

ЕКОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕОСИСТЕМ

УДК 911.52

А. В. ХОЛОПЦЕВ, канд. физ.-мат. наук, доц., **М. П. НИКИФОРОВА**, асп.

Севастопольский национальный технический университет

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА НАД КАРПАТСКИМ РЕГИОНОМ

Рассмотрены особенности пространственно-временной изменчивости общего содержания озона над Карпатским регионом. Проанализированы тенденции изменения озонового слоя, а также возможность моделирования его динамики с использованием нестационарной многомодовой модели. Зависимость от времени средних значений углового коэффициента пространственного тренда среднемесячных общего содержания озона носит осциллирующий характер.

Ключевые слова: общее содержание озона, пространственно-временная изменчивость, Карпатский регион, нестационарная модель

Розглянуто особливості просторово-часової мінливості загального вмісту озону над Карпатським регіоном. Проаналізовані тенденції зміни озонового шару, а також можливість моделювання його динаміки з використанням нестационарної багатомодової моделі. Залежність від часу середніх значень кутового коефіцієнта просторового тренда середньомісячних значень загального вмісту озону носить осцилюючий характер.

Ключові слова: загальний вміст озону, просторово-часова мінливість, Карпатський регіон, нестационарна модель

In the paper features of the total ozone amount spatiotemporal variability over Carpathian region are viewed. Also ozone layer changes tendencies are analyzed and a possibility of its dynamics simulation with the use of nonstationary multimodal model is developed. Time dependence of angular coefficient of spatial trend of average monthlies common maintenance of ozone mean values carries an oscillation character.

Key words: total ozone amount, spatiotemporal variability, Carpathian region, nonstationary model

Пространственно-временная изменчивость общего содержания озона (ОСО) является значимым фактором экологических условий во многих регионах мира, определяющим динамику распределения потока биологически активной УФ радиации, воздействующей на их экосистемы, а также интенсивности образования над ними тропосферного озона. Тем самым она оказывает существенное влияние на заболеваемость населения саркомой, меланомой и другими видами рака кожи, а также развитие растений [1]. Поэтому совершенствование методов ее моделирования является актуальной проблемой не только экологии, физической географии и физики атмосферы, но также здравоохранения и экономики.

Наибольший интерес решение данной проблемы представляет для экономически развитых регионов мира, с развитым сельским хозяйством, высокой плотностью населения и разнообразными природными ланд

шафтами. К числу таких регионов относится и Карпатский регион Юго-Восточной Европы, где встречаются и Карпатские горы, и низменности, и степи, и леса. Благодаря наличию плодородных почв здесь более 7 тысяч лет назад впервые в Европе зародилось земледелие, и сформировались древнейшие цивилизации мира. И ныне на территории Карпатского региона расположены европейские государства с динамично развивающейся экономикой такие, как Болгария, Молдова, Румыния, а также западная часть территории Украины и Европейская часть территории Турции.

Мониторинг ОСО над Европой впервые начал осуществляться в 1926 г. в п. Ароза (Швейцария). На территории Карпатского региона наиболее продолжительные наблюдения ведутся в п. Храдек-Кралове (Чехия) с 1961 г. Эти наблюдения с 1979 г. дополнились информацией о пространственно-временной изменчивости ОСО над регионом, полученные с помощью спутников Nimbus 7, Meteor 3, ADEOS, Earth Probe [2].

Анализ накопленной к настоящему времени информации показал, что результаты измерений ОСО над различными пунктами рассматриваемого региона существенно зависят как от места их расположения, так и от времени. При этом закономерности временной изменчивости осредненных характеристик ОСО над теми или иными частями его территории существенно зависят от интервала осреднения по времени.

Показано, что, как и над большей частью территории юго-восточной Европы, над Карпатским регионом наибольшие значения среднемесячных ОСО наблюдаются в апреле, а наименьшие – в октябре. Межгодовые изменения этой характеристики в атмосфере над различными его пунктами носят осциллирующий характер. Анализ статистических свойств этих процессов позволил предположить, что они являются нестационарными и многофакторными, что существенно осложняет моделирование.

Один из подходов к моделированию таких процессов, эффективность которого подтверждена на примере динамики среднемесячных ОСО над Украиной, предложен в [3]. Он основан на следующих допущениях:

- настоящее и будущее изучаемых процессов в основном определяются их предысторией;
- мгновенные спектры моделируемых процессов являются многомодовыми, а их параметры (амплитуды и периоды максимумов) являются медленными функциями времени, параметры которых в изучаемый период (включающий как прошлое, так и будущее) могут полагаться неизменными.

Установлено, что модели изучаемого процесса, идентифицированные с помощью упомянутой методики, позволяют не только оценивать мощности отдельных его мод, но и для некоторых регионов осуществлять его эффективное долгосрочное прогнозирование. При этом их адекватность и эффективность существенно зависят от географического положения региона, для которого они разрабатываются.

