

## ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.501

**В.В. Зуев, С.В. Смирнов, В.Н. Маричев, М.В. Гришаев**

### **РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОПТИЧЕСКОМУ КОНТРОЛЮ СОСТОЯНИЯ ОЗОНОСФЕРЫ НА СИБИРСКОЙ ЛИДАРНОЙ СТАНЦИИ**

Представлены результаты анализа комплексных измерений на Сибирской лидарной станции Института оптики атмосферы СО РАН в Томске (56,5°с.ш., 85°в.д.) в феврале и декабре 1996 г., выполненного в рамках задачи оптического контроля состояния озоносферы. Комплексные измерения включают лидарные измерения вертикального распределения озона (ВРО) и температуры (ВРТ) в стратосфере, спектрофотометрические измерения общего содержания озона (ОСО) и вертикального распределения и общего содержания двуокиси азота (ВР/ОС NO<sub>2</sub>). Анализ наблюдаемых аномальных отклонений озона показал их хорошую связь с эволюцией циркуляционно-синоптических процессов планетарного масштаба. Замечено, что с положительными аномалиями в ОСО связано необычное ВР NO<sub>2</sub>; не обнаружено явной связи между поведением озона и двуокисью азота при отрицательных аномалиях в ОСО. Анализ данных комплексных измерений, выполненный с целью интерпретации атмосферных процессов, в сравнении с результатами синоптического анализа подтвердил потенциальную способность комплексного подхода в исследованиях озоносферы из одной точки наблюдения.

#### **1. Введение**

В настоящее время проблема изучения атмосферных механизмов и процессов, ответственных за поведение озона, несмотря на выполненные многочисленные исследования, остается по-прежнему актуальной. Для решения этой задачи на Сибирской лидарной станции (СЛС) Института оптики атмосферы СО РАН в Томске (56,5°с.ш., 85°в.д.) создан и развивается измерительный комплекс для оптического контроля состояния верхней тропосферы и стратосферы. Аппаратура, методики измерений и результаты исследований подробно изложены в наших предыдущих публикациях (например, см. список литературы в [1] и работы [2–7]).

Целью данной работы являются совокупный анализ результатов одновременных измерений озона, двуокиси азота и температуры в стратосфере, выполненных в феврале и декабре 1996 г. в рамках комплексного эксперимента, и попытка интерпретировать динамические процессы в стратосфере на основе этого анализа.

#### **2. Методические и геофизические основы комплексного эксперимента**

Методической основой оптического контроля состояния озоносферы являются комплексные измерения и анализ ряда атмосферных параметров и составляющих, а именно:

- лидарные измерения вертикального распределения стратосферного озона (ВРО);
- лидарные измерения вертикального распределения стратосферной температуры (ВРТ);
- спектрофотометрические измерения вертикального распределения и общего содержания двуокиси азота (ВР/ОС NO<sub>2</sub>);
- спектрофотометрические измерения общего содержания озона (ОСО).

Комплексный подход позволяет методами аналитического и статистического сопоставления и сравнения выявить как общие, так и частные закономерности и процессы, обуславливающие пространственно-временное поведение исследуемых параметров и составляющих атмосферы.

Хорошо известно [8, 9], что стратосферный озон имеет высокую корреляцию с температурой, поскольку она не только влияет на скорость фотохимических реакций в стратосфере, но и является показателем тех или иных динамических стратосферных процессов, которые участвуют в перераспределении озона и других малых газовых составляющих.

Не менее важен также контроль за состоянием и поведением в стратосфере двуокиси азота. Эта малая газовая составляющая играет доминирующую роль в азотном каталитическом

цикле разрушения стратосферного озона, на долю которого приходится до 50 % от общего каталитического разрушения озона [8].

