

І.В. Дворецька, А.В. Сидоренко

ПРОГНОЗ ЗАГАЛЬНОГО ВМІСТУ ОЗОНУ НАД ТЕРИТОРІЄЮ УКРАЇНИ

Здійснено моделювання динаміки загального вмісту озону над територією України методом побудови статистичної моделі. Визначено основні метеорологічні параметри, що визначають зміни концентрації озону над територією України. Результати тестування показали, що отримані статистичні залежності дозволяють використовувати дану модель для прогнозування динаміки озону.

Ключові слова: загальний вміст озону (ЗВО), статистична модель, регресійний аналіз, прогнозування загального вмісту озону.

Вступ

На сьогодні існує декілька методик прогнозування загального вмісту озону. Усі вони базуються на існуванні залежностей між вмістом озону та певним набором параметрів. Так, під час прогнозування значень приземної концентрації озону успішно використовується транспортно-фотохімічна модель [1], а для прогнозування як приземного, так і стратосферного озону – статистична [2]. Остання полягає у встановленні регресійних залежностей між концентрацією озону за попередній період та певною кількістю метеорологічних параметрів. Наприклад, у Росії використовується метод прогнозування приземного озону [3], заснований на регресійній залежності від максимальної температури повітря й відносної вологості.

Вихідні дані та методика досліджень

Загалом, статистичну методику прогнозування вмісту озону було запропоновано Т.Л. Кларком і Т.Р. Карлом у 1982 році [2]. В її основу взято множинний регресійний аналіз, який до того часу вже застосовувався для прогнозування опадів і температури. У класичному вигляді ця методика зводиться до рівняння лінійної регресії:

$$y' = a_0 + \sum_{i=1}^p a_i X_i,$$

де a_i – коефіцієнти предикторів X_i ; P – число предикторів у рівнянні. Коефіцієнти предикторів визначаються методом найменших квадратів.

З 1996 року, завдяки працям Звягінцева [4, 5], така методика прогнозування поширилась на території Росії та країн СНД і на її основі було розроблено й інші статистичні методи прогнозу. Так, Звягінцев, Кузнецова та Шалигіна [3] запропонували емпіричний метод – приріст концентрації озону за N днів, лінійно пов'язаний зі зміною метеорологічних параметрів за цей же період. Запропонований пізніше синоптико-статистичний метод [6] прогнозу максимальних добових значень концентрації приземного озону заснований на регресійному зв'язку максимальних значень концентрацій приземного озону з максимальною концентрацією за попередню добу та з метеорологічними предикторами, найбільший внесок серед яких має комплексний показник метеорологічних умов (КПМУ). Цей предиктор ідентифікує можливість формування аномальних рівнів озону завдяки специфічним атмосферним процесам. На сьогодні в РФ [7] впроваджено метод добового прогнозу загального вмісту озону та УФ-індексу, заснований на взаємозв'язку концентрації озону з різницею температур на поверхнях 400 і 50 гПа та різницею геопотенціальних висот на стандартних рівнях 30 і 10 гПа [8].

Таким чином, для створення прогностичної моделі загального вмісту озону для території України було вирішено скористатись саме статистичною методикою, що полягає в побудові для певного пункту регресійної моделі на основі даних за попередні строки з подальшим використанням її значень під час прогнозування на наступні строки. Як регресори, було обрано дані аерологічного зондування атмосфери.

Таким чином, прогностичне значення ЗВО розраховувалось за наступною формулою:

$$X_i = A * X_{i-1} + B * R_1 + C * R_2 + N * R_N,$$

де A, B, C, N – коефіцієнти регресії для даних аерологічного зондування, $R_1 \dots R_N, X_i$ та X_{i-1} – значення ЗВО на наступний та попередній строки.

Таким чином, для створення регресійної моделі було використано дані 16 аерологічних станцій на території України та за її межами за весь період спостережень, починаючи з 1979 року (табл. 1).

Про загальний вміст озону використовувались дані супутникового приладу TOMS за період з 1979 до 2011 рр. Всі ці дані TOMS

представлено в спеціальних таблицях TOMS grid і центровано з кроком за широтою 1°, а за довготою 1° 25' (до 2008 р.) та 1° (після 2008 р.).