Особенности современной пространственно-временной изменчивости среднемесячных ОСО над Карпатским регионом ныне изучены недостаточно, а возможности моделирования их межгодовых изменений с ис-

пользованием упомянутой методики ранее не изучались. Таким образом, целью данной работы является анализ особенностей современной пространственно-временной изменчивости среднемесячных ОСО над Карпатским регионом, а также изучение возможностей ее моделирования с учетом статистических свойств этого процесса, выявленных по его предыстории.

Методика исследования и фактический материал

Для достижения поставленной цели анализировались ряды среднемесячных и среднесуточных значений ОСО в том или ином месяце над различными частями территории Карпато-Балканского региона. Эти ряды включают данные, полученные как в результате спутникового мониторинга, так и со станций, расположенных на рассматриваемой территории и вблизи нее за период с 1 января 1979 г. по 30 октября 2009 г.

Данные спутникового мониторинга получены с сайта Мирового информационного центра по озону и ультрафиолетовой радиации (WOUDC – <http://www.woudc.org>). Эти данные представляют собой карты, отображающие распределение среднесуточных значений ОСО в единицах Добсона (е.Д.) над всей территорией планеты, при этом их разрешение (разница значений ОСО, соответствующих различным цветам) составляет 25 е.Д.

С помощью разработанной авторами программы, такие карты преобразовывались в числовые массивы, состоящие из 360x180 членов, каждый из которых соответствует значению ОСО над тем или иным квадратом территории планеты размерами 1x1 угловой градус. Из этих значений, упорядоченных по времени формировались временные ряды среднесуточных значений ОСО над соответствующей территорией, отображающие межгодовые изменения этой характеристики за весь изучаемый период.

Из всего множества полученных таким образом временных рядов рассматривались только те, которые соответствуют квадратам, попадающим в пределы области, образованной пересечением параллелей 45°N и 53°N, и меридианов 16°E и 30°E, т.е. Карпатскому региону.

Члены изучавшихся временных рядов среднемесячных значений ОСО над тем или

иным квадратом этой области формировались путем усреднения за месяц соответствующих членов временных рядов среднесуточных значений.

Для оценки адекватности спутниковой информации использовались данные наземного мониторинга ОСО, полученные на озонметрических станциях: Будапешт (Венгрия); Бухарест (Румыния); Храдек Кралове (Чехия); Одесса, (Украина), представленные на упомянутом выше сайте. Точность расчета среднесуточных ОСО, с использованием

данных полученных наземными средствами измерения, составляет 0,5 е.Д.

При оценке адекватности спутниковых данных, полученные по ним временные ряды среднесуточных ОСО за тот или иной месяц над каждым из этих пунктов, сопоставлялись с данными наземных измерений, которые принимались за их истинные значения. При этом оценивались систематические и абсолютные погрешности спутниковых данных.

Полученные при этом результаты представлены в таблице 1а-б.

Таблица 1а

Систематические погрешности спутниковых данных, отображающих динамику среднесуточных ОСО над некоторыми пунктами Карпато-Балканского региона в январе

Характеристика адекватности	Храдек Кралове (Чехия)	Будапешт (Венгрия)	Бухарест (Румыния)	Одесса (Украина)
Дисперсия	91,899	185,255	280,059	118,487
СКО	9,586	13,611	16,735	10,885

Таблица 1б

Средние абсолютные погрешности (е.Д.) спутниковых данных, отображающих динамику среднесуточных ОСО над некоторыми пунктами Карпато-Балканского региона в январе

Храдек Кралове (Чехия)	Будапешт (Венгрия)	Бухарест (Румыния)	Одесса (Украина)
2,296	5,453	1,361	2,320

Для рассматриваемых пунктов Карпато-Балканского региона средние абсолютные погрешности спутниковых данных (табл. 1а-б). достаточно низки. Максимальное значение погрешности наблюдается для п. Будапешт (Венгрия), при этом в данном пункте велико также и значение систематической погрешности данных. Данные представленные в таблице 1а-б, подтверждают адекватность информации о межгодовых изменениях среднесуточных ОСО в любые месяцы, соответствующим данным, полученным с помощью наземных средств измерений.

Временные ряды межгодовых изменений среднесуточных ОСО над различными квадратами территории Карпатского региона использовались для изучения особенностей пространственно-временной изменчивости этого процесса.

В качестве примера, на рис. 1 приведены зависимости от времени среднесуточных ОСО над всеми квадратами данного региона в январе.

