

СВЯЗЬ ВЫБРОСОВ РАДИОАКТИВНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ ИЗ ОБЪЕКТА "УКРЫТИЕ" С МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СИТУАЦИЕЙ. ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ВЕТРА

Б. И. Огородников, А. Д. Скорбун

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль

При помощи различных статистических методов проанализированы результаты многолетних наблюдений концентрации радиоактивных аэрозолей в объекте "Укрытие". Показано, что существует достоверная, хотя и не 100 %, корреляция между концентрациями аэрозолей и скоростью ветра. Сделано заключение, что выбросы радиоактивных аэрозолей из объекта "Укрытие" также коррелируют со скоростью ветра. Это необходимо учитывать при оценке загрязнения воздушной среды.

Постановка задачи

Как известно [1 - 3], объект "Укрытие" не является герметичным сооружением. Поэтому вопрос о влиянии ветра на концентрацию аэрозолей в объекте "Укрытие" поднимался неоднократно [4 - 8]. Сопоставление данных позволило сделать качественное заключение, что сильный ветер вызывает рост концентрации аэрозолей. Принимая во внимание, что в объекте "Укрытие" происходят и другие процессы, приводящие к возрастанию концентрации аэрозолей (строительные, сварочные работы, проведение сеансов пылеподавления и др.), однозначной связи со скоростью ветра ожидать не приходится. Обработка данных методом нормированного размаха показала, что вклад техногенных процессов в генерацию аэрозолей достаточно велик [9]. Тем не менее, поскольку наличие связи между скоростью ветра и ростом концентрации аэрозолей кажется физически обоснованным, было решено удостовериться в этом путем использования статистических методов обработки результатов наблюдений.

Место отбора проб аэрозолей

Выброс аэрозолей происходит через вентиляционную трубу ВТ-2 и неплотности (щели, проемы, технологические люки) внешних конструкций объекта "Укрытие" [10]. Проконтролировать воздушные потоки и концентрации аэрозолей в многочисленных неплотностях чрезвычайно сложно. Ориентировочно их общая площадь составляет 120 м² [3, 5]. В связи с этим основной точкой мониторинга считается система "Байпас" – вентиляционный канал, соединяющий разрушенный центральный зал 4-го энергоблока с трубой ВТ-2. Поскольку центральный зал – самое большое помещение 4-го блока, причем расположенное в его верхней части, то в нем собираются воздушные потоки из нижних и боковых помещений. В развале центрального зала находится большое количество обрушившихся конструкций, а также материалов засыпки с вертолетов в 1986 г. Они являются мощным источником генерации аэрозолей.

Вентиляционная система "Байпас"

Эта система была обустроена осенью 1986 г. перед сдачей объекта "Укрытие" в эксплуатацию. Для этого в стене центрального зала направленным взрывом проделали овальное отверстие площадью около 3 м². От него проложили металлический короб сечением 2 м² и длиной 3,5 м. Далее воздух через вертикальный цилиндрический коллектор диаметром 1,4 м и длиной 3,5 м направляется в приемную камеру (помещение 4004/1), где смешивается с вентиляционными потоками 3-го энергоблока и поступает в ВТ-2. На выходе из цилиндрического коллектора размещены датчики расхода воздуха. Их показания (линейная и объемная скорости) непрерывно поступают на щит начальника смены объекта "Укрытие".

Методики отбора проб аэрозолей

В 2003 - 2006 гг. пробы аэрозолей были отобраны на пакеты многослойных фильтров Петрянова с помощью переносной воздуходувки, которую размещали на верхнем срезе системы "Байпас" в помещении 4004/1. Через фильтры площадью 20 см^2 воздух прокачивали со скоростью около 100 л/мин в течение 1 - 2 ч. Для обеспечения изокинетичности отбора аэрозолей перед пакетом фильтров располагалась конусная насадка. В летний период, когда скорость потока в системе "Байпас" составляла 1 - 3 м/с, использовали конус длиной 9 см с площадью входного отверстия 10 см^2 . В зимний период скорость потока возрастала до 4 - 6 м/с. При этом использовали конус длиной 14 см с входным отверстием около 4 см^2 .

