

УДК 528.813 : 551.510.534

А. В. Шаврина<sup>1</sup>, М. Крон<sup>2</sup>, В. А. Шеминова<sup>1</sup>, Я. В. Павленко<sup>1</sup>,  
А. А. Велесь<sup>1</sup>, И. И. Синявский<sup>1</sup>, Я. О. Романюк<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

<sup>2</sup> Королівський Метеорологічний інститут, Нідерланди

## ОБЩЕЕ СОДЕРЖАНИЕ И ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ПРОФИЛИ ОЗОНА НАД КИЕВОМ В 2005–2008 гг.

Дослідження загального вмісту озону над Києвом і змін його концентрації з висотою у тропосфері було виконано на основі наземних спостережень з інфрачервоним фур'є-спектрометром в Головній астрономічній обсерваторії Національної академії наук України (ГАО НАНУ) в рамках проекту ESA-NIVR-KNMI № 2907 «OMI validation by ground-based remote sensing: ozone columns and atmospheric profiles» (2005–2008 pp.). Мета проекту — валідація даних моніторингу за загальним змістом озону в атмосфері і атмосферних профілів озону, отриманих з інструментом OMI на борту супутника NASA EOS Aura. Спостереження спектрів поглинання прямого сонячного випромінювання в атмосфері Землі в інфрачервоній області (2–12 мкм) провадились у періоді квітень — жовтень кожного року. Моделювання спектру озонової смуги  $\lambda \approx 9.6$  мкм було виконано за допомогою програми MODTRAN4 і моделі молекулярних смуг, розрахованих нами на основі молекулярної бази даних HITRAN-2004. Як апріорну інформацію для моделювання було використано супутникові вимірювання профілів водяної пари і температури (Aqua-AIRS) та стратосферних профілів озону (Aura-MLS, версія 2.2), кліматологічні профілі озону TEMIS-KNMI і вимірювання поверхневого озону, виконані одночасно з інфрачервоними спостереженнями спектрів в ГАО НАНУ. Стратосферні профілі озону Aura-MLS версії 2.2 дозволяють відновлювати тропосферні профілі озону. Для деяких дат спостережень ми порівняли наші відновлені профілі з тропосферними профілями Aura-TES. Проаналізовано зміни концентрацій озону в тропосфері для двох характерних епізодів — весняного епізоду підвищеного загального вмісту озону і літнього епізоду підвищеного поверхневого вмісту озону. Спостереження за весь період демонструють щоденну фотохімічну змінність концентрацій озону в тропосфері Землі в залежності від висоти Сонця і свідчать про процеси переміщення в тропосфері ввечері і вночі. Чітко простежується динаміка озонового шару, викликана проникненням багатих озоном стратосферних мас повітря у нижчі тропосферні шари, їхнє опускання і дисипація у тропосфері протягом наступних декількох днів. Наша методика може бути використана для будь-яких станцій ІК-спостережень, вона дозволяє отримати характеристики горизонтальної і вертикальної динаміки глобального озонового шару лише з наземних спостережень.

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение озона и его переменности в атмосфере Земли критически важно как для ученых, так и для политиков во всем мире, принимающих решения, а также для широкой общественности. Озоновый слой в стратосфере защищает все живущее на Земле от губительного действия чрезмерной ультрафиолетовой радиации Солнца. Строгий контроль за восстановлением глобального озонового слоя как результата действия Монреальского протокола и поправок к нему по ограничению эмиссий веществ, разрушающих озон, стал предметом большого внимания в науке об атмосфере и в обществе на высоких

уровнях. Однако увеличение концентраций озона в нижней части атмосферы, в тропосфере, где он действует как опасный для здоровья загрязнитель воздуха, а также как важный парниковый газ, вызывает тревогу и растущую обеспокоенность. Тропосферный озон очень токсичен для организмов, дышащих воздухом подобно людям, и вызывает коррозию у листы растений. Этот слой воздуха, которым мы дышим, формируется фотохимическими реакциями газов-предшественников как естественного происхождения (летучие органические соединения, испускаемые деревьями), так и антропогенными источниками (эмиссии отработанных газов моторных двигателей и промышленных предприятий). Наблюдения высоких концентраций поверхностного озона над урбанизованными и