Как видим из рис. 1, рассматриваемые зависимости среднесуточных ОСО от времени весьма подобны. Их максимумы и минимумы по времени совпадают, отличаясь несколько лишь своими абсолютными значениями. Разброс между значениями ОСО в различных пунктах региона в один год сопоставим со значением среднеквадратического отклонения результатов расчетов по спутниковой и наземной информации. Учитывая это, характеристикой распределения среднесуточных ОСО, анализ которой информативен при изучении их временной изменчивости, является среднее значение, рассчитанное как среднее арифметическое по

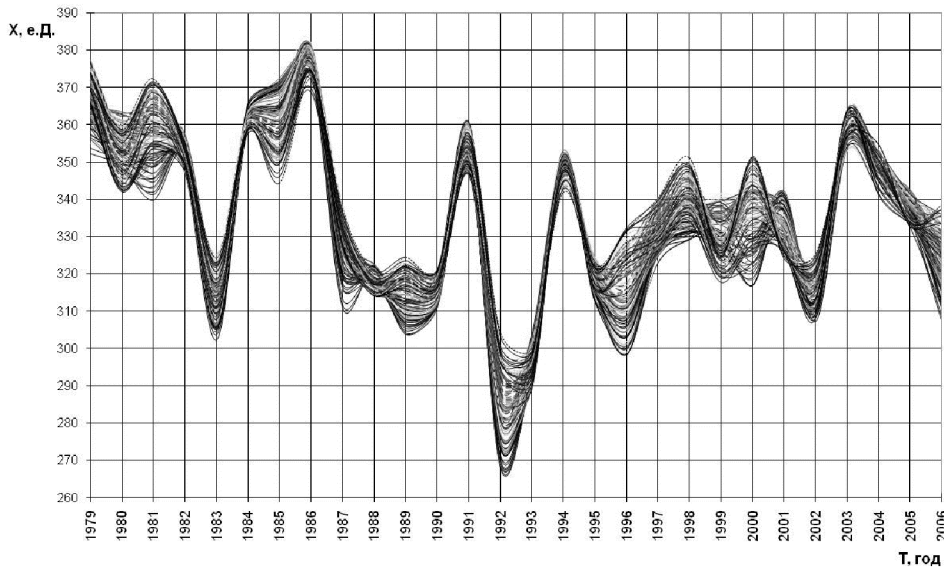


Рисунок 1 – Зависимости от времени (Т, год) среднемесячных ОСО (X, е.Д.) над различными частями территории Карпатского региона в январе, построенные по спутниковым данным

времени значений ОСО, соответствующих всем квадратам. Как мера тенденции рассматриваемого процесса рассматривался угловой коэффициент линейного тренда этой характеристики, рассчитанный за период с 1979 по 2006 г. Как характеристики его пространственной изменчивости рассматривались значения угловых коэффициентов линейных трендов среднемесячных значений ОСО в квадратах территории региона, расположенных в различных его меридиональных и широтных сегментах шириной 1 у.г. При этом предполагалось, что в меридиональных сегментах квадраты рассматриваются по мере уменьшения широты, а в широтных сегментах они изучаются по мере увеличения долготы их центров.

Как видно из примера, приведенного на рис.1, зависимости от года среднемесячных ОСО над пунктами Карпатского региона в январе носят осциллирующий характер. Аналогичный вид они имеют и в прочие месяцы. Это позволяет предполагать, что все рассматриваемые процессы являются многомодами и нестационарными, а в качестве их математической модели может быть использовано соотношение:

$$X(t) = T \cdot x(t) + K(t) + n(t), \quad (1)$$

где $T \cdot x(t)$ – линейный тренд изучаемого процесса;

$n(t)$ – стационарный, гауссовый шум измерения, характеризуемый нулевым средним;

$K(t)$ – коррелированная, нестационарная составляющая с нулевым средним:

$$K(t) = \sum_{k=1}^N A_k(t) \sin[\omega_k(t) + \varphi_k], \quad (2)$$

где $A_k(t)$ – мгновенная амплитуда k -моды процесса ($k = 0, 1, 2, \dots$)

$$A_k(t) = a_{k_0} (1 + a_{k_1} t + a_{k_2} t^2); \quad (3)$$

$\omega_k(t)$ – ее мгновенная фаза, являющаяся в общем случае нелинейной функцией времени:

$$\omega_k(t) = \omega_{k_0} (1 + \omega_{k_1} t) \cdot t; \quad (4)$$

a_{k_i} и ω_{k_i} – действительные числа, зависящие от рассматриваемого процесса и номера его моды k ,

φ_k – начальная фаза моды с частотой $\omega_k(t)$, являющаяся действительной константой.

Для подтверждения этого предположения с помощью методики [6], для квадратов территории Карпатского региона, соответствующих пунктам, упомянутым в таблице 1а-б, были идентифицированы параметры модели (1-4) временных рядов среднемесячных ОСО для всех месяцев. Также были идентифицированы модели этих процессов в предположении, что $A_k(t) = a_{k_0}$, $\omega_k(t) = \omega_{k_0}$.

Для оценки адекватности обеих моделей был использован критерий Стьюдента [5].

