

УДК 551.510.41

Л. М. Белокриницкая<sup>1</sup>, И. В. Калинина<sup>1</sup>, Г. М. Крученицкий<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Київський національний університет імені Тараса Шевченка

<sup>2</sup>Центральна аерологічна обсерваторія Росгідромету, м. Долгопрудний, Росія

**Мониторинг поля общего содержания озона  
над Украиной средствами наземного  
и космического базирования**

*Надійшла до редакції 15.03.04*

---

Проаналізовано дані спостережень поля загального вмісту озону (ЗВО) над Україною наземними і космічними вимірювальними засобами з 1970-х рр. по цей час. Отримано порівняльні оцінки якості роботи наземних вимірювальних засобів в Україні та за її межами. Розраховано кліматичні норми, а також лінійні та квадратичні тренди ЗВО для України, які порівнюються з даними для відповідного широтного поясу. Показано, що зміни ЗВО носять коливальний характер.

---

**ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ**

К настоящему времени стало ясно, что роль антропогенного фактора в долговременных изменениях озонового слоя была сильно преувеличена, а влияние естественных причин существенно недооценивалось. Это обстоятельство заставляет вновь возвращаться к анализу рядов долговременных наблюдений общего содержания озона (ОСО), чтобы более надежно и объективно оценить происходящие изменения и диагностировать их причины. Хорошо известно, что сезонные вариации ОСО являются главной составляющей изменчивости озонового слоя. Только после их выделения можно говорить об анализе долговременной изменчивости с характерными временами, превышающими период сезонности. При этом, выделение сезонного хода традиционными методами климатологии наталкивается на следующие трудности:

- длина рядов наблюдений ОСО крайне мала по климатологическим меркам (30—50 лет);
- ряды содержат большое количество пропусков;
- однородность рядов вызывает определенные сомнения, так как регулярные международные калибровки измерительных средств стали проводиться относительно недавно, не все стороны могут принять в них участие, и наконец, условия сетевых наблюдений отличаются от условий проведения калибровок.

Перечисленные трудности усугубляются тем обстоятельством, что наземные средства измерения ОСО не обеспечивают глобальной представительности данных, а спутниковые подвержены долговременным изменениям метрологических параметров, связанных с длительной эксплуатацией на борту космического аппарата.

Настоящая работа посвящена сравнению данных ОСО, поступающих от станций наземной озонметрической сети Украины и данных, поступающих от американского спутникового прибора TOMS (Total Ozone Mapping System), имеющего наиболее длинные и однородные ряды ОСО из всех измерительных средств космического базирования. По этим данным будут выделены периодическая и долговременная составляющие изменчивости поля ОСО над Украиной, которые будут сравнены со средними данными для соответствующего пояса. Результаты интеркалибровок наземных средств измерения ОСО и их сравнений со спутниковыми измерениями регулярно публикуются на лазерных дисках [10], распространяемых Мировым центром данных ВМО по озону в Торонто, а также сайтах NASA и WMO. Несколько лет назад попытка сравнения результатов наземных и спутниковых измерений ОСО была предпринята и в Украине. Ее результаты и библиография по этому вопросу приведены в работе [3].

Регулярные (ежесуточные) измерения ОСО на Украине начались в 1973 г. на станциях Борисполь,

Феодосия, Одесса и Львов и продолжают по сегодняшний день. С 1989 г. к ним присоединились станции Киев, работающая по сей день, и Богуслав, прекратившая работу в 1997 г. Все станции Украины оснащены озонметрическими фильтровыми приборами М-124 (ранее М-84). К анализу мы привлекаем все результаты, полученные в ходе работы наземной сети. Для сравнения с результатами зарубежных озонметрических станций использовались данные [10]. Первый из приборов TOMS функционировал на борту КА «Nimbus-7» с конца октября 1978 г. по начало мая 1993 г. Второй — на борту КА «Метеор-3» с августа 1991 г. по ноябрь 1994 г., а третий — с июля 1996 г. по настоящее время на борту КА «Earth Probe». В работе использованы только данные первой и третьей миссий аппаратуры TOMS, так как КА «Метеор-3» в отличие от «Nimbus-7» и «Earth Probe» функционировал не на солнечно-синхронной орбите, что обусловило как наличие большого числа пропусков в его данных, так и существенную неоднородность этих данных, связанную с отсутствием синхронизации измерений с местным временем. (Данные измерений первой и третьей миссий аппаратуры TOMS довольно жестко привязаны к местному полудню.)

Сравнение данных ОСО, полученных от наземной и космической измерительных систем, производилось по следующим показателям:

- совпадение пространственно совмещенных отсчетов;
- совпадение пространственных полей;
- совпадение климатических норм;
- совпадение трендов.

Результаты сравнений изложены ниже.

