

УДК 551.510.534

О ПРИЧИНАХ ИЗМЕНЕНИЙ ОЗОнового СЛОЯ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ

В. М. Волощук

Украинский науч.-исслед. гидрометеорологический институт, г. Киев, Украина

А. М. Звягинцев, Н. Е. Кадыгров, Т. В. Кадыгрова, Г. М. Крученицкий

Центральная аэрологическая обсерватория, г. Долгопрудный Московской обл., Россия

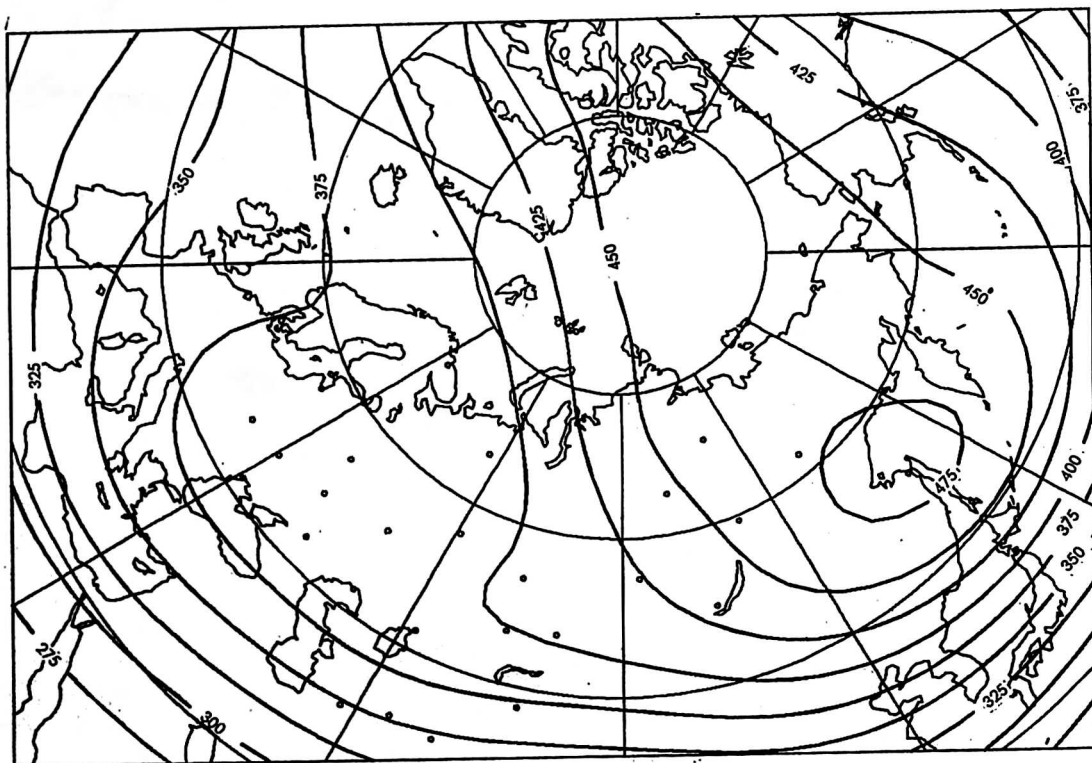
Исследованы причины уменьшения озонового слоя путем изменения формы профилей вертикального распределения озона (по данным девяти станций мировой озонометрической сети). Полученные результаты свидетельствуют, что динамический механизм уменьшения озонового слоя должен играть доминирующую роль по отношению к "фреоновому". Этот вывод существенно расходится с устоявшимися воззрениями на озоновую проблему.

Уменьшение общего содержания озона (ОСО) является в настоящее время общепризнанным [1, 2] и проявляется, в частности, в резко участвовавших случаях появления отрицательных озоновых аномалий ("дыр"). Возможными причинами убыли озона считаются следующие:

динамические процессы в атмосфере, климатические изменения в характере атмосферной циркуляции;

фотохимическое разрушение озона окислами хлора (и отчасти брома), которые накапливаются в стратосфере при разрушении галогеноуглеводородных соединений (фреонов и галлонов).