Анализ радиоактивных аэрозолей

Через 15 - 20 мин после окончания прокачки воздуха пакет фильтров разделяли на три исходных фильтрующих слоя и начинали измерять их β -активность радиометром КРК-1. Продолжительность замера 100 с. Смена фильтров происходила последовательно через каждые 120 с. Таким образом, для каждого слоя получали кривую спада активности на протяжении 1 - 1,5 ч. Это позволяло при повторном измерении фильтров через 4 - 5 сут определить β -активность как долгоживущих ($\Sigma\beta$), так и короткоживущих нуклидов. Дальнейшую идентификацию радионуклидного состава выполняли на сцинтилляционном и полупроводниковом γ -спектрометрах. Концентрации ^{137}Cs , ^{241}Am и $\Sigma\beta$ -излучающих нуклидов представлены в публикациях [11, 12]. Основной вклад в $\Sigma\beta$ вносили продукты Чернобыльской аварии (^{90}Sr , ^{137}Cs и ^{241}Pu).

Среди естественных короткоживущих радионуклидов значительный интерес представлял ^{212}Pb - дочерний продукт торона. Он не связан с продуктами Чернобыльской аварии и характеризует эманирование инертного благородного газа из фундаментного пространства, сохранившихся и разрушенных бетонных конструкций, а также материалов, сброшенных в развал 4-го блока в 1986 г. Таким образом, источники и механизмы генерации аэрозолей $\Sigma\beta$ и ^{212}Pb совершенно различные. Для первых - это эрозия твердых материалов и сдув пылевых частиц с поверхностей, для вторых - осаждение на атмосферных ядрах конденсации атомарных металлов - продуктов распада торона.

Методика расчета количества ^{212}Pb , поступившего на фильтр, сводилась к тому, что путем экстраполяции кривой распада, полученной для третьего слоя пакета фильтров, находили его активность в момент окончания пробоотбора. Из нее вычитали $\Sigma\beta$. Оставшаяся величина, представляет суммарную активность короткоживущих дочерних продуктов радона и торона. Вклад в нее от первых и вторых находили с учетом того, что эффективный период полураспада смеси дочерних продуктов радона после 1 - 2 ч накопления на фильтре составляет около 32 мин [13 - 15]. Принимали также, что активность дочерних продуктов торона в течение 1 ч, пока проводятся измерения для построения кривой распада, остается практически неизменной, поскольку период полураспада ^{212}Pb составляет 10,6 ч. Из рассчитанной β -активности дочерних продуктов торона (с учетом их доли, находящейся на третьем слое пакета фильтров) лишь половина приходится на ^{212}Pb , поскольку при его распаде образуются еще два β -излучающих нуклида: ^{212}Bi с выходом 64 % и ^{208}Tl - 36 %.

Метеорологическая информация

Все данные были получены с метеостанции "Чернобыль", на которой результаты наблюдений фиксируют каждые три часа. Станция расположена в 18 км на юго-восток от ЧАЭС на высоте 123 м над уровнем моря на южной окраине города. Флюгер для замеров скорости и направления ветра находится в 12 м от земли. Средняя скорость ветра определяется с помощью автоматической аппаратуры в течение 10 мин, предшествующих сроку наблюдения. Максимальные порывы ветра автоматически фиксируются непрерывно в течение трех часов между сроками наблюдений.

Методика обработки данных

Как уже говорилось, данная работа посвящена поиску связи между концентрацией аэрозолей и метеоусловиями, в данном случае скоростью ветра. Пусть имеется две выборки чисел $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ и $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$, между которыми предполагается зависимость типа $Y = aX + b$. Наиболее известным способом является вычисление коэффициента корреляции K . Однако сам по себе этот коэффициент еще не свидетельствует о взаимосвязи явлений, особенно в условиях значительного разброса данных. Поэтому для большей достоверности при обработке результатов было использовано еще два метода: первый - построение графической зависимости, когда по осям откладываются значения переменных, между которыми ищется связь, и вычисляется наклон прямой, проведенной через точки на графике методом наименьших квадратов; второй - использование так называемой проверки методом перестановок (permutation test).