При этом были рассчитаны значения коэффициента корреляции результатов моделирования изучаемых процессов, основанных на использовании спутниковых данных, а также результатов их наземных наблюдений. При этом на протяжении всех месяцев года значения коэффициента корреляции временных рядов рассматриваемых процессов, описываемых стационарной моделью (с использованием стандартного спектрального анализа, [7]) существенно меньше 95% порога достоверной корреляции, что свидетельствует об их неадекватности. В тоже время значения коэффициента корреляции временных рядов среднемесячных ОСО, описываемых нестационарной моделью (3,4) ощутимо больше этого порога.

Особенности пространственно-временной изменчивости среднемесячных значений ОСО над Карпатским регионом

С использованием рассмотренной методики изучены закономерности пространственной и временной изменчивости среднемесячных ОСО над Карпатским регионом для всех месяцев года. В качестве примера рассмотрим особенности полученных результатов для января.

На рис. 2 приведена зависимость от года среднего значения среднемесячного ОСО над Карпатским регионом в январе.

Как видим из рис. 2, средние значения среднемесячных ОСО в январе над данным регионом за период с 1979 по 2006 г. уменьшались (соответствующее значение углового коэффициента линейного тренда равно -0.745 е.Д/год). Зависимость от времени рассматриваемой характеристики носит осциллирующий характер.

Наиболее существенные ее максимумы соответствуют 1979, 1986, 1991, 1994, 1997, 1999, 2002 гг. Абсолютный минимум среднего значения ОСО над регионом в январе наблюдался в 1992 г.

На рис. 3 приведены зависимости от года значений угловых коэффициентов линейных трендов пространственной изменчивости среднемесячных ОСО в январе, рассчитанных для различных меридиональных сегментов территории региона.

Из рис. 3 следует, что рассматриваемые зависимости для различных меридиональных секторов территории региона во многом подобны. Все они носят осциллирующий характер, расположения их максимумов и минимумов совпадают. Среднемесячные ОСО над регионом возрастали с севера на юг в 1979, 1981, 1987, 1989 – 1990, 1992, 1996 – 1998, 2000, 2002 – 2003 и 2006 годах. Противоположная закономерность имела место в 1980,

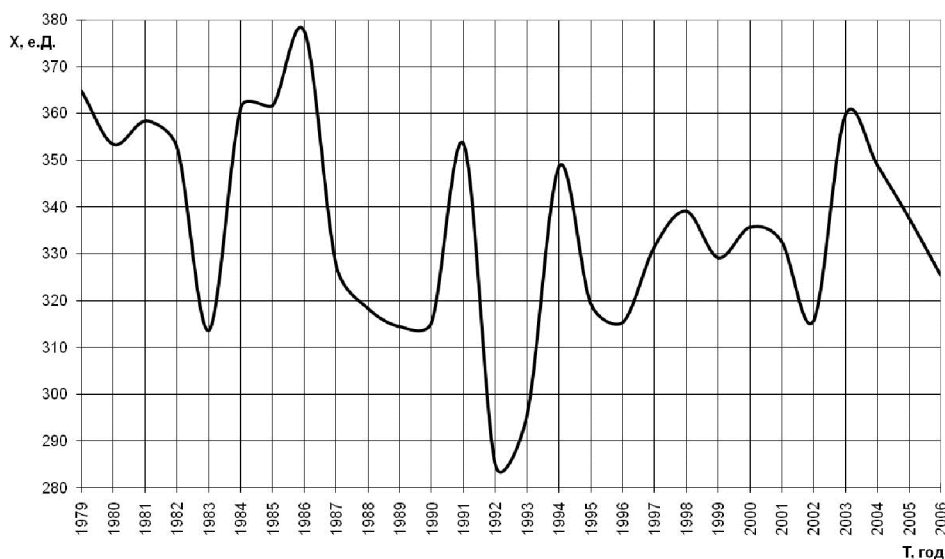


Рисунок 2 – Зависимость от года (Т) среднего значения среднемесячного ОСО над Карпатским регионом в январе