В зарубежной литературе [1, 2] в качестве основной причины уменьшения озонового слоя принято указывать, как правило, на увеличение содержания фреонов в атмосфере либо придавать "фреоновому" механизму доминирующую роль в рамках комбинированной версии. Тем не менее при тщательном анализе конкретных аномалий полей ОСО в Северном полушарии различной длительности (от суток до года) практически всегда оказывается, что они могут быть наглядно объяснены с точки зрения динамической версии [3—7] (влияние фреонов на образование озоновых аномалий достаточно аргументированно отмечается лишь для Антарктиды [5], хотя и там эта концепция подвергается сомнениям [8]). Серьезным аргументом в пользу какой-либо из версий могло бы явиться успешное предсказание поведения озонового слоя хотя бы с 5—10-летней заблаговременностью, а не исчисляемой многими десятилетиями, как это сейчас делается. Кроме того, должны быть объяснены резкое увеличение в последние годы частоты появления локальных короткоживущих аномалий (с протяженностью 1—5 тыс. км и временем жизни 2—7 сут) [9] и трансформация профилей вертикального распределения озона (ВРО). Характер временного развития и исчезновения озоновых аномалий над территорией бывшего СССР за последние шесть лет [9], на наш взгляд, свидетельствует в пользу динамической версии. Сравнивая карты на рис. 1, а — 1, в, можно видеть топографическую близость изоплет ОСО в "спокойном" 1994 г. и изоплет климатической нормы, а также резкие различия последних с изоплетами аномального 1995 г. Это обстоятельство трудно объяснить, принимая "фреоновую" версию, так как с учетом двухмесячного усреднения в этом случае следовало бы ожидать не поворота изолиний ОСО, а лишь изменение их номинальных значений.



в

Рис. 1. Карты среднего распределения общего содержания озона на территории бывшего СССР:
 а — в период с 1 февраля по 31 марта 1994 г.; б — в тот же период в 1995 г.;
 в — климатические нормы 1995 г.

В настоящей работе сделана попытка выявить причины уменьшения озонового слоя путем анализа изменения формы профилей ВРО во времени. Основанием для проведения такого анализа является то, что различные причины уменьшения озонового слоя по-разному влияют на изменения концентрации озона на различных уровнях [1—4]. Поскольку регулярные и достаточно качественные измерения профилей ВРО с помощью озонзондов электрохимического типа, поднимаемых на аэрологических баллонах на ряде станций мировой сети озонирования атмосферы (всего в настоящее время их насчитывается более 40), осуществляются на протяжении около 30 лет, то естественно ожидать, что именно они, по мнению многих авторитетных специалистов [4, 10], могут дать наиболее раннюю и решающую информацию о причинах изменений озонового слоя.

Исходные данные вертикального озонирования атмосферы для настоящего анализа взяты из банка данных [11], при этом анализировали только данные станций Северного полушария, имеющих временные ряды длительностью не менее 20 лет (табл. 1). Предметом анализа явились два параметра профилей ВРО: высота H и ширина W максимума. Под шириной максимума понимается вертикальная протяженность его окрестности ($H - W/2$, $H + W/2$), в которой содержится четверть общего содержания озона. Полнота исходных данных характеризуется следующими показателями: для всех японских станций доля числа месяцев, во время которых не проводилось выпусков озонзондов, составила около трети; для других станций — от 0,014 в Хоенпайсенберге до 0,14 — в Резолуте. Тренд и сезонный ход обоих названных параметров выделяли с помощью стандартной процедуры, при этом эффективность моделирования Q оценивали

соотношением $Q = 1 - (\sigma/\delta)$, где σ и δ — дисперсии рядов до и после выделения тренда и сезонности, соответственно.

Наибольшая эффективность Q выделения внутригодовой сезонности и тренда для исследованных параметров H и W (см. табл. 1) наблюдается для Хоемпайсенберга. Это является следствием регулярности наблюдений и свидетельствует о высоком качестве данных этой станции, что нами неоднократно отмечалось при анализе и других характеристик озонового слоя. Наименьшая эффективность Q наблюдается, как и следовало ожидать, на станциях Японии.

