

**Г.М. Крученицкий, В.И. Бекорюков, В.М. Волощук, А.М. Звягинцев,
Н.Е. Кадыгров, Т.В. Кадыгрова, С.П. Перов**

О ВКЛАДЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ФОРМИРОВАНИЕ АНОМАЛЬНО НИЗКИХ ЗНАЧЕНИЙ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ

Проанализированы причины уменьшения озонового слоя путем статистического анализа изменений профиля вертикального распределения озона во времени на 9 станциях мировой озонметрической сети (четыре станции в Канаде, одна в США, три в Японии, одна в Германии) и временных рядов общего содержания озона на 25 станциях, в т.ч. наиболее длинного в Арозе (Швейцария) с 1926 г. Показано, что имеются значимые (при доверительной вероятности $P=0,95$) положительные тренды высоты озонового максимума на 7 станциях и его ширины на 5 станциях; на других станциях указанные тренды незначимы (хотя также положительны).

При анализе 41 наиболее крупной озоновой аномалии выявлено, что практически всегда основное уменьшение концентрации озона наблюдается в области ниже озонового максимума. Общепринятое модельное представление временного хода общего содержания озона в виде «хоккейной клюшки» статистически не является оптимальным. Динамический механизм уменьшения озонового слоя должен играть доминирующую роль по отношению к «антропогенному». Накопленного в мире массива наблюдений по-прежнему недостает (или они сильно зашумлены) для определения долговременных тенденций изменений озонового слоя и, тем более, их причин. Адекватное описание временного хода общего содержания озона должно учитывать глобальное изменение климата.

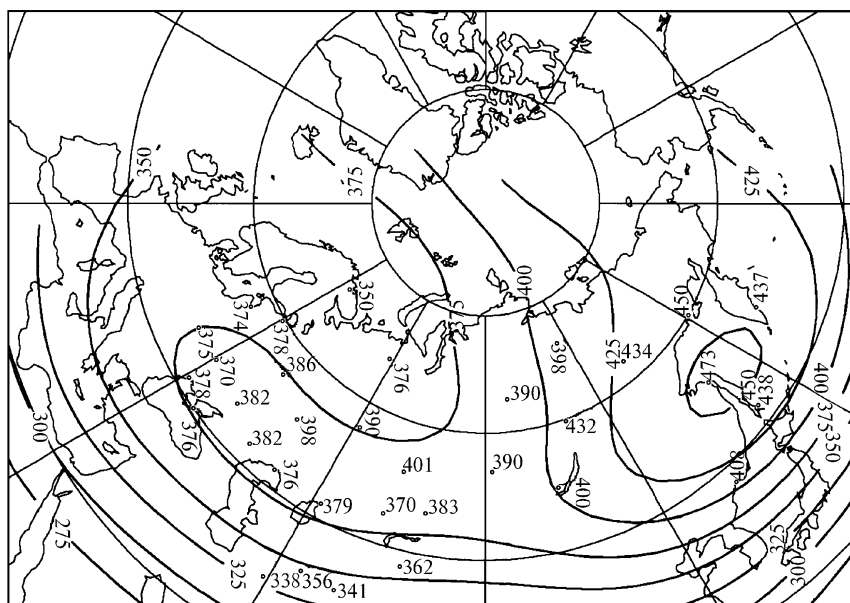
Факт уменьшения общего содержания озона (ОСО) является в настоящее время общепризнанным [1–3] и проявляется в глобальном масштабе, в частности, в резко участвовавших случаях появления отрицательных озоновых аномалий («дыры») [4]. Как правило, в зарубежной литературе [1–3] в качестве основной причины уменьшения озонового слоя указывают на фотохимическое разрушение озона окислами хлора (и отчасти брома), которые накапливаются в стратосфере при разрушении галогеноуглеродородных соединений (фреонов и галонов) антропогенного происхождения. Однако при анализе конкретных аномалий ОСО в Северном полушарии различной длительности (от суток до года) практически всегда оказывается, что их можно достаточно убедительно объяснить динамическими процессами в атмосфере, климатическими изменениями в характере атмосферной циркуляции, тогда как антропогенное влияние может лишь не исключаться [5–10] (влияние окиси хлора на образование озоновых аномалий аргументированно отмечено лишь для Антарктиды [3, 7], но и там эта концепция подвергается сомнениям [11, 12]).