© А. В. ШАВРИНА, М. КРОН, В. А. ШЕМИНОВА,  
Я. В. ПАВЛЕНКО, А. А. ВЕЛЕСЬ, И. И. СИНЯВСКИЙ,  
Я. О. РОМАНЮК, 2010

промышленными регионами являются ясным указанием существенного антропогенного загрязнения воздуха, которым мы дышим.

Для отождествления ключевых процессов в бюджете стратосферного озона с конца 1970-х годов проводится спутниковое зондирование атмосферных содержаний соответствующих малых газовых составляющих. Эти спутниковые наблюдения позволяют определять общее содержание озона и вертикальные профили озона от стратосферы до тропосферы. Здесь наземные наблюдения служат цели подтверждения спутниковых данных путем проверки, а также дополняют спутниковые данные посредством продолжения тропосферных наблюдений к поверхности Земли, где спутниковые приборы имеют уменьшенную чувствительность. Это особенно важно для понимания роли локальных и региональных источников и стоков тропосферного озона и его предшественников. Такие наземные наблюдения помогают изучать динамическое поведение загрязнителей воздуха и проверять согласие с моделями, описывающими трансграничный и межконтинентальный перенос загрязнителей. Такие исследования также поддержат развитие национальной и интернациональной политики, направленной на уменьшение предшественников тропосферного озона, и особенно озона на уровне воздуха, которым мы дышим, и уменьшить эффект тропосферного озона, действующего как парниковый газ как в местном, так и региональном масштабах.

В наших предыдущих работах [2, 10] были изложены результаты наших наблюдений и определения общего содержания озона в 2005—2007 гг., а также результаты анализа тропосферных профилей озона над Киевом в 2007 г. В настоящей работе мы подводим итоги всех наших исследований за период 2005—2008 гг.

### НАЗЕМНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ОЗОНА С ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРОМ

Наземные наблюдения инфракрасных спектров поглощения прямого солнечного излучения в земной атмосфере выполнены в Главной астрономической обсерватории Национальной академии наук Украины на фурье-спектромет-

ре (модель «Infracum FT 801»), который был модернизирован для задачи контроля загрязненности атмосферы [1]. Рабочий спектральный диапазон фурье-спектрометра составляет 2—12 мкм ( $800—5000\text{ см}^{-1}$ ) с максимальным спектральным разрешением приблизительно  $1.0\text{ см}^{-1}$ . Программное обеспечение для первичной обработки зарегистрированных спектров позволяет в ходе наблюдения усреднять от 2 до 99 индивидуальных спектров. Мы усредняли по 4 отдельных спектра, что занимает 2—3 мин, как рекомендовано разработчиками спектрометра, чтобы избежать эффектов атмосферной нестабильности на более длинных экспозициях. Усредненные спектры имеют отношения амплитуды сигнала к шуму  $S/N = 150...200$ , что более чем достаточно.

### СПУТНИКОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ОЗОНА

Голландско-финский прибор OMI (Ozone Monitoring Instrument) [6, 7] установлен на борту спутника NASA Aura серии EOS (Earth Observing System) [9], запущенного в июле 2004 г. OMI — компактный спектрометр, работающий в УФ- и видимой области спектра ( $\lambda\lambda = 270...500\text{ нм}$ ), продолжает измерения общего содержания озона по всему земному шару, которые были начаты в 1978 г. прибором NASA TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer). Серия инструментов TOMS работала на спутниках «Nimbus-7» (1978—1993 гг.) и Earth Probe (EP) (1996—2005 гг.). Спектрометр OMI записывает спектры в широкой полосе UVVIS (270—500 нм), измеряя солнечный свет, отраженный и рассеянный атмосферой и поверхностью Земли вблизи точки надир, и обеспечивает ежедневный мониторинг атмосферы всего земного шара с высоким пространственным и спектральным разрешением ( $\Delta\lambda = 0.45\text{ нм}$  в УФ-области спектра и  $0.63\text{ нм}$  в видимой области [6]). Инструмент имеет широкую полосу обзора 2600 км и способен обеспечивать ежедневное глобальное картирование различных малых газовых составляющих, облаков, уровней УФ-радиации и твердых частиц в атмосфере с очень высоким пространственным разрешением  $13 \times 24\text{ км}$  в надире. Данные OMI по общему содержанию озона, использованные в этой работе, были получены с применением