Известно также, что озон и двуокись азота имеют ярко выраженное зональное распределение [8–10], характеризующееся увеличением содержания с ростом широты. При этом озон распределяется таким образом в течение всего года, увеличивается лишь амплитуда сезонного хода от низких широт к полярным. Распределение двуокиси азота, как более фотохимически активной составляющей, имеет отличие в зимнем периоде, в котором от широтного пояса 40–50° к полюсу происходит быстрое уменьшение общего содержания, вызванное тем, что в условиях дефицита или отсутствия солнечной КВ-радиации зимой в высоких широтах практически вся двуокись азота превращается в соединения-резервуары  $ClONO_2$  и  $N_2O_5$ . Максимальные градиенты в зональном распределении зимнего поля общего содержания двуокиси азота на широтах 40–50° образуют так называемый клифф-эффект, результатом которого являются значительные отклонения в содержании двуокиси азота при определенном развитии крупномасштабных циркуляционных процессов в течение коротких промежутков времени (от дня до недели). Поэтому при значительных деформациях зонального переноса, наблюдаемых при активизациях центров высокого давления (азорского, североатлантического или азиатского антициклонов) в периоды их продвижения в высокие широты и стабилизации, происходят значительные изменения полей общего содержания и вертикального распределения озона, двуокиси азота и температуры в нижней и средней стратосфере.

Таким образом, одновременно контролируя поведение в стратосфере озона, двуокиси азота и температуры, можно определенно показать атмосферные процессы, которые влияют на содержание и изменчивость стратосферного озона, и даже попытаться спрогнозировать дальнейшее развитие этих процессов.

Однако возникает вопрос: а возможно ли достаточно уверенно говорить об атмосферных процессах, получая информацию о вертикальном распределении и общем содержании озона, двуокиси азота и о температуре в одной точке? Да, возможно. И это подтверждается климатическими различиями в содержании и распределении полей атмосферных составляющих и параметров и неустойчивостью и изменчивостью атмосферных переносов, о чем было сказано выше.

### 3. Обсуждение результатов комплексного эксперимента

Итогами комплексного эксперимента по оптическому контролю состояния озоносферы в 1996 г. явились временные ряды спектрофотометрических наблюдений общего содержания озона (рис. 1), общего содержания (рис. 2) и вертикального распределения двуокиси азота, ряд лидарных профилей вертикального распределения озона и температуры в стратосфере.

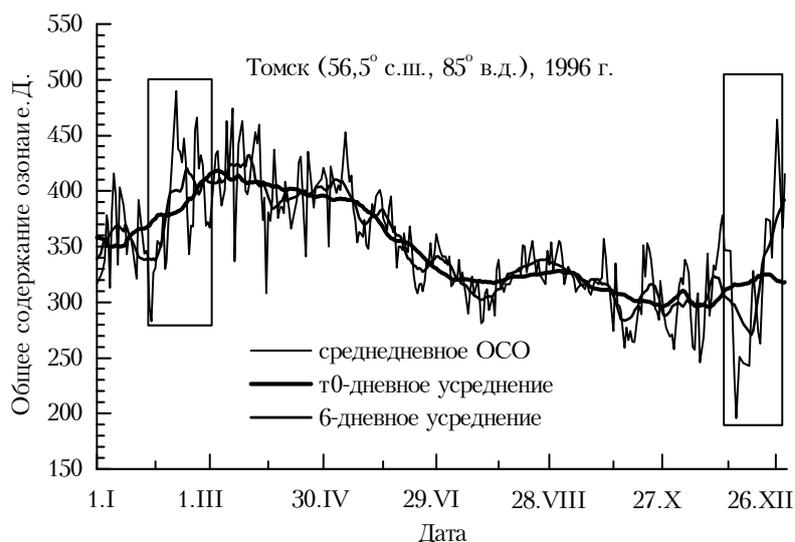


Рис. 1. Временной ход среднедневных значений СО в 1996 г. в Томске. Показано усреднение по 6 и 20 дням

Наиболее информативными для анализа по объему данных оказались два зимних месяца – февраль и декабрь. В эти месяцы отмечались самые высокие в 1996 г. и равные по величине значения ОСО (490, 455 и 456 е.Д. – 12, 22 и 23 февраля, 464 е.Д. – 27 декабря) и уникальное кратковременное понижение ОСО до 196 е.Д. 5 декабря. К тому же эти периоды оказались чрезвычайно интересными с точки зрения аномальности в развитии синоптических процессов, о чем будет сказано в следующем разделе. На рис. 1 и 2 анализируемые периоды выделены. Показаны также кривые 6- и 20-дневного усреднения, характеризующие соответственно средний естественный синоптический период и средний полупериод длинных планетарных волн в общей циркуляции атмосферы.

