

## К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕРАВНОВЕСНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЗАГРЯЗНЕНИИ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

*В.А. Павлий, О.В. Дейкун*

*Донецкий национальный технический университет*

### ВСТУПЛЕНИЕ

В настоящее время Украина присоединилась к международным соглашениям о создании европейской сети мониторинга окружающей природной среды (ОПС). Это приводит к необходимости учета общих требований и рекомендаций комиссии ЕЭК ООН при разработке систем мониторинга государственного и региональных уровней. Современные системы мониторинга отличаются единым методологическим подходом, общими регламентами обмена экологической информацией между странами-участниками и предоставления ее населению и лицам, принимающим решения в области экологической безопасности. Примером экологической системы мониторинга общеевропейского уровня является сеть EIONET [1].

Разработка сети EIONET ведется Европейским Агентством по охране окружающей природной среды (ЕЕА) с 2009 года. По данным агентства ЕЕА в проекте EIONET сегодня участвует около 30 стран, еще 6 поддерживает активное сотрудничество. Поддержку сети со стороны стран-участников осуществляет около 900 экспертов и более 300 национальных институтов. Данная сеть использует единые протоколы передачи данных, что позволяет автоматизировать процессы обмена экологической информацией между странами-участниками и предоставления ее другим странам при помощи сети Интернет в соответствии с правами доступа.

Сегодня мониторинг ОПС на территории Украины осуществляется Гидрометеослужбой Украины, санитарно-эпидемиологическими станциями и другими субъектами экологического мониторинга. Сбор информации о состоянии ОПС осуществляется на стационарных постах мониторинга в соответствии с рекомендациями нормативных документов [2 и др.] преимущественно ручным способом. Подобная методика является устаревшей и не дает возможности обеспечить интеграцию с европейской сетью EIONET и ее аналогами. Принятые Украиной обязательства, в соответствии с подписанными международными договорами, ставят задачи по разработке автоматизированных систем мониторинга (АСМ) государственного и региональных уровней, особенностями которых является Интернет-ориентированный подход, совместимость с сетью EIONET и возможность сбора, обработки и передачи экологической информации в автоматическом режиме.

В структуре региональных АСМ подсистемы мониторинга атмосферного воздуха занимают особое место. Развитие подобных подсистем на Украине протекает достаточно слабо, действующие прототипы имеются лишь в Донецкой и Запорожской области. Разработка системы мониторинга атмосферного воздуха АКИАМ 2.1 [3] в Донецкой области ведется с 2004 года, однако возможность приема данных с автоматизированных постов появилась сравнительно недавно. Применение автоматизированных средств наблюдения в сравнении с традиционными методами дает ощутимые преимущества, среди которых следует выделить непрерывность и высокую точность измерений, а также практически мгновенную передачу данных по каналу связи в АСМ. Это позволяет более оперативно реагировать на возможные опасные события, связанные с загрязнением атмосферы, и принимать в случае необходимости соответствующие меры. Однако установка автоматизированных постов требует существенных финансовых затрат на приобретение и информационную поддержку оборудования.

Начиная с конца 2008 года, на территории Донецко-Макеевского региона действует два автоматизированных поста мониторинга. Каждый пост укомплектован средствами для измерения концентраций загрязняющих веществ и метеорологических параметров, а также системой передачи данных в АСМ при помощи Интернет или мобильной связи.

Измерение концентраций загрязняющих веществ на автоматизированных постах осуществляется газоанализатором с электролитическими датчиками. Отбор проб происходит принудительно при помощи встроенных дозаторов газовоздушной смеси. Газоанализаторы, установленные на автоматизированных постах мониторинга на территории Донецко-Макеевского региона, позволяют измерять концентрации трех основных веществ: оксида углерода (СО), диоксида серы (SO<sub>2</sub>) и диоксида азота (NO<sub>2</sub>). Для измерения основных метеорологических параметров (температуры, влажности, атмосферного давления, уровня осадков, скорости и направления ветра) в состав постов входят также автоматические метеостанции. Периодичность наблюдений для автоматизированных постов, в отличие от стационарных, на которых отбор проб в соответствии с [2] производится от 2 до 4 раз в сутки, также может выбираться произвольно. Для автоматизированных постов мониторинга Донецкой области указанная величина составляет 10 минут. Это дает возможность строить более точные модели загрязнения среды, позволяющие учитывать динамику суточных колебаний концентрации примеси.

Учитывая достаточно частые измерения, на действующих автоматизированных постах сегодня накоплено около 300 тыс. наблюдений за концентрацией загрязняющих веществ и около 700 тыс.

метеорологических измерений. Данная информация представима в виде временных рядов и может быть использована при разработке моделей, описывающих процессы загрязнения атмосферного воздуха и формирования метеопараметров в динамических режимах. На рис. 1 показан типичный график изменения концентрации диоксида азота  $\text{NO}_2$ , а на рис. 2 – график изменения температуры, полученные по данным автоматизированного поста мониторинга.

