

В.В. Зуев, С.В. Смирнов

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ОЗОННЫХ АНОМАЛИЙ НА СИБИРСКОЙ ЛИДАРНОЙ СТАНЦИИ (СЛС, 56,5° с.ш., 85° в.д.)

Приводятся результаты комплексных наблюдений озонных аномалий, которые были выявлены из регулярных озонметрических наблюдений ОСО и из данных лидарного зондирования озона и температуры в стратосфере, выполняемых на Сибирской лидарной станции (СЛС, 56,5°с.ш., 85°в.д.). Во временном ходе ОСО в течение 1994–1997 гг. определено пять периодов продолжительностью 6–12 дней с отклонениями, предварительно усредненными по 6 дням, превышающими 20%-й уровень относительно среднего годового ряда. Из них периоды в январе 1994 г. и феврале 1995 г. – отрицательные аномалии, в декабре 1994 г. и ноябре–декабре 1996 г. – положительные. Анализ синоптической информации, соответствующей периодам озонных аномалий, показал, что положительные озонные аномалии связаны с передней частью высокого малоподвижного центрального циклона, смещенного в более низкие широты. Аналогично отрицательные озонные аномалии связаны с передней частью высокого блокирующего антициклона (или высотного гребня), смещенного в более высокие широты. В периоды озонных аномалий в тропосферной циркуляции наблюдаются планетарные волны с волновыми числами 3 или 4, причем с уменьшением волнового числа интенсивность и продолжительность озонной аномалии возрастают. Как показал анализ, основными причинами возникновения аномальных отклонений в поле ОСО являются адвективные перемещения воздушных масс, вызванные перемещениями высоких обширных барических образований. Наибольшие локальные аномальные отклонения связаны с зонами интенсивных упорядоченных вертикальных движений в нижней стратосфере над тропосферными барическими образованиями, которые сопутствуют локальным изменениям значений геопотенциала и располагаются в контрастных передних частях барических образований.

Введение

Наблюдаемые в последние годы значительные колебания общего содержания озона (ОСО) в умеренных широтах Северного полушария вызывают повышенный интерес к выявлению причин и механизмов подобного поведения озона.

Последние исследования [1–9] показывают, что причиной аномальных отрицательных отклонений ОСО в зимне-весенние периоды являются как глобальные изменения режима общей циркуляции атмосферы (ОЦА) [3, 7, 8], так и возможное интенсивное каталитическое разрушение молекул озона в реакциях взаимодействия со свободными молекулами хлора, источниками которых являются хлорсодержащие соединения. Их повышенные концентрации также регистрировались в эти периоды [1, 2, 9]. Однако определенного ответа на то, какие процессы (фотохимические или динамические) в данных ситуациях играют доминирующую роль, пока не получено.

В исследованиях обычно затрагиваются случаи или периоды с отрицательными аномальными отклонениями ОСО, так как они более актуальны для человека и биосферы в целом, поскольку только озоновый слой является эффективным естественным биологическим щитом от жесткого УФ солнечного излучения. Однако для более глубокого понимания механизмов, вызывающих отрицательные аномалии, необходимо хорошо уяснить механизмы любых, как положительных, так и отрицательных, аномальных отклонений и их основные причины.

В данной статье приводятся результаты комплексных наблюдений озонных аномалий, которые были выявлены из регулярных озонметрических наблюдений ОСО и из данных лидарного зондирования озона и температуры в стратосфере, выполняемых на СЛС [19].

Результаты наблюдений и их обсуждение

Регулярные наблюдения за ОСО на СЛС проводятся с марта 1993 г. Измерения ОСО выполняются по стандартной методике с помощью калиброванного озонметра М-124 №249. Для повышения относительной точности и оперативности измерений была выполнена частичная автоматизация процессов измерения и расчета ОСО [10]. Результаты первых наблюдений были опубликованы в [11].

К настоящему времени временной ряд насчитывает более 1000 значений среднегодневного ОСО. На рис. 1 показан ход ОСО с начала 1994 г. по май 1997 г. Данные за 1993 г. не представлены и в анализе не учитываются из-за невысокой регулярности наблюдений в то время. Для устранения периодических колебаний во временном ходе ОСО был сделан переход от абсолютных значений к отклонениям. С этой целью ряд, представленный на рис. 1, который является неоднородным, с использованием линейной интерполяции был преобразован в однородный. Затем был рассчитан среднестатистический годовой ход среднегодневных значений ОСО и относительно этого годового ряда были рассчитаны относительные отклонения, которые представлены на рис. 2.

