

где  $f_{\max}$  — частота преобладающего максимума на функциях спектральной плотности  $S(f)$  (см. рис. 1),  $b$  — найденная из эксперимента ширина слоя смещения в суспензионном потоке,  $u$  — максимальная скорость суспензионного потока. Определенные таким образом числа  $Sh$  при увеличении исходной плотности суспензии  $\rho$  закономерно падают:  $Sh=1,4 \cdot 10^{-2}$ ;  $1,0 \cdot 10^{-2}$  и  $0,6 \cdot 10^{-2}$  при  $\rho=1,0070$ ;  $1,0125$  и  $1,0259$  г/см<sup>3</sup> соответственно, причем для случая минимальной плотности ( $\rho=1,0070$  г/см<sup>3</sup>) рассчитанное по (1) число Струхала совпадает с нижней границей интервала значений  $Sh$ , рассчитанных для слоя смещения нестратифицированного по плотности отрывного течения за полуцилиндром.

Таким образом, приведенные экспериментальные данные свидетельствуют о подобии механизма возникновения когерентных структур в плоских турбулентных слоях смещения и в слое смещения отрывного течения.

Выражаем большую благодарность Л. В. Поборчей, любезно предоставившей в наше распоряжение экспериментальные материалы по исследованию движения суспензионных потоков.

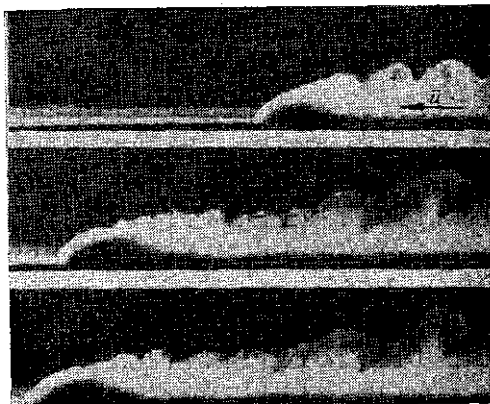


Рис. 2. Фотографии суспензионного потока, движущегося в неподвижной чистой воде



Рис. 3. Фотография поверхности раздела суспензионного потока и чистой воды

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Анисимова Е. П., Сперанская А. А., Тугеева М. С. Изв. АН СССР, ФАО, 1975, 11, с. 537. [2] Анисимова Е. П., Доброклонский С. В., Лесников Б. М., Сперанская А. А. Там же, 1978, 14, с. 445. [3] Анисимова Е. П., Сперанская А. А., Шапхаев С. Г. Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон., 1981, 22, № 3, с. 71. [4] Рошко А. Ракетная техника и космонавтика, 1976, 14, № 10, с. 8. [5] Winant C. D., Browand F. K. J. Fluid Mech., 1974, 63, N 2, p. 237. [6] Анисимова Е. П., Поборчая Л. В., Сперанская А. А. Изв. АН СССР, ФАО, 1978, 14, с. 1110. [7] Анисимова Е. П., Сперанская А. А. В кн.: Тез. Междунар. симпоз. по стратифицированным течениям. Новосибирск, 1972, с. 1.

Поступила в редакцию  
05.05.85

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1986, т. 27, № 2

УДК 551.510.534

## О ПЕРЕНОСЕ ОЗОНА ТЕЧЕНИЯМИ СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ

М. С. Ракова, А. Х. Хргиан

(кафедра физики атмосферы)

Атмосферный озон, основной слой которого находится в стратосфере на высоте 20—24 км, участвует там, несомненно, в процессах горизонтального и вертикального переноса воздушных масс. Поле давления воздуха, создающее такой перенос, имеет форму циклонов, антициклонов либо так называемых длинных волн (волн Россби). Их некоторые свойства можно изучить, в частности, по изменениям количества озона, наблюдения за которым ведутся сейчас систематически в ряде (более 100) пунктов земного шара.