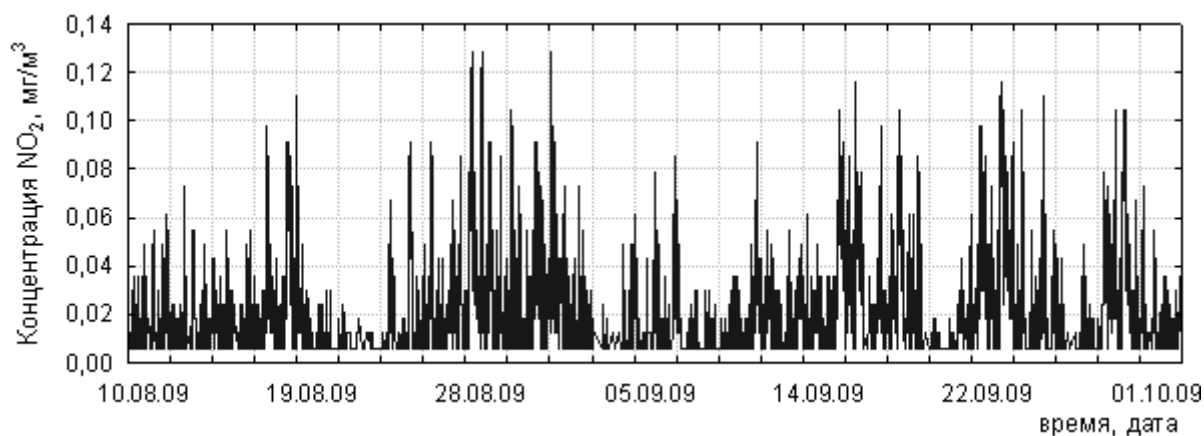


Рис. 1 – График изменения концентрации диоксида азота ( $\text{NO}_2$ ) на автоматизированном посту контроля загрязнения атмосферного воздуха №6 г. Донецка за период с 10.08.09 по 01.10.09

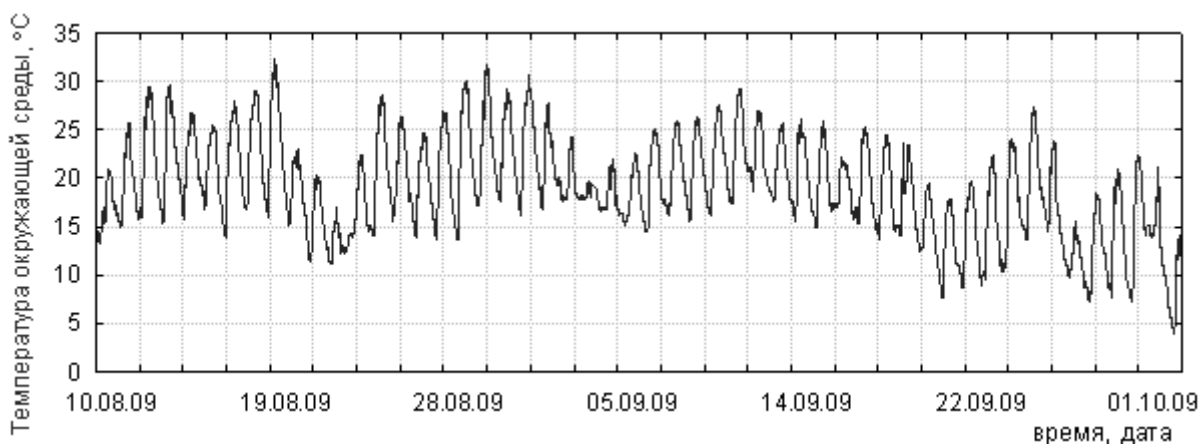


Рис. 2 – График изменения температуры атмосферного воздуха на автоматизированном посту контроля загрязнения атмосферы №6 г. Донецка за период с 10.08.09 по 01.10.09

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ

Основной задачей данной работы является разработка термодинамических моделей, описывающих динамику различных примесей в атмосферном воздухе вблизи автоматизированных постов мониторинга Донецко-Макеевского региона. Для построения таких моделей необходимо установить термодинамические закономерности, характеризующие состояние воздушного бассейна в окрестности автоматизированного поста, который представлен в виде открытой системы. Одной из универсальных термодинамических зависимостей, характеризующих состояние открытой системы, является энтропия. Для открытых систем энтропия определяет направление протекания неравновесных процессов между системой и внешней средой.

Изменение энтропии открытой системы, в соответствии со вторым началом термодинамики, представляется в виде (1):

$$\Delta s = \frac{\Delta q}{T}, \quad (1)$$

где:  $\Delta q$  – изменение общего количества теплоты;  $T$  – абсолютная температура.

В работе авторов [4] в качестве универсального процесса, характеризующего динамику различных примесей в атмосферном воздухе по данным стационарных постов мониторинга, был использован политропный процесс. В соответствии с [5] изменение энтропии системы в политропном процессе при постоянной теплоемкости в данном интервале определяется по формуле (2):

$$\Delta s = c_n \ln \frac{T(\tau + 1)}{T(\tau)}, \quad (2)$$

где:  $T(\tau)$  – абсолютная температура,  $T(\tau) = t(\tau) + 273,15$ ;  $c_n$  – теплоемкость идеального газа в политропном процессе,  $\tau$  – время, задаваемое в соответствии с периодичностью наблюдений автоматизированного поста мониторинга.