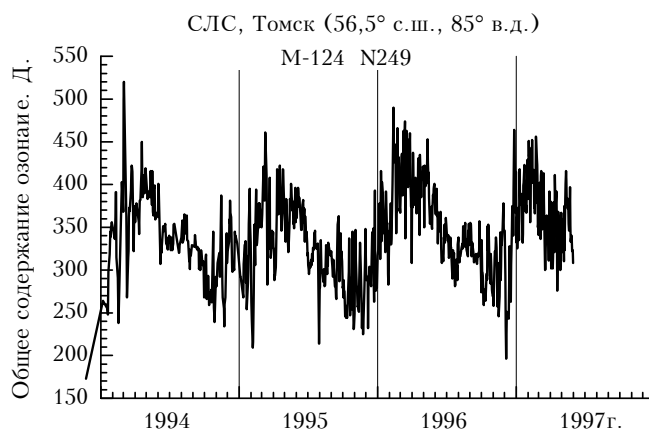


Рис. 1. Временной ход среднегодневного ОСО по данным озонметрических наблюдений в Томске

Начиная с первых работ Добсона [12, 13] и из современных исследований [3, 4, 14, 15] известно, что в тропосфере и нижней стратосфере, в том числе и на высоте озонового климатического максимума, озон подвержен значительному динамическому воздействию циркуляционных процессов. Для того чтобы сгладить мезомасштабные и синоптические колебания, было выполнено 6-дневное усреднение, соответствующее средней продолжительности естественного синоптического периода. Выполненное 20-дневное усреднение, соответствующее среднему периоду длинных планетарных волн, хорошо выявляет особенности ОЦА и соответственно отчетливо показывает периоды с устойчивыми нарушениями нормального временного распределения.

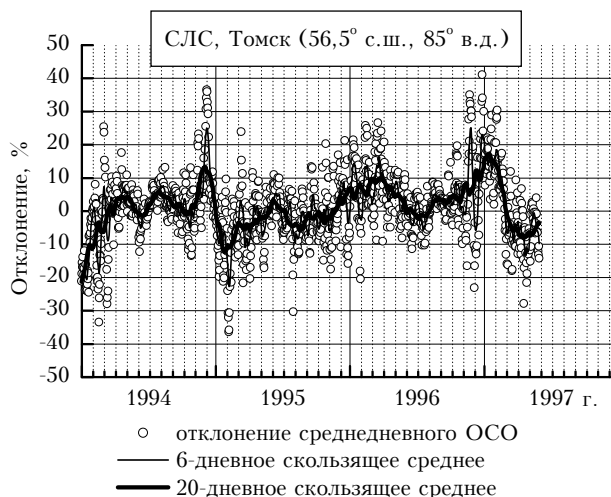


Рис. 2. Отклонения среднегодневных значений ОСО от среднестатистического годового хода

На рис. 2 кривая 20-дневного скользящего среднего четко показывает, что в колебаниях ОСО в течение рассматриваемого временного интервала наблюдались устойчивые периоды как с положительными, так и с отрицательными отклонениями. Видно, что в течение 1994 г. преобладали положительные отклонения, кроме зимних месяцев, в течение 1995 г. – отрица-

тельные, в 1996 г. – вновь положительные. В 1997 г. зимой наблюдался период со значительными положительными отклонениями, весной – с отрицательными. Следует также отметить два особых участка: первый – осень 1994 г. и зима 1994/95 г., второй – зима 1996/97 г. и весна 1997 г. Оба участка характеризуются периодами с высокими положительными и затем отрицательными отклонениями, с резким переходом между ними. Подобное, не являющееся строго периодическим, чередование отклонений и участков с резким переходом, интервал между которыми составляет около 26 месяцев, связано, вероятно, с квазидвухлетней цикличностью (КДЦ) экваториальной стратосферной циркуляции. Согласно результатам исследований в [16], наблюдаемые участки с резкими переходами должны соответствовать восточной фазе КДЦ в период смены направления переноса с западного на восточный. В связи с этим можно ожидать, что поведение ОСО во второй половине 1997 г. будет аналогично поведению в 1995 г., т.е. будут наблюдаться незначительные в целом по амплитуде колебания с положительными отклонениями в июне–июле и отрицательными в августе–сентябре.