Рассмотрим последний метод более подробно и покажем его возможности на демонстрационном примере, чтобы были понятны результаты последующей обработки экспериментальных данных. Метод подробно описан в [16, 17] и в нашем случае состоит в следующем. Парно перемножим элементы $x_i y_i$ обеих выборок и просуммируем результаты умножения $S = \sum x_i y_i$. Суть метода базируется на том, что для упорядоченных по возрастанию (полностью скоррелированных) выборок такая сумма будет наибольшей, а для антикоррелированных – наименьшей из возможных. Затем случайным образом переставим местами элементы в одной из выборок, перемножим их и опять подсчитаем сумму результатов умножения. Повторим эту операцию k раз, каждый раз запоминая результат S_k , и построим гистограмму распределения полученных сумм. Количество значений S_k , полученных в результате многократных перестановок, которые будут больше суммы S_0 для исходной комбинации выборок, будет показывать, насколько случайной является корреляция между двумя анализируемыми выборками.

Покажем это на примере модельных расчетов (рис. 1 - 3). В первом случае выборки X и Y представляли собой независимые наборы случайных чисел. Для таких выборок коэффициент корреляции близок к нулю. Прямая, проведенная через точки графика, по одной оси которого отложены значения X , а по другой Y , иногда может показать слабый наклон как в сторону корреляции, так и антикорреляции. Выполним операцию подсчета сумм для перестановок и из каждой суммы вычтем начальное значение $S_k - S_0$, устанавливая таким образом точку отсчета в нуль. На полученной для таких случайных выборок гистограмме центр распределения находится вблизи нуля. Это свидетельствует о том, что, по крайней мере, в половине случаев начальная сумма может реализоваться при случайной комбинации

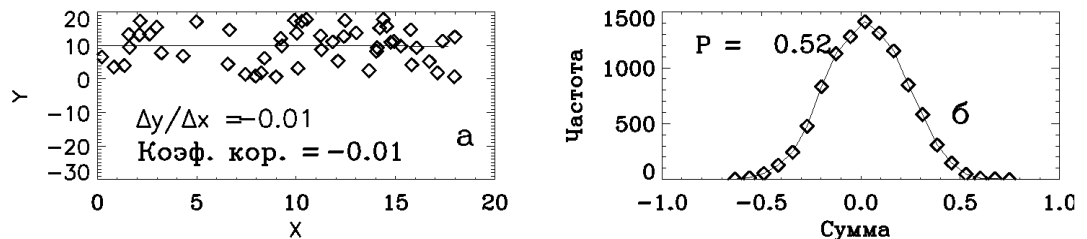


Рис. 1. Модельная выборка для полностью случайных данных.

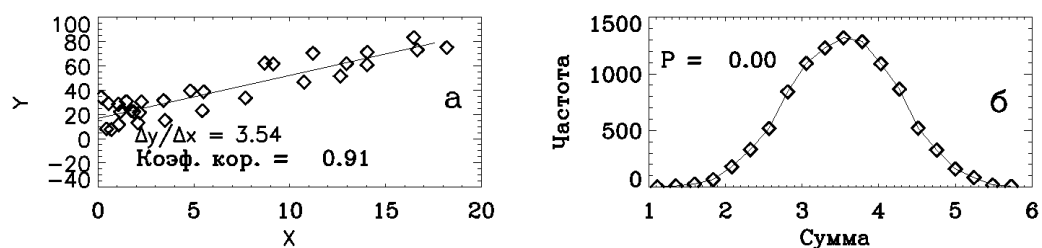


Рис. 2. Модельная выборка с корреляцией данных.