**ЕЖЕСУТОЧНЫЕ ДАННЫЕ**

Ежесуточные данные, поступающие от наземной сети и прибора TOMS, вообще говоря, не должны быть полностью тождественными даже в случае, если измерительные средства производят измерение ОСО с нулевой погрешностью. Это обусловлено следующими обстоятельствами:

- TOMS измеряет значение ОСО в местный полдень, и результаты измерений пространственно усреднены по ячейкам имеющим размеры 1° по широте и 1.25° по долготе и ориентированным вдоль меридианов и параллелей.
- Наземная аппаратура измеряет среднесуточное значение ОСО, выполняя в течение светового дня от 5 до 8 измерений с интервалом 1 ч. При этом пространственное усреднение выполняется в направлении движения воздушной массы над

пунктом наблюдения (а эти направления, как правило, различны на различных высотах), и размер зоны усреднения зависит от модуля скорости ветра, который также изменяется с высотой.

Поэтому целесообразно сравнивать не отдельные отсчеты наземной и спутниковой аппаратуры, а их совокупность за определенный период времени, например за год. Удобно количественно оценивать корреляцию между наземными и спутниковыми данными, изображая каждый день точкой на плоскости наземный отсчет — спутниковый отсчет (рис. 1). При идеальном совпадении данных все точки будут расположены на биссектрисе первого координатного угла. В реальном случае коэффициент  $k$  регрессии  $y = kx$  показывает отличия калибровок наземного и спутникового приборов, а отличие коэффициента детерминации  $R^2$  от 100 % соответствует вкладу случайных погрешностей.

Пределы изменения коэффициентов регрессии и детерминации для станций украинской озонметрической сети за период 1978—2002 гг. показаны на

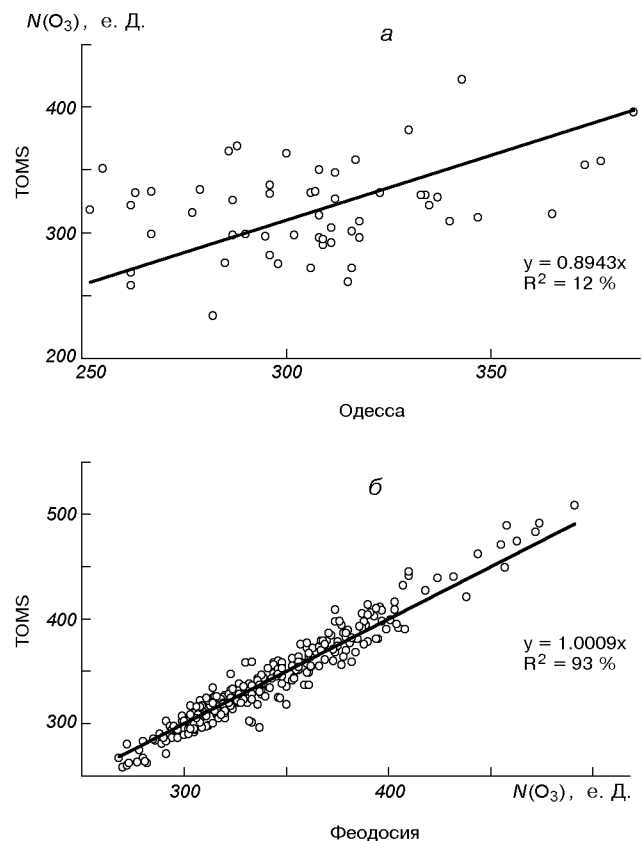


Рис. 1. Наихудшее (а) и наилучшее (б) согласие данных станций украинской озонметрической сети с данными аппаратуры TOMS

рис. 2. Видно, что работа станций Борисполь и Одесса зачастую является совершенно неудовлетворительной. Наилучшие показатели имеет станция Киев (УкрНИИГМИ).

Для сравнения приведем (см. табл. 1) соответствующие показатели станций мировой озонметрической сети, оснащенных озонотрами Добсона, рассчитанные нами по данным [10]. Кроме этих станций, в таблицу включены показатели лучшей из станций украинской сети — Киев, так как она является единственной, которая обладает долговременной стабильностью по коэффициенту регрессии.

Из рис. 2, а ясно, что среднее квадратичное отклонение коэффициента регрессии составляет  $\sigma_k \approx 0.002$  (20 % динамического диапазона), что дает возможность использовать данные станции Киев для оценки однородности рядов спутниковых измерений озона до и после смены прибора (пере-

хода от «Nimbus-7» к «Earth Probe»).

Данными остальных украинских станций для этой цели воспользоваться невозможно, так как у них величина  $\sigma_k$  существенно превышает обусловленное сменой прибора изменение коэффициента регрессии  $\Delta k$ , что совершенно очевидно из сравнения рис. 2, а с последней графой табл. 1.