Серьезным аргументом в пользу какой-либо из версий могло бы явиться успешное предсказание поведения озонового слоя в глобальном масштабе хотя бы с 5–10-летней заблаговременностью, а не исчисляемой многими десятилетиями, как это сейчас делается. Также необходимо объяснить резкое увеличение в последние годы частоты появления локальных короткоживущих аномалий (с протяженностью 1–5 тыс. км и временем жизни 2–7 суток) [4] и трансформацию профилей вертикального распределения озона (ВРО). Между тем характер развития и исчезновения озоновых аномалий над территорией бывшего СССР за последние годы [4] свидетельствует, скорее, в пользу «динамической» версии. Например, сравнивая карты на рис. 1, а – 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 с точки зрения антропогенной версии, так как с учетом двухмесячного усреднения в этом случае следовало бы ожидать не поворота изолиний ОСО, а лишь изменение их номинальных значений.

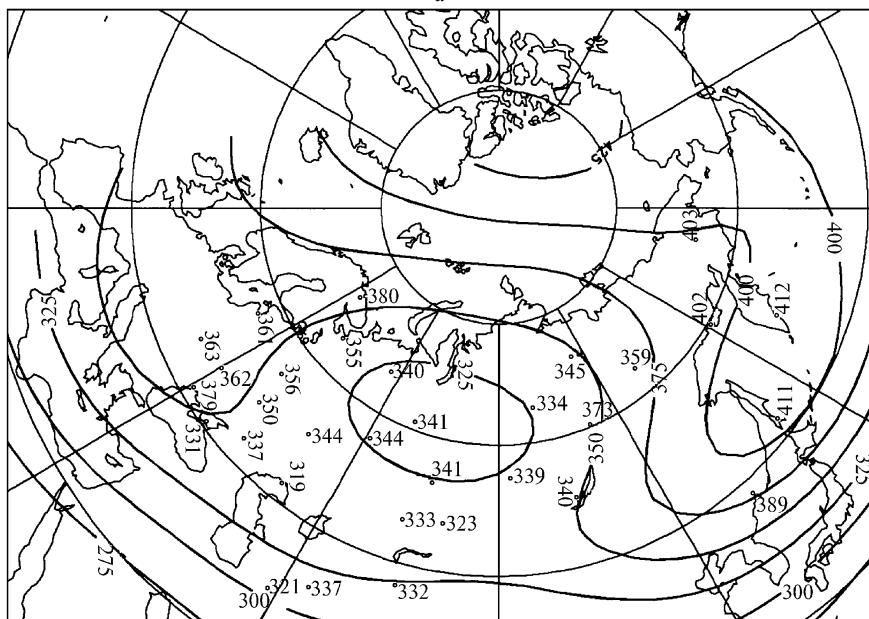
В настоящей работе выявление причин уменьшения озонового слоя проведено путем анализа изменения формы профилей ВРО во времени. Основанием для этого является то обстоятельство, что различные причины уменьшения озонового слоя должны по-разному влиять на изменения концентрации озона на различных уровнях [1–3, 5, 6]. Поскольку регулярные и достаточно качественные измерения профилей ВРО с помощью электрохимических озонзондов,

поднимаемых на аэрологических баллонах на ряде станций мировой сети озонowego зондирования атмосферы (всего в настоящее время их насчитывается более 40), осуществляются уже более 30 лет, то естественно ожидать, что именно они, в согласии с мнением многих специалистов [6, 13], могут дать раннюю и убедительную информацию о причинах изменений озонowego слоя.