Приведенная на рис. 2 кривая 6-дневного скользящего среднего, которая сглаживает колебания синоптических масштабов, а также разброс, вызванный погрешностью измерений (относительная средняя погрешность составляет около 3%, максимальная при неблагоприятных условиях наблюдения – до 8%), рассматривалась нами как исходная для выявления аномальных периодов. В качестве критерия аномальности нами был принят уровень 20%-го отклонения. Таким образом в анализируемом периоде, с января 1994 г. по май 1997 г., было определено пять участков, представленных в таблице.

Периоды отклонений ОСО, превышающие 20%-й уровень, с января 1994 г. по май 1997 г. в Томске

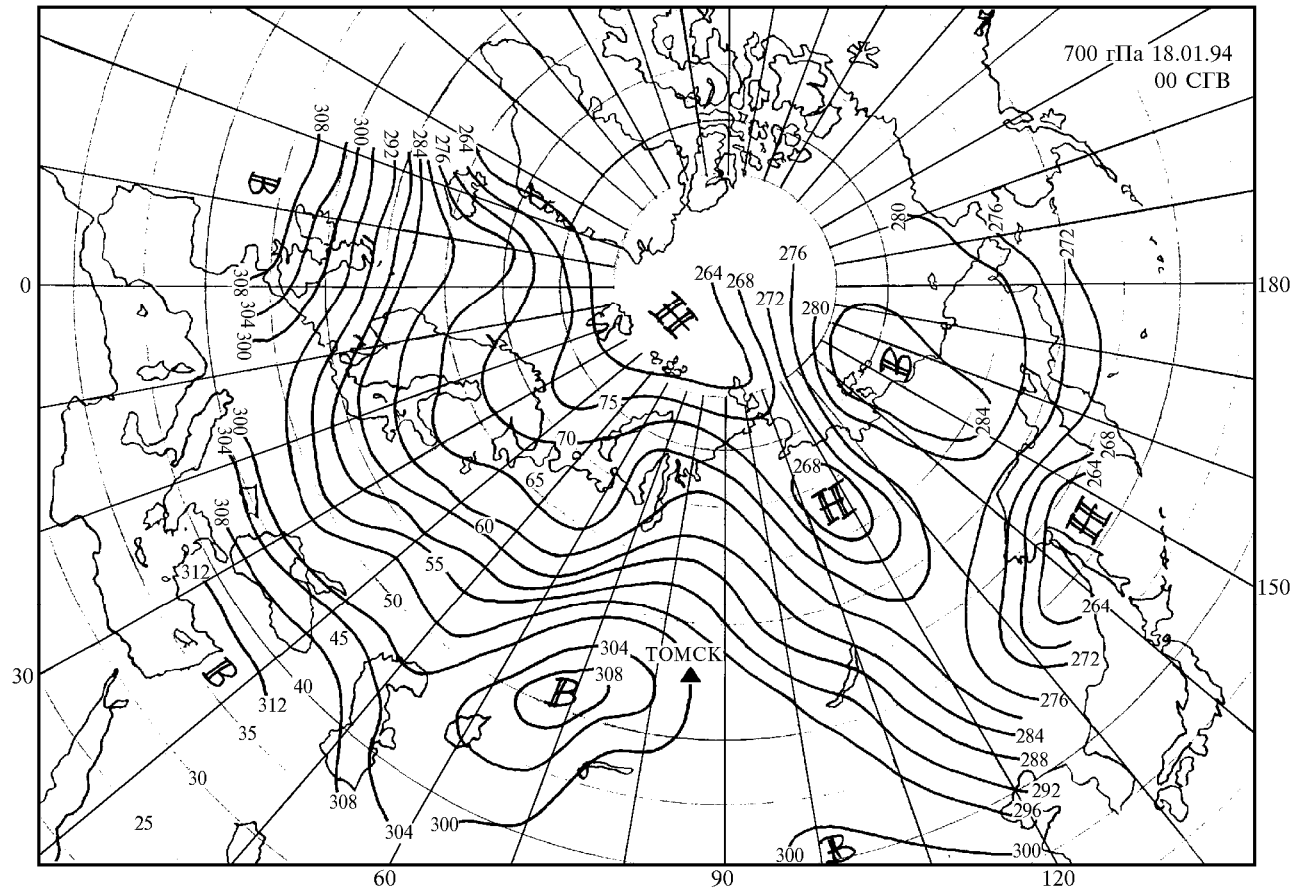
Период	Максимальное отклонение, %
11–20 января 1994 г.	–20,57
3–14 декабря 1994 г.	+25,05
3–8 февраля 1995 г.	–22,68
21–28 ноября 1996 г.	+25,16
24 декабря 1996 г. – 2 января 1997 г.	+23,10