алгоритмов OMI-TOMS [4] и OMI-DOAS [11]. Последний был разработан в Королевском метеорологическом институте Нидерландов (KNMI) и основан на методе дифференциальной оптической спектроскопии (DOAS). Детальный анализ различий и сходства данных по общему содержанию озона OMI-TOMS и OMI-DOAS приведен в работе [5], где были использованы данные новой версии 3 (<http://disc.gsfc.nasa.gov/Aura/OMI/>, <http://avdc.gsfc.nasa.gov> — для данных по станциям проверки).

### МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРОВ И ИХ АНАЛИЗ

Оценки общего содержания озона (OCO) в атмосфере Земли были получены, используя моделирование спектра поглощения в области полосы озона  $\lambda \approx 9.6$  мкм с помощью программы MODTRAN4.3 [3]. Программа вычисляет прошедшее через атмосферу и отраженное от поверхности Земли электромагнитное излучение Солнца в диапазоне частот от 0 до  $50000 \text{ см}^{-1}$ . Она использует двухпараметрическую (температура и давление) модель молекулярных полос поглощения, которая рассчитывается на основе большого количества данных о спектральных линиях, содержащихся в молекулярной базе данных HITRAN (<http://www.cfa.harvard.edu/hitran/>). Для расчета модели полос используются данные для 12 легких молекул ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_4$  и  $\text{HNO}_3$ ) из HITRAN, а для тяжелых молекул — CFC (9 молекул) и  $\text{ClONO}_2$ ,  $\text{HNO}_4$ ,  $\text{CCl}_4$  и  $\text{N}_2\text{O}_5$  используются вычисленные сечения поглощения [3]. Расчеты выполнены в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР) для умеренного спектрального разрешения ( $2 \text{ см}^{-1}$ ), которое почти точно соответствует нашим наблюдаемым спектрам. Параметры модели полосы были рассчитаны нами на основе базы данных HITRAN-2004 [8].

Для построения входных (*a-priori*) атмосферных профилей озона, температуры и водяного пара использовались: 1) измерения концентраций поверхностного озона ультрафиолетовым озонметром TEI-49i, размещенным рядом с фурье-спектрометром; 2) данные AIRS ([\[gsfc.nasa.gov/Data/AIRS/\]\(http://avdc.gsfc.nasa.gov/Data/AIRS/\)\), установленного на борту спутника NASA EOS-Aqua; 3\) данные микроволнового прибора MLS \(<http://avdc.gsfc.nasa.gov/Data/Aura/>\) на борту спутника NASA EOS-Aura. Для анализа наших наблюдений 2007—2008 гг. мы использовали MLS-данные версии v2.2, более высокая точность которой позволила нам разработать новую методику анализа: мы теперь варьируем во входном профиле озона лишь тропосферную часть, а стратосферный профиль шкалируем множителем в пределах указанной точности данных MLS \(2—5 % в области давлений 216—0.02 гПа\) без модификации его общей формы. Детали методики определения концентраций озона описаны в работах \[2, 10\]. Как результат анализа из лучшего совмещения модельных и наблюдаемых спектров полосы озона мы получаем вертикальные тропосферные профили озона, общее количество озона в тропосфере и общее количество озона в атмосфере.](http://avdc.</a></p>
</div>
<div data-bbox=)

