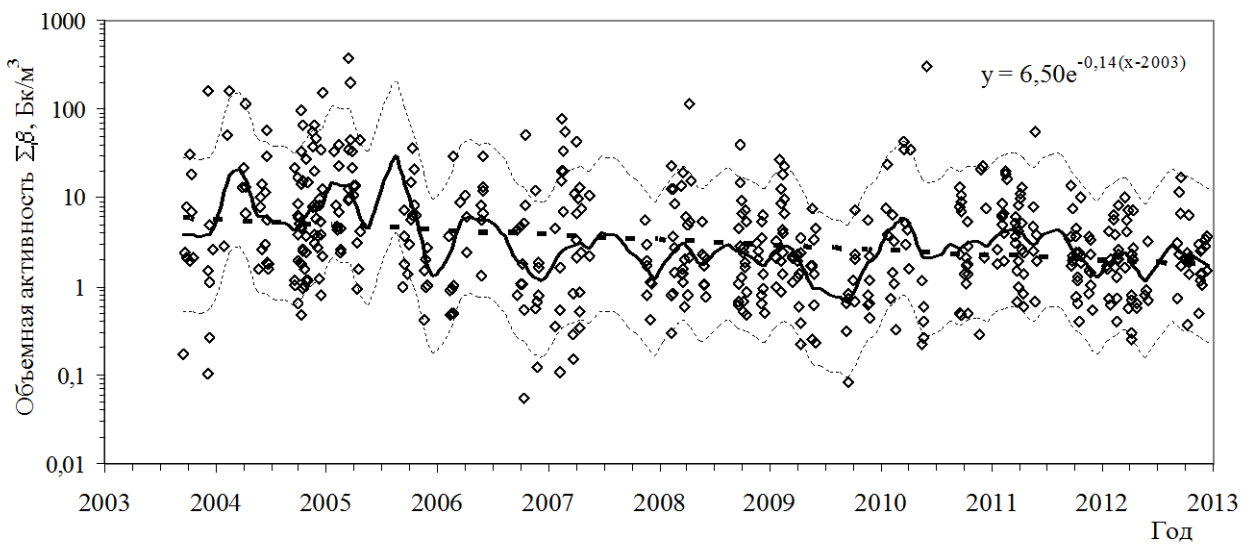
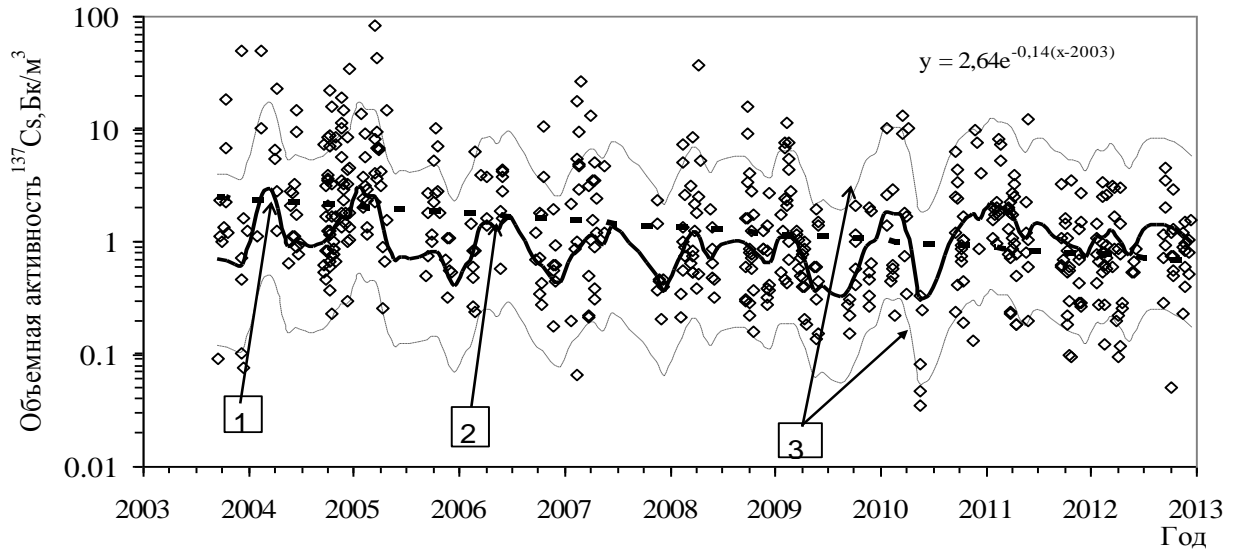