В соответствии с периодами аномальных отклонений ОСО нами были рассмотрены аналогичные временные интервалы в эволюции термобарических полей и имеющиеся данные высотного лидарного зондирования озона и температуры. К сожалению, из-за отсутствия высотных карт барической топографии мы были вынуждены ограничиться рассмотрением уровней ниже 500 гПа. Несмотря на это, данной информации вполне достаточно, чтобы правильно интерпретировать вертикальную структуру и эволюцию высоких барических образований и показать их связь с озонными аномалиями.

На рис. 3 представлены барические поля на 700-гПа уровне, которые в среднем характеризуют ситуации, когда наблюдались озонные аномалии. На рисунке хорошо видно, что во всех случаях над пунктом наблюдения (ПН) барическое поле имеет высокие барические градиенты, зональный поток значительно деформирован смещенным в низкие широты высоким центральным малоподвижным циклоном либо смещенным в высокие широты высоким блокирующим антициклоном.

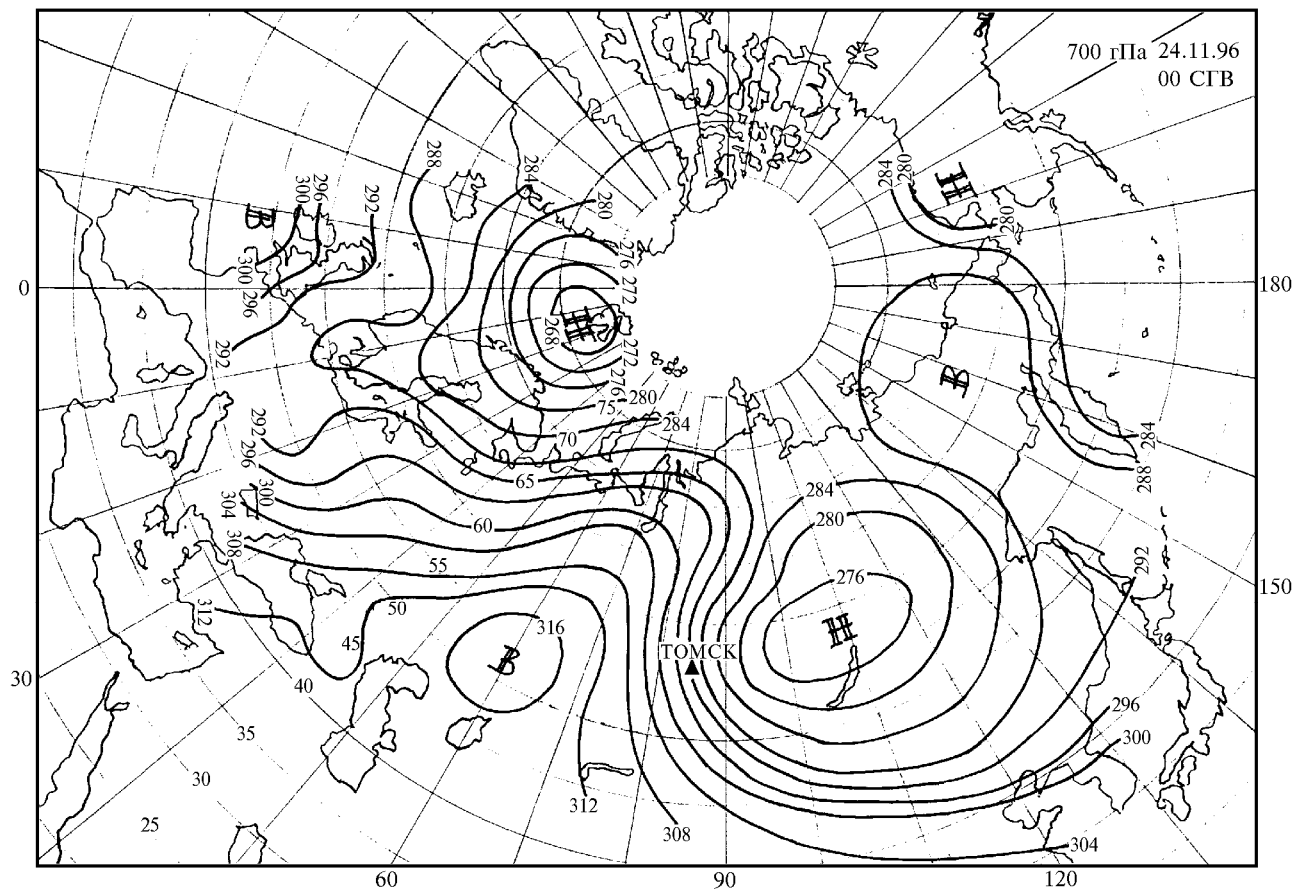
Во всех случаях в тропосферной циркуляции наблюдаются планетарные волны с волновыми числами 3 или 4. Причем чем меньше волновое число и соответственно обширнее центральные барические образования, тем значительнее интенсивность и продолжительность озонной аномалии (положительные аномалии в декабре 1994 и 1996 гг. и отрицательная в феврале 1995 г.).