В [5] величина  $c_n$  при представлении загрязнителя идеальным газом определяется из соотношения (3):

$$c_n = c_v \frac{n - k}{n - 1}, \quad (3)$$

где:  $c_v$  – теплоемкость идеального газа при постоянном объеме,  $c_v = c_p - R$ ;  $n$  – показатель политропы;  $k$  – показатель адиабаты идеального газа,  $k = \frac{c_p}{c_v}$ ;  $c_p$  – теплоемкость идеального газа при

постоянном давлении;  $R$  – индивидуальная газовая постоянная вещества,  $R = \frac{8,314}{\mu_i}$ ;  $\mu_i$  – молярная масса газа.

Для определения показателя политропы в работе авторов [4] для  $n$  было получено следующее уравнение (4):

$$n(\tau + 1) = 1 + \log \frac{C(\tau)}{C(\tau+1)} \frac{273,15 + t(\tau)}{273,15 + t(\tau + 1)}, \quad (4)$$

где:  $C(\tau)$  – концентрация загрязняющего вещества в момент времени  $\tau$ .

Значение параметра  $c_p$  зависит только от абсолютной температуры газа и является справочной величиной. Анализ таблиц [6] показал, что для рассматриваемых газов в диапазоне температур  $\pm 30$  °C данная величина изменяется незначительно (см. табл. 1), что позволяет использовать усредненные значения  $c_p$  при практических расчетах.

Таблица 1. Усредненные значения параметра  $c_p$  для некоторых загрязняющих веществ

Загрязняющее вещество	Усредненное значение параметра $c_p$ , Дж·К <sup>-1</sup> ·Моль <sup>-1</sup>	Погрешность параметра $c_p$ при изменении температуры в пределах $\pm 30$ °C	
		Абсолютная	Относительная
NO <sub>2</sub>	36,498	±0,825	±2,260%
SO <sub>2</sub>	38,961	±1,059	±2,717%
CO	29,133	±0,010	±0,034%

С учетом (3) и (4) соотношение (2) можно представить в виде (5):

$$\Delta s(\tau + 1) = c_v \cdot \ln \left( \frac{273,15 + t(\tau + 1)}{273,15 + t(\tau)} \right) + R \cdot \ln \left( \frac{C(\tau)}{C(\tau + 1)} \right). \quad (5)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Данные наблюдений автоматизированных постов мониторинга Донецко-Макеевского региона использовались для расчета изменения энтропии  $\Delta s$  различных загрязняющих веществ в соответствии с выражением (5). С целью исключения аномальных наблюдений и стабилизации временных отметок перед расчетом проводилось усреднение исходных рядов концентраций примеси и температуры окружающей среды. Поскольку периодичность наблюдений автоматизированных постов составляет 10 минут, применение метода скользящего окна с параметрами сдвига и ширины окна  $l = s = 6$  дало возможность получить синхронизированные временные ряды с периодом, равным одному часу. Анализ основных статистических характеристик рядов, представленных в таблице 2, показывает, что среднее значение изменения энтропии близко к нулю для всех рассматриваемых примесей и составляет от - 0,000482 до 0,093050, а дисперсия изменяется в интервале от 0,021593 до 0,063195. Наличие как положительных, так и отрицательных значений величины  $\Delta s$  позволяет сделать вывод о том, что в окрестности автоматизированного поста наблюдаются ярко выраженные неравновесные процессы теплопереноса примеси. На рис. 3 показаны временные ряды показателя  $\Delta s$ , рассчитанные по данным автоматизированного поста мониторинга №6 г. Донецка. Из анализа рисунка 3 следует, что графики изменения энтропии для различных типов примесей визуально схожи и подобны между собой.

Это дает возможность предположить, что изменение энтропии практически не зависит от типа вещества, а термодинамические модели прогноза могут относиться к одному классу зависимостей.

Таблица 2. Основные статистические характеристики временных рядов изменения энтропии в процессе распространения загрязняющих веществ в атмосферном воздухе

Показатель изменения энтропии $\Delta S$	Месторасположение автоматизированного поста мониторинга	Среднее	Минимум	Максимум	Дисперсия
NO <sub>2</sub>	Донецк	-0,000482	-0,673471	0,725063	0,036799
NO <sub>2</sub>	Макеевка	0,063636	-0,591276	0,602756	0,027336
SO <sub>2</sub>	Донецк	0,000638	-0,625009	0,686528	0,025950
SO <sub>2</sub>	Макеевка	0,093050	-0,845094	1,203526	0,063195
CO	Донецк	0,009170	-0,933780	0,727789	0,045328
CO	Макеевка	0,067655	-0,453810	0,509377	0,021593

