

ПРОГНОЗ ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ ^{137}Cs В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ 30-КИЛОМЕТРОВОЙ ЗОНЫ ЧАЭС

Е. К. Гаргер, Ю. И. Кузьменко

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев

Проведен анализ нестационарности изменения средних объемных активностей ^{137}Cs во времени по данным измерений в г. Припять с 1987 г. Показано, что флуктуации объемных активностей долгосрочно коррелированы, имеют выраженную циклическую составляющую с периодом в один год и логнормально распределены. Полученные зависимости для описания детерминированной составляющей изменения средних объемных активностей за период 1987 - 1991 гг. в комбинации с моделированием случайной составляющей процесса на основе параметров ее распределения позволили дать долгосрочный прогноз активности до 2009 г. Верификация результатов прогнозирования была проведена на независимых данных после 1992 г.

Сразу после окончания первичной фазы Чернобыльской аварии вторичное поступление радиоактивного аэрозоля осуществлялось за счет естественного ветрового подъема пылевых частиц с загрязненной подстилающей поверхности земли (пашня, лес, луга), подъема пыли с дорог, строительных площадок. Поступление аэрозоля происходило также вследствие лесных пожаров и постоянной неорганизованной эмиссии радиоактивности в атмосферу из объекта «Укрытие». В связи с этим возникла необходимость оценки перераспределения радиоактивности в пространстве за счет горизонтальной миграции радиоактивных частиц в приземном слое атмосферы, оценки временной изменчивости ингаляционных доз при различных видах деятельности в 30-километровой зоне и в окружающей местности. Расчет ингаляционных доз в первую очередь требует знания объемной активности основных дозообразующих радионуклидов. Это дает возможность анализировать средние объемные активности радионуклидов во времени и ее изменчивость более детально [1]. Так как ^{137}Cs измеряется надежно и проще других радионуклидов, то это позволило получить данные за ряд лет в нескольких пунктах в зоне и вокруг нее. Эти данные демонстрируют выраженный нестационарный характер зависимости объемных активностей от времени после аварии (рис. 1), что позволяет представить их как случайный нестационарный процесс, включающий в себя детерминированную составляющую и случайные колебания.

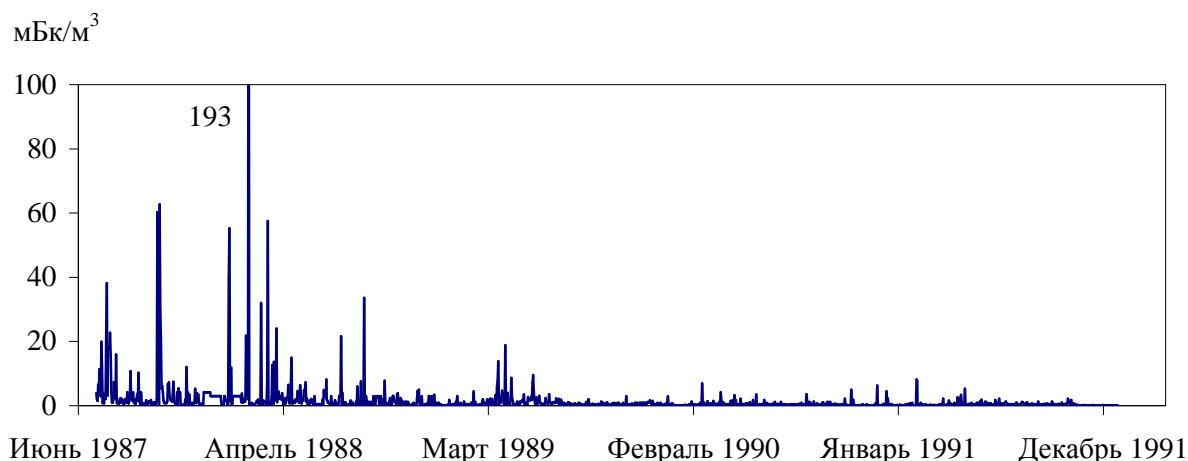


Рис. 1. Объемная активность в ^{137}Cs за 1987 - 1991 гг. в г. Припять

Суточные измерения объемной активности ^{137}Cs 1987 - 1991 гг. в Чернобыле послужили основой первой попытки расчетов прогноза на 20 лет [2]. Особенностью этого ряда наблюдений является наличие пропусков наблюдений до 7 % от общего количества по разным объективным причинам, что послужило основанием применения для расчетов