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты сравнения общего содержания озона по данным OMI (коллекция 2) и наших оценок, основанных на наблюдениях с фурье-спектрометром и моделировании с программой MODTRAN, за 2005—2007 гг. уже представлены в работах [2, 10]. Летом 2008 г. появилась новая серия данных Aura-OMI (коллекция 3). На рис. 1 мы показываем сравнение наших результатов за 2007 г. с данными Aura-OMI коллекции 2, полученными по алгоритмам OMI-TOMS и OMI-DOAS. Данные OMI коллекции 2 по общему содержанию озона за 2007 г. в среднем очень близки к оценкам по наземным наблюдениям, хотя и имеют существенные систематические стандартные отклонения. Средние различия спутниковых и наземных оценок составляют  $-0.33$  ЕД и  $-4.32$  ЕД для OMI-DOAS и OMI-TOMS коллекции 2 соответственно, а стандартные отклонения составляют 10.66 ЕД и 10.88 ЕД. Данные OMI коллекции 3 для 2007 г. в среднем не так близки к оценкам по наземным наблюдениям, хотя имеют меньшие стандартные отклонения. Средние различия спутниковых и наземных оценок составляют  $-6.63$  ЕД и  $-7.54$  ЕД для OMI-DOAS и OMI-TOMS соответственно, со

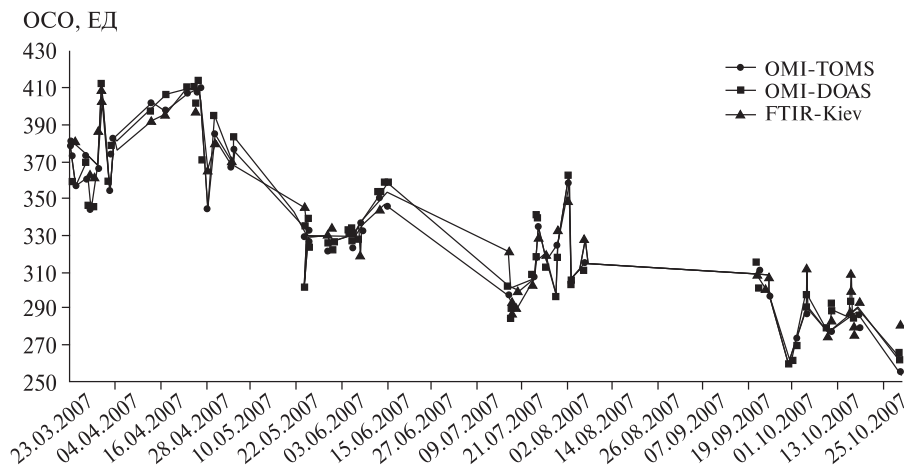


Рис. 1. Значения общего содержания озона (ЕД) в 2007 г.: 1 — по данным спутника Агас-ОМІ-ТОМS, 2 — ОМІ-DOAS, 3 — по данным фурье-спектрометра

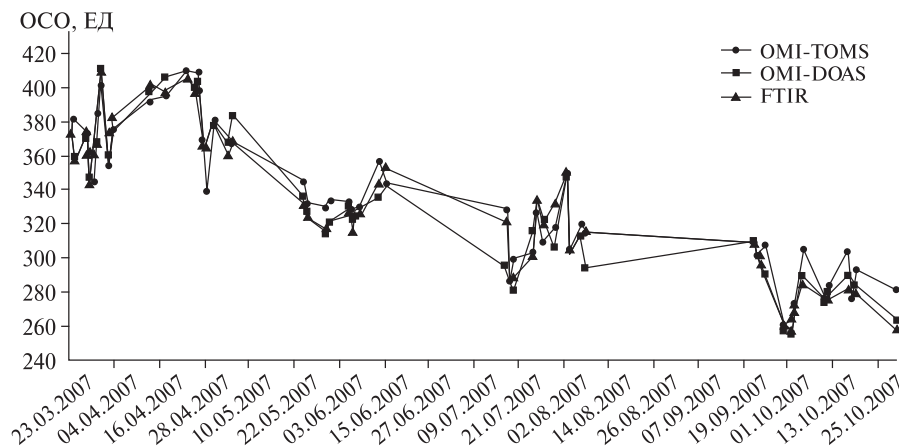


Рис. 2. То же, что на рис. 1, с обновленными в 2008 г. данными ОМІ за 2007 г.