Приведенные данные дают возможность количественно оценить, насколько фильтровая аппаратура, которой оснащена эта сеть, дает большую случайную погрешность, чем спектральная аппаратура, работающая на мировой сети. Подчеркнем, что сравнение наземных и спутниковых рядов ОСО может привести только к обнаружению изменений чувствительности спутниковой аппаратуры, обусловленной сменой прибора и КА, но никак не о их численном определении и тем более компенсации, о чем свидетельствует разброс значений в последней графе табл. 1. Так, совершенно очевидно, что показания прибора TOMS на борту КА «Earth Probe» завышены на 1 % относительно показаний прибора на борту «Nimbus-7». Более конкретное сравнение невозможно, так как различие коэффициентов регрессии данных обоих приборов даже с данными наземных спектральных измерений по порядку величины совпадает с долговременной нестабильностью чувствительности наземной аппаратуры. Это объясняется прежде всего тем, что расхождение наземных и спутниковых данных зависит от условий наблюдений на каждой станции (высоты над уровнем моря, облачной обстановки и т. д.). И наконец, отметим, что существенно более низкие (по сравнению с мировой сетью) значения коэффициента детерминации на украинской сети связаны не только с техническим несовершенством аппаратуры и относительно невысокой квалификацией персонала, но и с тем, что фильтровая аппаратура для определения среднесуточного значения ОСО требует большего числа отсчетов, чем спектральная [6]. Следовательно, увеличивается объем пространственного усреднения (см. выше) и отличие среднего значения от мгновенного полуденного значения в ячейке TOMS.

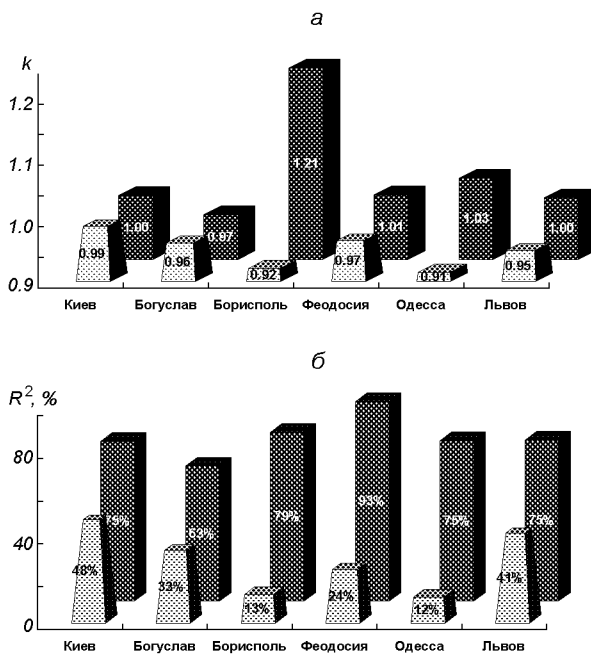


Рис. 2. Динамический диапазон коэффициентов регрессии (а) и детерминации (б)

Таблица 1. Показатели станций мировой озонметрической сети, оснащенных озонотрами Добсона

Станция	Широта	Долгота	Н, км	k	$\sigma_k$	$R^2$ , %	k	$\sigma_k$	$R^2$ , %	$\Delta k$
				«Nimbus-7»			«Earth Probe»			
Саппоро	43.1	141.3	0.0	1.014	0.001	93.6	1.026	0.001	93.1	0.012
Мауна Лоа	19.5	-155.6	3.4	1.037	0.0004	91.5	1.055	0.001	95.6	0.018
Болдер	40.0	-105.3	1.7	1.003	0.001	92.9	1.006	0.001	93.7	0.004
Хознпайссенберг	47.8	11.0	1.0	1.003	0.0004	97.6	1.006	0.001	93.7	0.004
о-в Уоллопс	37.9	-75.5	0.0	0.998	0.001	92.3	1.009	0.001	92.6	0.011
Киев	50.4	30.5	0.1	0.989	0.002	62.5	0.996	0.002	58.8	0.007

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ПОЛЯ

Построение пространственных полей распределения ОСО над территорией Украины по спутниковым данным обладает рядом преимуществ по сравнению с их построением по результатам наземных измерений по следующим причинам:

- Количество наземных отсчетов ОСО никогда не превышало шести в сутки, причем станции, дающие эти отсчеты, весьма неравномерно расположены по территории Украины, а в сетке TOMS для этой территории имеется  $9 \times 16 = 144$  равноудаленных (в градусном исчислении) отсчета;
- Не каждые сутки наземные станции имеют возможность по условиям оптической погоды выполнять измерения [6], а данные TOMS поступают ежесуточно, исключая чрезвычайно редкие перерывы, связанные с техническими неполадками на борту или в центре обработки NASA.