Из рис. 3 видно также, что периодам с отрицательными озонными аномалиями соответствуют антициклонические синоптические ситуации (рис. 3, а, в), в которых ПН располагается справа от планетарной высотной фронтальной зоны (ПВФЗ), в области дивергенции антициклонически искривленных изогипс. Периодам с положительными озонными аномалиями соответствуют циклонические синоптические ситуации (рис. 3, б, г и д), в которых ПН располагается слева от ПВФЗ (или в ней), в области конвергенции циклонически искривленных изогипс.



a

Рис. 3. Характерные барические поля на уровне 700 гПа в периоды аномальных отклонений ОСО над Томском в 1994–1997 гг. Н – область низкого давления, В – высокого



2

Рис. 3 (продолжение)

Наблюдаемое над Томском в первой половине февраля 1995 г. значительное понижение ОСО явилось частным случаем общей депрессии озонового слоя в течение января и февраля над обширным регионом, охватывающим Западную и Восточную Сибирь. Временное развитие этой депрессии хорошо иллюстрируется на рис. 4 и 5, где видно, как происходили её перемещение и трансформация. Период максимального понижения ОСО над Томском соответствовал периоду прохождения ядра депрессии над ним.

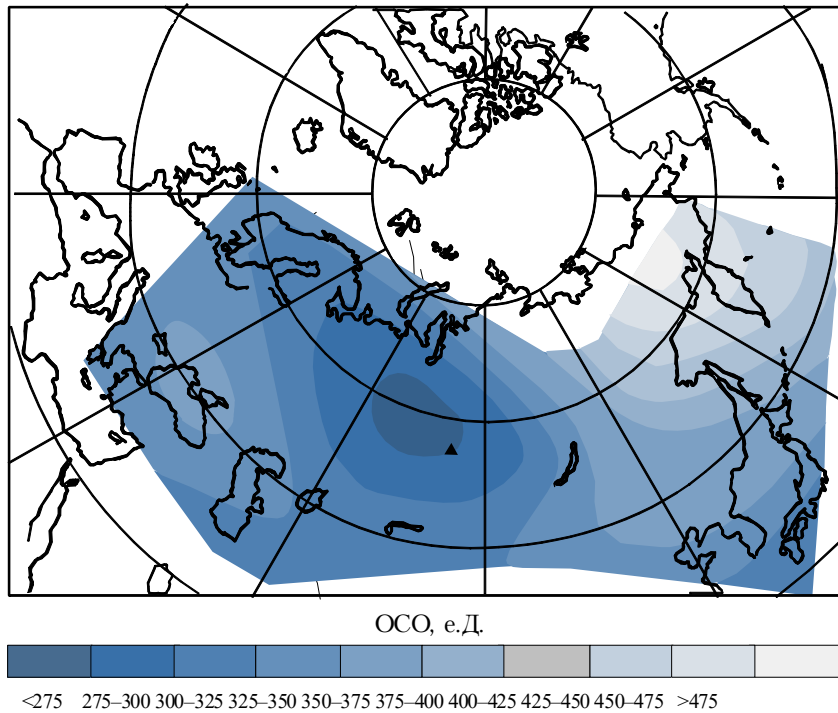


Рис. 4. Поле ОСО по данным спутниковых наблюдений в начале периода anomalously низкого ОСО над территорией Западной и Восточной Сибири в феврале 1995 г.