техники вычисления спектров мощности ряда измерений объемной активности ^{137}Cs , специально приспособленной к случаям с пропусками данных, основанной на вычислении LS спектра Ломба [3]. Имеющиеся данные измерений ^{137}Cs в районе г. Припять с 1987 г. также позволяют оценить статистические характеристики временных рядов наблюдений и использовать существующие методы предсказания поведения объемной концентрации во времени с учетом результатов, полученных в [2].

В настоящей работе поставлена задача провести прогностические расчеты объемной активности ^{137}Cs по данным измерений в г. Припять и дать оценку их достоверности путем верификации прогноза на независимых данных за 1992 - 1997 гг. Данные измерений в г. Припять, полученные до 1997 г., позволили сравнить прогноз, составленный по данным за период 1987 - 1991 гг. с экспериментом. Осенью 2001 г. наблюдения были перенесены в санитарно-защитную зону ЧАЭС для постоянного слежения за радиоактивными аэрозолями в приземном слое атмосферы. Фильтровентиляционное устройство «Тайфун» было установлено в 1 км от объекта «Укрытие».

Методы и результаты

В основе методики оценки детерминированной составляющей изменений во времени объемной активности ^{137}Cs , рассматриваемой как случайный процесс с ярко выраженным нестационарным характером, был использован подход последовательного выделения временных трендов. При этом на первом этапе производится выделение убывающей непериодической составляющей процесса, а затем определяются периодические компоненты временного ряда на основе их разложения в тригонометрический ряд Фурье.

Для уменьшения влияния ошибок измерений и высокочастотных колебаний нами были использованы среднедекадные значения объемной активности ^{137}Cs .

На первом этапе моделирования временного ряда объемной активности $C(t)$, где t – текущее время, для описания убывающей непериодической составляющей временного тренда $C_0(t)$ с использованием регрессионного анализа был произведен выбор и оценка параметров модели на основе нескольких вариантов эмпирических зависимостей, представленных в табл. 1.

Таблица 1. Эмпирические зависимости для описания убывающего тренда $C_0(t)$

Структура модели	Параметр			
	a	τ	b	c
$C_0(t) = a \exp(-t/\tau)$	5931	41,9		
$C_0(t) = a \exp(-t/\tau) + b$	6725	30,0	346	
$C_0(t) = a \exp(-t/\tau)t^{-c} + b$	6590	44,6	119	0,069
$C_0(t) = a \exp(-t/\tau)t^{-c}$	6823	49,9		0,087
$C_0(t) = at^{-c}$	10248			0,480

Здесь параметр a имеет смысл средней объемной активности ^{137}Cs в момент времени $t = 0$, τ представляет временной масштаб ее убывания, b имеет смысл фонового значения объемной концентрации, параметр c – показатель степени, характеризующий убывание гиперболической функции. Оценка параметров моделей производилась по данным ряда наблюдений в г. Припять за 1987 - 1991 гг. методом взвешенных наименьших квадратов (МНК). На рис. 2 представлены графики экспоненциальных зависимостей, представляющие наибольший интерес. Характерным для всех представленных моделей является хорошее совпадение с фактическими данными за период 1987 - 1991 гг., когда скорость убывания активности была наибольшей. В то же время на промежутке 1992 - 1997 гг. правдоподобный результат дает только модель $C_0(t) = a \exp(-t/\tau) + b$ со свободным членом. В этом случае $C_0(t)$ асимптотически стремится к некоторому постоянному значению, а не к нулю, как,