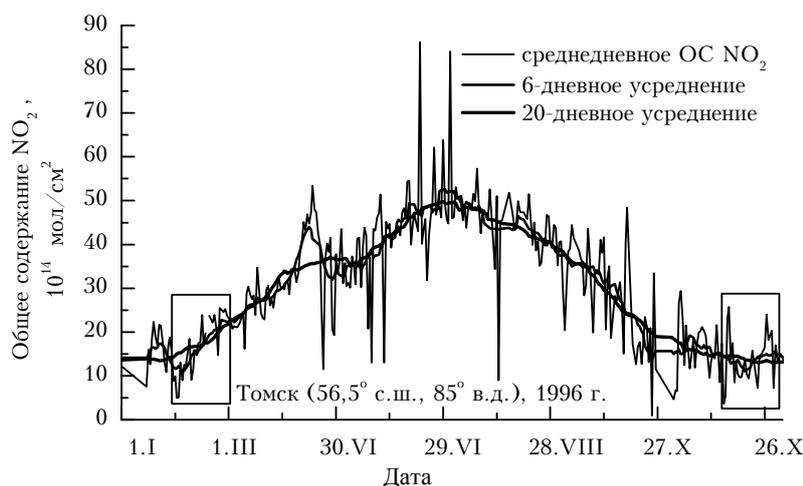


Рис. 2. Временной ход среднесуточных значений ОС NO<sub>2</sub> в 1996 г. в Томске. Показано усреднение по 6 и 20 дням

В течение февраля наблюдались в целом повышенные значения ОСО с максимальным отклонением до + 28 % от многолетнего среднефевральского. В течение декабря наблюдались периоды с аномально низким ОСО (максимальное отклонение до – 39 %) в первой декаде и с аномально высоким (до + 44 %) в последней декаде. В поведении двуокиси азота в эти периоды значительных отклонений не наблюдалось. В общем средний ход ОС NO<sub>2</sub> повторяет средний ход ОСО; различие состоит в амплитуде отклонений. Поскольку двуокись азота является более фотохимически зависимой составляющей в стратосфере и менее подвергнута влиянию динамики, чем озон, то и изменения в ОС NO<sub>2</sub> менее выражены. Но, с другой стороны, в зимних условиях дефицита солнечной радиации проявление фотохимии в поведении двуокиси азота также менее выражено по сравнению с летним периодом, и поэтому в зимнее время зависимость от динамики атмосферы все же существенна.

Соответствующие этим периодам лидарные профили ВРО и ВРТ представлены на рис. 3. Как видно, в случаях, когда ВРО наиболее отличается от среднего модельного распределения, в общем содержании также наблюдается более значимое отклонение. Причем при наблюдаемых примерно равных значениях ОСО в профилях ВРО могут быть существенные различия, что хорошо видно из сравнения профилей озона за 22 февраля и 27 декабря. Отличаются также друг от друга и профили ВРТ: 12 февраля в слое с высоким содержанием озона – более высокие температуры; 22 февраля в средней стратосфере корреляция между температурой и озоном положительная, в нижней – отрицательная; 27 декабря при аномально высоком содержании озона в нижней стратосфере наблюдалась аномально низкая температура на высоте среднеклиматического озонного максимума.