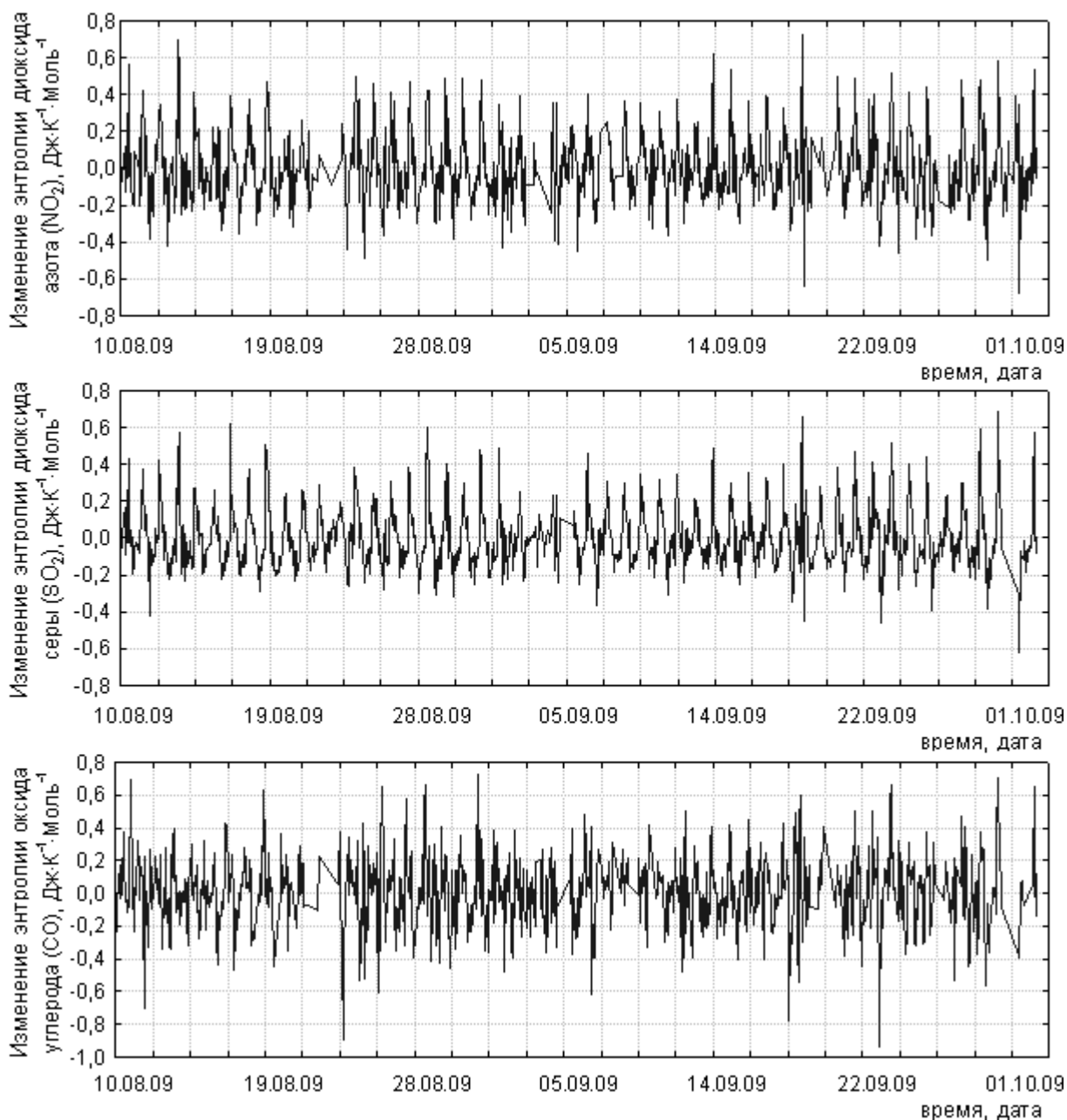


Рис. 3 – График изменения энтропии в процессе загрязнения атмосферного воздуха различными загрязнителями на автоматизированном посту №6 г. Донецка за период с 10.08.09 по 01.10.09

Визуальный анализ, а также оценка спектральных и статистических характеристик временных рядов величины  $\Delta S$  показали, что изменение энтропии характеризуется ярко выраженной

стохастичностью. Наиболее универсальным методом стохастического прогнозирования является метод авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС). В соответствии с данным методом для описания произвольного динамического процесса используется три категории параметров: параметры авторегрессии ( $p$ ), порядок разности ( $d$ ), параметры скользящего среднего ( $q$ ) [7]. Для учета сезонной составляющей модель АРПСС может быть дополнена одноименными сезонными параметрами ( $P, D, Q$ ), а также сезонным лагом порядка  $S$ . В этом случае сокращенная форма обозначения модели имеет вид АРПСС ( $p, d, q$ )( $P, D, Q$ ) $_S$ .

Идентификация модели АРПСС изменения энтропии в процессах загрязнения атмосферного воздуха различными примесями производилась при помощи программного продукта STATISTICA 6.0. В соответствии с [8] идентификация осуществляется по виду автокорреляционной функции (АКФ) и частной автокорреляционной функции (ЧАКФ). На рис. 4 приводятся оценки АКФ и ЧАКФ изменения энтропии  $\Delta s$  при загрязнении атмосферного воздуха диоксидом азота ( $\text{NO}_2$ ), построенные для 50 лагов.