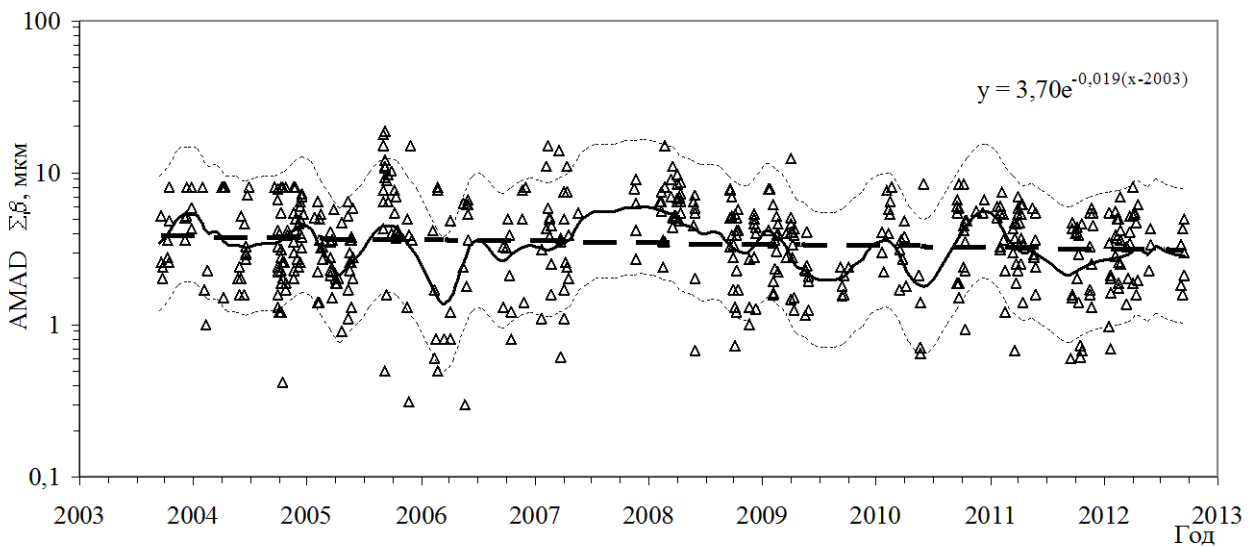
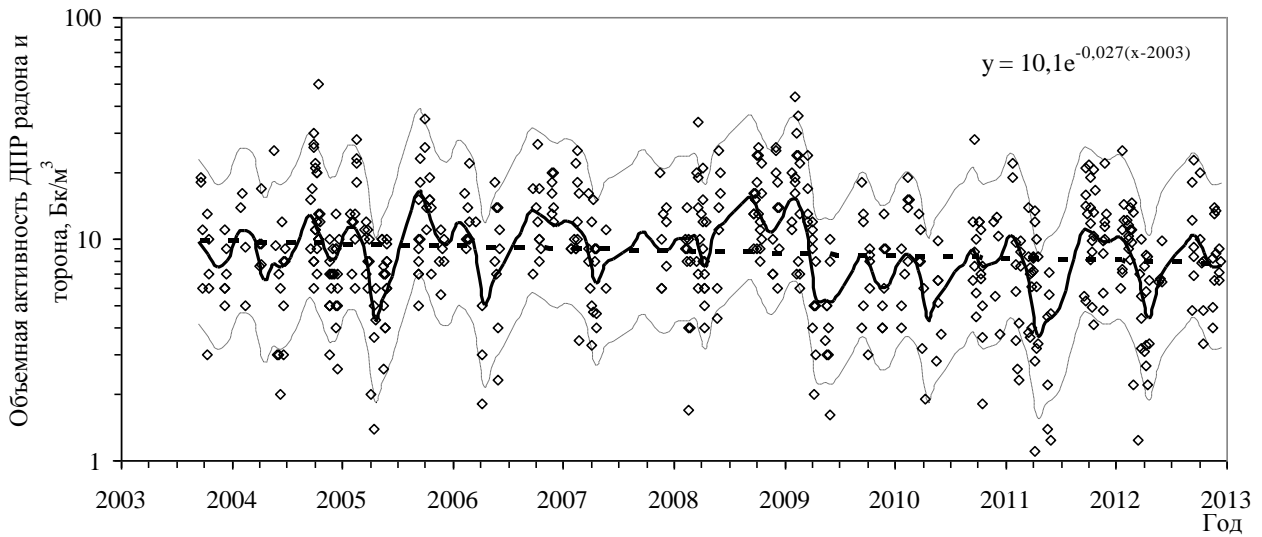