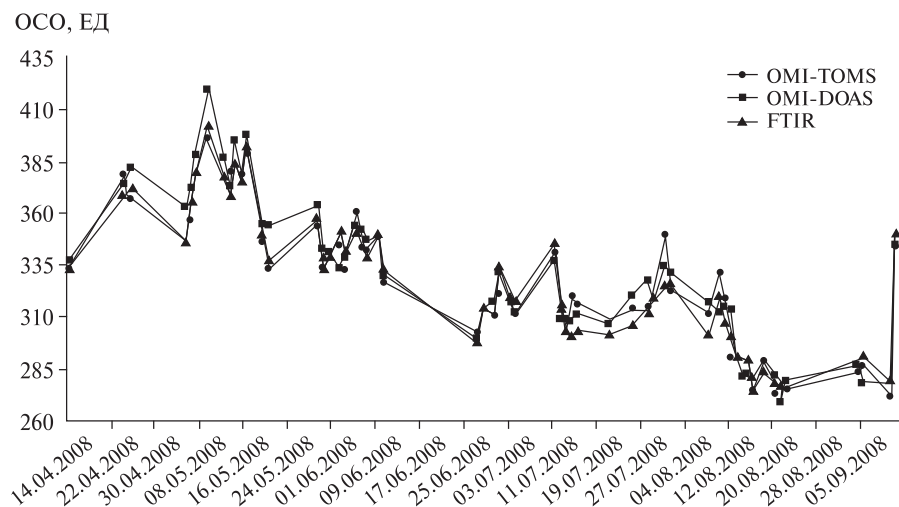


Рис. 3. То же, что на рис. 1, по данным 2008 г.

## Сравнение оценок общего содержания озона по спутниковым данным OMI-TOMS и OMI-DOAS и наземным наблюдениям FTIR

Параметры	OMI-TOMS – FTIR / OMI-DOAS – FTIR				
	2005 г.	2006 г.	2007 г. (OMI, 2007 г.)	2007 г. (OMI, 2008 г.)	2008 г.
Среднее различие, ЕД	3.19/8.45	–0.25/0.37	–4.32/–0.33	–7.54/–6.63	–0.29/2.85
Медианное различие, ЕД	1.45/10.70	0.115/0.16	–2.98/–0.05	–7.59/–4.09	0.57/3.51
Стандартное отклонение, ЕД	13.41/10.50	5.37/8.77	10.88/10.66	9.00/9.06	7.52/8.88
Число общих измерений	28/28	62/62	61/62	52/54	57/57
Наклон	0.68/0.94	1.03/1.07	0.91/0.88	0.95/0.93	0.93/0.88
Коэффициент корреляции	0.60/0.76	0.98/0.96	0.97/0.98	0.98/0.98	0.97/0.97
Квадрат коэффициента корреляции	0.36/0.57	0.97/0.92	0.94/0.95	0.95/0.95	0.95/0.94

стандартными отклонениями 9.06 ЕД и 9.00 ЕД. Новые OMI-данные коллекции 3 существенно уменьшили стандартные отклонения при проверочном сравнении с наземными данными, но существенно увеличили сдвиг.

