

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В ВЕРХНЕЙ СТРАТОСФЕРЕ МЕТОДАМИ СПЕКТРОСКОПИИ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

С. В. Соломонов*, Е. П. Кропоткина, А. Н. Игнатъев,
А. Н. Лукин, С. Б. Розанов

Представлены новые результаты исследований изменений озона в верхней стратосфере над Москвой в наиболее чувствительном к техногенным воздействиям слое на высоте 40 км. Проанализированы изменения концентрации озона и её связь с другими параметрами атмосферы в холодные периоды 2008–2009 гг. и 2009–2010 гг. Показано, что в верхней стратосфере существуют области с пониженным содержанием озона в полярном вихре, а также вне полярного вихря в воздухе с повышенной температурой. Обнаруженные явления приводят к деформации профилей вертикального распределения озона, к заметному смещению максимума относительного содержания озона в более низкие слои стратосферы.

Ключевые слова: миллиметровые волны, озон, верхняя стратосфера.

1. Актуальность исследований атмосферного озона и его изменений определяется ключевой ролью этой газовой составляющей в фотохимии, динамике, тепловом режиме атмосферы, в защите биосферы от губительного УФ-Б излучения Солнца [1, 2].

Особый интерес представляют наблюдения озона в верхней стратосфере, на высотах около 40 км, где расположены слои озоносферы, наиболее чувствительные к техногенным воздействиям [1, 2].

Наблюдения долговременных эффектов техногенного воздействия на озоносферу происходят на фоне сезонных и более короткопериодных изменений содержания озона, создающих “шум”, который маскирует эти долговременные эффекты. Для выделения информации о долговременном изменении озона на высоте вблизи 40 км важно знать

ФИАН, 119991, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: Solomon@sci.lebedev.ru.

причины и закономерности короткопериодных изменений в озоносфере, которые достигают наиболее значительных величин в холодные полугодия [3].

Другой стороной проблемы изменений озона в верхней стратосфере является необходимость иметь данные о влиянии тепловых, динамических и фотохимических процессов на озоносферу с целью прогнозирования её эволюции в условиях климатических изменений. Особенностью верхней стратосферы на указанных высотах является то, что в отличие от более низких слоёв, где время жизни озона велико и его содержание управляется динамикой атмосферы, на содержание озона по мере увеличения высоты всё большее влияние оказывают фотохимические процессы [2].

Наблюдения на миллиметровых (ММ) волнах позволяют, в отличие от ряда других методов, получать надёжную информацию о содержании озона в широком диапазоне высот стратосферы и мезосферы, включая и верхнюю стратосферу [3, 4].

В данной работе представлены новые результаты наблюдений озона над Москвой на ММ волнах на высотах верхней стратосферы в холодные периоды 2008–2009 гг. и 2009–2010 гг., рассмотрены эффекты изменений содержания озона под влиянием тепловых и динамических атмосферных процессов.

2. Аппаратура и методы. Многолетние наземные измерения вертикального распределения озона (ВРО) на миллиметровых волнах проводятся в ФИАН, в Москве, с помощью высокочувствительной спектральной аппаратуры [3]. Спектрорадиометром регистрируется вращательная спектральная линия озона с центром на частоте 142.175 ГГц. Контур этой уширенной столкновениями молекул линии чувствителен к высотному распределению молекул озона в стратосфере и мезосфере, что является физической основой решения обратной задачи – восстановления профилей вертикального распределения озона из измеренной спектральной линии [3, 4].

При решении этой обратной задачи использовался алгоритм [4], основанный на применении двух методов – метода Тихонова [5, 6] и метода статистической регуляризации [6, 7], сочетание которых позволило оптимизировать решение задачи восстановления ВРО.

Спектрорадиометр ФИАН для дистанционного зондирования атмосферного озона состоит из малощумящего супергетеродинного приемника, 96-канального анализатора спектра АС-96 с улучшенными характеристиками и персонального компьютера с интерфейсными модулями и программным обеспечением [3]. Однополосная шумовая температура приёмника составляет около 700 К при охлаждении входных каскадов жидким азотом и около 1500 К без охлаждения.