Справедливости ради необходимо отметить, что в 1996—1998 гг. КА «Earth Probe» находился на очень низкой орбите, и почти половина суточных данных содержала до 15 % пропусков отсчетов в той части сетки TOMS, которая соответствует территории Украины. О том, какие последствия может иметь недостаточная частота отсчетов, можно судить по рис. 3. Наличие области высоких значений ОСО в восточной части Украины, где нет озонметрических станций, привело не только к сильнейшим искажениям формы изоплетов, но и существенно занизило значение ОСО в этом регионе. Отсюда ясно, что для решения задач, которые требуют знания поля ОСО с высоким пространственным разрешением (например, задачи мониторинга УФ-облученности территории Украины [2]), альтернативы использованию спутниковых данных практически нет. К использованию же наземных данных для картирования полей ОСО для каких бы то ни было других задач имеет смысл прибегать

только в период отсутствия спутниковых данных (как, например, это имело место в 1993—1996 гг.).

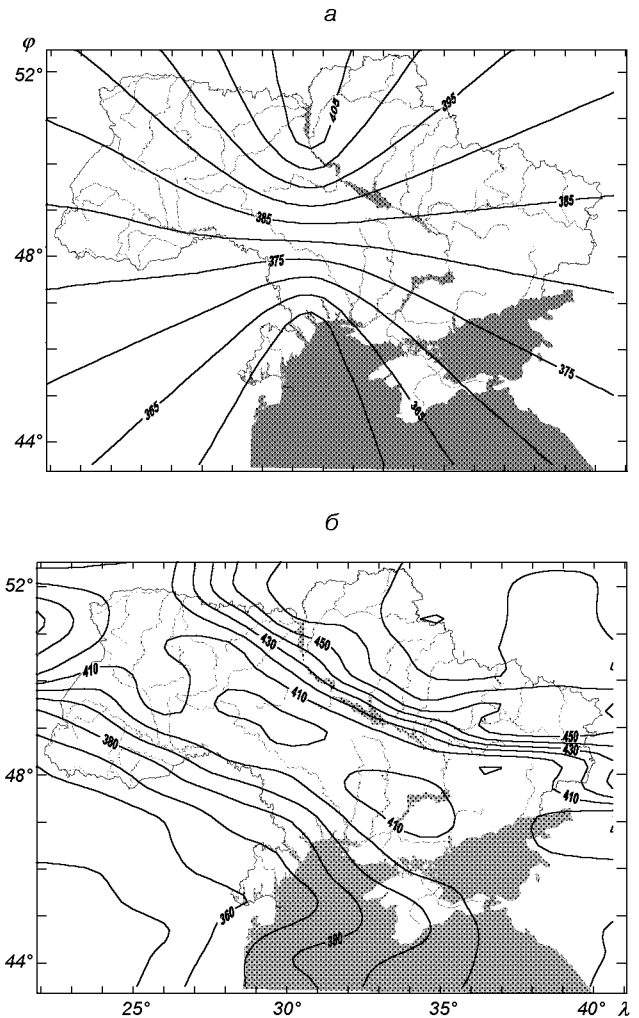


Рис. 3. Распределение ОСО над Украиной 19 марта 1989 г.: а — наземные данные, б — спутниковые данные

Таблица 2. Результаты вычисления климатических норм

Станция	A <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	F <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	F <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	F <sub>3</sub>	R <sup>2</sup> , %	A <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	F <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	F <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	F <sub>3</sub>	R <sup>2</sup> , %	Корреляция, %	Разность
	Наземные станции								TOMS								Сравнение	
Киев	335	37	105	5	52	—	—	79	341	45	102	8	53	—	—	79	99.8	-6
Богуслав	341	35	106	4	52	—	—	73	340	44	101	7	53	—	—	79	99.4	1
Борисполь	349	46	110	8	61	—	—	69	341	45	102	8	53	—	—	79	98.8	8
Феодосия	340	39	100	4	68	3	121	74	338	41	94	6	55	3	18	80	99.2	2
Одесса	351	44	101	6	60	—	—	78	340	43	99	7	54	—	—	79	99.8	11
Львов	344	44	107	8	52	—	—	78	338	44	106	7	51	—	—	78	100	6
Украина	—	—	—	—	—	—	—	—	339	43	100	7	54	—	—	81	—	—
Пояс	—	—	—	—	—	—	—	—	346	44	87	4	36	—	—	91	—	—