например, в модели без свободного члена, что важно для оценок за большой период времени. Модель $C_0(t) = a \exp(-t/\tau)$, используемая в [2] для выделения убывающего тренда, дает значительно заниженные результаты после 1991 г. Исследование поведения параметров модели со свободным членом в зависимости от длины используемого ряда для оценки ее параметров показало, что параметры стабилизируются с длины ряда, соответствующей примерно 4,5 годам (соответствует середине 1991 г.). В дальнейшем изменение параметров a и τ незначительно и составляет 1 – 3 %. Изменение величины свободного члена b не превышает 10 %. Это подтверждает надежность определения параметров модели, полученных за период 1987 - 1991 гг., и позволяет сделать вывод о возможности ее применения для долгосрочного прогнозирования по результатам оценки за первые 4 - 5 лет после аварии.

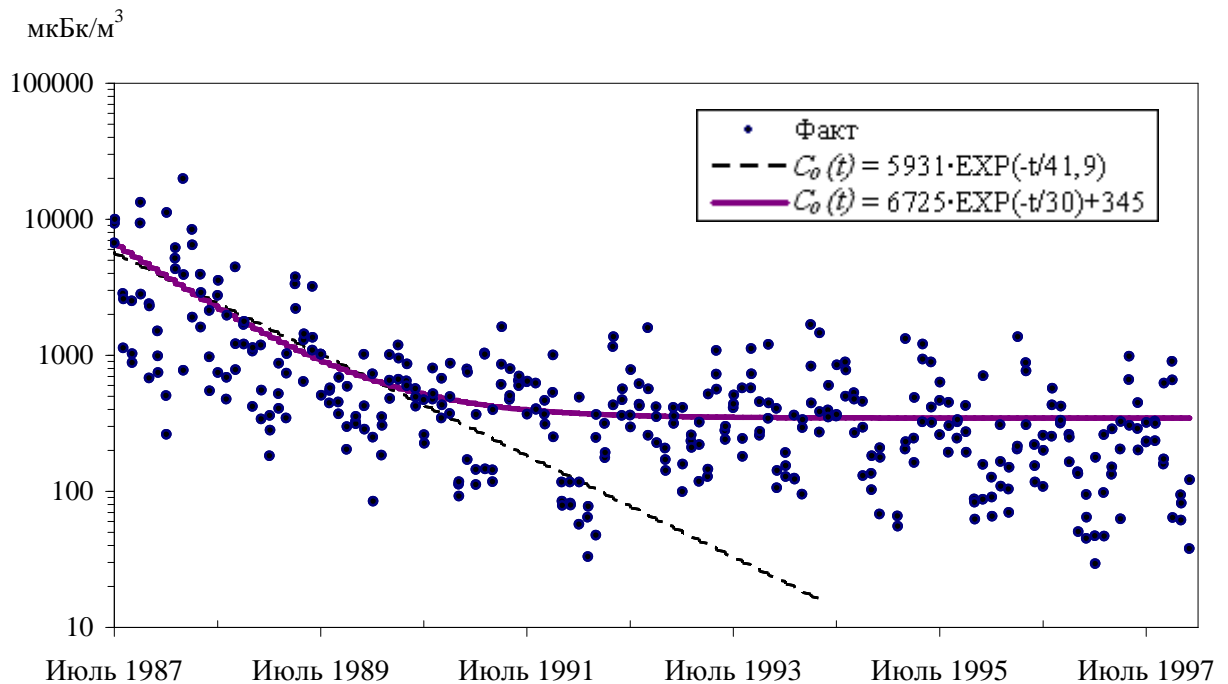


Рис. 2. Среднедекадные данные объемной активности и графики эмпирических зависимостей $C_0(t)$ за период 1987 - 1997 гг.

На рис. 3 представлен безразмерный временной ряд изменений объемной активности $C(t)$ относительно экспоненциально убывающей детерминированной составляющей $C_0(t)$, полученный так же, как и в [2] в результате логарифмирования частного от деления $C(t)$ на $C_0(t)$.

Из данных, представленных на рис. 3, видно, что ряд $u(t) = \log_{10} \{C(t)/C_0(t)\}$ содержит периодические низкочастотные колебания относительно средней величины, что дает основания для выделения систематической периодической составляющей.