Таблица 1

Значения и тренды высоты и ширины максимума вертикального распределения озона для озонметрических станций Северного полушария

Название станции	Страна	Средняя широта (с. ш.)	Период наблюдений	Высота максимума			Ширина максимума		
				H , км	Trend, м/год	Q	W , км	Trend, м/год	Q
1. Кагوشيما	Япония	32	12.68—08.93	24,5	24±11*	0,27	4,1	22±8*	0,1
2. Татено	"	36	11.68—08.93	22,8	57±15*	0,42	5,1	7±6	0,1
3. о. Уоллопс	США	38	05.70—04.93	23,4	12±12	0,50	4,7	2±5	0,1
4. Саппоро	Япония	43	12.68—08.93	21,9	15±22	0,25	4,9	15±10	0,1
5. Хоемпайсенберг	Германия	48	09.69—08.93	22,0	26±11*	0,73	4,8	1±4	0,5
6. Гус	Канада	53	06.69—08.93	20,6	36±14*	0,50	4,7	20±7*	0,1
7. Эдмонтон	"	53	10.70—08.93	21,1	40±13*	0,37	4,3	29±5*	0,3
8. Черчилль	"	58	10.73—08.93	20,1	40±18*	0,47	4,7	27±6*	0,3
9. Резолют	"	75	01.66—07.93	18,3	22±9*	0,42	4,4	20±3*	0,2

* Тренды, значимые при уровне доверительной вероятности $P = 0,95$.

Временные ходы высоты и широты озонового максимума после вычета регулярной сезонной составляющей обнаруживают значимую отрицательную и положительную корреляции, соответственно, с аналогичной характеристикой ОСО, что объяснимо, если считать, что вариации ОСО в средних широтах Северного полушария обусловлены в основном замещением типов воздушных масс (полярных и субтропических [10]). Известно [10], что при вторжении более южных воздушных масс (адвекции) должно наблюдаться понижение ОСО и увеличение высоты максимума ВРО. Все (!) значительные аномалии ОСО на территории бывшего СССР, зарегистрированные отечественной системой контроля состояния озонового слоя за последнее десятилетие, сопровождалась вторжением субтропических воздушных масс. Последнее является весьма существенным доводом в пользу "динамической" версии изменений озонового слоя.

Результаты анализа указанных характеристик профилей ВРО представлены в табл. 1 и на рис. 2. На всех девяти станциях отмечен положительный тренд высоты озонового максимума, и только на двух из них он оказался незначимым по уровню доверительной вероятности $P = 0,95$. Наибольший тренд отмечен в средних широтах (50—60 с. ш.), наименьший — ближе к экваториальным широтам. Также отмечен и положительный тренд ширины максимума, но он оказался незначимым уже на четырех станциях (в том числе в Хоемпайсенберге). Для ширины максимума наблюдается положительный тренд в средних и высоких широтах Северного полушария; ближе к экваториальной области он превращается в мало-значимый. Отмеченные временные изменения формы вблизи озонового максимума в целом соответствуют полученным в работах [11—14].

Рассмотрим более подробно возможное влияние на вышеописанные характеристики общепринятых причин наблюдаемых долговременных трендов ОСО [1—5]:

снижение продуктивности активного фотохимического слоя, обусловленное включением продуктов фотодиссоциации фреонов в озоновый цикл;

консервация и последующее высвобождение фреонородного С10 в образованиях типа полярных стратосферных облаков (ПСО). Этот фактор является распространенным объяснением образования известной антарктической “дыры”;

адвекция воздушных масс в направлении с юга на север, что приводит к снижению ОСО из-за уменьшения количества озона в диапазоне высот, расположенном под местным климатическим максимумом.

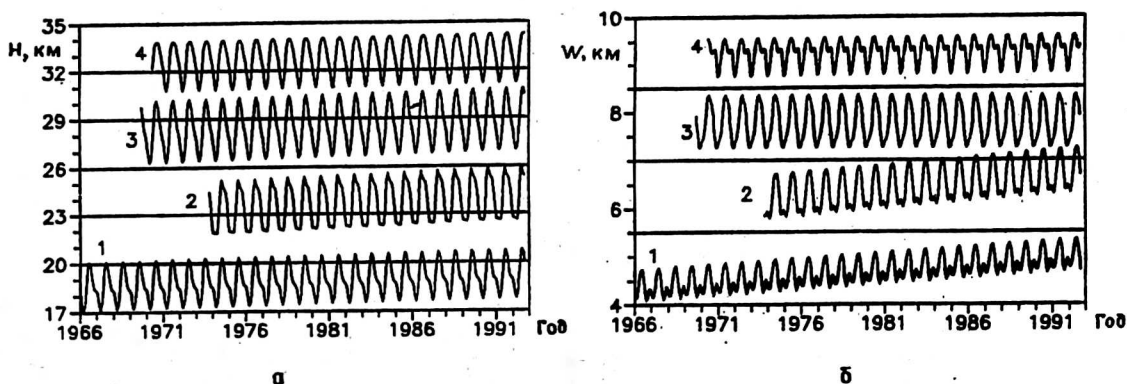


Рис. 2. Модельные временные ходы (с учетом тренда и сезонности) высоты (а) и ширины (б) озонового максимума:

1 — в Резолюте; 2 — в Черчилле; 3 — в Хоемпайсенберге; 4 — на о. Уоллопс. Кривые (2)—(4) сдвинуты вверх по отношению к кривой (1) на 4, 8 и 12 км на рис. 2, а и на 1,5, 3 и 4,5 км — на рис. 2, б, соответственно

Каждый из механизмов различным образом модифицирует форму профиля ВРО. Установлено [1], что основное уменьшение озонового слоя, вызываемое “фреоновыми” причинами, происходит в фотоактивном слое в области высот около 40 км, что экспериментально зафиксировано с помощью наземной озонометрической сети (по “Umkehr” эффекту) и спутниковой аппаратуры SAGE — в области высот 35—45 км (однако ввиду малого вклада этой области высот в ОСО последнее практически уменьшиться не должно) [2]. В этом случае эффект “выедания” озона, распространяясь сверху вниз, должен был бы привести к снижению высоты озонового максимума. Второй из названных факторов должен приводить к “выеданию” максимума озонной концентрации в диапазоне высот, соответствующего расположению ПСО (в Антарктиде это приводит к “выеданию” центра максимума и раздвоению последнего). Динамические же причины, которые сводятся в основном к участвующему проникновению относительно бедных озоном низкоширотных воздушных масс [10] в более высокие широты, должны приводить к повышению этого уровня.

Для изучения реально наблюдаемых модификаций профилей ВРО в условиях аномально низких значений ОСО для каждой из анализируемых станций были исследованы профили, которые соответствовали наименьшим значениям ОСО, наблюдавшимся в дни выпусков озонзондов. Для анализа отбирались все аномалии, в которых дефицит озона составил два и более среднеквадратических отклонений, или 15 % и более от климатической нормы, соответствующей анализируемой дате (всего проанализирована 41 аномалия; более подробно эти аномалии

рассмотрены в работе [15]). Характерные особенности отклонений наблюдаемых профилей ВРО от климатических для нескольких таких аномалий, характеризующихся наблюдаемыми отрицательными отклонениями d от нормы ОСО X в единицах среднеквадратических отклонений, представлены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что для всех анализируемых аномалий наибольший дефицит озона соответствует диапазону высот, расположенному под климатическим максимумом. Практически это указывает на то, что в средних широтах Северного полушария аномалии ОСО обусловлены, главным образом, адвекцией воздушных масс, как это описано в [3, 6, 10]. Лишь для одной из перечисленных в табл. 2 озоновых аномалий (31.03.93 на станции Резолют — см. рис. 3, в) по форме профиля ВРО нельзя исключить влияния фотохимических гетерогенных факторов. Однако качественное подобие проанализированных ситуаций на всех широтах, а также отсутствие антарктического “провала”, максимума делают предположение об участии ПСО в проанализированных аномалиях ОСО в Северном полушарии маловероятным. Поскольку аномалии появляются в нижней, контролируемой динамикой части озонового слоя, то (если нет фотохимических реакций, в сотни раз более интенсивных, чем известные до сих пор) их причиной следует считать аномалий изменения меридионального переноса озона из тропической зоны в высокие широты [4]. Экспериментальных данных, свидетельствующих о какой-либо роли снижения продуктивности активного фотохимического слоя, обусловленного фотодиссоциацией фреонов, выявить не удалось.