## КЛИМАТИЧЕСКИЕ НОРМЫ

Как отмечено выше, относительно небольшая временная протяженность, как наземных, так и особенно спутниковых рядов наблюдений над Украиной существенно осложняет вычисление по их данным климатической нормы [8] ОСО. Дополнительные трудности возникают в связи с наличием в названных рядах пропусков. Это обстоятельство практически исключает возможность использования для вычисления климатической нормы межгодового усреднения, так как в этих условиях оно приведет к различной статистической значимости климатических норм для разных месяцев и субрегионов. Поэтому в основу вычисления климатической нормы было положено разложение Фурье по гармоникам основного периода  $T = 1 \text{ год} = 365.25 \text{ сут.}$  С целью уменьшения количества пропусков вычисление коэффициентов Фурье было выполнено по среднемесячным значениям ОСО. Усреднялись данные, полученные по наземным измерениям на всех станциях украинской сети, данные сети TOMS, соответствующих этим станциям, а также спутниковые данные по всей территории Украины и широтному поясу ( $44^\circ\text{N} - 53^\circ\text{N}$ ), содержащему эту территорию. Коэффициенты Фурье вычислялись для гармоник с индексами от нуля до пяти. (Теорема Котельникова [5] не позволяет использовать гармоники, на период которых приходится менее двух отсчетов, а вычисление амплитуды шестой гармоники возможно лишь при бесконечном значении соотношения сигнал/шум). Вычисленные коэффициенты разложения тестировались по критерию Стьюдента, и в климатическую норму включались лишь те гармоники, которым соответствовали амплитуды, имеющие достоверность 95 % и более (табл. 2). Из таблицы видно, что ни для одного из рядов не оказались статистически достоверными гармоники выше третьей, что ясно указывает на бессмысленность попыток построить по имеющимся данным климатические нормы для рядов ежесуточных отсчетов, имеющих заведомо гораздо более широкий спектр.

Климатическая норма  $X_{\text{Cl}}$  ОСО — для конкретной станции или территории в юлианский день  $t$  по данным табл. 2 вычисляется по формуле

$$X_{\text{Cl}}(t) = \sum_{k=0}^3 A_k \cos \left[ \frac{2\pi k}{T} (t - F_k) \right]. \quad (1)$$

Из данных табл. 2 видно, что для пунктов размещения станций озонметрической сети климатические нормы, полученные по наземным и спутниковым данным, весьма близки друг к другу, что свидетельствует об устойчивости выбранной

процедуры вычисления.

Интересно отметить следующие особенности климатического хода ОСО над Украиной относительно ее широтного пояса:

- существенно большее значение амплитуды второй гармоники;
- запаздывание обеих гармоник по фазе (особенно второй);
- более низкое значение постоянной составляющей.

Все эти особенности, следующие из табл. 2, наглядно иллюстрирует рис. 4, *a*, на котором изображен фазовый портрет (т. е. график траектории в фазовом пространстве [1]) системы Украина — широтный пояс. Этот фазовый портрет образуют точки на плоскости, где координата по оси абсцисс соответствует значению климатической нормы для Украины, а по оси ординат — для широтного пояса. Напомним, что для полностью синфазной системы фазовый портрет представляет собой прямую с положительным наклоном по отношению к оси абсцисс, для противофазной — прямую с отрица-

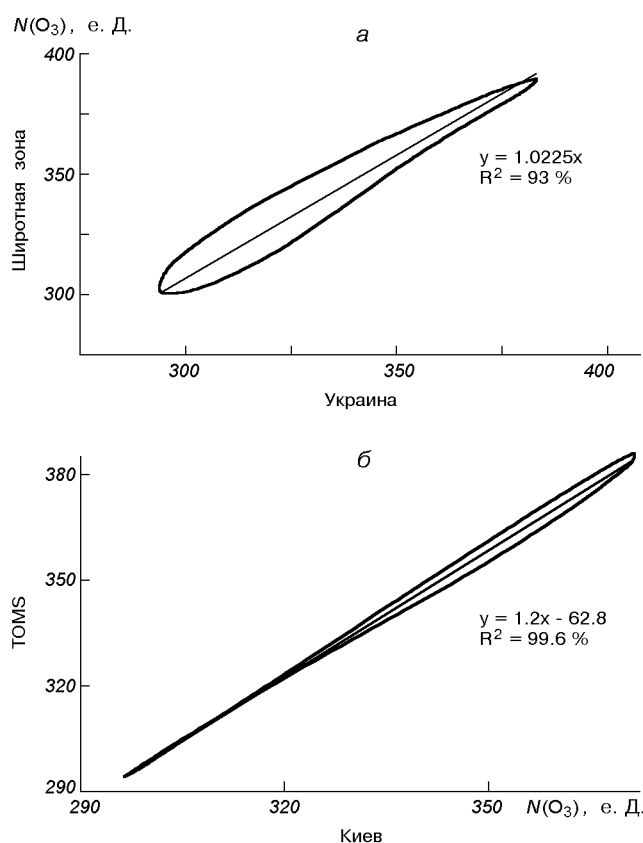


Рис. 4. Сравнение сезонного хода ОСО: *a* — над Украиной и содержащим ее широтным поясом; *б* — над Киевом по наземным и спутниковым данным

тельным наклоном, а для произвольного сдвига фаз — т. н. фигуру Лиссажу. Приведенное значение коэффициента линейной регрессии свидетельствует о том, что климатическая норма для широтного пояса в целом на 2.25 % выше, чем для Украины. Линейная регрессия типа  $y = kx$  по критерию Фишера не уступает регрессии более общего вида  $y = kx + b$  и поэтому ей отдано предпочтение.