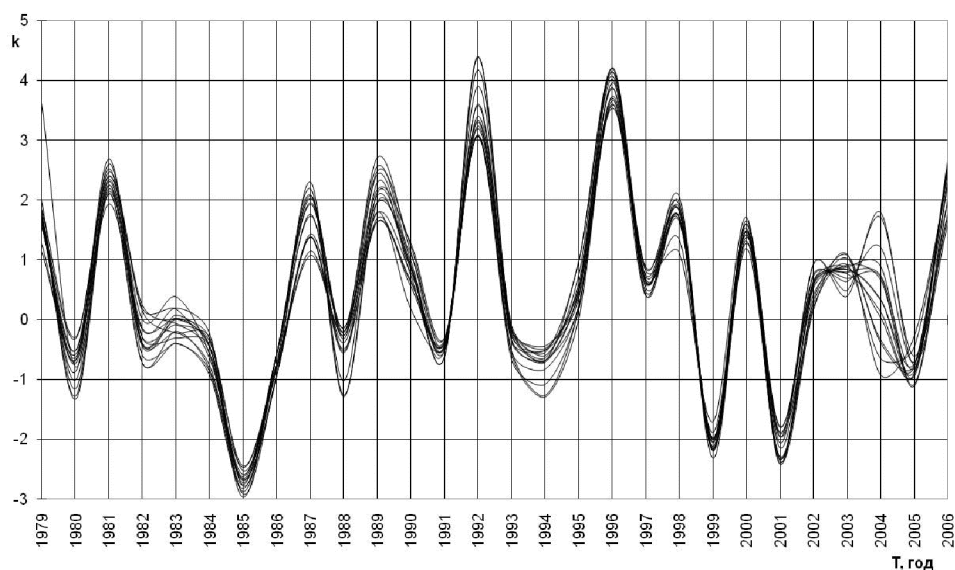


Рисунок 3 – Зависимости от года (Т, год) значений углового коэффициента линейного тренда (k) пространственной изменчивости среднемесячных ОСО в различных меридиональных сегментах атмосферы над Карпатским регионом

1984 – 1986, 1989 1993 – 1994 , 2001 и 2005 годах. В целом за период преобладали тенденции к увеличению среднемесячных ОСО с севера на юг.

Наиболее существенная пространственная изменчивость среднемесячных ОСО в меридиональных сегментах имела место в 1992 и 1996 гг.

На рис. 4 приведены зависимости от года значений угловых коэффициентов линейных трендов пространственной изменчивости среднемесячных ОСО в январе, рассчитанных для различных широтных сегментов территории региона.

Из рис. 4 следует, что для различных широтных секторов территории Карпатского региона рассматриваемые зависимости также

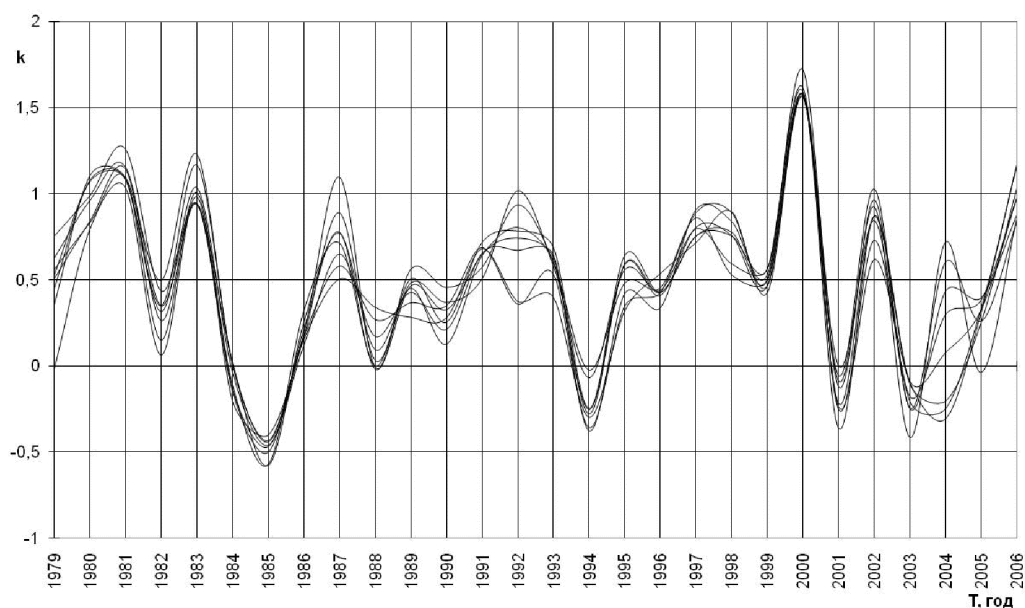


Рисунок 4 – Зависимости от года (Т, год) значений углового коэффициента линейного тренда (k) пространственной изменчивости среднемесячных ОСО в различных широтных сегментах атмосферы над Карпатским регионом

во многом аналогичны. Все они носят осциллирующий характер. Годы, в которые имеют место их максимумы и минимумы, как правило, совпадают. Исключениями являются 1991 – 1992 и 2004 гг.

За весь период с 1979 по 2006 гг. значения среднемесячных ОСО над регионом возрастали с запада на восток. Наиболее существенная пространственная неоднородность их распределения имела место в 2000 г. Противоположные тенденции пространственной изменчивости ОСО отмечались лишь в 1985, 1994, 2001, 2003 – 2004 гг.

Из сравнения рис. 3 и 4 видно, что годы, соответствующие большинству экстремумов представленных на них зависимостей совпадают. Это позволяет предполагать, что изменчивость среднемесячных ОСО в меридиональных, и в широтных секторах атмосферы над рассматриваемым регионом в январе вызвана действием единых факторов.

Из сравнения рис. 2, 3 и 4 можно заключить, что максимумы средних среднемесячных ОСО над регионом имели место в годы, когда значения пространственных трендов распределения этой характеристики, рассчитанных как в широтных сегментах, так и в меридиональных были близки к минимальным.