Для восстановления профилей ВРО используются данные о вертикальном распределении температуры и давления из базы данных BADC [9]. Оценки показали [4], что при оптимальных условиях наблюдения, которые реализуются на практике, точность восстановленных профилей озона не хуже 5–7% на высотах 20–50 км. При анализе и интерпретации результатов наблюдений используются данные о полях температуры, давления, потенциальной завихренности [9] на разных высотных уровнях стратосферы.

По основным параметрам (чувствительности, точности восстановления профилей озона) аппаратура ФИАН соответствует мировому уровню инструментов такого типа.

Необходимо отметить хорошее соответствие данных об изменениях озона над Москвой по наблюдениям в ФИАН и из космоса с помощью прибора MLS на спутнике Ауга [10]. Например, различие усреднённых профилей ВРО, полученных в ФИАН и из космоса с помощью прибора MLS в марте 2005 г., не превосходит 7% на высотах 21–51 км. Эти профили отличаются не более, чем на 5% в области высот между 26 и 43 км.

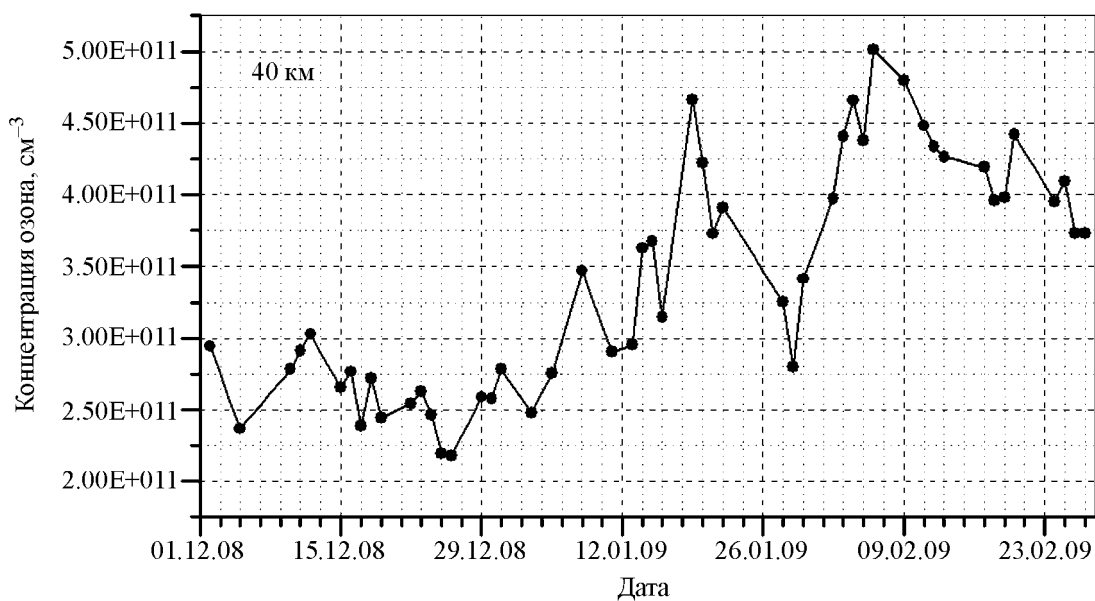


Рис. 1: Концентрация озона на высоте 40 км над Москвой в зимний период 2008 – 2009 гг.

3. *Результаты исследований.* Как следует из наблюдений в ФИАН, содержание озона в верхней стратосфере, также как и в более низких её слоях, испытывает значительные колебания в холодное полугодие, т.е. в период развития планетарных волн и внезапных стратосферных потеплений [2]. В качестве примеров, на рис. 1 и рис. 2 представлены данные о концентрации N_{O_3} озона на высоте 40 км над Москвой в зим-