В изменении объемной активности приземных слоев атмосферы, как и в большинстве многофакторных процессов в природе, отсутствует точная периодичность, поэтому на втором этапе моделирования для нахождения оценок спектральной плотности и построения моделей для целей долгосрочного прогнозирования мы воспользовались представлением $u(t) = u_n$ в виде суммы периодических функций с некратными частотами $\omega_k \neq k\omega_1$, не соотнесенными к периоду наблюдения

$$u_n = A_0 + \sum_{k=1}^m [A_k \sin(\omega_k n) + B_k \cos(\omega_k n)] + \varepsilon_n, \quad (1)$$

$$0 < \omega_k < \pi, \quad k = 1, 2, \dots, m,$$

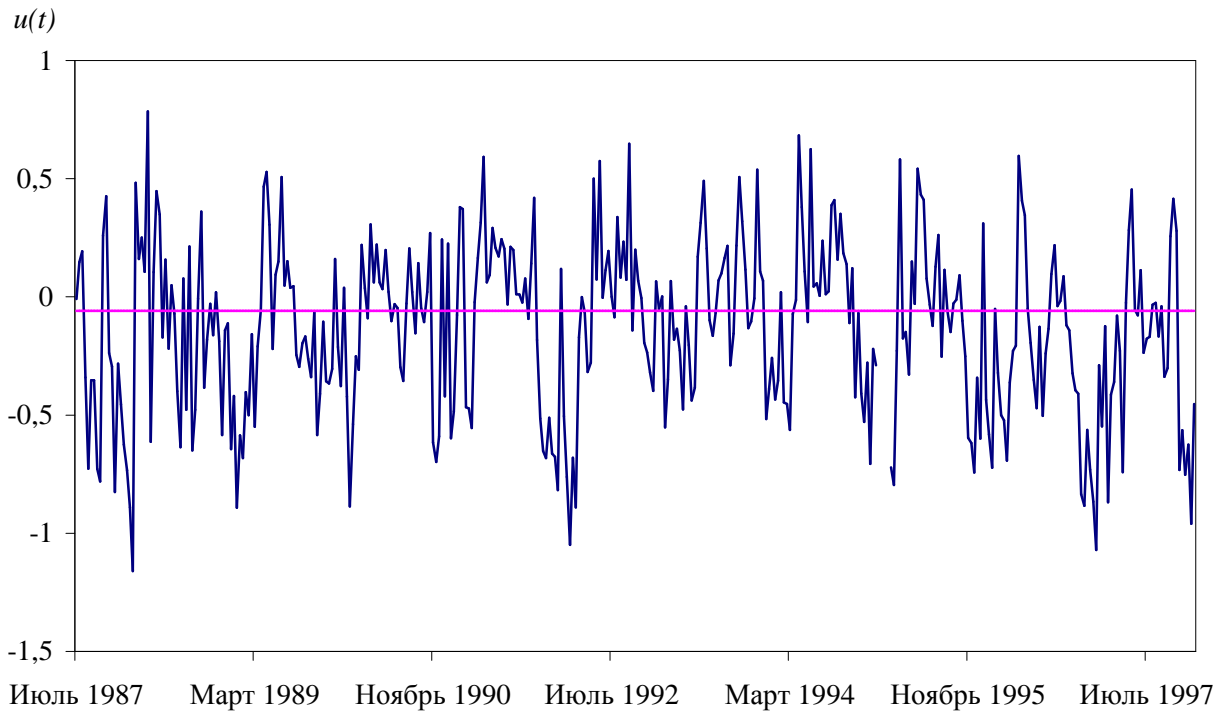


Рис. 3. Временной ряд $u(t) = \log_{10}(C(t)/C_0(t))$ за 1987 - 1997 гг.