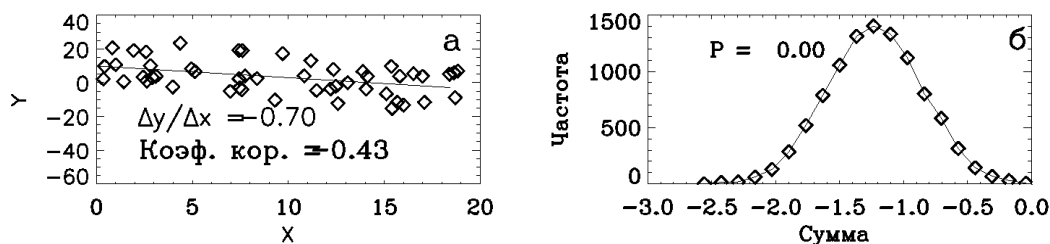


Рис. 3. Модельная выборка с антикорреляцией данных.

анализируемых выборок. Доля случаев P , когда случайная сумма больше начальной, вынесена на график.

Образум теперь выборки следующим образом. Создадим из случайных чисел выборку X , затем получим выборку $Y = aX + \xi$, где ξ - случайное число, имитирующее разброс данных. Можно видеть, что хотя на графике рис. 2а точки имеют некоторый разброс, на рис. 2б все суммы значительно больше нуля. Следовательно, при случайных перестановках нет ни одной комбинации, которая дала бы исходный результат. Это является свидетельством того, что исходные выборки достаточно сильно скоррелированы.

Обратим внимание на то, что в случае антикорреляции критерием случайности будет число комбинаций, результат суммирования которых меньше суммы для исходных выборок, и тогда гистограмма сместится в сторону отрицательных значений (рис. 3б).

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Анализ ветра. Приступая к обработке экспериментальных данных по концентрациям радиоактивных аэрозолей в "Байпасе", мы не знали, какой скорости ветра отдать предпочтение: средней или максимальным порывам. Из приведенных на рис. 4а метеоданных интуитивно чувствовалось, что между скоростями ветра имеется прямая корреляционная связь: в большинстве случаев пики и впадины на обеих кривых совпадали. Чтобы убедиться в наличии корреляции, все данные, полученные с метеостанции "Чернобыль" за период отбора проб аэрозолей в системе "Байпас", были обработаны с помощью изложенной выше проверки методом перестановок. Представленная на рис. 4в гистограмма подтверждает не только наличие корреляционной связи. Из нее следует также, что эти данные полностью зависимы и не обнаружено ни одной случайной комбинации исходных средних скоростей и порывов ветра, которая могла бы описать такую зависимость. В связи с этим описанные ниже корреляции с концентрациями аэрозолей оказались примерно одинаковыми как для средней скорости ветра, так и для максимальных порывов, поэтому приводятся результаты расчетов только для средней скорости ветра.

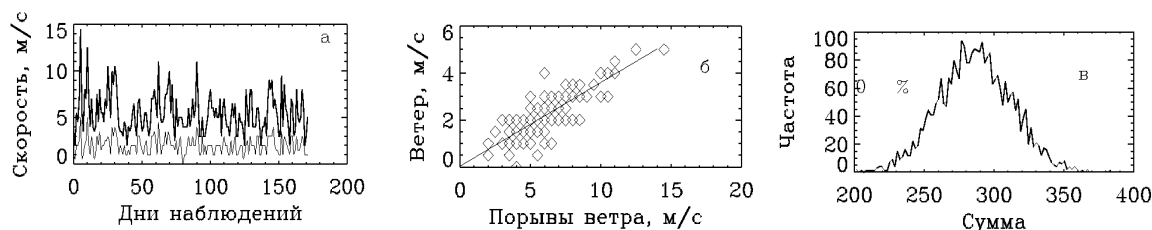
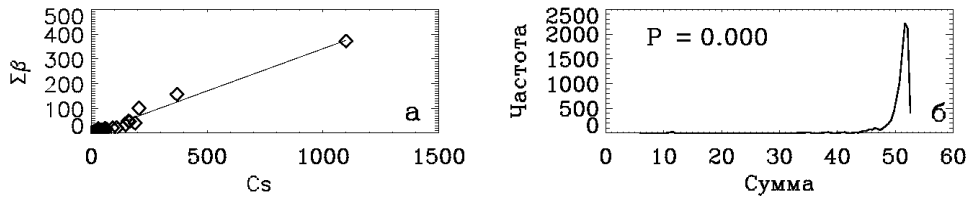