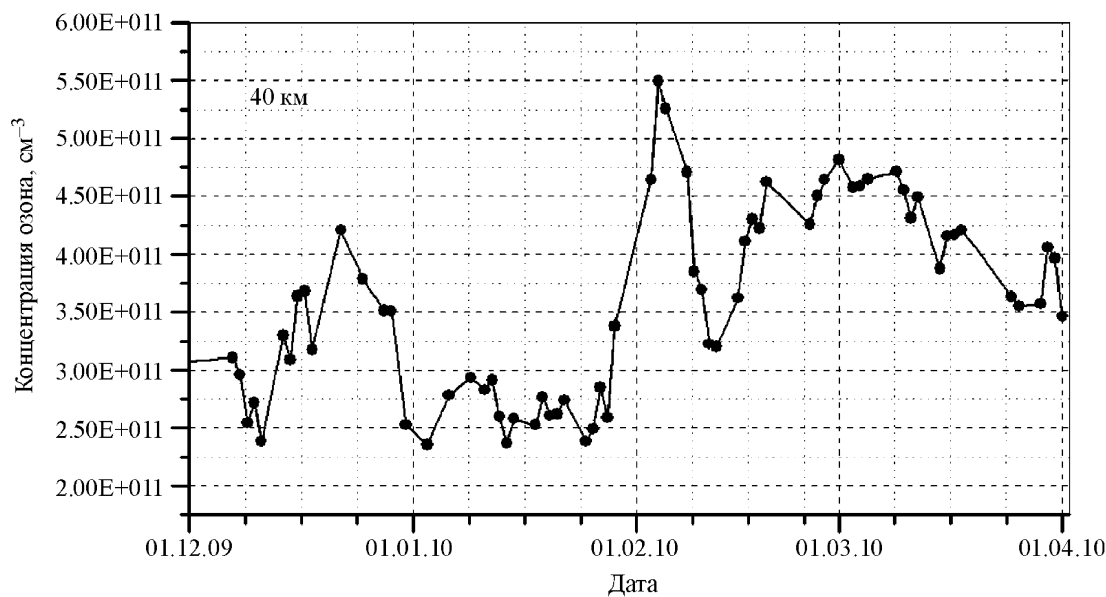


Рис. 2: Концентрация озона на высоте 40 км над Москвой в зимний период 2009 – 2010 гг.

ние периоды 2008–2009 гг. и 2009–2010 гг. Видны значительные, более чем в два раза, изменения N_{O_3} в течение этих периодов.

В 2008–2009 гг. пониженные значения концентрации озона наблюдались в декабре 2008 г. Минимальные концентрации составили примерно $2.2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ (25 и 26 декабря 2008 г.). Повышенные концентрации озона наблюдались в январе и феврале 2009 г. Наибольшие значения N_{O_3} в январе 2009 г. достигли значений $4.7 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ (19 января), а в феврале составили $5.0 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ (6 февраля 2009 г.).

В холодное полугодие 2009–2010 гг. пониженные значения N_{O_3} были зарегистрированы в декабре и январе. В январе 2010 г. они снижались примерно до $2.4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ (3, 14 и 25 января 2010 г.). Повышенные значения N_{O_3} наблюдались в начале февраля 2010 г. они достигли $5.5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ (4 февраля 2010 г.).

Анализ изменчивости озона показал, что на высотах верхней стратосферы содержание озона, вообще говоря, связано и с динамикой атмосферы, и с её тепловым режимом (температурой). Причём корреляционная связь концентрации озона N_{O_3} в верхней стратосфере с температурой T (связь вида “ $N_{O_3} - T$ ”) и связь N_{O_3} с характеризующей динамические процессы потенциальной завихренностью PV (см., например, [8]), т.е. связь вида “ $N_{O_3} - PV$ ”, не является неизменной. Можно выделить периоды, когда преимущественным являлся либо один, либо другой вид связи.

Рассмотрим подробнее изменения N_{Oz} в верхней стратосфере на 40 км, показанные на рис. 2. Связь концентрации озона N_{Oz} на 40 км с температурой T за весь показанный на рис. 2 период 2009–2010 гг. наблюдений характеризовалась отрицательным коэффициентом корреляции $k_{Oz-T} = -0.54 \pm 0.08$. Причём коэффициент корреляции возрастал (по модулю) и становился равным $k_{Oz-T} = -0.78 \pm 0.06$ для периода с 25 января по 1 марта 2010 г., который включал среднезимнее стратосферное потепление.