Исходные данные вертикального озонного зондирования атмосферы для настоящего анализа взяты из банка данных [14]; при этом анализировали только данные станций Северного полушария, имеющих временные ряды длительностью не менее 20 лет (таблица). 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 по стандартной процедуре [15].



a



b

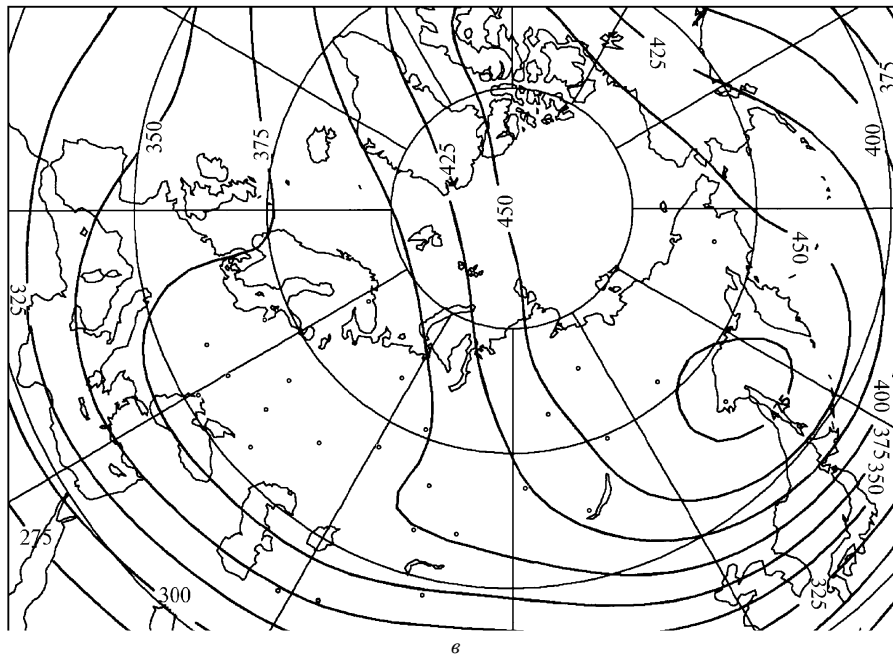


Рис. 1. Карты среднего распределения общего содержания озона на территории бывшего СССР в период с 1 февраля по 31 марта в 1994 (а), 1995 г. (б) и климатические нормы (в)

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

Название станции	Страна	С.ш.	Время наблюдений	Высота максимума				Ширина максимума			
				H , км	A_H , м	Тренд, м/год	Q	W	A_W , м	Тренд, м/год	Q
1. «Кагошима»	Япония	32	12/68–08/93	24,5	750	24±22	0,27	4,1	230	22±16	0,12
2. «Татено»	Япония	36	11/68–08/93	22,8	1220	57±30	0,42	5,1	180	7±12	0,11
3. «о.Уоллопс»	США	38	05/70–04/93	23,4	1480	12±24	0,50	4,7	300	2±10	0,17
4. «Саппоро»	Япония	43	12/68–08/93	21,9	1600	15±44	0,25	4,9	250	15±20	0,10
5. «Хоенпайсенберг»	Германия	48	09/69–08/93	22,0	1750	26±22	0,73	4,8	550	1±8	0,54
6. «Гус»	Канада	53	06/69–08/93	20,6	1870	36±28	0,50	4,7	490	20±14	0,18
7. «Эдмонтон»	Канада	53	10/70–08/93	21,1	1310	40±26	0,37	4,3	440	29±10	0,37
8. «Черчилль»	Канада	58	10/73–08/93	20,1	1740	40±36	0,47	4,7	460	27±12	0,36
9. «Резолот»	Канада	75	01/66–07/93	18,3	1230	22±18	0,42	4,4	250	20±7	0,22

Результаты анализа указанных характеристик профилей ВРО представлены в таблице (дополнительно там указаны эффективности разложения Q [16] и годовые амплитуды A_H и A_W ; погрешности приведены при уровне доверительной вероятности $P = 0,95$). На всех девяти станциях отмечен положительный тренд высоты озонового максимума, из них только на двух станциях он оказался незначимым; наибольший наблюдается в средних широтах (50–60°с.ш.), наименьший – вблизи экватора. Тренд ширины максимума также положителен, но незначим уже на четыре станции. Для ширины максимума значимый положительный тренд наблюдается в средних и высоких широтах Северного полушария; ближе к экватору он превращается в мало значимый. Отмеченные временные изменения формы вблизи озонового максимума в целом соответствуют полученным в работах [17–19].