Таблиця 1

Ряди даних аерологічних станцій

Станція	№ станції	Широта	Довгота	Період спостережень
Київ	33345	50°27'	30°30'	1979 – 2010
Львів	33393	49°49'	24°00'	1979 – 2010
Ужгород	33631	48°37'	22°17'	1979 – 1999
Харків	34300	50°00'	36°14'	1979 – 1999
Сімферополь	33946	44°56'	34°06'	1979 – 1993
Одеса	33837	46°28'	30°43'	1979 – 1978
Кривий Ріг	33791	45°57'	33°25'	1979 – 2010
Чернівці	33658	48°17'	25°55'	1979 – 1997
Шепетівка	33317	50°11'	27°04'	1979 – 2000
Ростов-на-Дону	34731	47°16'	39°43'	1979 – 2010
Гомель	33041	52°26'	30°58'	1979 – 2009
Мінеральні Води	37054	44°12'	43°08'	1979 – 2010
Курськ	34009	51°43'	36°10'	1979 – 2010
Воронеж	34122	51°40'	39°12'	1979 – 2010
Туапсе	37018	44°09'	39°06'	1979 – 2010
Бухарест	15420	44°24'	26°05'	1979 – 2010

Під час побудови регресійної моделі було обрано тільки ті 16 значень, які за своїми координатами відповідають географічному положенню аерологічних станцій (табл. 1). Тут необхідно зазначити, що на сьогодні дані ЗВО (із TOMS) важко використовувати для оперативної роботи через велику кількість пропусків у рядах, а також через запізнення в появі вимірних значень на сайті [8], яке іноді триває не одну добу. Тому для оперативного прогнозу ЗВО було вирішено скористатись даними супутникового приладу GOME-2, а як дані регресорів – прогностичні дані моделі WRF-ARW 3.1.1.

Таблиця 2

Результати побудови регресійних моделей

Станція	X _{i-1}	Регресори													Коефіцієнт детермінації	Статистика Фішера	Число ступенів свободи	Похибка величини, що обчислюється
		850				700					500							
		SKNT	DRCT	MIXR	RELH	SKNT	DRCT	MIXR	RELH	TEMP	SKNT	MIXR	RELH	TEMP				
№ коеф.	A1	A2	A3	A4	A5	A8	A9	A10	A11	A13	A14	A16	A17	A19				
Київ	0,8	-0,7	-0,3	8,3	-0,34	-	-0,01	0,6	-	-2,7	-0,4	-	-	-	0,89	272,30	7229	40,02
похибка		0,06	0,01	0,47	0,03		0,01	0,29		0,21	0,04							
Львів	0,8	-0,4	-	6,5	-0,1	-	-	-	0,1	-4,2	-0,4	-	-	-	0,89	127,39	4015	39,89
похибка		0,1		0,6	0,0				0,0	0,2	0,1							
Сімферополь	0,8	-	-	6,5	-0,2	-0,3	-	-	0,1	-	-0,4	-4,3	-	-1	0,95	149,47	4416	34,09
похибка				0,6	0,04	0,07	-	-	0,05	-	0,04	1,4	-	0,2				
Харків	0,8	-0,2	-	7,5	-0,3	-0,2	-	-	0,05	-2,7	-0,3	-	-	-	0,89	146,52	4276	38,57
похибка		0,06		0,6	0,04	0,08			0,02	0,33	0,05							
Бухарест	0,8	-0,3	-	2	-	-	-	1,6	-0,3	-0,6	-0,3	-	-0,1	-2,3	0,98	161,06	4997	35,07
похибка		0,04		0,3				0,5	0,03	0,17	0,03		0,04	0,21				
Чернівці	0,8	-0,3	-	6,7	-	-	-	1,5	-	-2,7	-0,5	-8,6			0,99	162,11	4380	38,87
похибка		0,07		0,5				0,78		0,26	0,05	1,6	-	-				