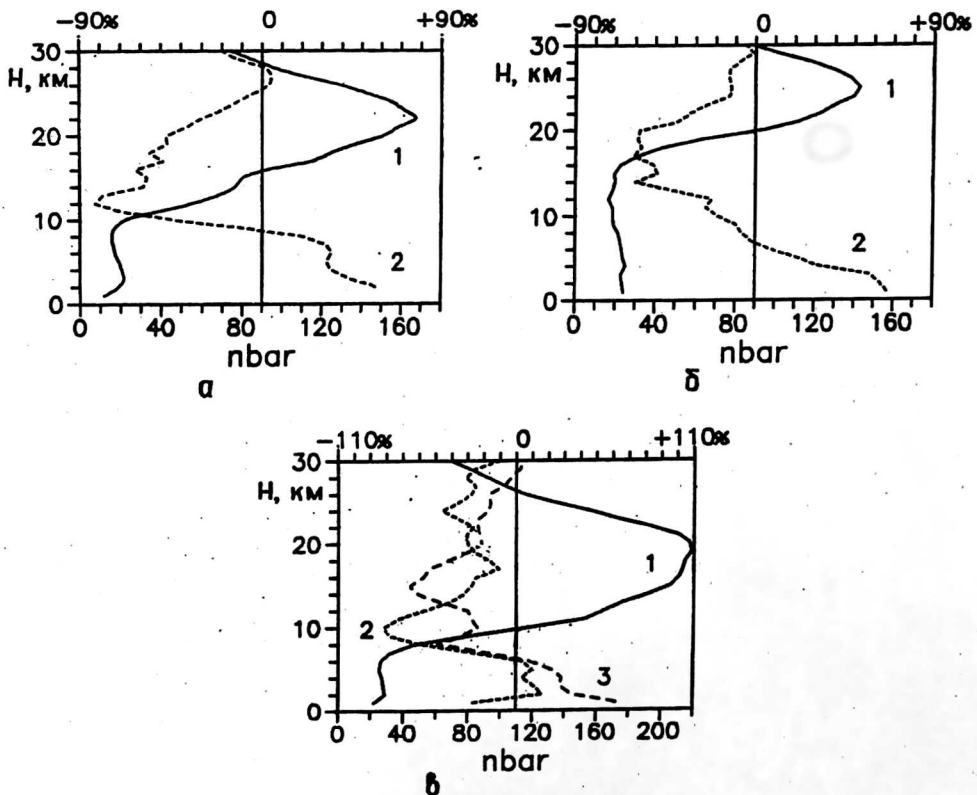


Рис. 3. Профили климатического вертикального распределения озона (1) и наблюдаемых отклонений (2 и 3), в % от нормы, в дни аномалий ОСО в различных пунктах наблюдений:

а — Кагوشي́ма: 22.02.89; $X_H = 302$ е.Д.; $d = 2,7 \sigma$; б — Хоенпайсенберг: 22.01.93; $X_H = 342$ е.Д.; $d = 2,3 \sigma$; в — Резолю́т: 04.04.90; $X_H = 468$ е.Д.; $d = 2,9 \sigma$ (2); 31.03.93; $X_H = 471$ е.Д.; $d = 2,8 \sigma$ (3)

Положительный тренд ширины озонового максимума (как это определено в настоящей работе) означает, что уменьшение озона в области максимума происходит сильнее, чем вдали от него. Обнаруженный характер тренда обоих параметров интерпретируется как свидетельство участвовавших вторжений низкоширотных воздушных масс в область более высоких широт. С этих позиций становится объяснимым и значительное увеличение числа озоновых аномалий, наблюдаемое в последнее время, вследствие долговременных (с характерными временами, исчисляемыми десятками лет) изменений стандартных метеопараметров [7], определяющих глобальную атмосферную циркуляцию. С другой стороны, подобное поведение высоты и ширины максимума ВРО трудно понять с точки зрения "фреоновой" версии, поскольку на широтах, где расположено подавляющее большинство из анализируемых в настоящей работе станций, соображения, аналогичные используемым при объяснении "выедания" максимума в антарктической "дыре", представляются маловероятными. В умеренных широтах Северного полушария нет причин для возникновения озоновых аномалий, аналогичных антарктическим, из-за отсутствия крайне низких значений температуры в стратосфере, что затрудняет образование ПСО и снижает эффективность гетерогенных химических реакций. Тем не менее, если предположить, что "фреоновые" причины истощения озонового слоя являются определяющими, то естественно ожидать, что такое уменьшение будет примерно равномерным на большей территории Северного полушария. Наблюдения показывают, что значительные аномалии локализованы. Таковы, например, зимне-весенние аномалии над северо-западом Европы и аномалия 1995 г. над Сибирью (см. рис. 1, б), которая явилась беспрецедентной как по уровню дефицита ОСО, так и по размерам затронутой территории.