На сегодняшний день существуют следующие объяснения наблюдаемых изменений ОСО [1–6]: 1) снижение продуктивности активного фото-химического слоя, обусловленное включением продуктов фотодиссоциации озоноразрушающих веществ в озоновый цикл; 2) консервация и последующее высвобождение антропогенного $C10$ в образованиях типа полярных стратосферных облаков (ПСО; этот фактор является широко распространенным объяснением образования известной антарктической «дыры»); и 3) южная адвекция воздушных масс, что приводит к снижению ОСО из-за уменьшения количества озона в

диапазоне высот, расположенном под местным климатическим максимумом. Каждый из них должен различным образом модифицировать форму профиля ВРО.

Со времен основополагающего обзора [11] установлено, что основное уменьшение озонового слоя, вызываемое антропогенными причинами, происходит в фотоактивном слое в области высот около 40 км. В этом случае эффект «выедания» озона, распространяясь сверху вниз, должен был бы привести к снижению высоты озонового максимума [2, 3]. Второй из названных факторов должен приводить к «выеданию» максимума озонной концентрации в диапазоне высот, соответствующих расположению ПСО (в Антарктиде это приводит к «выеданию» центра максимума и раздвоению последнего). Динамические же причины, которые сводятся в основном к участвовавшему проникновению (адвекции) относительно бедных озоном низкоширотных воздушных масс [13] в более высокие широты, должны приводить к понижению ОСО и увеличению высоты максимума ВРО.

Все значительные аномалии ОСО на территории Европы, зарегистрированные отечественной и мировой системами контроля состояния озонового слоя за последнее десятилетие, сопровождались вторжением субтропических воздушных масс. Это обстоятельство является весьма существенным доводом в пользу «динамической» версии изменений озонового слоя.

Для изучения реально наблюдаемых изменений профилей ВРО в условиях аномальных низких значений ОСО для каждой из анализируемых станций были исследованы профили, которые соответствовали наименьшим значениям ОСО, наблюдавшимся в дни выпусков озонзондов [20]. Для анализа отбирали все аномалии, в которых дефицит озона составил два и более среднеквадратических отклонений σ или 15 и более процентов от климатической нормы, соответствующей анализируемой дате (всего проанализирована 41 аномалия; результаты этого анализа более подробно изложены в работе [21]). Характерные особенности отклонений наблюдаемых профилей ВРО от климатических для нескольких таких аномалий, характеризующихся наблюдаемыми отрицательными отклонениями d от нормы ОСО X в единицах σ представлены на рис. 2.

Из рис. 2 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 [5, 8, 13]. Лишь для одной из рассмотренных озоновых аномалий (31.03.93 на станции «Резолют» – рис. 2, в) по форме профиля ВРО нельзя исключить влияние фотохимических гетерогенных факторов. Однако качественное подобие проанализированных ситуаций на всех широтах, а также отсутствие антарктического «провала» максимума делает 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) следует считать причиной аномалий изменения меридионального переноса озона из тропической зоны в высокие широты [6]. Экспериментальных данных, свидетельствующих о какой-либо роли снижения продуктивности активного фотохимического слоя, обусловленного фотодиссоциацией фреонов, выявить не удалось.

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 естественно 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 [9], определяющих глобальную атмосферную циркуляцию. С другой стороны, подобное поведение высоты и ширины максимума ВРО трудно понять с точки зрения антропогенной 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.