По-видимому, увеличение по модулю k_{Oz-T} для второй половины рассмотренного холодного периода с 25 января по 1 марта 2010 г. было обусловлено особенностями изменений состояния стратосферы в январе-феврале 2010 г. во время сильного возмущения – внезапного стратосферного потепления, при котором температура испытывала большие изменения. Действительно, 26 января 2010 г. температура воздуха на высоте 40 км над Москвой составила 305 К, что на 80 К превысило значение температуры, зарегистрированной до потепления 29 декабря 2009 г.

Связь концентрации озона с потенциальной завихренностью как для всего холодного периода с 1 ноября 2009 г. по 1 апреля 2010 г., так и для его части с 25 января по 1 марта 2010 г. практически отсутствовала. Соответствующие коэффициенты корреляции для связи “ $N_{Oz} - PV$ ” составили $k_{Oz-PV} = -0.18 \pm 0.11$ и $k_{Oz-PV} = -0.14 \pm 0.12$ (значения PV были взяты из базы данных [9] для близкого к 40 км уровня с потенциальной температурой 1500 К). Поэтому можно сделать вывод, что в рассмотренные периоды преобладала связь содержания озона с тепловыми процессами.

Изменения концентрации озона на высоте 40 км над Москвой в предыдущее холодное полугодие в период с начала декабря 2008 г. до конца февраля 2009 г. характеризовались более выраженной связью вида “ $N_{Oz} - PV$ ”. В то же время связь “ $N_{Oz} - T$ ” была существенно слабее. Коэффициенты корреляции для этих связей в этот период составляли $k_{Oz-PV} = -0.6 \pm 0.1$ и $k_{Oz-T} = -0.25 \pm 0.14$. Пониженным значениям концентрации озона над Москвой в декабре 2008 г. (см. рис. 1) соответствовали повышенные значения потенциальной завихренности: средние значения потенциальной завихренности в этот период составляли около 8000 ед. PV на уровне 1500 К, а максимальные значения превышали 11000 ед. PV , что характерно для воздуха полярного вихря (здесь и ниже значения потенциальной завихренности даны в принятых в литературе единицах PV : 1 единица $PV = 1 \cdot 10^{-6} \text{ К м}^2 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-1}$ [8]).

Подобная отрицательная корреляция концентрации озона с потенциальной завихренностью, характерная и для более низких слоёв стратосферы (см., например, [4]), возникала при появлении над Москвой бедного озоном воздуха полярного вихря, харак-

теризуемого повышенными значениями потенциальной завихренности. Для сравнения приведём значения коэффициентов корреляции для связей “ $N_{O_3} - PV$ ” и “ $N_{O_3} - T$ ” на более низких высотах, например, на 30 км, в этот же период с начала декабря 2008 г. до конца февраля 2009 г. Связь “ $N_{O_3} - PV$ ” на 30 км в этот период характеризовалась отрицательным коэффициентом корреляции $k_{O_3-PV} = -0.89 \pm 0.03$. Большое по модулю значение k_{O_3-PV} свидетельствует о том, что процессы переноса воздушных масс в средней и нижней стратосфере преобладали над фотохимическими процессами, что согласуется с работой [2]. При этом связь “ $N_{O_3} - T$ ” на 30 км характеризовалась положительным коэффициентом корреляции $k_{O_3-T} = 0.63 \pm 0.09$. Эта положительная корреляция озона и температуры вызвана ростом поглощаемой озоном энергии излучения Солнца с увеличением концентрации озона, что также находится в согласии с работой [2].