Рис. 4. Сопоставление средней скорости и максимальных порывов ветра:
 а - по данным метеостанции; б - корреляционные зависимости;
 в - гистограмма распределения $S_0 - S_k$.

ляции с концентрациями аэрозолей оказались примерно одинаковыми как для средней скорости ветра, так и для максимальных порывов, поэтому приводятся результаты расчетов только для средней скорости ветра.

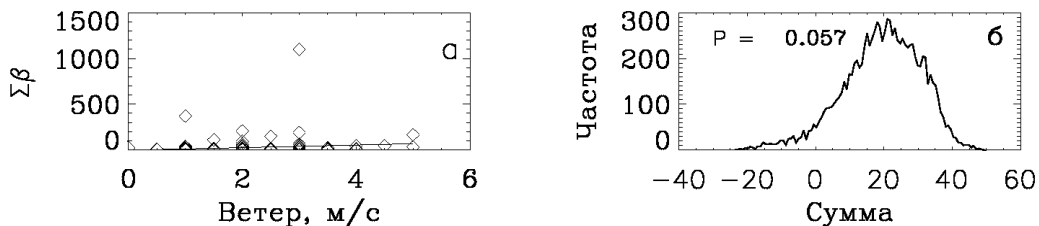
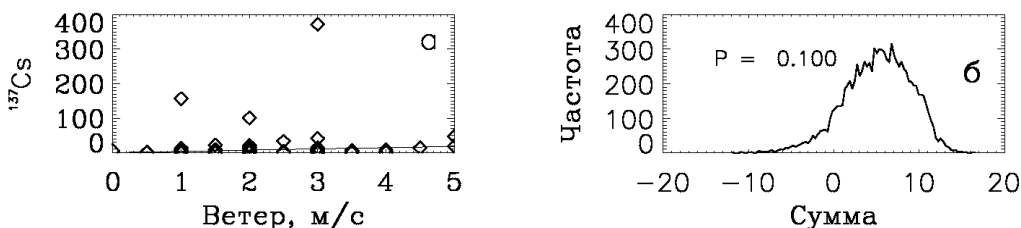
Анализ концентрации аэрозолей. В течение 2003 – 2006 гг. из системы "Байпас" на пакеты трехслойных фильтров было отобрано около 300 проб аэрозолей. Из них для статистического анализа выбрано около 75 %. Исключены пробы, во время отбора которых в

Рис. 5. Корреляционные зависимости концентраций $\Sigma\beta$ и ^{137}Cs .

объекте "Укрытие" проводились работы с интенсивным образованием аэрозолей, например распыление растворов через форсунки над развалом центрального зала при сеансах пылеподавления [18].

Контрольной проверкой примененного метода анализа можно считать подтверждение корреляций между концентрациями ^{137}Cs и $\Sigma\beta$. Связь между ними по своей физической природе является однозначной, поскольку их генерация происходит в одном источнике, что и демонстрирует рис. 5. На нем не обнаружено ни одной комбинации, которая дала бы отрицательные значения. Тем не менее отметим, что гистограмма на рис. 5 очень асимметрична. Из этого следует, что среди экспериментальных данных имеются весьма сильные "выбросы", объяснить которые ошибкой эксперимента достаточно сложно. Возможно, это связано с тем, что в некоторых помещениях объекта "Укрытие" пылевые осадки и аэрозоли обогащены ^{137}Cs .