Исходя из знаний широтного распределения полей и вертикальной структуры озона и их взаимосвязей с барическими полями и циркуляционными процессами в стратосфере [8–14], можно предположить, что наблюдаемые различия в ВРО обуславливаются разным высотным развитием циркуляционно-синоптических процессов, а именно: увеличение озона и температуры в нижней стратосфере 12 февраля было вызвано смещением арктической воздушной массы на юг и нисходящими вертикальными токами в области теплого ядра циркумполярного циклонического вихря. Изрезанная структура профиля озона может характеризовать выраженную зональность стратосферного переноса [14]. Одновременное возрастание озона в нижней и средней стратосфе-

ре и температуры в средней стратосфере, наблюдаемое 22 февраля, можно однозначно связать со стратосферным зимним потеплением и, в связи с этим, – ослаблением зональной составляющей переноса. Можно допустить, что 22 февраля произошло значительное нарушение зональности, в результате которого за счет горизонтальной адвекции арктического воздуха увеличилось содержание озона, без существенного изменения температурного режима в нижней стратосфере. Наблюдаемое 27 декабря высокое содержание озона, аналогичное по содержанию 12 февраля, и очень низкая стратосферная температура обусловлены, как можно предположить, значительным смещением в наши широты холодной части циркумполярного циклонического вихря.