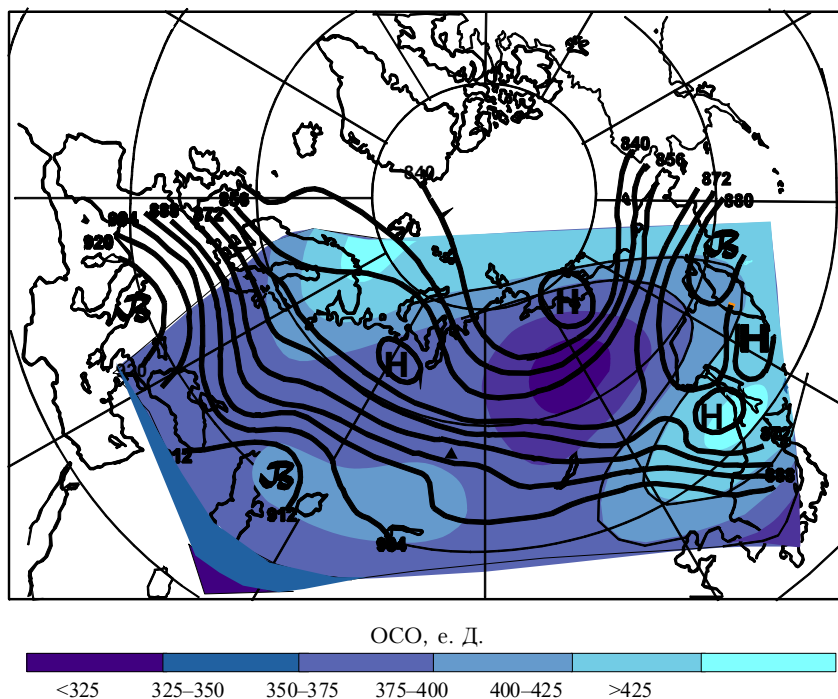


Рис. 5. Поле ОСО и барическое поле на уровне 300 гПа в конце периода anomalously низкого ОСО в феврале 1995 г.

Наложение высотного барического поля на поле ОСО (см. рис. 5) показывает, что область минимального ОСО приходится на край стратосферного циркумполярного циклонического вихря, сместившегося в более низкие широты со своего обычного положения над Арктикой. Причем в тропосфере этому соответствовал теплый барический гребень, а в нижней стратосфере на краю вихря наблюдались аномально низкие стратосферные температуры. На рис. 6 показаны значения температуры на стандартных изобарических уровнях, значения и отклонения ОСО от среднемесячного, наблюдавшиеся в конце января 1995 г., до периода максимального понижения ОСО над Томском в первой половине февраля.