Продовження табл. 2

Гомель	0,8	-0,5	-	6,2	-0,1	-	-	-2,1	-	-2,1	-0,3	-5,7	0,1	-	0,94	110,51	4385	41,56
похибка		0,07		0,69	0,04			0,58		0,25	0,05	2,62	0,05					
Кривий Ріг	0,8	-0,3	-	-	-	-0,3	-	2,5	-0,01	-1,1	-0,31	-	-	-0,6	0,85	157,41	5765	36,94
похибка		0,05				0,07		0,39	0,01	0,23	0,04			0,17				
Курськ	0,8	-0,3	-	8,1	-0,3	-	-	-1,5	-0,01	-2,4	-0,3	-	-0,06	-	0,8	177,59	6632	39,36
похибка		0,06		0,59	0,03			0,63	0,01	0,37	0,03		0,02					
Мінеральні Води	0,8	-0,09	-	-	0,1	-	-	-	-0,01	-1,6	-0,4	-4,1	-	-	0,91	291,59	5616	32,61
похибка		0,03			0,02				0,01	0,17	0,02	1,4						
Одеса	0,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-2	-0,8				0,89	81,58	1275	38,29
похибка										0,67	0,08							
Ростов н/Д	0,8	-0,3	-	-	0,08	-0,4	-	2,3	-	-1,6	-0,3	-6,2	-	-	0,95	268,27	7059	36,68
похибка		0,03			0,02	0,06		0,45		0,3	0,03	1,1						
Шепетівка	0,8	-0,2	-	6,6	-0,2	-0,3	-	-	-0,01	-2,1	-0,42	-	-	-	0,8	94,24	2616	39,94
похибка		0,07		0,7	0,06	0,09			0,004	0,45	0,06							
Туапсе	0,8	-0,35	-	1,9	-	-0,3	-	-	-	-0,8	-0,2	-2,6	-	-1,7	0,97	179,71	4553	34,43
похибка				0,31		0,05				0,25	0,03	1,2		0,21				
Ужгород	0,8	-0,4	-	9,8	-0,4	-0,2	-	-4,1	0,27	-2	-0,4	-3,8	-	-	0,94	153,28	4444	38,30
похибка		0,06		0,61	0,05	0,05		1,39	0,05	0,32	0,04	0,04						
Воронеж	0,8	-0,5	-	7,7	-0,4	-	-	-	-	-2,6	-0,37	-	-	-	0,84	155,81	2048	39,94
похибка		0,08		0,55	0,04					0,27	0,05							

Зважаючи на той факт, що за даними моделі WRF-ARW 3.1.1 прогностичні поля наявні тільки для поверхонь 850, 700 та 500 гПа, для створення регресійних моделей було вирішено використовувати початкові дані для цих же поверхонь.

Після проведення регресійних аналізів для всіх станцій за всіма аерологічними показниками було визначено, що найкращі за значенням критерію Ст'юдента (<5%) моделі дають такі метеорологічні параметри як температура, вологість та напрямок вітру (табл. 2).

Як видно з таблиці, такі регресори як швидкість вітру (SKNT), відношення суміші (MIXR) та відносна вологість (RELH) виявились вагомими на всіх досліджуваних поверхнях (850, 700, 500 гПа), напрям вітру (DRCT) та температура (TEMP) виявились вагомими на двох досліджуваних рівнях 850 та 700 гПа і 700 та 500 гПа відповідно.

Таблиця 3а

Результати тестування регіональних моделей 1 за даними супутника

Станція	Середнє значення відхилення, од. Д.	Мінімальне відхилення, од. Д.	Максимальне відхилення, од. Д.	Середнє квадратичне відхилення, од. Д.
Бухарест	-1,03	-89,01	165,67	12,77
Гомель	-0,90	-119,24	195,51	13,49
Чернівці	-1,32	-75,12	167,06	4,24
Харків	0,48	-81,41	50,46	12,54
Кривий Ріг	-1,48	-104,52	112,32	11,15
Курськ	0,18	-77,11	130,79	10,79
Львів	0,16	-82,32	107,65	17,16
Мінер. Води	-0,71	-93,66	106,62	14,05
Одеса	-0,71	-57,55	44,72	15,24
Ростов н/Д	1,33	-72,85	48,08	13,11
Шепетівка	0,73	-59,6	131,05	13,51
Сімферополь	0,60	-87,17	93,17	13,17
Туапсе	1,02	-90,80	107,87	13,55
Ужгород	1,31	-86,16	231,34	15,53
Воронеж	-0,52	-64,14	41,73	13,67
Київ	0,81	-113,65	112,01	15,53

Також необхідно відмітити, що для різних станцій вагомою є різна

кількість регресорів. Так, тільки регресор $SKNT_{500}$ є вагомим для всієї території України, регресори $SKNT_{850}$ та $TEMP_{700}$ є вагомими для більшої частини території нашої держави. Всі інші регресори є вагомими для меншої кількості станцій. Необхідно також зазначити, що коефіцієнти регресії кожного регресора за даними для різних станцій є досить близькими між собою, що, по-перше, вказує на правильність обраної комбінації, по-друге, дає можливість як осереднювати дані коефіцієнти регресії для більших територій, так і інтерполювати їх значення на віддалені регіони.