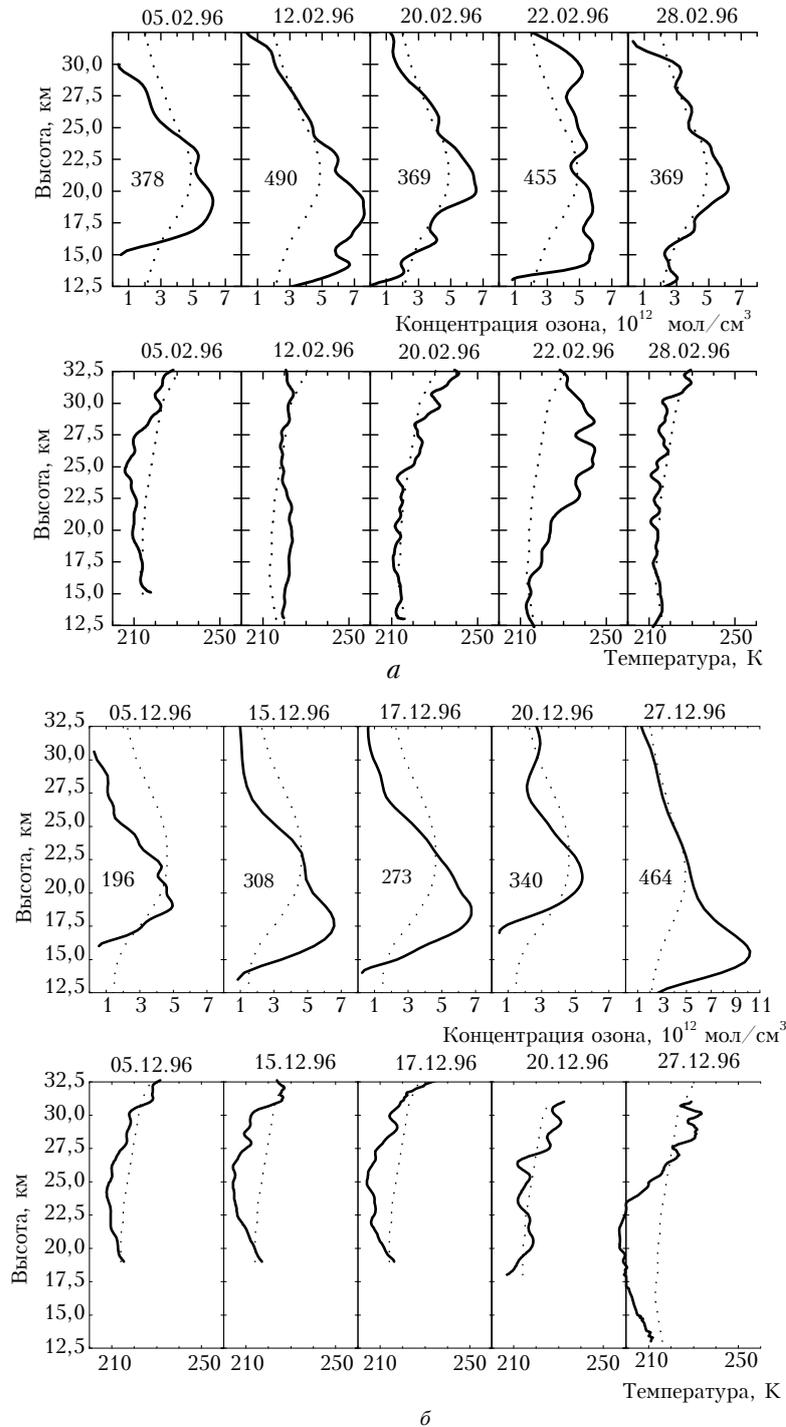


Рис. 3. Вертикальное распределение озона и температуры в феврале (а) и декабре (б) по данным лидарного зондирования. Показаны модельные распределения озона и температуры и приведены значения ОСО в е.Д.

Особенный случай с аномально низким ОСО наблюдался 5 декабря. По озонметрическим наблюдениям в этот день было зарегистрировано рекордно низкое ОСО – 196 е.Д. Лидарное зондирование 5 декабря также показало очень низкие концентрации озона в нижней и средней стратосфере, хотя значительных отрицательных температурных отклонений не наблюдалось. Как видно на рис. 1, низкое ОСО наблюдалось в целом в течение первой половины декабря, с минимумом 5 декабря.

Подобные низкие зимние значения ОСО характерны для тропической зоны. Как отмечается в [11, 13], при вторжениях тропических (или субтропических) воздушных масс в умеренные или полярные широты в результате продвижения на север и стабилизации высоких блокирующих антициклонов (или высотных гребней), охватывающих и нижнюю стратосферу, возникают ситуации с низким ОСО и характерным трансформированным профилем ВРО. Аналогичное ВРО как раз и наблюдалось 5 декабря, когда ниже и выше местного климатического озонного максимума произошло значительное уменьшение озона: внизу – за счет адвективного замещения воздушной массы в высотном барическом гребне, сверху – за счет восходящих вертикальных токов в области холодного ядра на краю циркумполярного вихря.