Интересно сравнить фазовый портрет, приведенный на рис. 4, а с фазовым портретом «Киев — TOMS», приведенный на рис. 4, б. В этом случае регрессионная зависимость более общего вида имеет преимущество по статистической значимости (выигрыш в коэффициенте детерминации составляет 2.5 %).

Полученное уравнение регрессии (как и наличие самопересечения в фазовом портрете) свидетельствует о том, что «спутниковая» климатическая норма больше «наземной» при больших значениях ОСО и меньше — при малых. Этот факт, по-видимому, имеет следующее объяснение. Большие значения ОСО, как известно [7], имеют место при антициклоническом типе циркуляции, а малые — при циклоническом. В последнем случае существенно увеличивается балл общей облачности, и данные TOMS складываются из измеренного значения «надоблачного» озона и модельного значения содержания озона под облачностью. Модельные значения содержания озона в тропосфере, используемые при обработке данных TOMS, сформированы по результатам измерений 1970-х гг. и не учитывают резкого увеличения количества озона в тропосфере в последние десятилетия [9]. Отсюда занижение результатов спутниковых измерений при малых значениях ОСО. В условиях же антициклонической циркуляции заметно увеличивается общая прозрачность атмосферы и уменьшается положительная погрешность наземного фильтрового прибора, который из-за недостаточного спектрального разрешения относит часть упругого ослабления УФ-излучения на счет поглощения озоном. Это приводит к уменьшению «наземной» климатической нормы.

Завершая сравнение климатических норм ОСО, рассчитанных по спутниковым и наземным данным, вновь подчеркнем их чрезвычайную близость. Это свидетельствует о том, что несомненно большая погрешность наземных измерений (по сравнению со спутниковыми) имеет в основном случайный характер. Следовательно, данные наземных измерений можно использовать для выделения как периодической, так, по-видимому, и аperiodической (долговременной) составляющих временного хода ОСО.

## ТРЕНДЫ

Вычисление долговременных изменений в общем содержании озона было выполнено по данным всех наземных станций (исключая Богуслав ввиду малой протяженности ряда) за все время работы (до конца 2002 г.), по отсчетам соответствующих станциям ячеек TOMS (1979—2002 гг.), а также спутниковым данным, усредненным по всей территории Украины и широтному поясу ( $44^\circ\text{N}$  —  $53^\circ\text{N}$ ), содержащему эту территорию. Вычисление трендов производилось построением для рядов ОСО регрессионных моделей вида

$$X(t) - X_{Cl}(t) = kt + \text{rest}(t), \quad (2)$$

и

$$X(t) - X_{Cl}(t) = at^2 + bt + \text{rest}(t), \quad (3)$$

где  $X_{Cl}(t)$  определено формулой (1). Коэффициенты модели  $k$ ,  $a$ ,  $b$  определялись методом наименьших квадратов. Модель (2) — соответствует монотонному тренду; модель (3) может обнаруживать экстремум в долговременных изменениях. Предпочтение той или иной модели отдается по большей статистической достоверности в соответствии с критерием Фишера.

Важно отметить, что наличие квадратичного тренда не означает, что его максимум (минимум) есть наибольшее (наименьшее) значение моделируемого параметра на все времена. Так как в распоряжении исследователя всегда лишь данные, относящиеся к ограниченному временному интервалу, квадратичный тренд просто соответствует локальному экстремуму колебательного, т. е. ограниченного по динамическому диапазону процессу.

Результаты расчетов (отдельно для наземных и спутниковых данных) сведены в табл. 3, в которой приведены значения линейного тренда в процентах за декаду (10 лет) с доверительными интервалами на уровне среднего квадратичного отклонения  $\sigma$ . Для квадратичных трендов приведены положения  $t_{\min}$  минимума в долговременных изменениях ОСО, вычисленные по формуле

$$t_{\min} = -\frac{b}{2a}.$$

Данные, относящиеся к квадратичным трендам, приведены только в том случае, если квадратичный тренд оказался статистически более достоверным, чем линейный.