Рис. 3 представляет сравнение наших наземных оценок общего содержания озона со спутниковыми данными OMI-DOAS и OMI-TOMS для 2008 г. Средние различия между спутниковыми и наземными наблюдениями составляют –0.29 ЕД и 2.85 ЕД для OMI-TOMS и OMI-DOAS соответственно со стандартными отклонениями 7.52 ЕД и 8.88 ЕД. Коэффициент корреляции составляет 0.97 в обоих случаях. В таблице мы сравниваем наши результаты с данными OMI за весь период наблюдений 2005–2008 гг. Видно, что полученная точность удовлетворяет требованиям валидации (3.0 % [4]).

Больше деталей можно найти в упомянутых ранее публикациях.

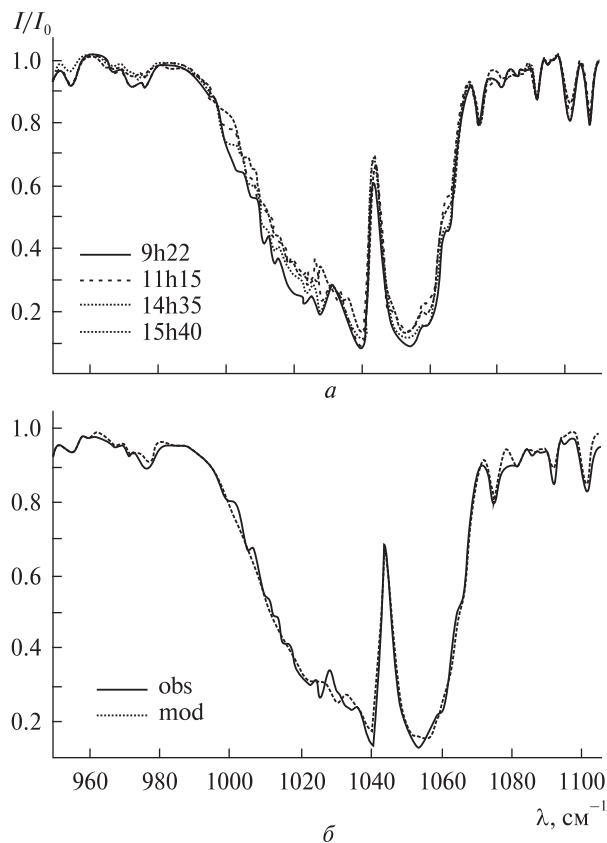
## ТРОПОСФЕРНЫЕ ПРОФИЛИ ОЗОНА

В работе [2] мы рассмотрели изменение тропосферных профилей озона для выбранных эпизодов 2007 г., каждый из которых демонстрировал различные характерные озоновые ситуации. Два отдельных весенних эпизода показали повышенное общее и тропосферное содержание озона, один из которых вероятно представляет эпизод стратосферной интрузии, т.е. вторжение стратосферных масс с более высокой концентрацией озона в тропосферу. Летний эпизод продемонстрировал повышенное содержание приземного

озона, вероятно вследствие фотохимического производства озона, и последующий осенний эпизод показал намного более низкое содержание озона над Киевом (260.2 ЕД), что близко к верхнему пределу для так называемой «озоновой дыры» (220 ЕД). В этой работе мы внимательно проанализировали изменения дневных профилей озона для нескольких дней этих эпизодов и убедились, что наблюдения в апреле 2007 г. свидетельствуют о динамике озона, обусловленной вторжением стратосферного озона в тропосферные слои 23 апреля, рассеивании и опускании его в последующие дни (рис. 2, 3).