На рис. 6 - 7 показаны результаты статистического анализа данных о связи концентрации аэрозолей-носителей ^{137}Cs и $\Sigma\beta$ со скоростью ветра. Для этих данных корреляционная связь не так однозначна, и вклад случайной составляющей (число точек в области отрицательных значений) достаточно велик. Это может свидетельствовать о том, что помимо ветрового пылеподъема существуют и другие механизмы генерации аэрозолей. Как отмечалось в [19], такими механизмами могут быть производственные работы в объекте "Укрытие" (например, сварочные работы). На основании полученных результатов можно оценить скорость ветра, при которой будут превышены контрольные уровни, например по $\Sigma\beta$. Согласно [20], для $\Sigma\beta$ контрольный уровень концентрации составляет 370 Бк/м^3 . Если корреляционная связь между $\Sigma\beta$ и средней скоростью ветра остается линейной при более высоких скоростях, чем на рис. 4, то контрольный уровень может быть превышен при 26 м/с. Если же связь между параметрами нелинейная (например, степенная), то контрольный уровень будет достигнут при меньших скоростях, которые нередко наблюдаются в районе ЧАЭС.

Рис. 6. Корреляционные зависимости концентраций $\Sigma\beta$ и средней скорости ветра.Рис. 7. Корреляционные зависимости концентраций ^{137}Cs и средней скорости ветра.

Третья серия измерений посвящена анализу концентрации в аэрозолях ^{212}Pb – дочернего продукта торона. Проанализировано наличие связи между концентрациями ^{212}Pb и средней скоростью ветра (рис. 8), а также ^{212}Pb и ^{137}Cs (рис. 9). Как и следовало ожидать, поскольку механизмы генерации этих нуклидов различны (продукты распада радона и торона обусловлены эмиссией из строительных конструкций и других природных материалов, а аэрозоли-носители ^{137}Cs образуются в результате пылеподъема), корреляции между ними не обнаруживается. Для соотношения ^{212}Pb и ^{137}Cs доля случайного вклада составляет 46 % (напомним, что для полностью случайного процесса эта величина близка к 50 %, см. рис. 1). Что касается соотношения между концентрацией ^{212}Pb и скоростью ветра, то здесь обнаруживается явная антикорреляция. Создается впечатление, что ветер выдувает радиоактивный газ из объекта "Укрытие". Подобный эффект уменьшения концентрации торона в воздухе при высоких скоростях ветра был отмечен при исследовании радиоактивных аэрозолей на станции мониторинга воздушной среды в канадском Ванкувере [21].

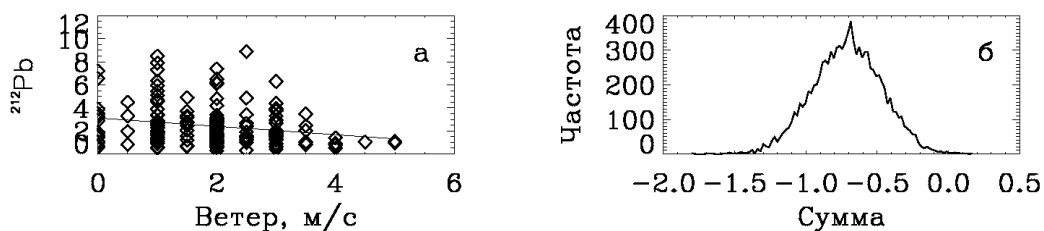


Рис. 8. Корреляционные зависимости концентраций ^{212}Pb и средней скорости ветра.