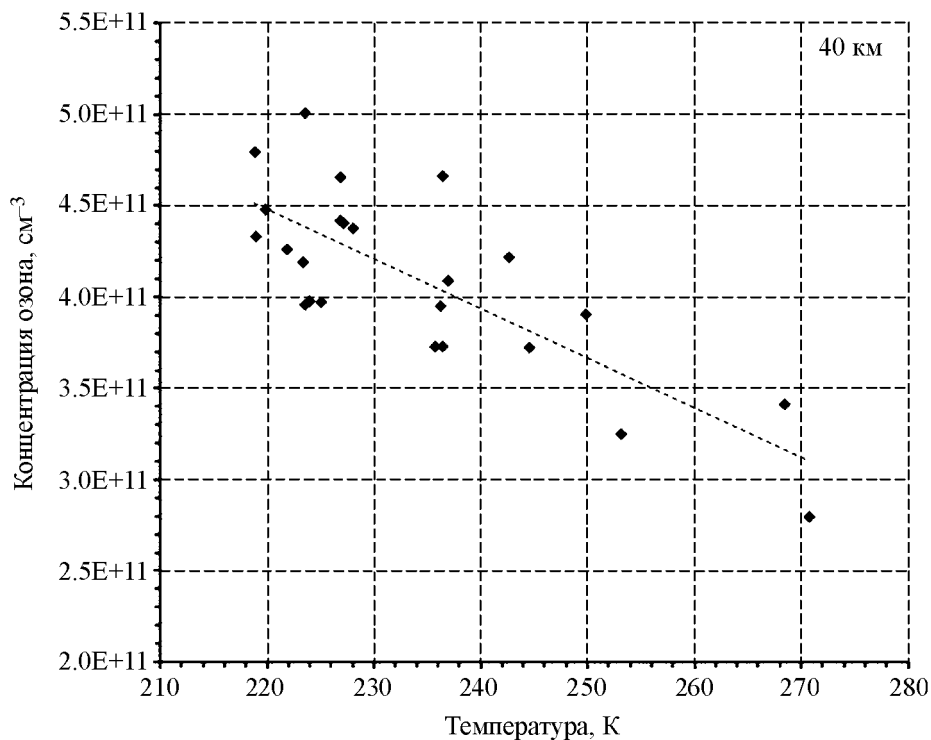


Рис. 3: Связь изменений концентрации озона на высоте 40 км над Москвой с изменениями температуры воздуха на этой же высоте в период с 19 января по 27 февраля 2009 г.

Вместе с тем в рассмотренный зимний период 2008–2009 гг. в верхней стратосфере на высоте 40 км можно выделить отдельные временные интервалы с хорошо выраженной

связью между содержанием озона и температурой. Например, на рис. 3, где нанесены значения N_{O_3} и T в период с 19 января по 27 февраля 2009 г., хорошо видна тенденция к уменьшению концентрации озона с ростом температуры на 40 км.

Таким образом, в зимний период 2008–2009 гг. преобладала связь концентрации озона на высоте 40 км с потенциальной завихренностью, с переносом воздушных масс. Более заметно связь озона с температурным режимом верхней стратосферы проявлялась со второй половины января 2009 г. Именно в этот период возникло сильное стратосферное потепление, сопровождавшееся большим ростом температуры.

Наблюдаемые эффекты снижения содержания озона в верхней стратосфере при повышении температуры могут быть объяснены возрастающей ролью химических реакций в разрушении озона [11] в переносимом в стратосферу над Москвой тёплом воздухе. Увеличение температуры воздуха приводит к росту скорости разрушения озона в химических реакциях [2, 11]. Поэтому в периоды с повышенной температурой воздуха в верхней стратосфере возникает отрицательная корреляция озона и температуры.

Существенно, что зарегистрированные в верхней стратосфере над Москвой области пониженного содержания озона наблюдались также в течение периодов, когда происходило поочерёдное появление воздуха из областей вне вихря с повышенной температурой и воздуха с пониженной или близкой к средней температурами из области вихря. Такая ситуация возникла, например, в период с конца декабря 2009 г. и до начала февраля 2010 г. (см. рис. 2). На рис. 4 представлены данные об озоне (рис. 4(а)), температуре (рис. 4(б)) и потенциальной завихренности (рис. 4(в)) в этот период. Концентрация озона в январе 2010 г. была пониженной до 30% по сравнению с многолетними среднемесячными значениями для января из наблюдений в ФИАН и колебалась в пределах от $2.35 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ до $2.9 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ (за исключением конца этого месяца). При этом влияние полярного вихря на атмосферу над Москвой на высоте 40 км в этом временном интервале наиболее сильно проявлялось 31 декабря 2009 г., затем 3, 11, 12, 13 и 20 января 2010 г. В эти дни происходило увеличение потенциальной завихренности, значения которой (более 9000 ед. PV на уровне 1500 К) 13.01.2010 г. и 20.01.2010 г. существенно (в 5 раз) превысили значения потенциальной завихренности 22.12.2009 г., т.е. в начале представленного на рис. 4 периода. При этом температура воздуха в указанные дни колебалась примерно между 230 К и 245 К (рис. 4(б)).