Всі отримані моделі було протестовано з використанням даних спостережень років, що не брали участь у моделюванні. У результаті тестування отриманих моделей (табл. 3-а і 3-б) було виявлено невеликі значення похибок для всіх станцій. Так, середнє значення відхилення (у %) для всіх станцій не виходить за межі ± 1 , що відповідає 2,5-3,5 о.Д., а середньоквадратичне відхилення не виходить за межі $\approx 5\%$.

Таблиця 3б

Результати тестування регіональних моделей 1 за даними супутника

Станція	Середнє значення відхилення, %	Мінімальнє відхилення, %	Максимальнє відхилення, %	Середнє квадратичнє відхилення, %
Бухарест	-0,30	-26,39	49,11	3,78
Гомель	-0,26	-35,00	57,38	3,96
Чернівці	-0,39	-22,23	49,44	4,24
Харків	0,14	-23,79	14,75	3,66
Кривий Ріг	-0,45	-31,65	34,01	3,37
Курськ	0,05	-22,74	38,57	3,18
Львів	0,04	-24,04	31,44	5,01
Мінер. Води	-0,21	-28,20	32,10	4,23
Одеса	-0,20	-16,83	13,08	4,45
Ростов н/Д	0,39	-21,67	14,30	3,90
Шепетівка	0,21	-17,54	38,57	3,97
Сімферополь	0,17	-25,76	27,54	3,89
Туапсе	0,30	-27,05	32,14	4,03
Ужгород	0,38	-25,29	67,90	4,56
Воронеж	-0,15	-18,88	12,28	4,02
Київ	0,24	-33,86	33,37	4,62

Тобто, результати тестування показали, що прогнозоване значення ЗВО в середньому не може вийти за межі середньої похибки вимірювання озонотромом М – 124. Проте необхідно також звернути увагу на абсолютні та відносні значення максимального та мінімального відхилень, що є досить великими.

Для аналізу прогностичної моделі загального вмісту озону було побудовано графіки ЗВО (рис.1-а і 1-б) за реальними даними, вимірними за допомогою супутника, та прогнозованими на цей день значеннями. Лінійні тренди (рис. 1-а) мають надзвичайно високі коефіцієнти детермінації, а їх коефіцієнти регресії близькі до 1. Тут необхідно зазначити, що у всіх без винятку побудовах коефіцієнти регресії лінійного тренду є вищими за 1, але не виходять за межі 0,2. Це вказує на деяке завищення даних моделювання відносно вимірних значень. Проте, як показано на рис.1-б, таке завищення є досить малим (адже лінійні тренди будуються на десятирічних інтервалах) і майже не виражене для щоденних даних.