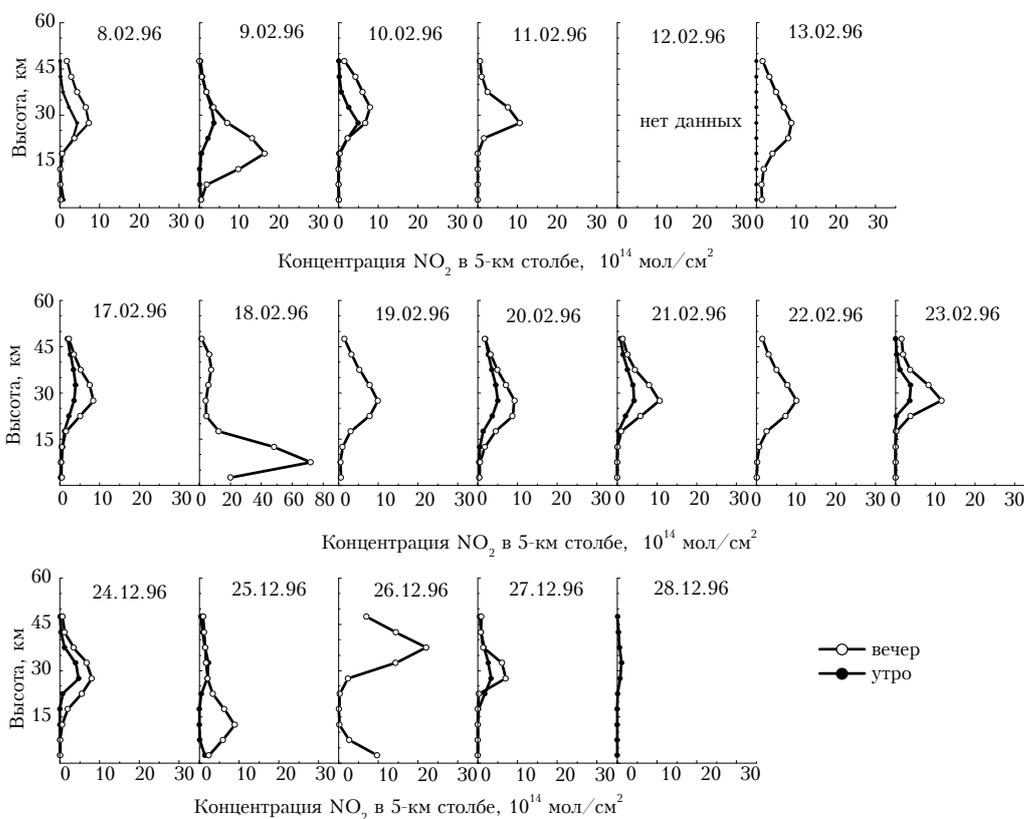


Рис. 4. Вертикальное распределение двуокиси азота в периоды, когда наблюдались озонные положительные аномалии в феврале и декабре 1996 г. (по данным спектрофотометрических измерений)

Для трех отмеченных случаев с аномальными положительными отклонениями в ОСО и ВРО характерна также некоторая закономерность и в поведении ВР  $\text{NO}_2$ . На рис. 4 представлены спектрофотометрические профили ВР  $\text{NO}_2$  по данным сумеречных измерений в утреннее и вечернее время, показывающие изменения распределения двуокиси азота в периоды, когда наблюдались озонные положительные аномалии. Как видно, во всех трех случаях за 2–4 дня до появления максимума в ходе ОСО наблюдается по данным вечерних измерений резкое возрастание содержания двуокиси азота в нижней стратосфере с образованием максимума на высотах 10–15 км (который обычно в профиле  $\text{NO}_2$  располагается на высотах 25–30 км). Затем видно, что через сутки ВР  $\text{NO}_2$  восстанавливается, далее ведет себя несколько нестабильно и после достижения озонного максимума полностью стабилизируется.

В общем содержании двуокиси азота в первой половине декабря, с аномальным понижением ОСО 5 декабря, каких-либо значительных отклонений не обнаружено. В этот период в

поведении ВР  $\text{NO}_2$  наблюдалась неустойчивость: колебания максимумов и соотношения день/ночь в содержании.

Наблюдаемое закономерное поведение двуокиси азота в первых трех случаях, возможно, обуславливается, так же как и аномальные отклонения в содержании озона, динамикой атмосферы и особенностью широтного распределения двуокиси азота зимой. По всей видимости, значительное смещение холодной полярной воздушной массы с малым содержанием  $\text{NO}_2$ , но с высоким содержанием соединений-резервуаров ( $\text{ClONO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}_5$  и др.) из зоны полярной ночи в освещаемые умеренные широты приводит к интенсивному фотолизу соединений-резервуаров и образованию  $\text{NO}_2$  в первый световой день после вторжения холодного полярного воздуха. Поскольку в этой воздушной массе отношение смеси для  $\text{ClONO}_2$  и  $\text{N}_2\text{O}_5$  в верхней тропосфере и нижней стратосфере в несколько раз выше, чем на тех же высотах в умеренной воздушной массе, то и увеличение количества восстановленного  $\text{NO}_2$  первоначально происходит в нижней стратосфере.

Таким образом, на основании данных комплексных экспериментальных измерений, выполняемых в одной географической точке, мы попытались провести анализ атмосферных процессов и показать возможность подобного комплексного подхода в решении задачи оптического контроля состояния озоносферы из одной точки.

#### **4. Сравнение результатов комплексного эксперимента с метеорологической информацией**

Для проверки правильности наших выводов при обсуждении результатов комплексного эксперимента мы провели синоптический анализ ситуаций в выбранных периодах (февраль и декабрь 1996 г.), результаты которого приводятся ниже. Анализ выполнялся по высотным барическим картам абсолютной топографии и аэрологическим данным пункта наблюдения в Новосибирске.

В первой половине февраля стратосферная циркуляция имела резко выраженную зональность с сильными западными ветрами во всей стратосфере. Это было вызвано смещением циркумполярного циклонического вихря в более низкие широты, что вызвало обострение циклоничности и углубление тропосферного высокого циклона, в зоне которого оказался Томск.