В промежутках между появлениями воздуха с повышенными значениями потенциальной завихренности в верхней стратосфере над Москвой появлялись воздушные массы с повышенными температурами (260–305 К).

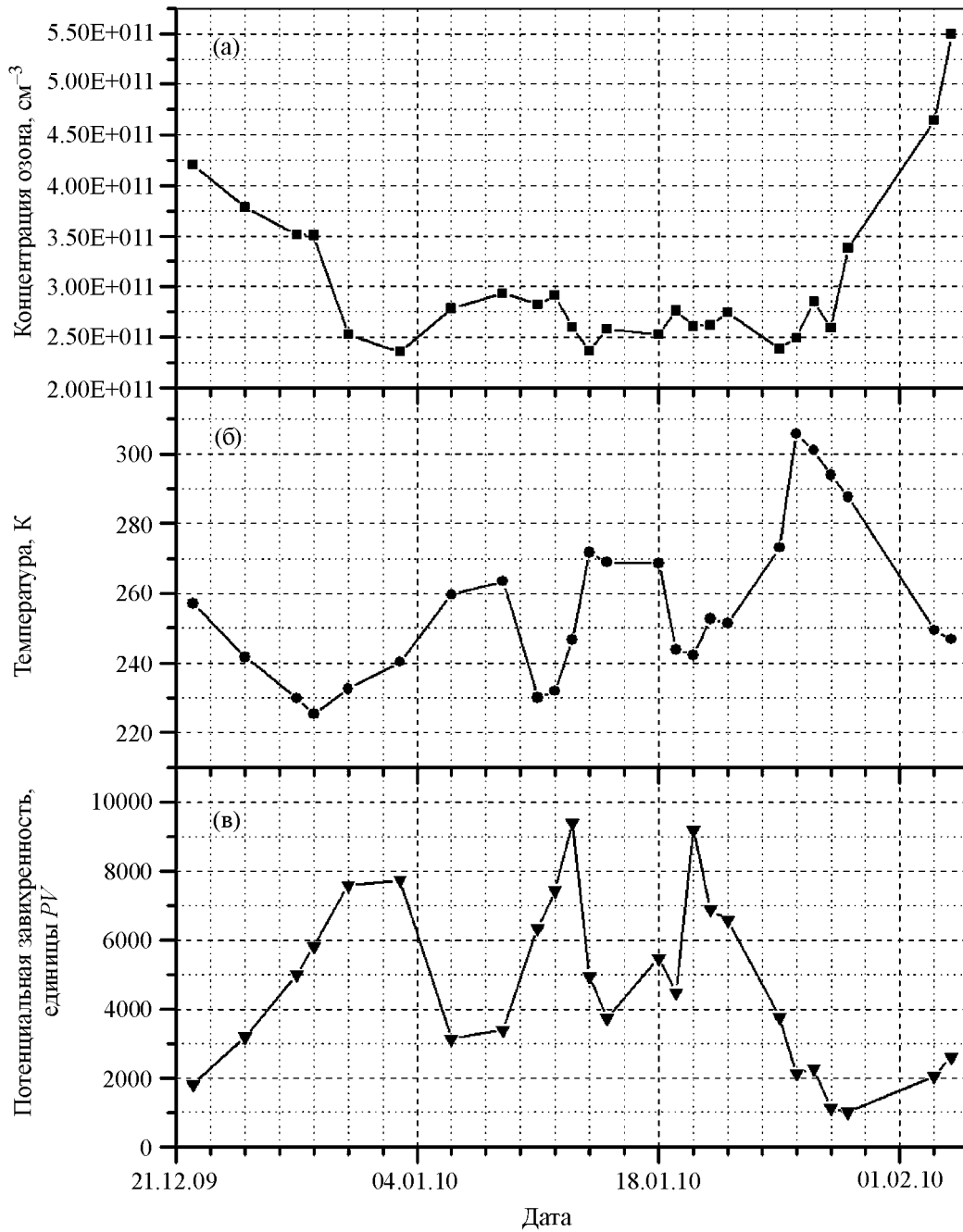


Рис. 4: Концентрация озона по наблюдениям в ФИАН (а) и температура [9] (б) на высоте 40 км, а также потенциальная завихренность на уровне 1500 К [9] над Москвой в период с 22 декабря 2009 г. по 4 февраля 2010 г.