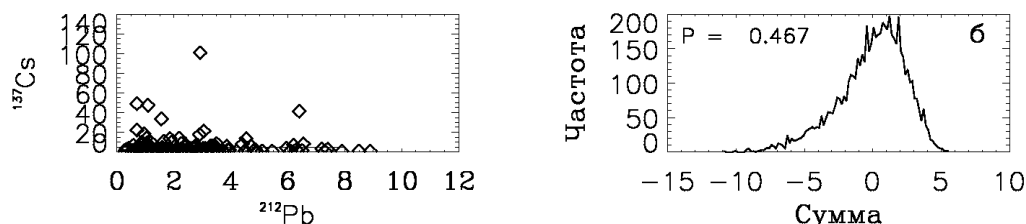


Рис. 9. Корреляционные зависимости концентраций ^{137}Cs и ^{212}Pb .

Выводы

Проанализированы многолетние ряды наблюдений (2003 – 2006 гг.) концентрации радиоактивных аэрозолей в системе "Байпас" с целью поиска физических причин их временной изменчивости. Путем статистической обработки показана связь колебаний концентрации радиоактивных аэрозолей в системе "Байпас" с метеоусловиями, а именно – со скоростью ветра:

1. При обработке данных метеостанции "Чернобыль" выявлена положительная корреляция средней скорости и максимальных порывов ветра.
2. Подтверждена положительная корреляция между концентрациями аэрозолей-носителей ^{137}Cs и суммарной β -активности.
3. Установлена положительная корреляция концентрации аэрозолей-носителей ^{137}Cs и суммарной β -активности, выбрасываемых из объекта "Укрытие" в атмосферу, со средней скоростью ветра вблизи ЧАЭС.
4. Обнаружена отрицательная корреляция концентрации аэрозолей-носителей ^{212}Pb со средней скоростью ветра.
5. Показано, что отсутствует какая-либо связь между колебаниями концентраций аэрозолей-носителей ^{137}Cs и ^{212}Pb , что естественно вследствие различий в механизмах генерации этих аэрозолей в объекте "Укрытие".
6. Анализ полученных статистических выводов подтверждает результаты сделанных ранее наблюдений о существовании влияния техногенных процессов в объекте "Укрытие" на колебания концентрации аэрозолей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Купный В. И.* Объект "Укрытие": вчера, сегодня, завтра // Объект "Укрытие" – 10 лет. Основные результаты научных исследований. – Чернобыль, 1966. – С. 57 – 77.
2. *Боровой А. А., Богатов С. А., Пазухин Э. М.* Современное состояние объекта «Укрытие» и его влияние на окружающую среду // Радиохимия. - 1999. – Т. 41, № 4. – С. 368 – 378.
3. *Ключников А. А., Краснов В. А., Рудько В. М., Щербин В. Н.* Объект "Укрытие": 1986 – 2006. – Чернобыль: ИПБ АЭС НАН Украины. – 2006. – 168 с.
4. *Огородников Б. И., Павлюченко Н. И.* Наблюдение за концентрациями и составом радиоактивных аэрозолей в выбросах из объекта "Укрытие" // Проблемы Чернобиля. - 2003. – Вып. 13. - С. 57 - 73.
5. *Огородников Б. И., Павлюченко Н. И., Ковальчук В. П.* Влияние ветра на выброс радиоактивных аэрозолей из объекта "Укрытие" // Тез. докл. Междунар. научн. сем. "Радиоэкология Чернобыльской зоны", 13 – 14 сент. 2004 г. Славутич, Украина. – Славутич. – 2004. - С. 85 - 86.
6. *Огородников Б. И., Будыка А. К., Павлюченко Н. И.,* Выброс радиоактивных аэрозолей из объекта "Укрытие" при сильных ветрах // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2005. – Т. 45, № 2. – С. 234 – 242.
7. *Контроль* неорганизованных выбросов из объекта "Укрытие" // Проблемы Чернобиля. - 2003. – Вып. 12. - С. 126 - 141.
8. *Огородников Б. И., Павлюченко Н. И., Хан В. Е., Краснов В. А.* Связь концентрации радиоактивных аэрозолей в "Байпасе" объекта "Укрытие" с погодными условиями // Там же. - 2004. – Вып. 15. - С. 14 – 23.
9. *Огородников Б. И., Скорбун А. Д.* О возможности прогнозирования уровня активности аэрозолей в вентиляционной системе объекта "Укрытие" // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. – 2006. – Вып. 4. – С. 121 – 124.
10. *Павлюченко Н. И., Хан В. Е., Малюк И. А., Хоренко И. П.* Мониторинг неорганизованных выбросов из объекта "Укрытие" // Проблемы Чернобиля. - 2001. – Вып. 7. - С. 170 - 180.
11. *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 станцій і Чернобиля. – 2005. – Вып. 2. – С. 22 – 32.
12. *Хан В. Е., Огородников Б. И., Калиновский А. К. и др.* Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта "Укрытие" // Там же. – 2006. - Вып. 6. – С. 85 – 94.
13. *Белюсов А. З., Новиков Ю. В., Орешко В. Ф., Поливода Б. И.* Радиоактивный фон атмосферного воздуха, обусловленный аэрозолями // Гигиена и санитария. – 1958. — № 10. – С. 17 – 22.
14. *Зыкова А. С., Счастный В. А., Ефремова Г. П.* К вопросу об определении естественных радиоактивных аэрозолей в атмосферном воздухе // Там же. – С. 62 - 64.
15. *Белюсов А. З., Новиков Ю. В., Орешко В. Ф., Поливода Б. И.* Методика определения естественного радиоактивного фона атмосферного воздуха, обусловленного аэрозолями // Там же. – С. 64 – 69.
16. *Hesterberg T., Moore D. S., Monaghan S. et al.* Bootstrap methods and permutation tests. – N.Y.: W. H. Ereeman. – 2005. – P. 14.2 – 14.69.
17. *Simon J. L.* Resampling: The new statistics.– Duxbury Press – 1993.
18. *Краснов В. А., Криницын 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. 24 - 33.
19. *Огородников Б. И., Будыка А. К.* Мониторинг радиоактивных аэрозолей в объекте "Укрытие" // Атомная энергия. – 2001. – Т. 91, вып. 6. – С. 471 – 475.
20. *Контрольные уровни радиационной безопасности 41П-С* (утверждены 27.10.05). ГСП ЧАЭС. - Славутич, 2005.
21. *Ho E. C. I., Measday D. F.* A simple model for describing the concentration of ^{212}Pb in the atmosphere // J. Environm. Radioactivity. – 2005. – Vol. 78, No. 3. – P. 289 – 309.