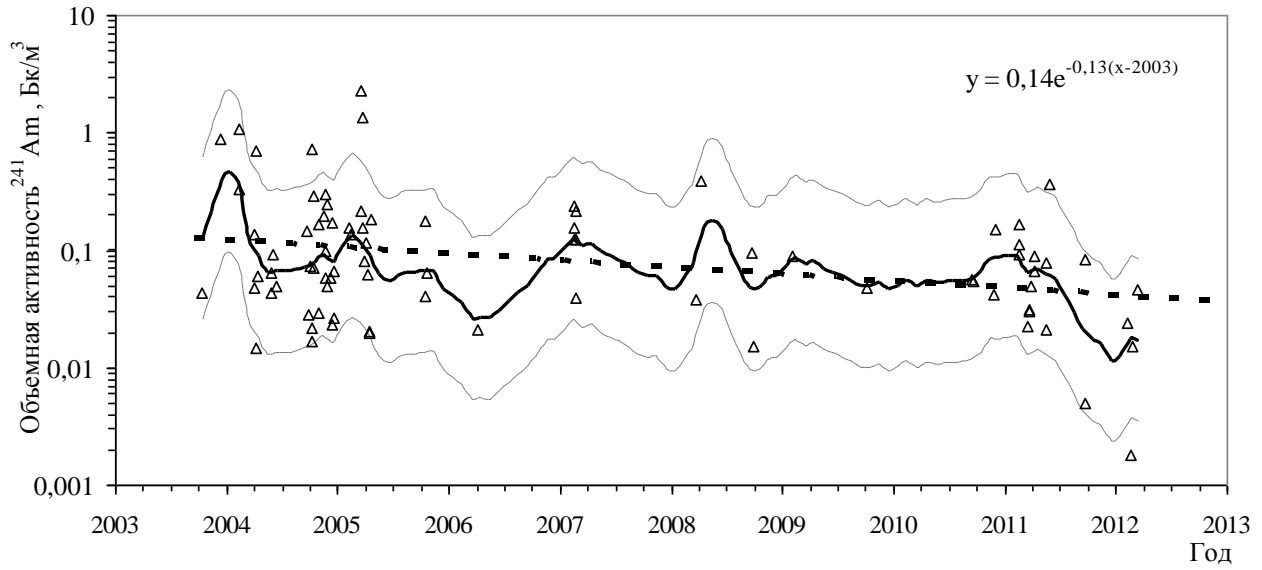
Рис. 4. Сезонные компоненты трендов характеристик аэрозоля в системе «Байпас».