Особое значение имеет озон как трассер вертикальных движений (для оценки которых до сих пор имелись лишь косвенные методы). Уже давно был предложен так называемый принцип Норманда—Добсона, утверждающий, что восходящее движение в нижней и средней стратосфере приподнимает и «сжимает» слой озона (уменьшая его общее количество  $X$ ), а нисходящее — опускает слой и увеличивает  $X$ . Оценки, данные ранее Бекарюковым [1], показали, что озон должен так отзываться даже на очень медленные вертикальные движения — порядка 1—2 см/с. По данным об общем количестве и изменениях вертикального распределения озона [2] мы изучили некоторые черты строения атмосферных фронтов, циклонов, антициклонов и длинных волн с их гребнями и ложбинами. Из работы [3] мы выбрали дни и периоды за 1977—1981 гг., когда индекс меридиональной циркуляции по Кацу [4] превышал его среднее значение, т. е. когда течения к северу и к югу были сравнительно сильны над всем Северным полушарием.

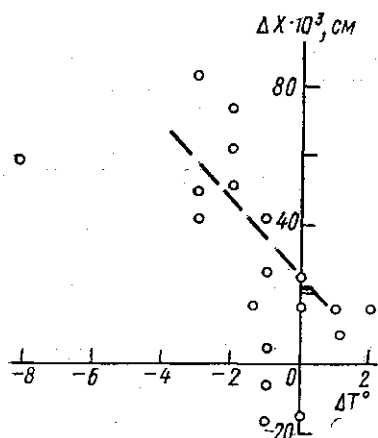


Рис. 1. Изменения температуры в средней тропосфере и общего количества озона при прохождении холодного фронта

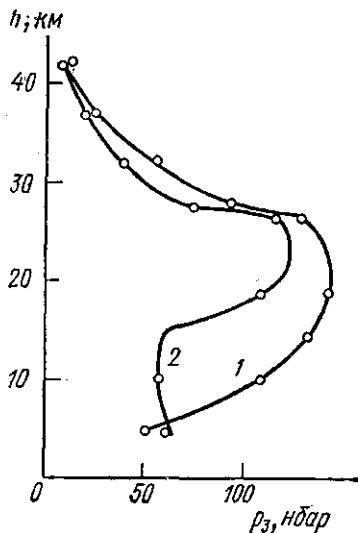


Рис. 2. Вертикальное распределение парциального давления озона в области ложбины длинной волны (1) и в области ее гребня (2)

По данным «Синоптического бюллетеня» и «Карт максимального ветра» Гидрометцентра СССР за указанные годы было проанализировано 11 случаев холодных фронтов и 6 случаев теплых, отмеченных на картах погоды, 27 циклонов и 10 антициклонов на уровне 100 мбар, т. е. ряд *высоких* атмосферных вихрей. Рассмотрены были также и некоторые ложбины и гребни в поле давления на этом уровне (около 16 км).

Данные об озоне мы заимствовали из наблюдений 22 озонометрических обсерваторий Европы, Азии и Америки. Вторжения холодного воздуха в общем повышали  $X$ . Очевидно, при этом увеличивалось количество озона в стратосфере. Зависимость его прироста  $\Delta X$  от  $\Delta T$  — изменения температуры при прохождении фронта — представлена на рис. 1. В среднем было  $\Delta X = +30$  единиц Добсона (с. Д.), но в отдельных случаях  $\Delta X$  менялось от +73 до -26 е. Д. Фронт 2 мая 1980 г., давший наибольшее понижение температуры ( $\Delta T = -8^\circ$ ), значительно повысил над Ленинградом количество озона ( $\Delta X = +59$  е. Д.). В отдельных случаях, однако,  $\Delta X$  уменьшалось до -26 е. Д. — на летних, очевидно, низких, холодных фронтах.