Поступила в редакцию 12.02.07

**20 ЗВ'ЯЗОК ВИКИДІВ РАДІОАКТИВНИХ АЕРОЗОЛІВ
З ОБ'ЄКТА "УКРИТТЯ" З МЕТЕОРОЛОГІЧНОЮ СИТУАЦІЄЮ.
ВПЛИВ ШВИДКОСТІ ВІТРУ**

Б. І. Огородников, А. Д. Скорбун

За допомогою різних статистичних методів проаналізовано результати багаторічних спостережень концентрації радіоактивних аерозолів в об'єкті "Укриття". Показано, що існує достовірна, хоча і не 100 %, кореляція між концентраціями аерозолів та швидкістю вітру. Зроблено висновок, що викиди радіоактивних аерозолів також корелюють із швидкістю вітру. Це необхідно враховувати при оцінці забруднення повітряного середовища.

**20 RELATIONSHIP OF RADIOACTIVE AEROSOL EMISSIONS
FROM "UKRYTTYA" OBJECT WITH METEOROLOGICAL SITUATION.
WIND VELOCITY INFLUENCE**

B. I. Ogorodnikov, A. D. Skorbun

Using different statistical methods the results of long-term observations of radioactive aerosol concentration in the "Ukryttya" object have been analyzed. It was shown, that there is reliable, although do not 100 %, correlation between aerosol concentration and wind velocity. The conclusion was drawn, that radioactive aerosol emissions also correlate with wind velocity. This fact must be taking into account when making an assessment of atmosphere environment pollution.