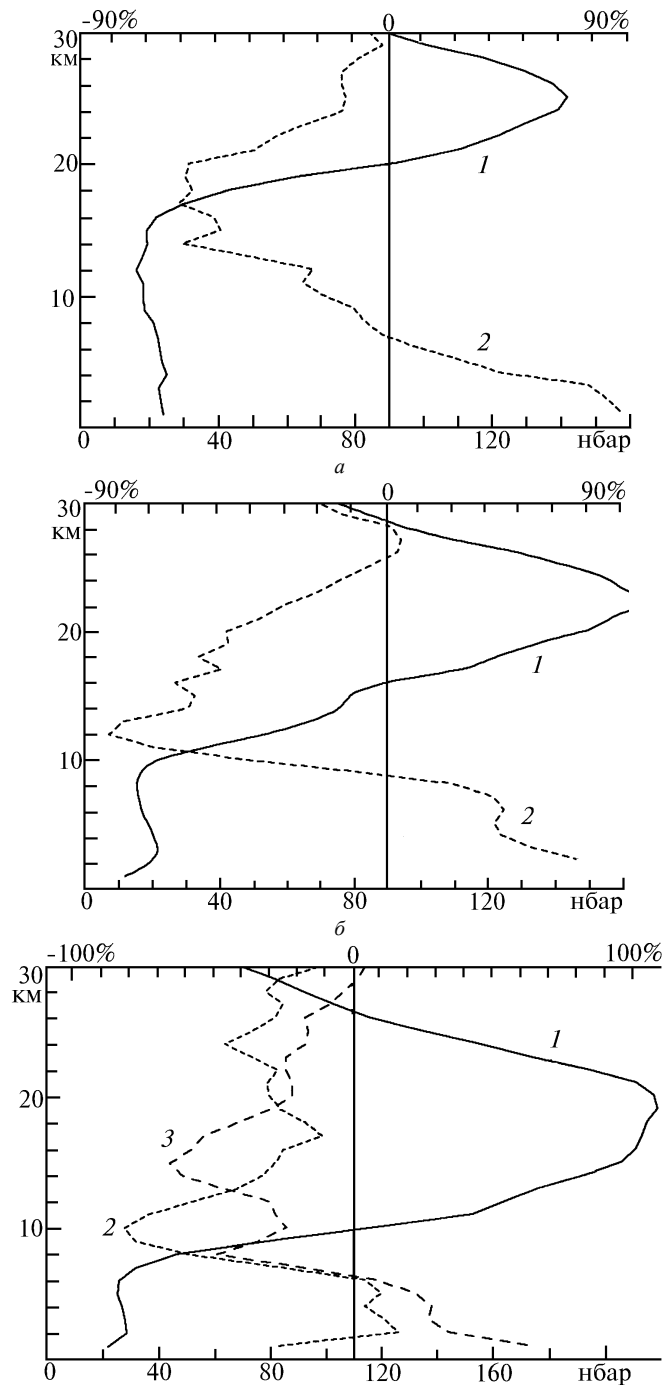


Рис. 2. Профили климатического вертикального распределения озона (1) и наблюдаемых отклонений (2 и 3 – в процентах от нормы) в дни аномалий ОСО в различных пунктах наблюдений: а – «Кагошима»: 22.02.89, ОСО – 302 е.Д., $d=2,7 \sigma$; б – «Хоенпайсенберг»: 22.01.93, ОСО – 342 е.Д., $d=2,3 \sigma$; в – «Резолот»: 04.04.90, ОСО – 468 е.Д., $d=2,9 \sigma$ (2); 31.03.93. ОСО – 471 е.Д., $d=2,8 \sigma$ (3)

В умеренных широтах Северного полушария, как правило, 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. Если тем не менее предположить, что антропогенные причины истощения озонового слоя являются определяющими, то естественно ожидать, что такое уменьшение будет примерно равномерным на большей части территории Северного полушария.