Сравнивая результаты, относящиеся к линейным трендам, вычисленным по наземным и спутниковым данным, необходимо отметить:

Таблица 3. Значения линейного тренда в процентах за декаду (10 лет) с доверительными интервалами на уровне среднего квадратичного отклонения ( $\sigma$ )

Станция	Тренд (наземн.), %		Тренд (TOMS), %		$R^2_{\text{наз}}$ , %	$R^2_{\text{TOMS}}$ , %	$t_{\text{наз}}$	$t_{\text{TOMS}}$	$R^2_{\text{H}}$ , %	$R^2_{\text{TOMS}}$ , %
	Линейные тренды				Квадратичные тренды					
Киев	0.4±0.9		2.1±0.4		0	10	ноябрь 1996	декабрь 1996	2.5	13
Борисполь	3.5	0.4	2.0	0.4	22	10	октябрь 1977	июль 1996	25	13
Феодосия	2.6	0.3	2.3	0.4	23	10		март 1998	23	12
Одесса	0.5	0.4	2.1	0.4	1	12	апрель 2000	апрель 1998	1	15
Львов	2.0 0.4		2.3 0.4		11	11	декабрь 1996	июль 1996	13	15
Украина			2.0 0.4			11		апрель 1997		14
Пояс			1.8 0.2			20		сентябрь 1995		29

- значимые расхождения по станциям Борисполь и Одесса (обусловленные низким качеством наблюдений) и на станции Киев (обусловленные существенным различием начальной точки в рядах наблюдений);
- хорошее согласие результатов по станциям Феодосия и Львов;
- несколько больший (по абсолютной величине) тренд по Украине, чем по соответствующему ей широтному поясу.

Относительно квадратичных трендов следует отметить:

- принципиальные расхождения по станциям Одесса и Борисполь (в Борисполе фиксируется максимум ОСО вместо минимума по спутниковым данным), обусловленные низким качеством наблюдений;
- хорошее согласие сроков наступления минимума ОСО по данным спутниковых наблюдений по всем станциям и регионам;
- более поздний срок наступления минимума ОСО по Украине по сравнению с соответствующим ей широтным поясом.

Оценивая качество выделения климатического хода и трендов в рядах спутниковых наблюдений, воспользуемся критерием, предложенным в работе [4]: «главное не что получилось, а что осталось». То есть, если остатки регрессионного моделирования представляют собой белый шум, то при использовании данного исходного материала получить более качественную регрессионную модель изучаемого процесса не удастся. Разумеется, при использовании рядов среднемесячных значений невозможно рассчитывать на то, что остатки регрессионного моделирования будут представлять собой белый шум. Это связано с тем, что значения ОСО не являются независимыми в пределах т. н. синоптического цикла [8] (~ 7 сут), начало и конец которого не обязаны совпадать с началом и концом календарного месяца. Следовательно, остатки ре-

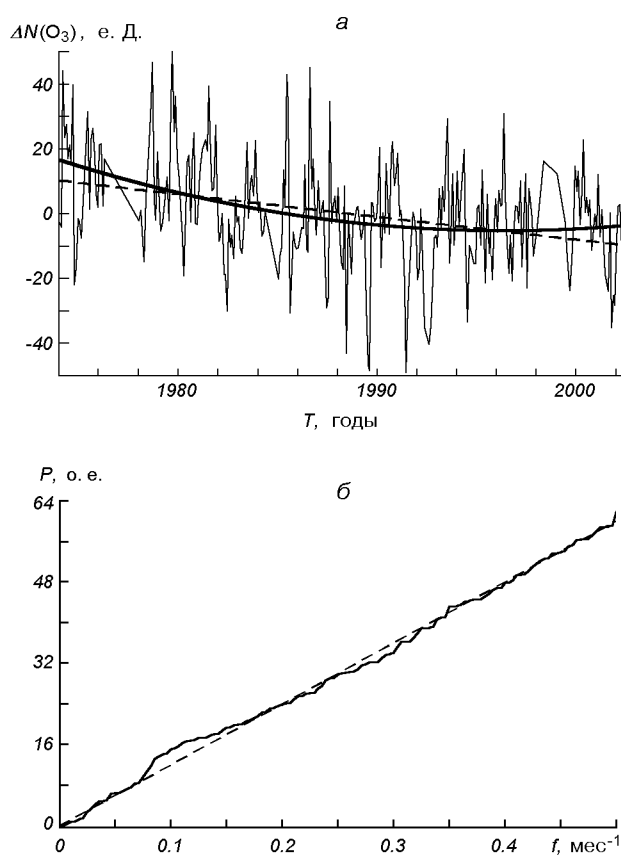


Рис. 5. Линейный ( $R^2 = 11\%$ ) и квадратичный ( $R^2 = 13\%$ ) тренды ОСО по данным станции Львов (а); интегрированная периодограмма  $P$  ряда остатков авторегрессии первого порядка из остатков регрессионной модели (климат + квадратичный тренд) для станции Львов (б)

грессионного моделирования можно тестировать на белый шум только после выделения авторегрессии первого порядка. В качестве критериев близости к белому шуму обычно используют:

- близость интегрированной периодограммы к прямой, проходящей через начало координат;
- близость статистики Дарбина — Уотсона к значению 2.