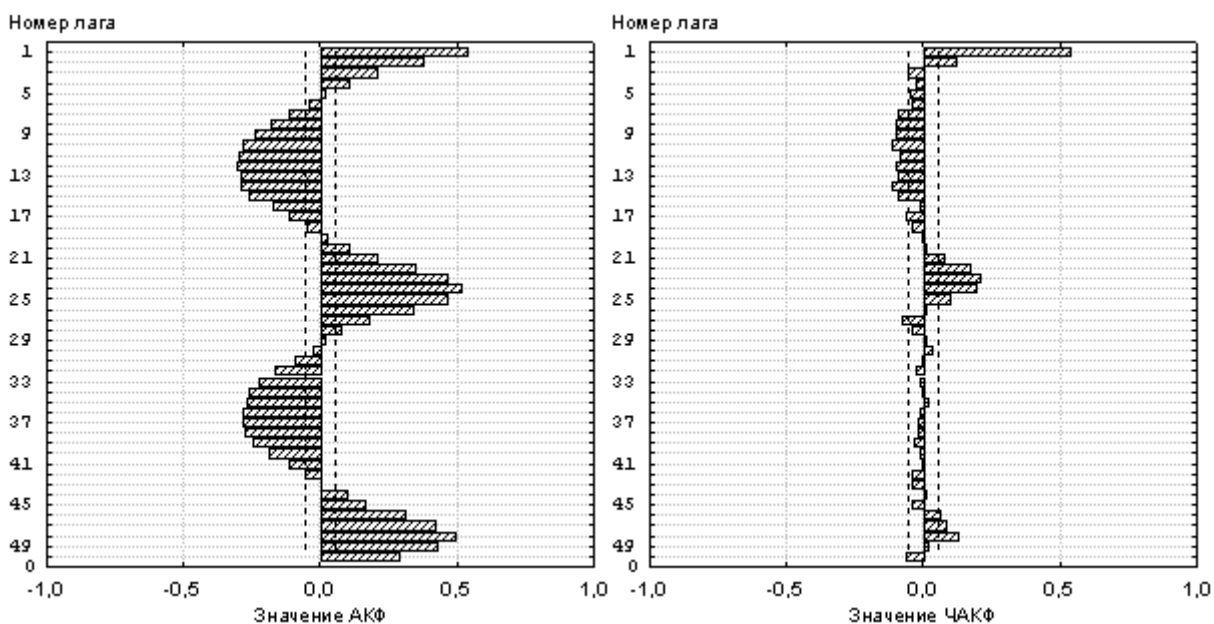


Рис. 4 – Оценки АКФ и ЧАКФ изменения энтропии в процессе загрязнения атмосферы диоксидом азота ( $\text{NO}_2$ )

Из визуального анализа рис. 4 следует, что значение показателя  $\Delta s$  не является стационарным, поскольку АКФ и ЧАКФ не затухают с течением времени, а осциллируют. Кроме того, в изменениях энтропии наблюдается сезонная компонента с периодом  $S = 24$ , обусловленная суточными колебаниями температуры окружающей среды. Соответствующий анализ моделей вида АРПСС ( $p, d, q$ )( $P, D, Q$ ) $_S$  при изменении параметров  $0 \leq p, P, q, Q \leq 2$ ;  $0 \leq d, D \leq 1$ ;  $S = 24$  показал, что оптимальной моделью является АРПСС (1,0,1)(0,1,1) $_{24}$ , причем вид модели не зависит от типа загрязняющего вещества.

Адекватность предложенной модели определялась при помощи:

- оценки значимости эмпирических коэффициентов модели;
- минимизации общей ошибки;
- оценки статистических и вероятностных параметров остатков.

Соответствующий анализ остатков показателя энтропии для всех загрязняющих веществ показал, что они подчиняются нормальному закону распределения, их математическое ожидание и дисперсия близки к нулю, а АКФ и ЧАКФ полностью лежат в пределах доверительного интервала. На рис. 5 показаны оценки АКФ и ЧАКФ остатков предложенной модели, построенные для диоксида азота ( $\text{NO}_2$ ).

Известно [7], что оптимальный предиктор модели АРПСС ( $p, d, q$ )( $P, D, Q$ ) $_S$  имеет вид (6):

$$\phi_p(B) \cdot \Phi_P(B^S) \cdot \nabla^d \cdot \nabla_S^D \cdot \Delta s(t) = \theta_q(B) \cdot \Theta_Q(B^S) \cdot a(t), \quad (6)$$

где:  $\phi_p(B)$ ,  $\nabla^d$ ,  $\theta_q(B)$  – простые операторы авторегрессии, разности и скользящего среднего соответственно;  $\Phi_P(B^S)$ ,  $\nabla_S^D$ ,  $\Theta_Q(B^S)$  – сезонные операторы авторегрессии, разности и скользящего среднего;  $a(t)$  – величина белого шума;  $B^S$  – оператор сдвига назад,  $\Delta s(t) \cdot B^S = \Delta s(t - S)$ .