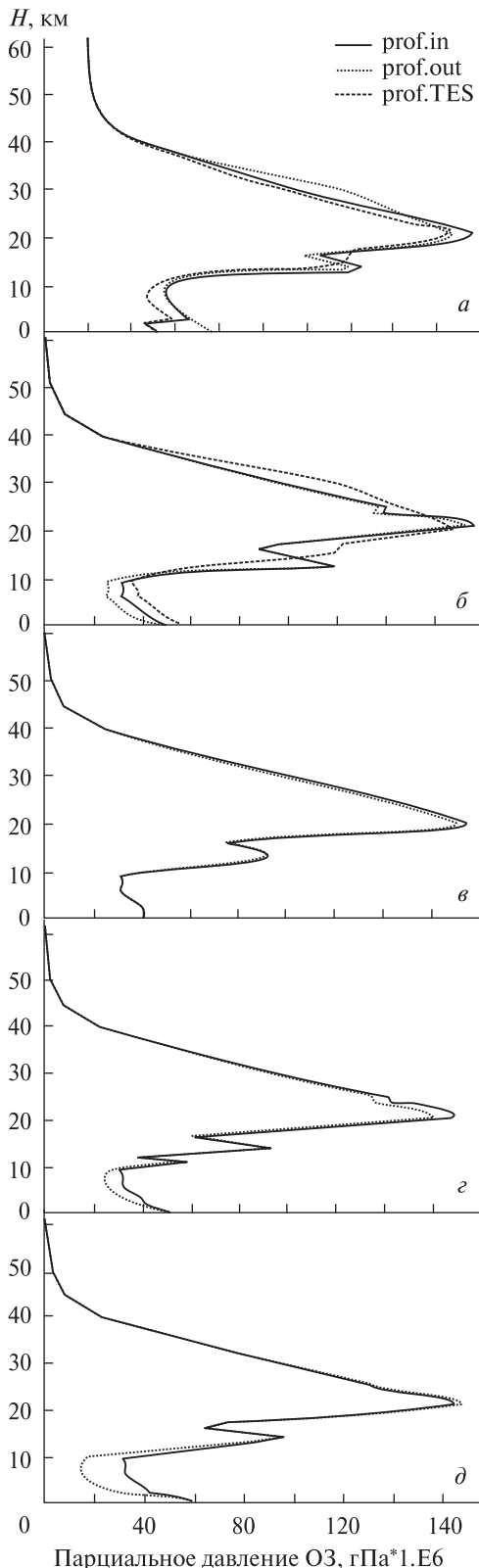
На рис. 4, а мы показываем спектры, полученные в течение дня 23 апреля 2007 г., а на рис. 4, б — модельный спектр, который лучше всего совмещается с наблюдаемым для момента 11 ч 15 мин местного времени. В этот день величины общего содержания озона и содержания озона в тропосфере насчитывали по нашим оценкам 411 ЕД и 48 ЕД [2], обе величины очень высоки. Отметим, что самая высокая величина общего содержания озона в 2007 г. над Киевом по спутниковым данным OMI была 22 апреля (448 ЕД).

Рис. 5 показывает восстановленные вертикальные профили атмосферного озона для моментов наблюдений с максимальной высотой Солнца в период 23–28 апреля 2007 г. Рис. 5 обнаруживает сильные изменения содержания озона с высотой, но не раскрывает сложные детали процесса интрузии. На рис. 6, где показаны все записанные профили, ясно виден процесс интрузии богатого озоном стратосферного