В начале второй половины февраля стратосферная циркуляция над Томском также имела в основном резко выраженную зональность с сильными западными ветрами. В тропосфере сформировался теплый блокирующий антициклон с холодной высокой тропопаузой.

В последней декаде февраля произошло стратосферное потепление, которое предшествовало сезонной перестройке стратосферной циркуляции на летний режим, проходившей в первой половине марта. Потепление и увеличение геопотенциальных высот изобарических уровней в нижней и средней стратосфере вызвали нарушение зональности в циркуляции и усиление меридионального переноса, что проявилось в формировании высотного барического гребня и в смене направления переноса на восточное в нижней стратосфере (до 100-гПа уровня). Увеличение температуры при потеплении происходило сверху вниз и было связано с продвижением теплого центра в области высотной фронтальной зоны в высокие широты, наблюдаемого при активизациях и смещениях постоянных центров высокого давления в более высокие широты в периоды стратосферных потеплений.

В декабре в стратосферной циркуляции над Томском четко прослеживались два периода: в первой декаде – антициклональный, во второй половине – циклональный. Наблюдаемые высотные барические поля как в первом, так и во втором периодах имели очень высокие барические градиенты и сильно деформированный зональный перенос.

В течение первого периода в тропосфере и нижней стратосфере наблюдался обширный, высокий, теплый, блокирующий антициклон с давлением свыше 1055 гПа с приземным центром над Южным Уралом и мощный, холодный циклон над северо-восточной частью Якутии. В средней стратосфере над антициклоном располагалось холодное ядро арктического циркумполярного вихря. Затем циклон стал расширяться, антициклон был оттеснен на юго-восток, над севером Европы в высотной ложбине сформировался вторичный циклон. В дальнейшем это обширное поле низкого давления внутри себя трансформировалось, но сохранялось.

Во втором периоде поле низкого давления охватило практически всю территорию России и сместилось до Средней Азии, при этом центр над Европейской территорией России обострился, а над Якутией частично заполнился. Наблюдаемая деформация барического поля низкого давления произошла из-за выдвигания и стабилизации в высоких широтах северотихо-

океанского и азорского антициклонов. Северотихоокеанский заблокировал зональный поток над Чукоткой и Аляской, а мощный гребень азорского антициклона распространился до северной части Атлантики, вплоть до Скандинавии. В средней стратосфере в этот период располагалась высотная ложбина циркумполярного вихря, сместившегося в более низкие широты.

Из сравнения результатов анализа данных комплексных измерений и синоптического анализа видно их хорошее совпадение и согласие. А это значит, что предложенный нами комплексный подход к исследованию атмосферных процессов и озоносферы из одной точки наблюдения является правильным и жизнеспособным.

## 5. Заключение

Проведенные комплексные экспериментальные измерения на СЛС в 1996 г. в рамках задачи оптического контроля состояния озоносферы и выполненный анализ результатов этих измерений в феврале и декабре показали следующее:

- в течение этих месяцев наблюдались три случая аномального повышения ОСО (12 и 22–23 февраля с максимальным отклонением от многолетнего среднемесячного до +28 %, 27 декабря – до +44 %) и один случай с аномальным понижением (5 декабря – до –39 %), которые однозначно были связаны с аналогичными периодами в ходе ОСО и хорошо выделяются через усреднение по 6 и 20 дням;

- наблюдаемые аномалии в ходе ОСО очень хорошо связываются с эволюцией циркуляционно-синоптических процессов, обусловленных мигрирующими длинными планетарными волнами, торможение которых блокирующими высокими антициклонами вызывает значительное нарушение зональности циркуляции и усиление меридионального переноса, что приводит к интенсивному адвективному переносу воздушных масс и озона соответственно;

- в наблюдаемых аномалиях, кроме значительного адвективного изменения содержания озона в нижней стратосфере, в средней стратосфере может происходить изменение содержания за счет развитых вертикальных токов, вызванных обострением высотных барических образований;