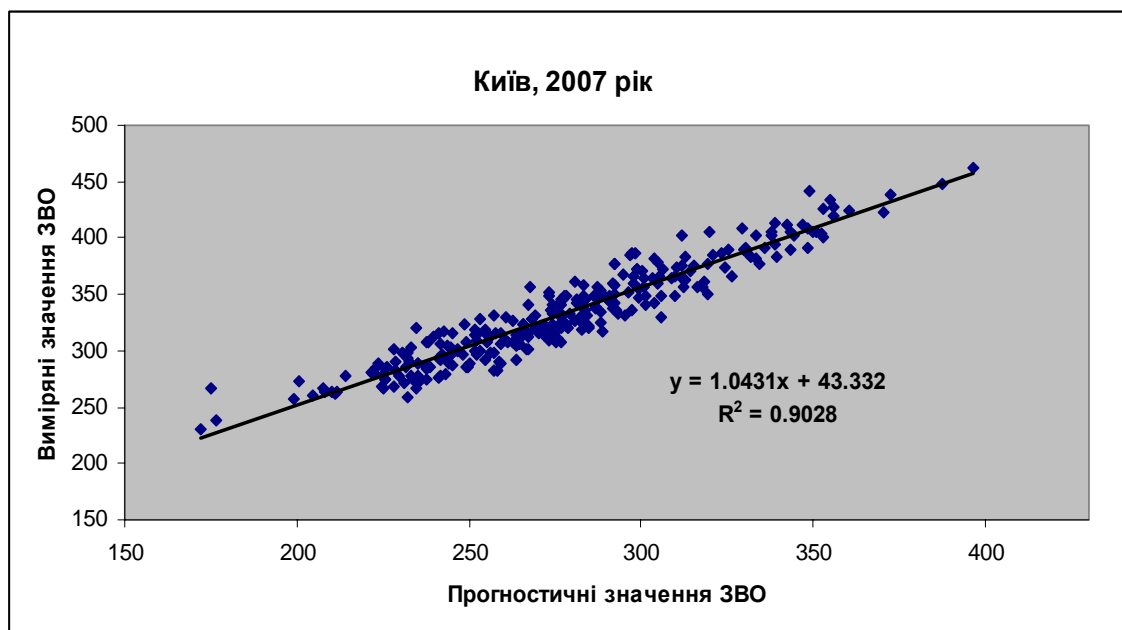


Рис. 1-а. Порівняння значень ЗВО, вимірних за допомогою супутника та спрогнозованих за регіональною регресійною моделлю, для станції Київ за 2007 р.

Отже, результати тестування створених регресійних моделей показали можливість їх використання в оперативній роботі для прогнозування загального вмісту озону над територією України.