Между тем наблюдения показывают, что значительные аномалии локализованы. Таковы, например, зимне-весенние аномалии над северо-западом Европы и аномалия 1995 г. над Сибирью (рис. 1, б), которая в целом явилась беспрецедентной как по уровню дефицита ОСО, так и по размерам затронутой территории

Хотя в работе [22] и сделан вывод, что динамические факторы способны объяснить лишь около 70% наблюдаемого уменьшения ОСО весной 1995 г. над Сибирью (чтобы оставшиеся 30% приписать возможному действию антропогенного механизма), следует отметить, что подобные оценки неполны [5], не учитывают нелинейности действия влияющих факторов (например, температуры стратосферы), а их погрешность сопоставима с самой оценкой эффекта. О превалирующем действии динамических факторов в последнем случае свидетельствует то обстоятельство, что самые низкие ОСО над Сибирью сопровождалась, как и следовало ожидать [5], возникновением в этой области гребня в тропосфере и нижней стратосфере [23].

Эти заключения подтверждаются и при анализе временных рядов ОСО, особенно самых длинных. При таком анализе возникают трудности, связанные с ограниченной протяженностью рядов наблюдений и хорошо известные в классической климатологии (где принято оперировать, по меньшей мере, с рядами длительностью 100 и более лет) и математической статистике. Применительно к анализу рядов ОСО трудности усугубляются еще двумя обстоятельствами. Первое из них состоит в том, что за последние полтора десятилетия дважды имели место мощные кратковременные воздействия на исследуемый процесс; извержения вулканов Эль-Чичон (1982 г.) и Пинатубо (1991 г.). Второе обстоятельство состоит в том, что ввиду разнообразия технических средств измерений ОСО и ряда специфических метрологических и методических трудностей (на различных озонметрических станциях погрешности измерений неизвестны даже инициаторам их проведения, хотя известно, что они различаются и неконтролируемым образом меняются во времени) анализируемые ряды в сильной степени неоднородны. Поэтому к значениям трендов ОСО, получаемых при численном моделировании с рядами длительностью около 30 лет, следует подходить с большой осторожностью, чего не наблюдается во многих современных работах [2, 3].

Анализ имеющихся рядов ОСО показывает следующее:

1. Модель «хоккейной клюшки» [3], часто применяемая для описания временного хода ОСО с 1957 г. и иллюстрирующая нарастание скорости уменьшения ОСО в последнее время, является статистически необоснованной, например по отношению к модели с квадратичным трендом.

2. Для описания временного хода ОСО за последние 30 лет на большинстве станций Северного полушария (были проанализированы данные 25 наиболее авторитетных станций) статистически более предпочтительным является ход ОСО $Q(t)$, из которого предварительно выделен сезонный ход, в виде квадратичного тренда: $Q(t)=At^2+Bt+C(t)$, где A и B – постоянные коэффициенты, а в слабой зависимости $C(t)$ от времени t могут быть выделены воздействия различных регрессоров (квазидвухлетних колебаний, Северо-Атлантического колебания, солнечной активности и др.). В модели с квадратичным трендом максимум концентрации озона приходится на 1950–1960-е годы, т.е. на начало массовых наблюдений за озоновым слоем в глобальном масштабе. Такое описание указывает, что, возможно, во временном ходе ОСО наблюдаются колебания с периодами 80 и более лет (их признаки отмечены в параметрах Азорского антициклона, в приземной температуре в Лондоне [9] и др.).

3. Результаты прямого анализа наиболее длинного из имеющихся рядов ОСО – в Арозе, Швейцария, с 1926 г. [24] – также указывают на существование максимума ОСО в 1950–1960-е годы (рис. 3, кривая 1), т.е. в те годы, которые получаются и по модели с квадратичным трендом на более чем 20 озонметрических станциях Северного полушария и когда влияния антропогенных фреонов не было. Именно в эти годы наблюдался и минимум активности Азорского антициклона, оказывающего большое влияние на ход ОСО в Европе [9] (отметим, что коэффициент корреляции кривых 1 и 2 на рис. 3 составляет 0,94). Никаких неоднородностей временного ряда ОСО в Арозе с 1926 г. при статистическом анализе обнаружить не удалось, что косвенно свидетельствует о хорошем качестве этого ряда наблюдений.