По нашему мнению, сказанное выше не означает, что должны быть сделаны окончательные выводы в пользу "динамической" версии, но чисто "фреоновая" версия должна быть, по-видимому, полностью исключена, а в рамках комбинированной версии динамический механизм должен играть доминирующую роль по отношению к "фреоновому". Имеющихся данных наблюдений по-прежнему недостает для надежного определения долговременных тенденций изменения озонового слоя (или они сильно зашумлены) и, тем более, их причин. При оценке моделей уменьшения озонового слоя путем их сопоставления с результатами наблюдений следует учитывать, насколько адекватно они способны предсказывать уже экспериментально наблюдаемый временной ход не только ОСО, но и более богатого особенностями ВРО. Правильное описание временного хода ОСО может быть построено лишь на основе модели, учитывающей наблюдаемое глобальное изменение климата.

Литература

1. World Meteorological Organization (WMO). The stratosphere: 1981: Theory and measurements// WMO Ozone Rep. 11, Geneva, 1982.
2. World Meteorological Organization (WMO). Scientific assessment of ozone depletion: 1994// Ibid, 37, Geneva, 1995.
3. Бекорюков В. И., Захаров Г. Р., Куколева А. А., Фиолетов В. Э. О связи аномально низкого содержания озона с барической ситуацией// Метеорология и гидрология, 1990. № 12. С. 103—105.
4. Хргиан А. Х. Аномалии общего содержания озона в Северном полушарии в 1983—1987 гг.// Там же, 1989. № 7. С. 115—123.
5. Хргиан А. Х., Петренко Н. А. Местные особенности атмосферного озона и их динамическая природа// Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1991. Т. 27. № 12. С. 1283—1291.
6. Бекорюков В. И., Борисов Ю. А., Звягинцев А. М., Крученицкий Г. М., Перов С. П., Рудаков В. В. Отрицательные аномалии в озоновом слое над Европой в начале зимы 1992—1993 гг.// Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 1994. Т. 30. № 6. С. 807—811.

7. Бекорюков В. И., Бугаева И. В., Захаров Г. Р., Кирюшов Б. М., Тарасенко Д. А. Азорский антициклон, озон и метеорологические параметры тропосферы и стратосферы// Метеорология и гидрология, 1995. № 7. С. 40—47.

8. Сывороткин В. Л. Дегазация Земли и разрушение озонового слоя// Природа, 1993. № 9. С. 35—45.

9. Бюллетень о состоянии озонового слоя// Центральная аэрологическая обсерватория. — г. Долгопрудный, 1991—1995, № 1—8.

10. Dutsch H. U. Regular ozone soundings at the aerological station of the Swiss meteorological office at Payerne, Switzerland, 1968—1972. LAPETH-10, ETH, Zuerich, 1974. — 338 p.

11. Кадыгрова Т. В., Крученицкий Г. М. Выделение трендов в парциальном давлении озона на различных высотах в атмосфере// Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 1995. Т. 31. № 1. С. 62—68.

12. Logan J. A. Trends in the vertical distribution of ozone: an analysis of ozonesonde data// J. Geophys. Res, 1994. V. 99. № D12. P. 25553—25585.

13. Miller A. J., Tiao G. C., Reinsel G. C., Wuebbles D., Bishop L., Kerr J., Natagani R. M., Deluisi J. J., Mateer C. L. Comparisons of the observed ozone trends in the stratosphere through examination of Umkehr and balloon ozonesonde data// Ibid, 1995. V. 100. № D. P. 11209—11217.

14. Bojkov R., Fioletov V. E. Changes of the lower stratospheric ozone over Europe and Canada// Ibid, 1996. V. 101 (in press).

15. Кадыгрова Т. В. Исследование статистических характеристик поля вертикального распределения озона: Автореф.-дис. ... канд. физ.-мат. наук/ ЦАО, г. Долгопрудный, 1995. — 118 с.

Авторы благодарят за полезные и плодотворные обсуждения настоящей работы профессоров Борисенкова Е. П., Бекорюкова В. И. и Тимашева С. Ф.

Работа частично выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 93-05-8978).

ABOUT REASONS OF OZONE LAYER CHANGES IN NORTHERN HEMISPHERE

V. M. Voloshuk

The ukrainian research hidrometeorological Institute, Kiev, Ukraina

A. M. Zvjaginzev, N. E. Kadjigrov, T. V. Kadjigrova, G. M. Kruchenizkij

The central airological observatory, Moscow district, Russia

The reasons of the ozone layer reduction are ivestigateed by analysis of the vertical distribution ozone change on date of nine global ozonemetric network stations. The received results testify, that the dynamic gear of ozone layer reduction should play the dominant role on relation to "freone" reason. This conclusion differs essential with the steady opinion on the ozone problem.