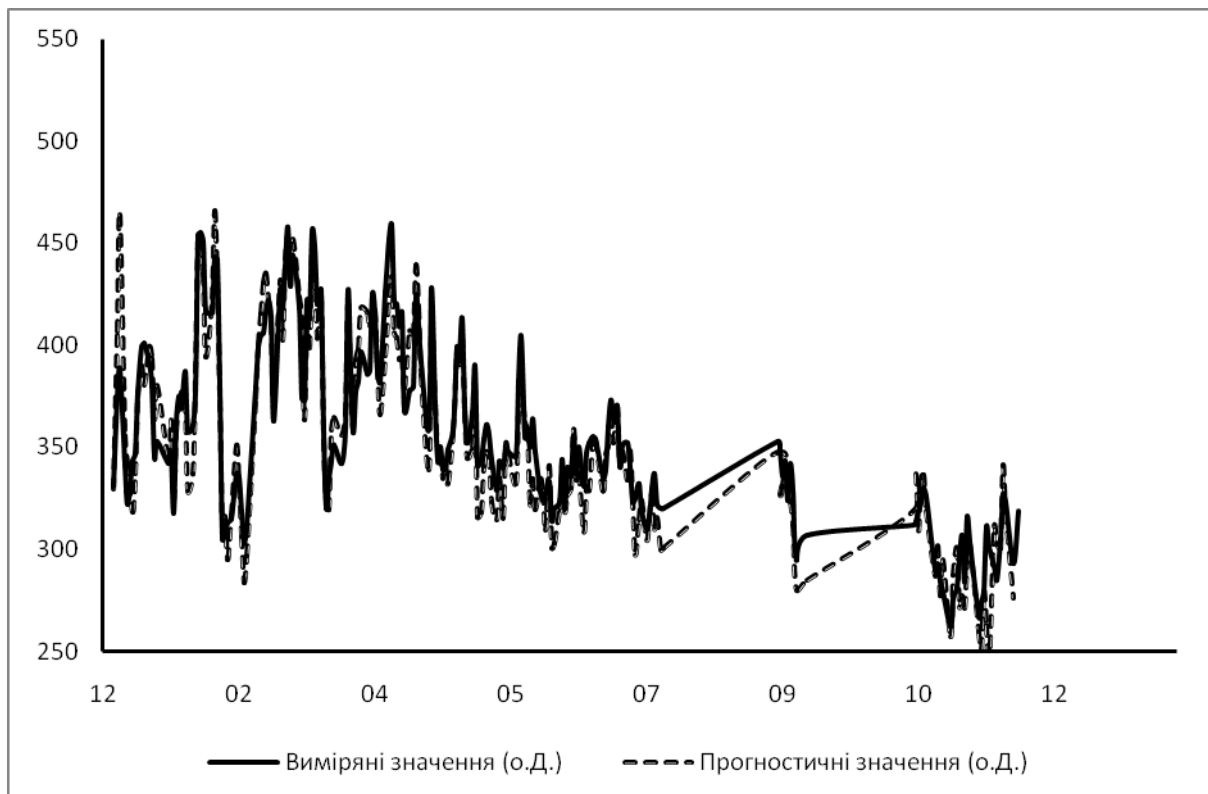


Рис. 1-б. Графік сезонної зміни ЗВО за даними, вимірними за допомогою супутника та прогнозованими на цей день. Станція Львів, 2010 р.

Висновки:

1. Значення загального вмісту озону над територією України істотно залежать від таких параметрів як напрямок і швидкість вітру, відносна температура та вологість на різних поверхнях.
2. Середньоквадратичне відхилення фактичних і прогнозованих значень не виходять за межі 5 %, що лежить у межах середньої похибки вимірювань озонметром М-124.
3. Дані моделювання дещо завищені відносно фактичних значень, проте таке завищення майже не виражене для щодобових значень.
4. Результати тестування даної моделі показали можливість її використання в оперативній роботі для прогнозування значень загального вмісту озону.

* *

1. *Шалыгина И.Ю.* Прогнозирование условий высокого содержания озона в приземном слое воздуха с использованием

- дискриминантного анализа / Тр. ГУ "Гидрометцентр России". 2010. – Вып. 344. – С. 228-237.
2. *Clark T.L., Karl T.R.* Application of prognostic meteorological variables to forecasts of daily maximum one-hour ozone concentrations in the northeastern United States // J. Appl. Meteorol. – 1982. – V. 21. – № 11. – P. 1662-1671.
 3. *Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю.* Статистические методы прогноза максимальных суточных концентраций приземного озона в Москве // Инф. сб. № 36. – 2009. – С. 153-162.
 4. *Звягинцев А.М., Крученицкий Г.М.* Об эмпирической модели приземной концентрации озона вблизи Москвы (г. Долгопрудный) / Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 1996 – Т. 32. – № 1. – С. 96-100.
 5. *Звягинцев А.М., Беликов И.Б., Еланский Н.Ф., Какаджанова Г., Кузнецова И.Н., Тарасова О.А., Шалыгина И.Ю.* Статистическое моделирование максимальных суточных концентраций приземного озона / Оптика атмосферы и океана. – 2010. – № 2. – С. 1-9.
 6. *Шалыгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И. и др.* О прогнозировании приземного озона в большом городе (на примере Москвы) / Оптика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 20. – № 7. – С. 651-658.
 7. Метод суточного прогноза ОСО и УФ-индекса на территории РФ, предложенный ЦАО. Одобрен Центральной методической комиссией Росгидромета 26.10.2010 доступный с <http://method.hydromet.ru/methods/pollut/uv/uv.html>
 8. Space-Based measurements of ozone and air-quality доступно з <http://ozoneaq.gsfc.nasa.gov/OMI/Ozone.md>

*Український науково-дослідний
гідрометеорологічний інститут, Київ*

И.В. Дворецкая, А.В. Сидоренко

Прогноз общего содержания озона над территорией Украины

Проведено моделирование динамики общего содержания озона над территорией Украины методом построения статистической модели. Определены основные метеорологические параметры, определяющие изменения концентрации озона над территорией Украины. Результаты тестирования показали, что полученные статистические зависимости позволяют использовать данную модель для прогнозирования динамики озона.

Ключевые слова: *общее содержание озона (ЗВО), статистическая модель, регрессионный анализ, прогнозирование общего содержания озона.*

I.V. Dvoretzka, A.V. Sydorenko

Forecast of the total ozone content over the territory of Ukraine

Modelling of the dynamics of total ozone over the territory of Ukraine, using the method of constructing a statistical model, were carried out. The basic meteorological parameters that define the changes in ozone concentrations over the territory of Ukraine were determined. Test results showed that the statistical dependencies allow to use this model to predict the dynamics of ozone.

Keywords: *total ozone content (TOC), the statistical model, regression analysis, forecasting of total ozone content.*