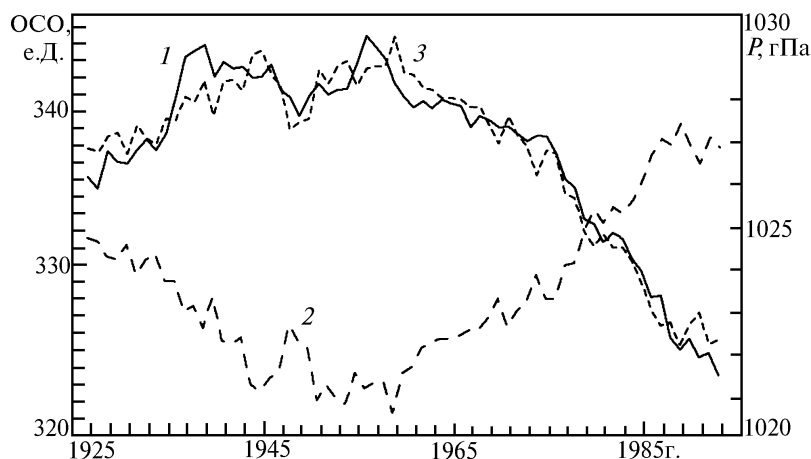


Рис. 3. Временные ходы ОСО в Арозе (1) и давления в январе в центра Азорского антициклона (2), усредненные методом скользящего среднего за 11 лет. Кривая 3 – регрессионная модель ОСО для Арозы с привлечением в качестве регрессоров давления в центре Азорского антициклона в январе, широты этого центра и времени

Сказанное не означает, что должны быть сделаны окончательные выводы в пользу «динамической» версии, но чисто «антропогенная» версия должна быть, по-видимому, полностью исключена, а в рамках комбинированной версии динамический механизм должен играть доминирующую роль по отношению к «антропогенному». Имеющихся данных наблюдений по-прежнему недостает для уверенного 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 прежде всего 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 наблюдаемые изменения климата.

Таким образом, исследование долговременных изменений формы профилей ВРО, отдельных аномалий и наиболее длинных рядов ОСО показывает, что определяющий вклад в формирование аномально низких значений ОСО в Северном полушарии вносят динамические процессы, в первую очередь участвовавшие случаи южной адвекции, что, по-видимому, свидетельствует о долговременных изменениях в процессах глобальной циркуляции. Имеющий место механизм формирования отрицательных аномалий в поле ОСО приводит к большему увеличению УФ-Б облученности земной поверхности в период таких аномалий, чем предполагавшийся ранее механизм [1–3] (истощение продуктивности фотохимически активного слоя, обусловленное антропогенной деятельностью), что связано с более эффективным ослаблением УФ-излучения на низких высотах вследствие эффектов многократного молекулярного рассеяния.

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить за плодотворное обсуждение концепции настоящей работы профессоров Е.П. Борисенкова (ГГО) и С.Ф. Тимашева (НИФХИ им. Л.Я. Карпова).

1. The Stratosphere 1981: Theory and Measurements // WMO Ozone Rep. N 11. Geneva, 1982.
2. Present State of Knowledge of the Upper Atmosphere 1988: An Assessment Report // NASA Ref. Publ. 1208, Washington, 1988. 200 p.
3. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1994 // WMO Ozone Rep. N. 37. Geneva, 1995.
4. Бюллетень о состоянии озонового слоя // Долгопрудный: ЦАО. 1991–1996. NN 1–9.
5. Бекорюков В.И., Захаров Г.Р., Куколева А.А. и др. // Метеорология и гидрология. 1990. N 12. С. 103–105.
6. Хргиан А.Х. // Метеорология и гидрология. 1989. N 7. С. 115–123.
7. Хргиан А.Х., Петренко Н.А. // Известия АН СССР. Сер. ФАО. 1991. Т. 27. N 12. С. 1283–1291.
8. Бекорюков В.И., Борисов Ю.А., Звягинцев А.М. и др. // Известия РАН. Сер. ФАО. 1994. Т. 30. N 6. С. 807–811.
9. Бекорюков В.И., Бугаева И.В., Захаров Г.Р. и др. // Метеорология и гидрология. 1995. N 7. С. 40–47.