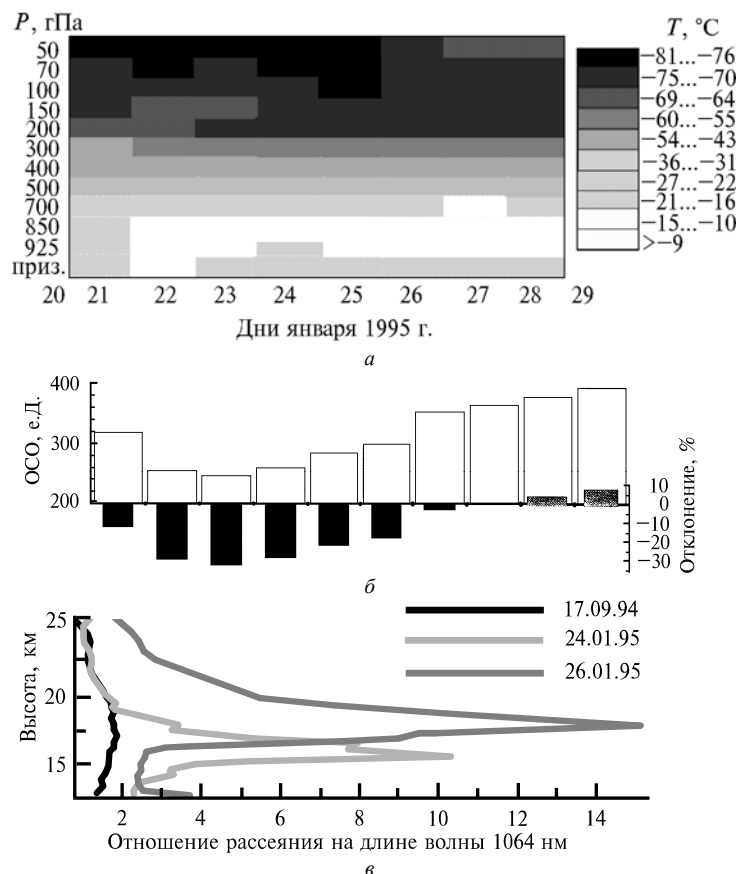


Рис. 6. Распределения температуры (а), значений и отклонений ОСО (б) и лидарные профили отношения рассеяния на длине волны 1064 нм (в) в конце января 1995 г.

На рис. 6 показаны также вертикальные профили отношения рассеяния по данным лидарного зондирования, полученные в тот же период, и для сравнения фоновый профиль за сентябрь 1994 г. Значительное увеличение аэрозольного рассеяния в нижней стратосфере свидетельствует о наличии в этот период аэрозольных образований типа полярных стратосферных облаков (ПСО), характерных для очень холодной зимней полярной нижней стратосферы.

Более детально рассмотреть динамику поля ОСО в зависимости от эволюции синоптических образований можно на основе результатов комплексных измерений по программе SATOR [17], проведенных летом 1995 г. Хотя в тот период не наблюдалось аномальных отклонений, как это видно из рис. 2, развитие процесса сходно с развитием озоновых аномалий зимой 1994/95 гг., но с меньшими амплитудами. Отклонения среднемесячных значений ОСО в период комплексных измерений в июне–июле 1995 г. от средних месячных значений, а также индексы зональной и меридиональной циркуляции показаны на рис. 7. Индексы характеризуют интенсивность составляющих циркуляции и тип циркуляционных процессов. Расчет индексов проводился по методике Каца по карте AT_{300} на площади между 60 и 100° в.д. и между 45 и 60° с.ш.

На рис. 7 видно, что положительным отклонениям ОСО, наблюдаемым в первой половине июня 1995 г., соответствуют более высокие значения индекса зональной составляющей атмосферного переноса и индексы меридиональной циркуляции южного направления, а периоду в

довательно, уменьшение ОСО) и адиабатическое охлаждение. Также, чем выше плотность и антициклоническая кривизна изогипс, тем больше увеличивается геопотенциал и, соответственно, больше уменьшается ОСО.

Заключение

В результате проведенных озонметрических наблюдений в Томске на СЛС во временном ходе ОСО в течение 1994–1997 гг. определено пять периодов продолжительностью 6–12 дней с отклонениями, предварительно усредненными по 6 дням, превышающими 20%-й уровень относительно среднего годового ряда. Из них периоды в январе 1994 г. и феврале 1995 г. – отрицательные аномалии, периоды в декабре 1994 г. и ноябре–декабре 1996 г. – положительные.

Анализ синоптической информации, соответствующей периодам озонных аномалий, утвердительно показал, что положительные озонные аномалии связаны с передней частью высокого малоподвижного центрального циклона, смещенного в более низкие широты. Аналогично отрицательные озонные аномалии связаны с передней частью высокого блокирующего антициклона (или высотного гребня), смещенного в более высокие широты.

В периоды озонных аномалий в тропосферной циркуляции наблюдаются планетарные волны с волновыми числами 3 или 4, причем с уменьшением волнового числа интенсивность и продолжительность озонной аномалии возрастают.

Как показал анализ, основными причинами возникновения аномальных отклонений в поле ОСО являются адвективные перемещения воздушных масс, вызванные перемещениями высоких обширных барических образований. Наибольшие локальные аномальные отклонения связаны с зонами интенсивных упорядоченных вертикальных движений в нижней стратосфере над тропосферными барическими образованиями, которые сопутствуют локальным изменениям значений геопотенциала и располагаются в контрастных передних частях барических образований.

Сделанные выводы хорошо согласуются с результатами исследований [3, 6, 7, 14], которые показывают, что случаи с локальными аномалиями в поле ОСО имеют высокую корреляцию с поведением таких атмосферных центров действия, как циркумполярный циклонический вихрь, постоянные антициклонические центры действия – азорский и северитихоокеанский антициклоны, и сезонный азиатский (сибирский) антициклон. Перемещения и интенсивность этих барических образований, в свою очередь, обуславливаются изменениями режима общей циркуляции атмосферы, связанного с глобальными климатическими изменениями.