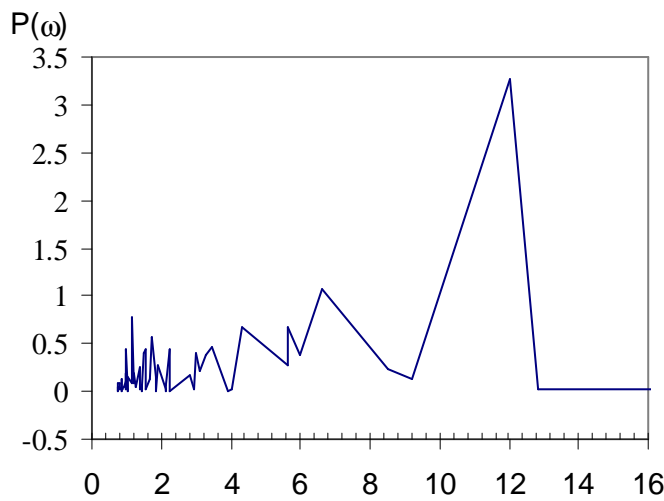


Рис. 4. Частотный спектр $P(\omega)$ как функция периода $T = 2\pi/\omega$

где A_k и B_k - коэффициенты, минимизирующие сумму квадратов отклонений $\sum_{n=1}^N \epsilon_n^2 = \sum_{n=1}^N (u_n - u_n^*)^2$, где u_n^* - детерминированная циклическая компонента, m - заданное число членов разложения, N - число декад в рассматриваемом промежутке времени.

В отличие от методов быстрого преобразования Фурье в данном случае частоты ω_k находятся из значений $\cos \omega_1, \cos \omega_2, \dots, \cos \omega_m$, определяемых как корни алгебраического уравнения [5]

$$\alpha_0 + \sum_{p=1}^{m-1} \alpha_p \cos(p\omega) = \cos(m\omega), \quad (2)$$

коэффициенты которого α_p должны удовлетворять системе линейных уравнений

$$\sum_{p=1}^{m-1} \alpha_p (u_{i+p-1} + u_{2m+i-p-1}) + a_m u_{m+i-1} = u_{i-1} + u_{2m+i-1} \quad (3)$$

$$(i = 1, 2, \dots, N - 2m).$$

На рис. 4 представлены оценки спектральной плотности рассматриваемого ряда в виде графика функции $P_k(\omega) = \frac{N}{2}(A_k^2 + B_k^2)$, где $P_k(\omega)$ представлена как функция периода

$T_k = \frac{2\pi}{\omega_k}$. На графике хорошо видно, что наибольший вклад в периодическую функцию (1)

вносят низкочастотные колебания с периодом приблизительно равным 12 месяцам, а также

имеется два пика с периодами, близкими к 6 и 4 месяцам. Для определения основных периодических составляющих и параметров тригонометрического полинома (2) для прогнозирования изменений $u(t)$ мы применили метод группового учета аргументов (МГУА) [4]. Этот метод особенно хорошо работает для коротких рядов данных с минимумом априорной информации о моделируемом процессе. Описание теоретических основ метода и алгоритма, использованного нами для проведения моделирования, имеется в [4, 5]. Здесь же мы только отметим, что в отличие от традиционного регрессионного анализа МГУА основан на применении внешнего критерия для выбора единственной (для заданного критерия) модели оптимальной сложности. Под внешним критерием в МГУА подразумевается критерий, вычисляемый на данных, не участвовавших в оценке параметров модели.

В качестве критерия селекции авторы использовали критерий минимума средне-квадратической ошибки S_B , вычисленной на проверочной последовательности $u(t)_B$

$$S_B = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_B} (u_{Bi} - u_{Bi}^*)^2}}{N_B}, \tag{4}$$

в которую включили N_B точек исследуемого ряда, не используемых для оценки параметров A_k и B_k в выражении (1) и составляющих, примерно, четверть всех имеющихся точек N .