- замечено, что с положительными аномалиями в ОСО связано необычное высотное распределение концентрации двуокиси азота, когда за 2–4 дня до наблюдения максимального ОСО происходит резкое разовое возрастание в нижней стратосфере и верхней тропосфере к концу дня содержания двуокиси азота; предположено, что данный эффект является следствием выноса арктического воздуха и фотохимического восстановления двуокиси азота из соединений-резервуаров;

- не обнаружено явной связи между поведением озона и двуокисью азота при отрицательных аномалиях в ОСО;

- замечено, что в зимнее время в общем виде ход ОС  $\text{NO}_2$  совпадает с ходом ОСО, но с меньшей амплитудой колебания, что свидетельствует о большом влиянии зимой на ОС  $\text{NO}_2$  динамики атмосферы;

- анализ данных комплексных измерений озона, двуокиси азота и температуры, выполненный с целью интерпретации атмосферных процессов, в сравнении с результатами синоптического анализа подтвердил потенциальную способность комплексного подхода в исследованиях озоносферы из одной точки.

В заключение авторы хотели бы искренне поблагодарить своих коллег из ЛДСА за техническую помощь в проведении измерений и обработки данных, Т.М. Рассказчикову за предоставленные синоптические карты и Г.М. Крученицкого за аэрологическую информацию.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№96-05-64282).

1. Зуев В. В. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 9. С. 1171–1183.
2. Мари́чев В. Н. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 8. С. 1175–1179.
3. Долгий С. И., Зуев В. В., Мари́чев В. Н. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 5. С. 609–626.
4. Зуев В. В., Смирнов С. В. // Известия АН. Сер. ФАО. 1996. Т. 32. № 4. С. 573–575.
5. Бондаренко С. Л., Правдин В. Л., Смирнов С. В. // Приборы и техника эксперимента. 1996. № 4. С. 167.
6. Зуев В. В., Бурлаков В. Д., Ельников А. В., Смирнов С. В. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 12. С. 1599–1603.
7. Мари́чев В. Н., Зуев В. В., Гришаев М. В., Смирнов С. В. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 12. С. 1604–1608.

8. Перов С. П., Хргиан А. Х. Современные проблемы атмосферного озона. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 288 с.
9. Брасье Г., Соломон С. Аэрономия средней атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 413 с.
10. Атмосфера: Справочник. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 510 с.
11. Бекорюков В. И., Захаров Г. Р., Куколева А. А., Фиолетов В. Э. // *Метеорология и гидрология*. 1990. № 12. С. 103–105.
12. Petzoldt K., Naujokat B., Neugeboren K. // *Geophysical Research Letters*. 1994. V. 21. N 13. P. 1203–1206.
13. Бекорюков В. И., Бугаева И. В., Захаров Г. Р. и др. // *Метеорология и гидрология*. 1995. № 7. С. 40–47.
14. Milch P., Laštovička J. // *Annales Geophysicae*. 1996. N 14. P. 744–752.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
30 мая 1997 г.

V. V. Zuev, S. V. Smirnov, V. N. Marichev, M. V. Grishaev. **Results of Complex Experiment on Optical Monitoring of the Ozonosphere at Siberian Lidars Station.**

The results of analysis of the measurements obtained at the Siberian Lidar Station of Institute of Atmospheric Optics, SB RAS in Tomsk (56,5°N, 85°E) in February and December of 1996, are presented. The complex measurements include lidar measurements of the ozone vertical distribution (VDO) and temperature (VDT) in the stratosphere, spectrophotometric measurements of the total ozone column (TOC), and vertical distribution and total column of nitrogen dioxide (VD/TC NO<sub>2</sub>). The analysis of observable abnormal fluctuations of the ozone has shown their good connection with the behaviour of circular-synoptical processes of planetary scale. It is noted, that the unusual VD NO<sub>2</sub> is connected with positive anomalies in TOC; obvious connection between behaviours of ozone and NO<sub>2</sub> at negative anomalies in TOC is not found. The comparizon the results obtained with synoptical ones has confirmed the potentiality of such complex investigation of the ozonosphere from one observational point.