В заключение авторы выражают благодарность коллегам из лаборатории оптической погоды за предоставленную синоптическую информацию и Г.М. Крученицкому за аэрологические данные и карты ОСО.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант N 96-05-64282).

1. Божков Р.Д., Фиолетов В.Э., Кадыгрова Т.В. и др. // *Метеорология и гидрология*. 1995. N 9. С. 30–40.
2. Дорохов В.М., Потапова Т.Е., Гутайл Ф., Поммеро Ж.-П. // *Метеорология и гидрология*. 1996. N 6. С. 53–62.
3. Бекорюков В.И., Бугаева И.В., Захаров Г.Р. и др. // *Метеорология и гидрология*. 1995. N 7. С. 40–47.
4. Petzoldt K., Naujokat B., Neugeboren K. // *Geophysical Research Letters*. 1994. V. 21. N 13. P. 1203–1206.
5. Randall C.E., Rusch D.W., Bevilacqua R.M., et al. // *Geophysical Research Letters*. 1995. V. 22. N 20. P. 2733–2736.
6. Крученицкий Г.М., Бекорюков В.И., Волощук В.М. и др. // *Оптика атмосферы и океана*. 1996. Т. 9. N 9. С. 1233–1242.
7. Бекорюков В.И., Бугаева И.В., Захаров Г.Р. и др. // *Оптика атмосферы и океана*. 1996. Т. 9. N 9. С. 1243–1249.
8. Жадин Е.А. // *Метеорология и гидрология*. 1995. N 7. С. 48–55.
9. Browell E.V., Butler C.F., Ismail S., et al. // *Geophysical Research Letters*. 1990. V. 17. N 4. P. 325–328.
10. Бондаренко С.Л., Правдин В.Л., Смирнов С.В. // *Приборы и техника эксперимента*. 1996. N 4. С. 167.
11. Зуев В.В., Смирнов С.В. // *Известия АН. Сер. ФАО*. 1996. Т. 32. N 4. С. 573–575.
12. Dobson G.M.B., Harrison D.N., Lawrence J. // *Proc. R. Soc. Part III. London*. 1929. N A122. P. 456–486.
13. Добсон Д., Митгем А. // *Некоторые проблемы современной метеорологии*. Л.: Гидрометеиздат, 1937. С. 137–154.

14. Бекорюков В.И., Захаров Г.Р., Куколева А.А., Фиолетов В.Э. // Метеорология и гидрология. 1990. N 12. С. 103–105.
15. Milch P., Laštovička J. // *Annales Geophysicae*. 1996. N 14. P. 744–752.
16. Мониторинг общей циркуляции атмосферы // Тр. ГМЦ, Вып. 322. Спб: Гидрометеониздат, 1992. 94 с.
17. Зуев В.В. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 6. С. 565–571.
18. Брасье Г., Соломон С. Аэрномия средней атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1987. 414 с.
19. Зуев В.В. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. N 9. С. 1171–1183.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
29 июля 1997 г.

V. V. Zuev, S. V. Smirnov. Results of Complex Observations of Ozone Anomalies from the Siberian Lidar Station.

Results of complex observations of ozone anomalies from the Siberian Lidar Station (SLS, 56.5°N/85°E) are presented, which were revealed from regular ozonometric measurements and lidar sounding of the stratospheric ozone and temperature. Five anomalous periods with durations of 6–12 days and with deviations exceeding 20% were determined during 1994–1997. Negative anomalies were observed in January, 1994, and February, 1995; positive anomalies – in December, 1994 and November–December, 1996. The synoptic analysis has shown that the positive ozone anomalies were connected to a front of high stationary central cyclone biased in lower latitudes. Analogously, the negative ozone anomalies were connected to a front part of high blocking anticyclone (high ridge) biased in higher latitudes. During the ozone anomalous periods planetary waves with number of 3 or 4 are observed in the tropospheric circulation and the duration and the intensity of the ozone anomalies grow with reduction of wave number. The analysis has shown that the main reason of abnormal deviations of the total ozone column is a horizontal transport of the air mass caused by movement of high extensive baric formations. Maximum local abnormal deviation are connected to zones of intensive regular vertical motions in the low stratosphere above tropospheric baric formations which accompany local changes of the geopotential magnitude and locate in contrast front parts of the formations.