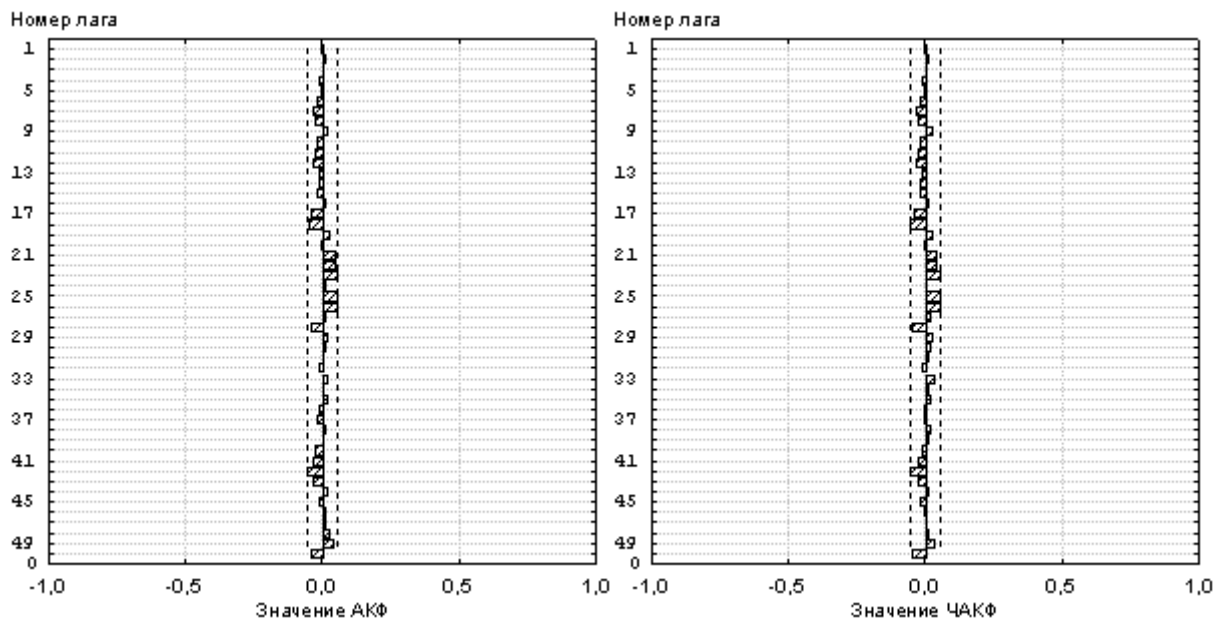


Рис. 5 – Оценки АКФ и ЧАКФ остатков модели изменения энтропии в процессе загрязнения атмосферы диоксидом азота (NO<sub>2</sub>)

В моделях АРПСС простые и сезонные операторы задаются в виде полиномов, порядок которых соответствует количеству взятых параметров модели. Для модели АРПСС (1,0,1)(0,1,1)<sub>24</sub> простые и сезонные операторы описываются соотношениями (7):

$$\begin{aligned} \phi_p(B) &= 1 - p_1 B, & \Phi_P(B^S) &= 1, & \nabla^d &= 1, & \nabla_S^D &= 1 - B^{24}, \\ \theta_q(B) &= 1 - q_1 B, & \Theta_Q(B^S) &= 1 - Q_1 B^{24}. \end{aligned} \quad (7)$$

С учетом (6) и (7) прогнозирующая функция величины  $\Delta s$  может быть представлена в виде (8):

$$\begin{aligned} \Delta s(\tau + 1) &= \Delta s(\tau - 23) + p_1(\Delta s(\tau) - \Delta s(\tau - 24)) + \\ &+ a(\tau + 1) - q_1 a(\tau) + Q_1(q_1 a(\tau - 24) - a(\tau - 23)) \end{aligned} \quad (8)$$

Параметры  $p_1, q_1, Q_1$  в уравнении (8) определялись эмпирически по расчетным значениям величины  $\Delta s$  для различных примесей при помощи программного продукта STATISTICA 6.0. Оценочные значения параметров, их стандартные ошибки, а также статистические показатели остатков представлены в таблице 3.

Таблица 3. Параметры модели АРПСС (1,0,1)(0,1,1)<sub>24</sub> согласно (8).

Ингредиент	Месторасположение автоматизированного поста мониторинга	$p_1$	Среднеквадратическое отклонение для $p_1$	$q_1$	Среднеквадратическое отклонение для $q_1$	$Q_1$	Среднеквадратическое отклонение для $Q_1$	Параметры остатков	
								Среднее остатков (M)	Дисперсия остатков (D)
NO <sub>2</sub>	Донецк	0,54451	0,08424	0,32817	0,09437	0,84027	0,01609	-0,002784	0,018171
NO <sub>2</sub>	Макеевка	0,92743	0,00867	0,05969	0,02540	0,83284	0,01311	0,000625	0,002167
SO <sub>2</sub>	Донецк	0,44347	0,06336	0,02441	0,07133	0,84302	0,01659	-0,002697	0,010280
SO <sub>2</sub>	Макеевка	0,96576	0,00592	0,44460	0,01980	0,89573	0,00950	0,000781	0,008248
CO	Донецк	0,48133	0,05845	0,08575	0,06578	0,84372	0,01547	-0,004380	0,029987
CO	Макеевка	0,94067	0,00760	0,03905	0,02340	0,86052	0,01234	0,000412	0,001368

Анализ таблицы 3 показал, что значения коэффициента  $p_1$  для всех примесей в окрестности поста незначительно отличаются друг от друга, в то время как для разных постов и одной примеси такое отличие может быть существенным. Это позволяет сделать вывод о том, что процессы распространения примеси имеют определенное сходство, однако параметры модели зависят также и от месторасположения поста. Близкое к единице значение параметра  $Q_1$  во всех процессах указывает на

наличие ярко выраженной сезонной составляющей. Величина  $q_1$  изменяется в широких пределах и оказывает корректирующее влияние только в отдельных случаях.

Таким образом, краткосрочный прогноз изменения энтропии в процессах распространения примеси в окрестности автоматизированного поста представляется прогнозирующей функцией вида (8), где белый шум  $a(\tau)$  описывает стохастическую модель остатков и задается генератором нормального распределения, параметры которого приведены в таблице 3.