Из рис. 3 и 4 следует, что существенных изменений средних значений угловых коэффициентов линейных трендов пространственной изменчивости среднемесячных ОСО в различных меридиональных и широтных сегментах за рассматриваемый период не произошло. Это же подтвердили результаты расчетов значений угловых коэффициентов их линейных трендов и для каждого соответ-

ствующего квадрата территории Карпатского региона.

Учитывая изложенное, пространственно-временную изменчивость среднемесячных ОСО в январе над Карпатским регионом целесообразно характеризовать зависимостями от года средних значений угловых коэффициентов линейных трендов их пространственной изменчивости в меридиональных и широтных сегментах, рассчитанных как средние арифметические значений для всех соответствующих сегментов.

Результаты математического моделирования межгодовой изменчивости среднемесячных значений ОСО над Карпатским регионом

Учитывая выявленные особенности пространственно-временной изменчивости среднемесячных и среднесуточных ОСО, с помощью изложенной методики были идентифицированы параметры математических моделей (1-4) межгодовых изменений их средних значений, а также средних значений угловых коэффициентов линейных трендов их пространственной изменчивости в меридиональных и широтных сегментах атмосферы территории Карпатского региона во все месяцы.

В качестве примера в таблице 3 приведены параметры модели динамики средних по всему Карпатскому региону значений среднемесячных ОСО в январе.

На рис. 5 приведена фактическая зависимость от времени (Т) средних среднемесячных значений ОСО над Карпатским регионом в январе, а также результат ее моделирования и экстраполяции.

Таблица 3

Параметры модели динамики средних по всему Карпатскому региону значений среднемесячных ОСО в январе

Параметр модели	1	2
Начальный период моды ($2\pi/\omega_{k_0}$, год)	7	2
Мощность ($a_{k_0}^2$, е.Д. ²)	139,26	128,44
Скорость изменения частоты моды (ω_{k_1})	0,031	-0,057
Начальная фаза моды (φ_k)	0,52	3,63
Среднеквадратическое отклонение результатов моделирования (е.Д.)	11,50	

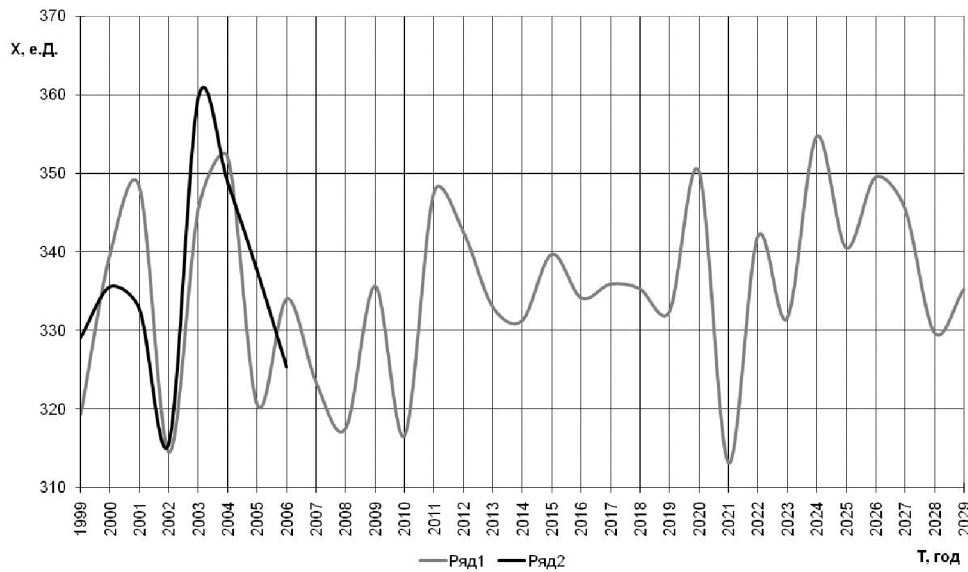


Рисунок 5 – Зависимость от времени (Т, год) средних среднемесячных значений ОСО над Карпатским регионом в январе (ряд 2), а также результат ее моделирования (ряд 1)

Из рисунка 5 видно, что между модельной и фактической зависимостью средних значений среднемесячных значений ОСО над Карпатским регионом в январе имеет место удовлетворительное соответствие (коэффициент корреляции 0,68, что выше 95% порога

достоверной корреляции по критерию Стьюдента).

В таблице 4 приведены полученные при этом параметры модели динамики широтных составляющих пространственной изменчивости среднемесячных ОСО в январе.