Таким образом, как показано на рассмотренных примерах, пониженные значения содержания озона в верхней стратосфере характерны для двух различных классов явлений. В одном из них понижение содержания озона на высоте 40 км наблюдалось в воздухе с повышенными значениями потенциальной завихренности, характерными для полярного вихря.

В другом классе явлений понижение содержания озона наблюдалось вне полярного вихря в воздухе с повышенной температурой.

Повышенные до $(5.0-5.5) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ значения концентрации озона (см. выше) наблюдались в воздушных массах с пониженной потенциальной завихренностью, близкими к средним значениям температурами и повышенным давлением в области стратосферного антициклона.

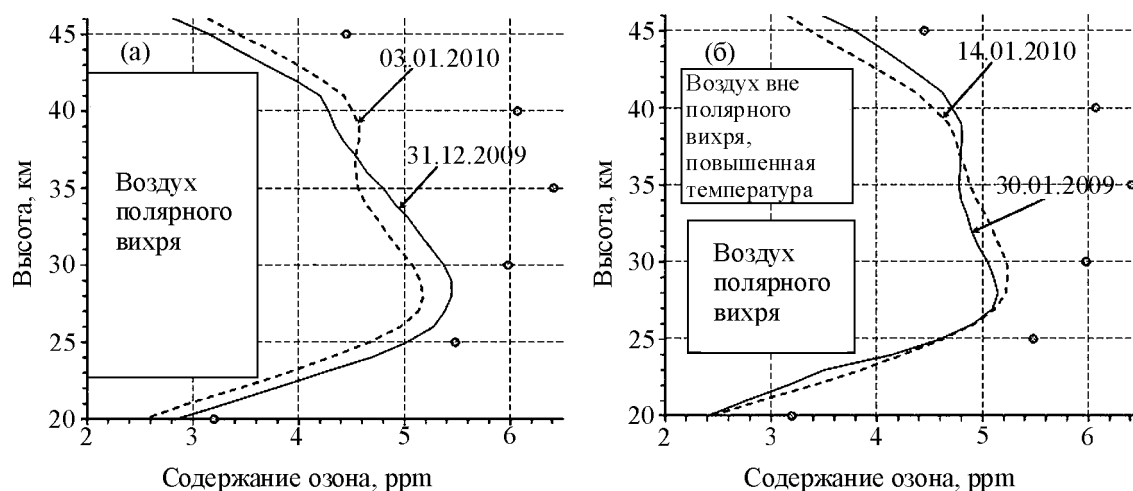


Рис. 5: Примеры профилей вертикального распределения озона с пониженным содержанием в стратосфере над Москвой 31.12.2009 г. и 03.01.2010 г. (а), а также 14.01.2010 г. и 30.01.2010 г. (б).

Описанные выше особенности связей озона с температурой и с динамикой отражаются на профилях вертикального распределения озона. На рис. 5 представлены примеры профилей ВРО (в единицах отношения смеси ppm, или 10^{-6}) с пониженным содержанием озона в стратосфере над Москвой. Кружками отмечены справочные данные из работ [12, 13], взятые для широты Москвы. Профили, представленные на рис. 5(а), зарегистрированы в период, когда верхняя стратосфера и более низкие её слои над Москвой находились в сфере действия полярного вихря. На рис. 5(б) показаны примеры профилей ВРО при отличающихся ситуациях в верхней и средней стратосфере:

воздушные массы в верхней стратосфере над Москвой находились вне вихря в области с повышенной температурой, а более низкие слои стратосферы находились внутри полярного вихря. Видно, что и в этом случае зарегистрированы профили ВРО с пониженным содержанием озона во всей толще стратосферы. Из графиков на рис. 5 видно также, что пониженное содержание озона в верхней стратосфере, вызванное влиянием полярного вихря (рис. 5(а)), так же, как и вызванное повышенной температурой (рис. 5(б)), привело к заметному смещению максимума отношения смеси в более низкие слои стратосферы (примерно на 7 км вниз от максимума на 35 км по данным справочной модели [12]).