Параметры модели, полученной с применением МГУА на основе тригонометрического полинома (1), представлены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры модели, полученной с применением МГУА

Частота, рад ω_k	Период, дек T_k	Амплитуда $\sqrt{A_k^2 + B_k^2}$	Коэф. A_k	Коэф. B_k	Свободный член A_0
0,174	36,2	0,237	-0,048	0,232	-0,112
0,241	26,1	0,085	-0,083	0,018	
0,329	19,1	0,045	0,028	-0,036	
0,528	11,9	0,055	-0,052	0,018	
0,935	6,7	0,094	0,041	-0,084	
1,272	4,9	0,036	0,014	-0,033	
1,748	3,6	0,025	0,012	0,022	
1,935	3,2	0,022	-0,016	-0,015	
2,594	2,4	0,034	0,024	0,025	

Построенная зависимость спектра мощности $P(f)$ от f [год⁻¹] в билогарифмических координатах, приведенная на рис. 5, описываемая степенной функцией

$$P(f) \sim f^\beta, \tag{5}$$

где $\beta \approx 0,7$ также подтверждает, что данные $C(t)$ не являются чисто случайными, а являются коррелированными в течение достаточно долгого периода времени.

Поскольку автокорреляционная функция уменьшается по экспоненте $\gamma = 1 - \beta$ (при $0 < \beta < 1$), то отметим, что при $\beta = 0$ наблюдается белый шум, т.е. данные не коррелированы; при $\beta = 1$ наблюдается шум с частотами $(1/f)$. Этот факт также свидетельствует в пользу наличия детерминированной периодической составляющей в составе $C(t)$.

Исследование остатков $\varepsilon_i = u_i - u_i^*$ показало, что они являются слабо коррелированными и нормально распределенными (рис. 6). Это позволило представить окончательную модель для долгосрочного прогноза $C(t)$ в виде

$$C(t)^* = 10^{z(t)} C_0(t). \tag{6}$$

Здесь $C_0(t)$ представляет собой непериодическую составляющую, а $z(t) = u^*(t) + x(t)$ - случайную циклическую компоненту, имеющую те же низкочастотные циклы колебаний,

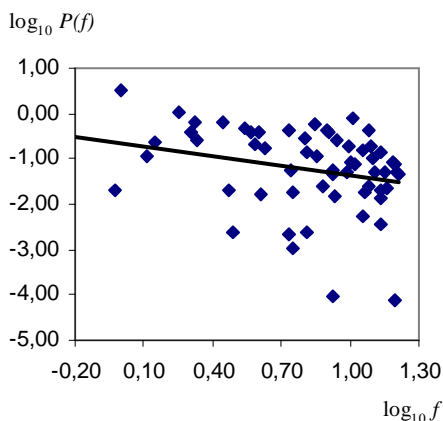


Рис. 5. Зависимость спектра мощности $P(f)$ от f [год⁻¹] в билигарифмических координатах