В качестве примера рассмотрим ряд остатков, образующихся после выделения авторегрессии из остатков регрессионной модели для наземных рядов станции Львов, занимающей промежуточное положение по качеству среди станций Украины. Значение статистики Дарбина-Уотсона составляет 2.04, а близость интегрированной периодограммы  $P$  к прямой, проходящей через начало координат, можно оценить по рис. 5, б.

На первый взгляд близость «остатков» к белому шуму представляется вполне удовлетворительной, однако окончательный ответ на вопрос, нельзя ли улучшить качество регрессионной модели, зависит от результатов включения в ее состав других базисных функций, кроме гармоник годового хода и степеней времени.

## ВЫВОДЫ

Сравнение результатов мониторинга состояния поля ОСО над Украиной средствами космического базирования позволяет сделать следующие выводы.

1. По качеству работы станции наземной озонметрической сети Украины можно разделить на три категории (по динамическому диапазону коэффициента регрессии спутниковых данных на наземные):

- высокое (Киев, Богуслав);
- среднее (Львов, Феодосия);
- низкое (Борисполь, Одесса).

Более высокому качеству наблюдений соответствует меньший динамический диапазон.

2. Данные всех станций пригодны только для определения среднемесячных значений ОСО в пунктах наблюдений, т. е. сезонного хода.

3. Для определения долговременных изменений в состоянии поля ОСО пригодны только данные, полученные на станциях Киев и Богуслав.

4. Данные, полученные на станциях с качеством наблюдений на уровне станций Львов и Феодосия пригодны только для грубых оценок долговременных изменений (линейных трендов).

5. Только данные, полученные на станциях с качеством наблюдений на уровне станций Киев и Богуслав, пригодны для выявления изменений чувствительности спутниковых средств озонного мониторинга, и именно эта задача является главной для наземных средств мониторинга ОСО.

6. Долговременные изменения состояния поля ОСО над Украиной не являются монотонными, а представляют собой колебательный процесс, о чем свидетельствует сравнительная эффективность линейных и параболических трендов, вычисленных по данным космических и высококачественных наземных измерений. Причины и количественные показатели этого процесса должны составить предмет дальнейших исследований, так же как и отличие особенностей долговременной эволюции поля ОСО над Украиной от среднезональных показателей.

Авторы благодарят И. В. Будака (УкрНИИГМИ) за предоставленную нам топографическую основу рис. 3.

1. Арнольд В. И. Математические методы классической механики. — М.: Наука, 1979.—С. 23.
2. Белокриницкая Л. М., Белявский А. В., Крученицкий Г. М. Украинская национальная система мониторинга СПЭО УФ-Б радиации // Тез. докл. 3-й Украинской конф. по перспективным космич. исследованиям (Кацивели, Крым, 15 сент.—19 сент. 2003 г.). — Киев: Изд-во Ин-т космич. исслед. НАНУ-НКАУ, 2003.—С. 216.
3. Грицай З. І., Євтушевський О. М., Кравченко В. О. та ін. Порівняння наземних спостережень озону на станції Академік Вернадський та на обсерваторії в Лісниках з супутниковими вимірюваннями // Бюл. Українського антарктичного центру.—1998.—Вип. 2.—С. 44—49.
4. Кадырова Т. В., Крученицкий Г. М. Выделение трендов в парциальном давлении озона на различных высотах в атмосфере // Изв. РАН. ФАО.—31, № 1.—С. 62—68.
5. Котельников В. А. Теория потенциальной помехоустойчивости. — М.: Госэнергоиздат, 1956.—С. 16.
6. Настанова гідрометеорологічним станціям і постам. Організація проведення спостережень за загальним вмістом атмосферного озону. — Київ: Мінекоресурсів України, 2004.—Вип. 13.—С. 35.
7. Перов С. П., Хргиан А. Х. Современные проблемы атмосферного озона. — Л.: Гидрометеоздат, 1980.—С. 232.
8. Хромов С. П., Мамонтова Л. И. Метеорологический словарь. — Л.: Гидрометеоздат, 1974.—С. 418.
9. Bojkov R. D. The Changing Ozone Layer // WMO & UNEP Joint publ.—1995.—P. 17.
10. Ozone Data for the World, ODW CD #1 1999, ODW CD #2 2000, ODW CD #3 2001. WOUDC, Canada M3H 5T4.

## GROUND-BASED AND SATELLITE-BORNE MONITORING OF TOTAL OZONE FIELD OVER THE UKRAINE

L. M. Belokrinitskaya, I. V. Kalinina, G. M. Kruchenitsky

We analysed observational data on total ozone field over the Ukraine obtained by the use of ground and space-borne measuring instruments since the 1970s to the present day. Comparative estimates of the performance of ground-based measuring means used in the Ukraine and abroad are derived. Climatic norms, linear and square-law TO trends for the Ukraine are calculated and compared with similar data for the corresponding latitudinal belt. It is shown that TO variations are not unidirectional but are oscillatory in character.