Результаты декомпозиции случайных процессов, описывающих динамику характеристик радиоактивного аэрозоля в системе «Байпас», с использованием глобальных трендов вида

$$C_0(t) = A \cdot \exp(-b \cdot (t - 2003)) \quad (2)$$

представлены на рис. 5. (Продолжение рис. 5 см. на с. 385 - 386.)





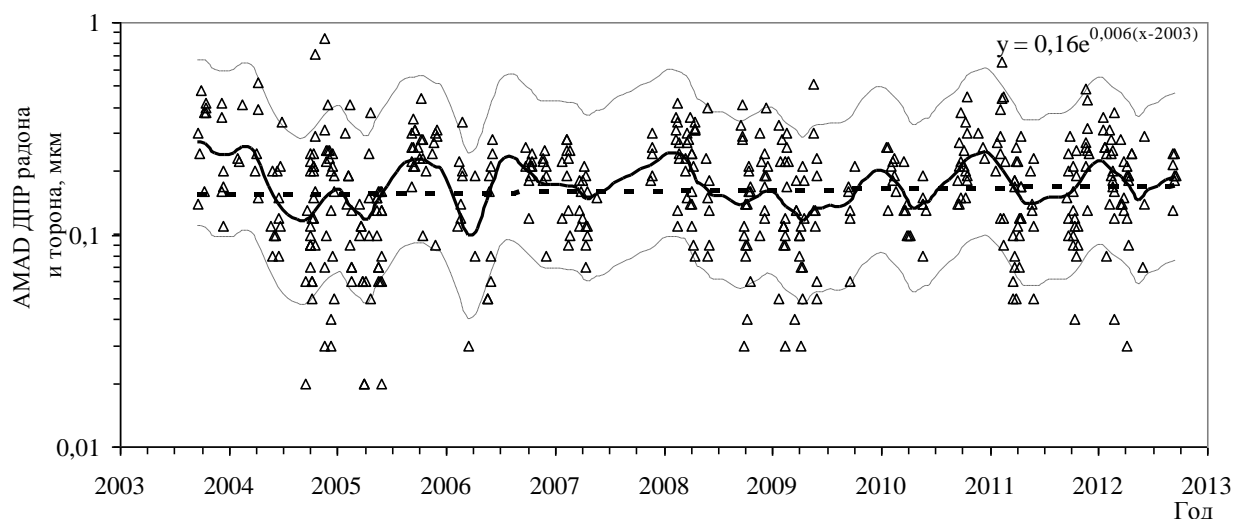


Рис. 5. Динамика характеристик аэрозоля в вентиляционной системе «Байпас»: ----- (1) экспоненциальный глобальный тренд (y); — (2) многолетний тренд с сезонной компонентой; - - - (3) толерантные границы уровня 0,95.

Из полученных результатов следует, что для временной динамики суперпозиции процессов генерации и фиксации аэрозольных носителей активности ^{137}Cs , ^{241}Am и $\sum\beta$ четко выражены экспоненциальные глобальные тренды $C_0(t)$ (3).

Причем параметр b (интенсивность снижения концентрации аэрозольных носителей) для объемной активности ^{137}Cs , $\sum\beta$ и ^{241}Am статистически не различаются (табл. 2).

Таблица 2. Результаты оценки параметра b

Характеристика аэрозолей	b	
	Среднее	STD
Объемная активность ^{137}Cs	0,14	0,02
Объемная активность суммы β -излучающих нуклидов	0,14	0,02
Объемная активность ^{241}Am	0,13	0,04
Объемная активность ДПР радона и торона	0,027	0,010
Значения АМАД по сумме β -излучающих нуклидов	0,019	0,012
Значения АМАД по сумме ДПР радона и торона	-0,006	0,011

Для объемной активности ДПР радона и торона и значений АМАД радиоактивного аэрозоля временная динамика отсутствует. При этом средние значения АМАД для $\sum\beta$ составляют $\sim 3,5$ мкм, а для ДПР радона и торона $\sim 0,15$ мкм.