10. Elansky N. F. // Internat. Conf. on Ozone in the Lower Stratosphere, May 15–20, 1995, Halkidiki, Greece. P. 25.
11. Сывороткин В. Л. // Природа, 1993. N 9. С. 35–45.
12. Жадин Е. А. // Исследование атмосферного озона. М.: Гидрометеониздат, 1992. С. 58–65.
13. Duetsch H. U. Regular Ozone Soundings at the Aerological Station of the Swiss Meteorological Office at Payerne, Switzerland, 1968–1972. Zuerich: LAPETH–10, ETH, 1974. 338 p.
14. Кадыгрова Т. В. // Известия РАН. Сер. ФАО. 1995. Т. 31. N 1. С. 57–61.
15. Кадыгрова Т. В., Крученицкий Г. М. // Известия РАН. Сер. ФАО. 1995. Т. 31. N 1. С. 62–68.
16. Voloshchuk V. M., Zvyagintsev A. M., Kadygrov N. E. et al. // Scientific Russian. 1996. V. 1 (in press).
17. Logan J. A. // J. Geophys. Res. 1994. V. 99D. N 12. P. 25553–25585.
18. Miller A. J., Tiao G. C., Reinsel G. C. et al. // J. Geophys. Res. 1995. V. 100D. N 5. P. 11209–11217.
19. Bojkov R., Fioletov V. E. // J. Geophys. Res. 1996. V. 101D (in press).
20. Ozone Data for the World // Downsview–Ontario: Canad. Environ Service / WMO, 1974–1995.
21. Кадыгрова Т. В. Исследование статистических характеристик поля вертикального распределения озона: Автореферат дис. ... канд. физ.-мат. наук. Долгопрудный: ЦАО. 1995. 18 с.
22. Bojkov R. D., Fioletov V. E., Balis D. S. et al. // Geophys. Res. Lett. 1995. V. 22. N 20. P. 2729–2732.
23. Бекорюков В. И., Бугаева И. В., Захаров Г. П. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. N 9. С. 1243–1249.
24. Duetsch H. U., Staehelin J. // Planet. and Space Sciences. 1989. V. 37. N 12. P. 1587–1599.

Центральная аэрологическая обсерватория,
г. Долгопрудный Московской обл.
Украинский научно-исследовательский
гидрометеорологический ин-т, г. Киев

Поступила в редакцию
2 апреля 1996 г.

G.M. Kruchenitsky, V.I. Bekorukov, V.M. Voloshchuk, A.M. Zvyagintsev, N.E. Kadygrov, T.V. Kadygрова, S.P. Perov. **On Dynamic Factors Contribution into Formation of Anomalously Low Total Contents of Ozone in the Northern Hemisphere.**

The reasons of reduction of ozone layer were investigated by means of determination of changes of ozone vertical profile at 9 world ozonometric stations (4 Canadian, 1 American, 3 Japanese and 1 German) and analysis of total contents of the ozone temporal series at 25 stations, including the longest series at Arosa (since 1926). A significant positive trend of height of the ozone maximum at 7 stations and that of width of the ozone maximum at 5 stations (with the significance level $P = 0.95$) are found; at other stations the trends are insignificant (but all are positive too). By analyzing the most significant 41 total ozone anomalies it was shown that the main ozone reduction practically always is observed below the ozone concentration maximum. The wide-spread model description of the total contents of the ozone temporal series as "hockey stick" is not statistically optimal. The dynamic mechanism of the ozone reduction should be dominating with respect to the anthropogenic one. The existing observational data are insufficient for full description of the ozone reduction tendencies and, furthermore, of their reasons (or they are over noised). The adequate temporal description should be based on the global climate changes data.