Теплые фронты приносили всегда уменьшение  $X$ ,  $\Delta X < 0$ , с приходом теплого, обычно тропического воздуха. В среднем было  $\Delta X = -22$  е. Д., а в отдельных случаях  $\Delta X$  менялось от -6 до -47 е. Д., причем это последнее значение отмечено было у фронта с большим разрывом температуры ( $\Delta T = +4^\circ$ ).

В таблице указаны  $\Delta X$  — отклонения  $X$  от среднего месячного значения — в передней и тыловой частях циклонов и антициклонов, найденные по показаниям обсерваторий, находившихся в данный день в этих синоптических положениях. Эти различия  $\Delta X$ , по-видимому, более систематичны, чем  $\Delta X$  на фронтах, из-за большого масштаба таких вихрей.

Часть вихря	Средние значения $\Delta X$ , е. Д.		Экстремумы $\Delta X$ , е. Д.	
	Циклон	Антициклон	Циклон	Антициклон
Передняя . . . . .	-28	-43	-66	-74
Тыловая . . . . .	+36	-38	+156	-41

В циклоне величина  $\Delta X$  того же порядка, как и на соответствующих фронтах (теплом в его передней части и холодном — в тыловой). Это показывает, что меридиональная интенсивная циркуляция, связанная с высотными циклонами, создает характерную теплую и затем холодную адвекцию (т. е. фактически фронтальные процессы) как в тропосфере, так и в стратосфере. Однако фронтов на высотных картах (скажем, уровня 200 мбар — 11 км или 100 мбар — 16 км) пока еще синоптики не отмечают.

В высотных антициклонах везде было  $\Delta X < 0$ , в них нет заметной асимметрии и, следовательно, влияния фронтов. Можно считать поэтому, что высотные антициклоны в этом поясе широт образуются в однородном теплом воздухе, вероятно тропическом. В нем, как давно известно, характерно низкое содержание озона  $X$ .

Эти выводы согласуются с данными вертикальных зондирований озона [5].

Мы рассмотрели также значения  $X$  и вертикальное распределение озона в длинных волнах — в волнах, где западное течение стратосферы (на уровне 100 мбар) отклоняется к северу и к югу на 10—20°. В ложбинах таких волн, например, по данным зондирований в Бельске (ПНР) 4 и 22 февраля 1977 г. и 5 мая 1979 г., слой озона располагался ниже нормального его уровня (рис. 2, 1) и  $X$  было выше нормы. Мы можем поэтому выдвинуть предположение, что нисходящее движение воздуха создавалось в волне, в потоке, идущем с севера на юг. Действительно, сохранение момента количества движения создает на юге восточную составляющую ветра и вертикальную составляющую силы Кориолиса  $A_z = 2\omega \cos \varphi \cdot V$ , направленную вниз.

Этим ложбины отличаются от гребней волн на севере, где с усилением западной составляющей сила  $A_z$  направлена вверх. Действительно, зондирование, например, в Эдмонтоне (Канада) 16 сентября 1981 г. обнаружило там (рис. 2, 2) приподнятый слой озона.

Таким образом, результаты наблюдения за озоном обнаруживают некоторые еще мало изученные динамические эффекты в атмосфере — восходящие движения в гребнях и нисходящие — в ложбинах длинных волн общей циркуляции атмосферы. Они обращают наше внимание и на роль вертикальной составляющей силы Кориолиса, которой нередко до сих пор пренебрегали.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Бекарюков В. И. Изв. АН СССР, ФАО, 1965, 1, с. 897. [2] Ozone data for the World. Atmosph. Environ. Service. Toronto, 1977—1981. [3] Индексы атмосферной циркуляции. Под ред. Н. В. Столыпной. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. [4] Кац А. Л. Сезонные изменения общей циркуляции атмосферы и долгосрочные прогнозы. Л.: Гидрометеоиздат, 1960. [5] Баттулга Л. В кн.: Рабоч. совещ. по исслед. атм. озона. Материалы докладов. Тбилиси, 1981, с. 327.

Поступила в редакцию  
11.06.85