4. *Заключение.* Полученные результаты показывают значительную изменчивость содержания озона в верхней стратосфере в холодные полугодия. Обнаружены области пониженного содержания озона, связанные с влиянием полярного вихря, а также с появлением тёплых воздушных масс в верхней стратосфере. Повышенное содержание озона связано с областями повышенного давления. Перенос воздушных масс стратосферы, характеризующихся различной температурой и принадлежащих различным барическим образованиям, приводит к вариациям концентрации озона в верхней стратосфере над пунктом наблюдения. При анализе причин изменений в озоносфере необходимо принимать во внимание связь озона с динамикой и тепловым режимом стратосферы в условиях усиления планетарных волн и возникновения стратосферных потеплений в холодное полугодие.

Поскольку области повышенной температуры в верхней стратосфере, а также холодные воздушные массы полярного вихря, судя по данным [9], могут занимать огромные пространства в стратосфере Северного полушария, то обнаруженные явления значительного понижения озона в этих областях необходимо учитывать при моделировании процессов эволюции озоносферы.

Результаты мониторинга вертикального распределения озона на ММ волнах необходимы для проверки фотохимических моделей атмосферы, а также важны в связи с решением проблемы эволюции озоносферы в условиях изменений теплового режима, динамики атмосферы и климата.

Авторы благодарны проф. В. Н. Сорокину, А. В. Масалову, Е. В. Суворову и В. А. Черепенину за поддержку работы, а также П. Л. Никифорову за помощь в настройке аппаратуры.

Авторы признательны центру British Atmospheric Data Center (BADC) за любезно предоставленные аэрологические данные.

Работа поддержана Программами ОФН РАН “Современные проблемы радиофизики” и “Радиоэлектронные методы в исследовании природной среды и человека”, а также грантами РФФИ № 10-02-05004 и № 10-02-02100.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010. Global Ozone Research and Monitoring Project, Report No. 52 (World Meteorological Organization, Geneva, 2010).
- [2] Г. Брасье, С. Соломон, *Аэрономия средней атмосферы* (Л., Гидрометеиздат, 1987).
- [3] С. В. Соломонов, А. Н. Игнатьев, Е. П. Кропоткина и др., *Приборы и техника эксперимента*, № 2, 138 (2009).
- [4] С. В. Соломонов, К. П. Гайкович, Е. П. Кропоткина и др., *Известия вузов. Радиофизика* **54**(2), 113 (2011).
- [5] А. Н. Тихонов, А. В. Гончарский, В. В. Степанов, А. Г. Ягола, *Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация* (М., Наука, 1983).
- [6] К. Р. Gaikovich, *Inverse Problems in Physical Diagnostics* (New York, NOVA Science Publishers Inc., 2004).
- [7] С. D. Rodgers, *Rev. Geophys. Space Phys.* **14**, 609 (1976).
- [8] С. Appenzeller, J. R. Holton, *J. Geophys. Res.* **102**, N D12, 13555 (1997).
- [9] The British Atmospheric Data Centre (BADC) <http://badc.nerc.ac.uk/data/assim/>
- [10] L. Froidevaux, N. J. Livesey, W. G. Read, et al., *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **44**(5), 1106 (2006).
- [11] T. Flury, K. Hocke, A. Haefele, et al., *J. Geophys. Res.*, **114**, D18302, doi: 10.1029/2009JD011940. (2009).
- [12] G. M. Keating, L. S. Chiou, N. C. Hsu, *Adv. Space Res.* **18**(9/10), 11 (1996).
- [13] *Атлас климатических карт общего содержания и парциального давления озона*. Под ред. Бекорюкова В.И. (М., Моск. отд. Гидрометеиздата, 1990).

Поступила в редакцию 5 октября 2011 г.