Выводы

Установлено наличие статистически значимой корреляционной связи между объемными активностями ^{137}Cs , ^{241}Am и суммой β -излучающих нуклидов в аэрозолях вентиляционной системы «Байпас» по результатам наблюдений в период 2003 - 2012 гг. Для остальных исследуемых характеристик (объемная активность ДПР радона и торона, значения АМАД аэрозоля по сумме β -излучающих нуклидов и по ДПР радона и торона) статистически значимых корреляционных связей не выявлено.

Отношения сезонных отклонений значений характеристик радиоактивного аэрозоля в системе «Байпас» от основных трендов укладываются в интервал от 0,5 до 1,5.

Для временной динамики объемной активности ^{137}Cs , ^{241}Am и суммы β -излучающих нуклидов в системе «Байпас» (с вычетом влияния спонтанного радиоактивного распада радионуклидов) установлено наличие четко выраженных глобальных трендов, которые удовлетворительно аппроксимируются экспоненциальными зависимостями вида $C(t) = A \cdot \exp(-b \cdot t)$. В соответствии с этим за период 2003 - 2012 гг. объемная концентрация носителей чернобыльских радионуклидов в системе «Байпас» снизилась в 3,5 раза. Для объемной активности ДПР радона и торона и значений АМАД радиоактивного аэрозоля аналогичные глобальные тренды отсутствуют, что говорит о неизменности динамики данных параметров за исследуемый период.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хан В.Е., Огородников Б.И., Калиновский А.К. и др. Контроль выброса радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в 2009 г. // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. - 2010. - Вип. 13. - С. 111 - 122.
2. Budyka A.K., Ogorodnikov B.I., Skitovich V.I. Filter pack technique for determination of aerosol particle sizes // J. of Aerosol Sci. - 1993. - Vol. 24, Suppl. 1. - P. S205 - S206.
3. Огородников Б.И., Пазухин Э.М., Ключников А.А. Радиоактивные аэрозоли объекта «Укрытие»: 1986 - 2006 гг. Монография. - Чернобыль: ИПБ АЭС НАН України, 2008. - 456 с.
4. Павлюченко Н.И., Хан В.Е., Крилицын 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.
5. Хан В.Е., Огородников Б.И., Калиновский А.К. и др. Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в 2005 г. // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. - 2006. - Вип. 6. - С. 85 - 94.
6. Хан В.Е., Огородников Б.И., Калиновский А.К. и др. Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в 2006 г. // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. - 2007. - Вип. 7. - С. 116 - 121.
7. Хан В.Е., Огородников Б.И., Калиновский А.К. и др. Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в 2007 г. // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. - 2008. - Вип. 9. - С. 48 - 53.
8. Хан В.Е., Огородников Б.И., Калиновский А.К. и др. Контроль выброса радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в 2008 г. // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. - 2009. - Вип. 12. - С. 154 - 162.
9. Makridaki S., Wheelwright S.C. Forecasting methods for managements. - New York: J. Wiley & Sons, 1989.
10. Бегичев С.Н., Боровой А.А., Строганов А.А. и др. Топливо реактора 4-го блока ЧАЭС (краткий справочник). - М., 1990. - 21 с. - (Препр. / Ин-т атомной энергии им. И. В. Курчатова; ИАЭ 5268/3).
11. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. - М.: Наука, 1991. - 384 с.

Ю. В. Хомути́н¹, В. П. Процак¹, В. С. Хан², Б. І. Огородніков²

¹ Український НДІ сільськогосподарської радіології НУБіП України, Київ

² Інститут проблем безпеки атомних електростанцій НАН України, Чернобыль

**СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК РАДІОАКТИВНОГО АЕРОЗОЛЮ
У ВЕНТИЛЯЦІЙНІЙ СИСТЕМІ «БАЙПАС» ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ» ЗА ПЕРІОД 2003 - 2012 рр.**

Представлено результати статистичного аналізу динаміки параметрів радіоактивного аерозолу у вентиляційній системі «Байпас» за період 2003 - 2012 рр. Для об'ємних концентрацій аерозольних носіїв активності ¹³⁷Cs, ²⁴¹Am та суми β-випромінюючих нуклідів встановлено наявність чітко виражених експоненціальних глобальних трендів. Отримано кількісні оцінки сезонних компонент трендів характеристик радіоактивного аерозолу в системі «Байпас».