Таблица 4

Параметры математической модели динамики широтных составляющих пространственной изменчивости среднемесячных ОСО в январе

Параметр модели	1	2	3
Начальный период моды ($2\pi/\omega_{k_0}$, год)	2	4	7
Мощность ($\alpha_{k_0}^2$, е.Д. ²)	0,24	0,08	0,04
Скорость изменения частоты моды (ω_{k_1})	0,125	0,043	-0,008
Начальная фаза моды (φ_k)	3,67	0,45	5,83
Среднеквадратическое отклонение результатов моделирования (е.Д.)	0,394		

На рис. 6 приведена фактическая зависимость от времени (Т) средних значений углового коэффициента пространственного тренда среднемесячных значений ОСО в широтных сегментах атмосферы над Карпатским регионом в январе, а также результат ее моделирования и экстраполяции.

Как видно из рисунка 6, между зависимостью от времени рассчитанных средних зна-

чений углового коэффициента пространственного тренда среднемесячных значений ОСО в изучаемых широтных сегментах атмосферы в январе, а также результатом ее моделирования имеет место удовлетворительное соответствие. Это подтверждается и рассчитанным значением коэффициента корреляции этих зависимостей, которое равно 0,87

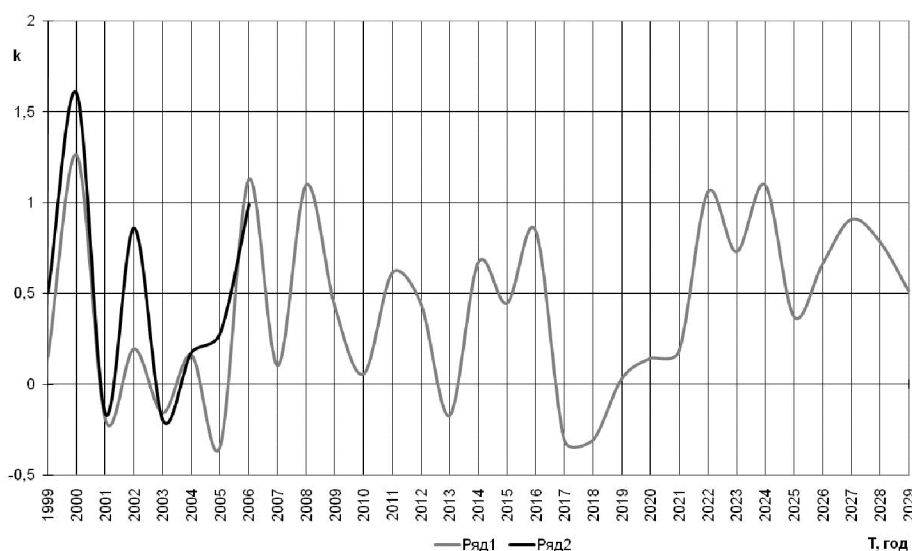


Рисунок 6 – Зависимость от времени (Т) средних значений углового коэффициента (k) пространственного тренда среднемесячных значений ОСО в изучаемых широтных сегментах атмосферы в январе (ряд 2), а также результат ее моделирования (ряд 1)

(что превышает значение 95% порога достоверной корреляции по критерию Стьюдента).

В таблице 5 приведены полученные при этом параметры модели динамики меридиональных составляющих пространственной изменчивости среднемесячных ОСО в январе.

На рис. 7 приведена фактическая зависимость от времени (Т) средних значений углового коэффициента пространственного тренда среднемесячных значений ОСО в меридиональных сегментах атмосферы над Карпатским регионом в январе, а также результат ее моделирования и экстраполяции.

Как видно из рисунка 7, между зависимостью от времени рассчитанных средних значений углового коэффициента пространственного тренда среднемесячных значений ОСО в изучаемых меридиональных сегментах атмосферы в январе, а также результатом ее моделирования имеет место удовлетворительное соответствие (значение коэффициента корреляции этих зависимостей равно 0,92, что превышает значение 95% порога достоверной корреляции по критерию Стьюдента).

Таблица 4

Параметры математической модели динамики меридиональных составляющих пространственной изменчивости среднемесячных ОСО в январе

Параметр модели	1	2
Начальный период моды ($2\pi/\omega_{k_0}$, год)	2	3
Мощность ($\alpha_{k_0}^2$, е.Д. ²)	1,92	1,59
Скорость изменения частоты моды (ω_{k_1})	0,086	0,069
Начальная фаза моды (φ_k)	3,54	5,95
Среднеквадратическое отклонение результатов моделирования (е.Д.)	0,794	