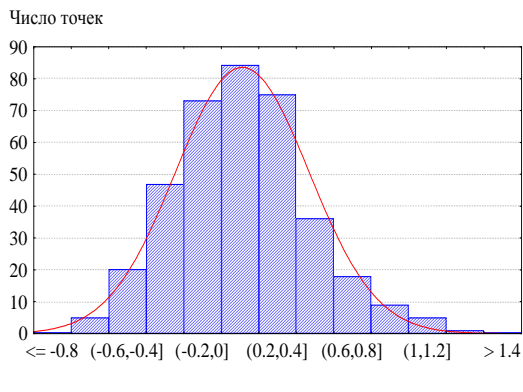


Рис. 6. Гистограмма распределения остатков $\varepsilon_i = u_i - u_i^*$

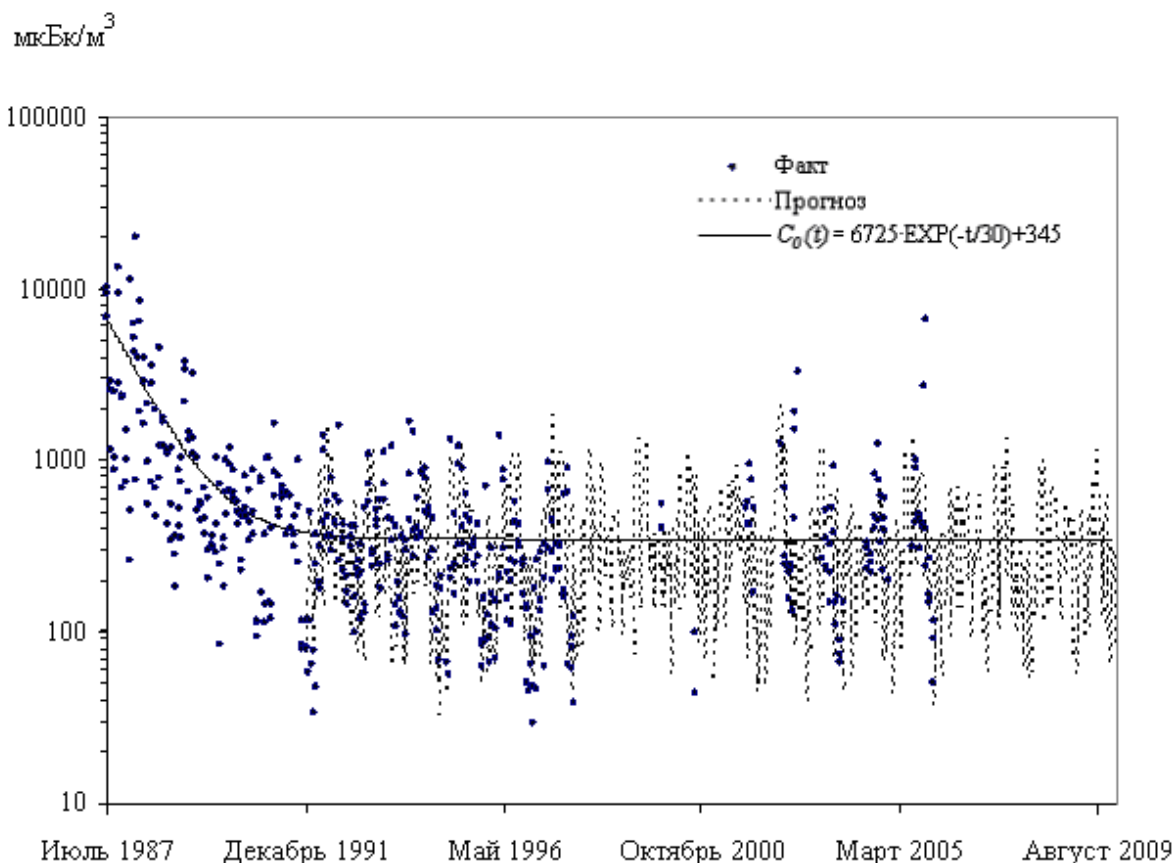


Рис. 7. Прогноз объемной активности ¹³⁷Cs в г. Припять на период до 2009 г.

дисперсию и среднюю, что и $u(t)$, а $x(t)$ представляет собой смоделированную из нормального распределения с нулевым средним и единичной дисперсией случайную величину с дисперсией и средним, соответствующим ряду $\varepsilon(t)$.

На рис. 7 в полулогарифмическом масштабе представлены результаты моделирования прогностических значений объемных концентраций $C(t)$, полученные с учетом разложения в ряд с некрatными частотами по формуле (1) с применением МГУА для выделения модели

гармонической составляющей оптимальной сложности, параметры которой представлены в табл. 2.

Расчет прогностических значений временного хода объемной активности ^{137}Cs производился по формуле

$$C(t)^* = 10^{z(t)} * [6725 \exp(-t/30) + 346], \quad (7)$$

где $C(t)^*$ - искомая модельная функция.

Выводы

Полученная временная зависимость детерминированной составляющей изменения объемной активности и оценки спектральной плотности спектра мощности ее колебаний по измерениям в г. Припять позволили аппроксимировать временной ход объемной активности до 2009 г. с учетом годового и сезонного изменения основных гидрометеорологических процессов в период наблюдений и, по-видимому, влияния субэкосистем (лесные массивы, водоемы, торфяники и сельскохозяйственные угодья). Экспериментальные данные показаны для всех дат за период с 1987 по 2005 г., когда они были получены.