Ключові слова: система «Байпас», радіоактивні аерозолі, радіонукліди, дочірні продукти радону і торону, АМАД, аналіз часових рядів.

Y. V. Khomutinin¹, V. P. Protsak¹, V. Y. Khan², B. I. Ogorodnikov²

¹ Ukrainian Institute of Agricultural Radiology,

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv

² Institute of Safety Problems of Nuclear Power Plants, National Academy of Sciences of Ukraine, Chornobyl

**STATISTICAL ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF RADIOACTIVE AEROSOL
IN THE VENTILATION SYSTEM "BYPASS" OF OBJECT "UKRYTTYA"
DURING THE PERIOD OF 2003 - 2012 YEARS**

Results of the statistical analysis of dynamics of parameters of a radioactive aerosol in ventilating Bypass system during 2003 - 2012 have been presented. For volume concentration of aerosol carriers of activity ¹³⁷Cs, ²⁴¹Am and sums of β-emitting nuclide the distinct exponential global trends were established. Quantitative estimates of seasonal trend component of characteristics of radioactive aerosol in the "Bypass" were received.

Keywords: Bypass system, radioactive aerosols, radionuclides, daughter products of radon and thoron, AMAD, time-series analysis.

REFERENCES

1. Khan V.E., Ogorodnikov B.I., Kalinovskij A.K. et al. // Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobylya. - 2010. - Issue 13. - P. 111 - 122. (Rus)
2. Budyka A.K., Ogorodnikov B.I., Skitovich V.I. Filter pack technique for determination of aerosol particle sizes // J. of Aerosol Sci. - 1993. - Vol. 24, Suppl. 1. -

- P. S205 - S206.
3. *Ogorodnikov B.I., Pazukhin E.M., Klyuchnikov A.A.* Radioactive aerosols of object "Shelter": 1986 - 2006. Monograph. - Chernobyl: ISP NPP NAS Ukraine, 2008. - 456 p. (Rus)
 4. *Pavlyuchenko N.I., Khan V.E., Krinitsyn A.P. et al.* // Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobylya. - 2005. - Issue 2. - P. 22 - 32. (Rus)
 5. *Khan V.E., Ogorodnikov B.I., Kalinovskij A.K. et al.* // Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobylya. - 2006. - Issue 6. - P. 85 - 94. (Rus)
 6. *Khan V.E., Ogorodnikov B.I., Kalinovskij A.K. et al.* // Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobylya. - 2007. - Issue 7. - P. 116 - 121. (Rus)
 7. *Khan V.E., Ogorodnikov B.I., Kalinovskij A.K. et al.* // Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobylya. - 2008. - Issue 9. - P. 48 - 53. (Rus)
 8. *Khan V.E., Ogorodnikov B.I., Kalinovskij A.K. et al.* // Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobylya. - 2009. - Issue 12. - P. 154 - 162. (Rus)
 9. *Makridaki S., Wheelwright S.C.* Forecasting methods for managements. - New York: J. Wiley & Sons, 1989.
 10. *Begichev S.N., Borovoj A.A., Stroganov A.A. et al.* Fuel of the reactor of Chernobyl NPP 4th Unit (reference book). - Moskva, 1990. - 21 p. - (Preprint / Kurchatov Institute of Atomic Energy; IAE 5268/3). (Rus)
 11. *Ventsel E.S., Ovcharov L.A.* Theory of stochastic processes and its engineering applications. - Moskva: Nauka, 1991. - 384 p. (Rus)

Надійшла 26.06.2014
Received 26.06.2014