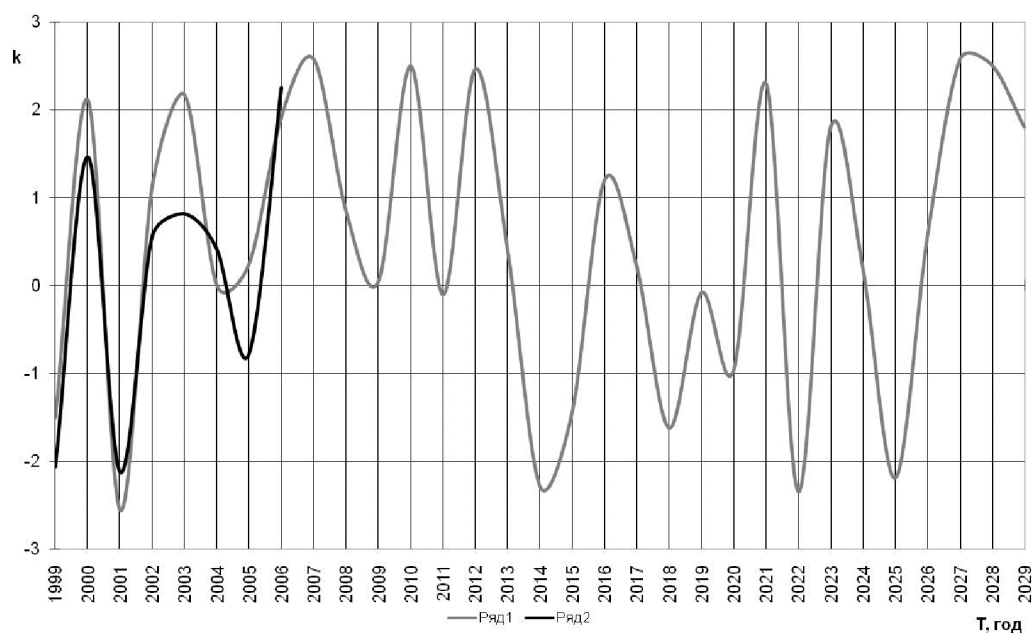


Рисунок 7- Залежність від часу (Т) середніх значень кутового коефіцієнта (k) просторового тренду середньомісячних значень ОСО в досліджуваних меридіональних сегментах атмосфери в січні (ряд 2), а також результату її моделювання (ряд 1)

Адекватність результатів моделювання і фактичної динаміки досліджуваних процесів свідчить про доцільність розгляду результатів їх екстраполяції на період з 2007 по 2029 гг. (на рис. 5, 6 і 7 ряд 1).

З рис. 5 видно, що екстрапольовані значення середніх середньомісячних ОСО над Карпатським регіоном будуть зростати (тенденція, існуюча в кінці ХХ століття, зміниться на протилежну).

З рис. 6 випливає, що в вказаний період значення ОСО над розглядуваним регіоном, як правило, будуть зростати з заходу на схід. Протилежне явище ймовірно в 2014 і 2017 – 2018 гг. Залежність від часу середніх значень кутового коефіцієнта просторового тренду середньомісячних ОСО буде і далі носити осцилюючий характер.

Останнє свідчить про доцільність розгляду результатів екстраполяції досліджуваного процесу, представлених на тому ж рисунку (ряд 1 за період з 2007 по 2009 гг.).

З рис. 7 випливає, що в вказаний період значення ОСО над Карпатським регіоном, як правило, будуть зростати з заходу на схід. Протилежне явище ймовірно в 2014 і 2017 – 2018 гг. Залежність від часу середніх значень кутового коефіцієнта просторового тренду середньомісячних ОСО буде і далі носити осцилюючий характер.

енда просторового тренду середньомісячних ОСО буде і далі носити осцилюючий характер.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борисова С. В. Озон в атмосфері: Навчальний посібник / С.В. Борисова. – Київ – Ізмаїл: СМІЛ, 2001. – 71 с.
2. М. Weber, K. Bramstedt, Lambert J. C., Loyola D., Gleason J. The use of GOME total ozone for longterm trend assessment //SPARC/IOC workshop understanding of ozone trends college park, MD. – 7-9 March 2001
3. Холопцев А. В. Особливості енергетических спектрів міжгодових змінності загального вмісту озону над Україною в період з 1979 по 2006 гг./ А. В.Холопцев, М. П.Никифорова // Причорноморський екологічний бюлетень. №1(31), (березень), Одеса. – 2009, 182 – 193 с.
4. Скворцов А. В. Триангуляція Делоне і її застосування / А.В.Скворцов. – Томск: Вид-во Томського державного університету, 2002. – 128 с.
5. Банди Б. Методи оптимізації. Вступний курс: Пер. з англ. / Б. Банди. – М.: Радіо і зв'язь, 1988. – 128 с.; іл.
6. Холопцев А. В. Аналіз факторів похибок моделювання міжгодових змінності середньомісячних значень загального вмісту озону над західною і центральною Європою з урахуванням їх нестационарності і багатомодовості / А.В.Холопцев, М.П.Никифорова // Вісник Одеського державного екологічного університету, №9, 2009. – в друку
7. Кендал М. Дж. Многомерний статистичний аналіз і часові ряди / М. Дж.Кендал, А.Стьюарт; пер. з англійського Е.Л. Пресмана, В.И. Ротаря; під редакцією Колмогорова А.Н., Прохорова Ю.В. – М.: Наука, 1976. – 736 с.

Надійшла до редколегії 25.01.2010