Прогнозирующая функция (8) использовалась для построения объектно-ориентированной расчетной модели в среде MatLab/Simulink, представленной на рис. 6.

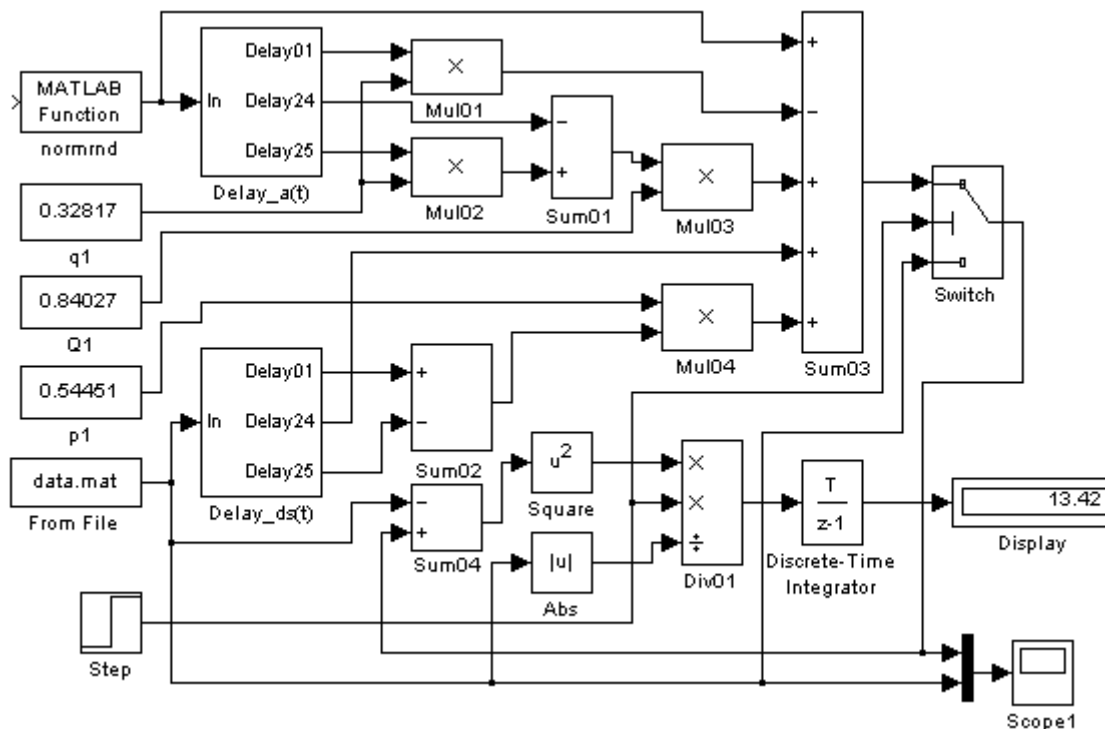


Рис. 6 – Объектно-ориентированная модель краткосрочного прогнозирования изменения энтропии для диоксида азота ( $\text{NO}_2$ ) по данным автоматизированного поста контроля загрязнения №6 г. Донецка

Блок *normrnd* служит для генерации белого шума  $a(\tau)$  с параметрами, указанными в таблице 3, а блок *From File* хранит исходные значения изменения энтропии  $\Delta s(\tau)$ , которые используются в (8) при учете сезонной составляющей. Временные задержки указанных величин на 1, 24 и 25 лагов организованы при помощи блоков *Delay\_a(t)* и *Delay\_ds(t)* соответственно. Во время начальной инициализации модели, которая включает генерацию последовательности из 25 значений  $a(\tau)$  и  $\Delta s(\tau)$ , прогноз не является корректным. Поэтому на время инициализации прогнозные значения заменяются расчетными при помощи блока *Switch*. Момент окончания инициализации определяется блоком *Step*.

Представленная модель позволяет также оценить суммарную ошибку прогноза с использованием критерия  $\chi^2$  согласно (9), при этом ошибка накапливается при помощи блока *Discrete-Time Integrator*:

$$\chi^2 = \sum_{\tau=1}^t \frac{(\Delta s(\tau) - \Delta s'(\tau))^2}{|\Delta s(\tau)|}, \quad (9)$$

где:  $\Delta s(\tau), \Delta s'(\tau)$  – реальное и прогнозное изменение энтропии на шаге  $\tau$ ;  $t$  – общее число шагов прогноза.

На рис. 7 показаны графики реальных и прогнозных (обозначены пунктиром) значений изменения энтропии в процессе загрязнения атмосферы диоксидом азота ( $\text{NO}_2$ ) по данным автоматизированного поста мониторинга г. Донецка. Число шагов прогноза  $t=36$  определяется конечным временем моделирования, а в качестве начального времени используется отрицательное значение, что обусловлено необходимостью инициализации модели. Значимость прогноза оценивалась из условия  $\chi^2 \leq \chi_t^2$ , где  $\chi_t^2$  – табличное значение критерия. Как видно из рисунка 6,  $\chi^2 = 13,42$ , а  $\chi_t^2 = 22,47$  при числе степеней свободы  $p = t - 1 = 35$  и уровне значимости  $\varepsilon = 0,95$ , что подтверждает адекватность модели.