Прогноз по данным наблюдений за 1987 – 1991 гг. оказался удовлетворительным как по средней величине объемной активности, так и по величине амплитуд флуктуаций, что говорит о достаточности периода наблюдений в 4 - 6 лет для получения первой оценки временного хода объемной активности на последующие 5 - 10 лет. В целом величины и характер флуктуаций объемной активности подобны наблюдавшимся в г. Припять с 1991 по 1997 г. за исключением двух пиков объемной концентрации, наблюдавшихся в 2002 г., связанных с произошедшими в этот период интенсивными лесными пожарами, и в 2005 г., обусловленных значительным выходом радионуклидов из объекта «Укрытие».

Для оценки убывания средней величины изменений объемной активности ^{137}Cs наиболее правдоподобный результат дает зависимость $C_0(t) = a \exp(-t/\tau) + b$ со свободным членом. Зависимость $C_0(t) = a \exp(-t/\tau)$ дает менее консервативные оценки значений активности и приводит к существенному ее занижению при долгосрочном прогнозе.

Изменение объемной активности ^{137}Cs отражает устойчивый циклический характер годового и сезонного хода изменений основных гидрометеорологических процессов в окружающей среде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Garger E.K., Kashpur V.A., Gurgula B.I. et al.* Statistical characteristics of the activity concentration in the surface layer of the atmosphere in the 30 km zone of Chernobyl // *J. Aerosol. Sci.* - 1994. - Vol. 25, No. 5. - P. 767 - 777.
2. *Viswanathan G.M., Buldyrev S.V., Garger E.K., et al.* Quantifying nonstationary radioactivity concentration fluctuations near Chernobyl: A complete statistical description // *Phys. Rev. E.* - 2000. - Vol. 62, No. 3. - P. 4389 - 4392.
3. *Lomb N.R.* Least-squary frequency analysis of unequally spaced data // *Astrophysics and Space Science.* - 1976. - Vol. 39. - P. 447 - 462.
4. *Ивахненко А.Г.* Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами. - К.: Техніка, 1975.
5. *Справочник по типовым программам моделирования / А. Г. Ивахненко, Ю. В. Коппа, В. С. Степашко и др.; Под ред. А. Г. Ивахненко.* - К.: Техніка, 1980. - 184 с.

Поступила в редакцию 20.11.06

**3 ПРОГНОЗ ОБ'ЄМНОЇ АКТИВНОСТІ ^{137}Cs У ПРИЗЕМНОМУ ШАРІ АТМОСФЕРИ
30-КІЛОМЕТРОВОЇ ЗОНИ ЧАЕС****Є. К. Гаргер, Ю. І. Кузьменко**

Проведено аналіз нестационарності зміни середніх об'ємних активностей ^{137}Cs в часі за даними вимірювань в м. Прип'ять з 1987 р. Показано, що флуктуації об'ємних активностей довгостроково корельовані, мають виражену циклічну складову з періодом в один рік і логнормально розподілені. Одержані залежності для опису детермінованої складової зміни середніх об'ємних активностей за період 1987 - 1991 рр. в комбінації з моделюванням випадкової складової процесу на основі параметрів її розподілу дали змогу дати довгостроковий прогноз активності до 2009 р. Верифікацію результатів прогнозування було проведено за незалежними даними після 1992 р.

**3 PREDICTION OF VOLUME ACTIVITY OF ^{137}Cs IN THE GROUND LAYER OF ATMOSPHERE
IN 30 KM OF EXCLUSIVE ZONE OF CHNPS****E. K. Garger, U. I. Kuzmenko**

The analysis of nonstationarity of change in time the mean volume activities ^{137}Cs from data of measuring in Pripjat with 1987 was conducted. It is shown that fluctuations of volume activities long-term correlated, have the expressed cyclic constituent with 1 year period and log-normally distributed. Dependences were got for description of the determined constituent of change of mean volume activities for 1987 - 1991 in combination with the modeling of casual constituent of process on the basis of log-normal probability distribution allowed to give the long-term forecast of activity up to 2009. There were conducted verification of prediction results from independent data after 1992.