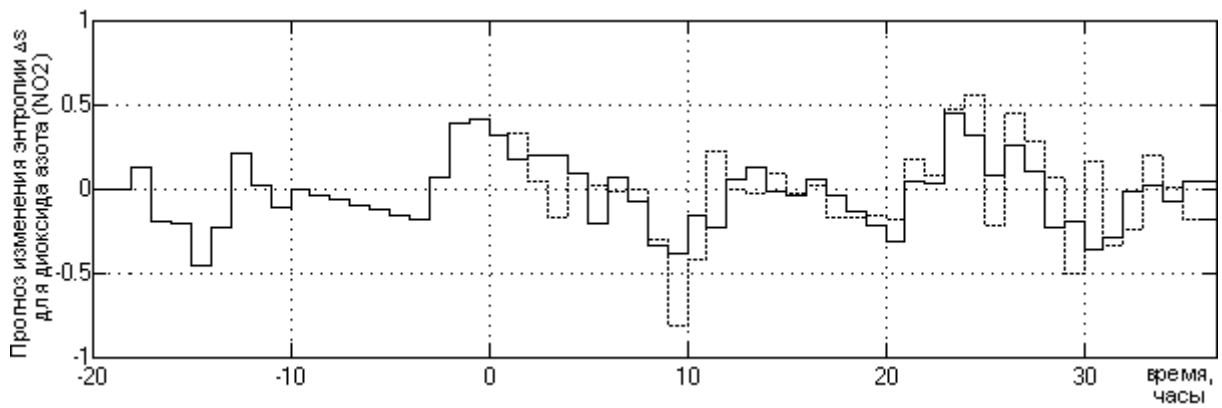


Рис. 7 – График прогноза изменения энтропии  $\Delta s$  в процессе загрязнения атмосферного воздуха диоксидом азота ( $\text{NO}_2$ ) по данным автоматизированного поста мониторинга г. Донецка

Для восстановления значения концентрации в окрестности поста мониторинга прогнозные значения  $\Delta s$  используются в уравнении (10), которое было получено из (4) путем логарифмирования:

$$C(\tau + 1) = C(\tau) \cdot \left( \frac{273,15 + t(\tau + 1)}{273,15 + t(\tau)} \right)^{\frac{C_v}{R}} \exp\left( \frac{\Delta s(\tau + 1)}{R} \right). \quad (10)$$

Как следует из (10), для определения концентрации примеси необходимы также прогнозные значения температуры окружающей среды. Задача краткосрочного прогноза температуры успешно решена достаточно давно и рассматривается, например, в [9].

## ВЫВОДЫ

Предложенные термодинамические модели неравновесных процессов могут быть использованы для краткосрочного прогноза концентрации примеси в атмосфере. Дальнейшие исследования предполагают проверку возможности применения теоремы Онсагера при загрязнении атмосферы.

## РЕЗЮМЕ

Розроблено термодинамічну модель змінення ентропії в процесах забруднення атмосферного повітря поблизу місць розташування постів моніторингу. Запропоновано стохастичну модель короткострокового прогнозування нерівноважних процесів забруднення атмосфери.

## SUMMARY

A thermodynamic model of entropy change in processes of air pollution near the location of monitoring stations is developed. A stochastic model for short-term prediction of non-equilibrium processes of atmospheric pollution is proposed.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. European Environment Information and Observation Network EIONET [El. resource] / EEA, 2009. – Title from screen. – Access mode: <http://www.eionet.europa.eu>
2. Руководство по контролю загрязнения атмосферы [Текст] : РД 52.04.186-89: введ. в действие с 01.07.1991. – М.: Госкомгидромет СССР. – 693 с.
3. Аппаратно-программный комплекс экологического мониторинга атмосферного воздуха АКИАМ [Эл. ресурс] / ДонНТУ, 2004-2009. – Назв. с тит. экр. – Режим доступа: <http://akiam.org.ua>
4. Павлий В. А. Термодинамические модели загрязнения атмосферы вредными газами [Текст] : научн. журнал / В. А. Павлий, Г. В. Аверин // Вісник Донецького університету. – [гол. редак. В. П. Шевченко]. – Сер. А: Природничі науки, №1, 2007. – С. 302 – 308.
5. Кириллин В. А. Техническая термодинамика [Текст] : учебник для вузов / В. А. Кириллин, В. В. Сычев, А. Е. Шейндлин. – [4-е изд.]. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 416 с.
6. Термодинамические свойства индивидуальных веществ [Текст] / справ. изд. – ред. кол. Глушко В. М. и др. – М.: Наука, 1978. – 496 с. – (в 4-х томах, том 1).
7. Бокс Дж. Анализ временных рядов: прогноз и управление [Текст] / Дж. Бокс, Г. Дженкинс; пер. с англ. А. Л. Левшина, под ред. В. Ф. Писаренко. – М.: Мир, 1974. – 406 с. – (в 2-х томах, том 1).
8. Боровиков В. П. Прогнозирование в системе Statistica в среде Windows [Текст] : учеб. пособ. / В. П. Боровиков, Г. И. Ивченко – М.: Финансы и статистика, 1999. – 384 с.
9. Белов П. Н. Численные методы прогноза погоды [Текст] : учеб. для вузов по спец. “Метеорология” / Белов П. Н., Борисенков Е. П., Панин Б. Д. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 376 с.