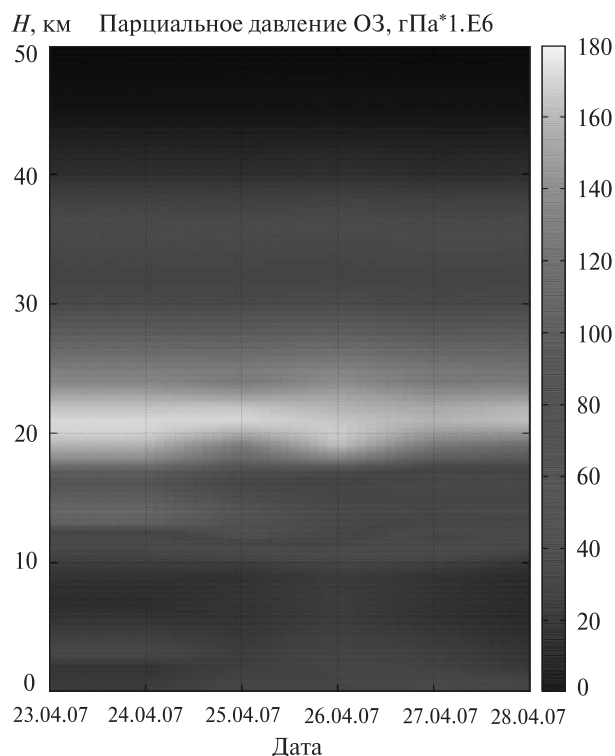


**Рис. 4.** *a* — наблюдаемые в течение дня 23 апреля 2007 г. спектры, время наблюдения указано в левом углу, *б* — пример лучшего совмещения модельного спектра с наблюдаемым для 11 ч 15 мин

воздуха в тропосфере, его опускание в отрезок времени 23—26 апреля и дальнейшую диссипацию и опускание почти к поверхности в течение 26—28 апреля. В последние дни, 27—28 апреля, содержание поверхностного озона составило 60 млрд, что характерно для летнего эпизода фотохимического производства озона. Заметим, что высокий уровень деталей, представленных



**Рис. 5.** Восстановленные профили озона для наблюдений в дни, когда произошла стратосферная интрузия (вторжение стратосферных масс воздуха, богатых озоном, в более низкие тропосферные слои), при максимальной высоте Солнца наблюдений в даты 23 (*a*), 25 (*б*), 26 (*в*), 27 (*г*) и 28 апреля (*д*) 2007 г. Сплошная линия — входной для моделирования профиль  $O_3$ , пунктирная — результат моделирования (восстановленный профиль), штриховая линия — профиль TES

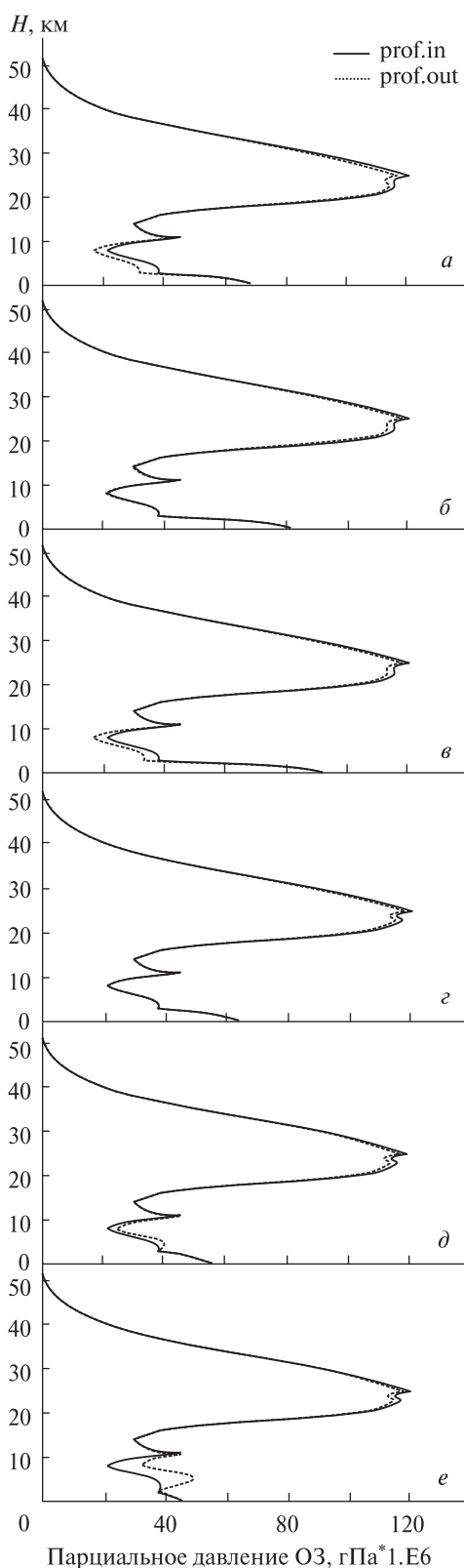


**Рис. 6.** Эпизод весенней стратосферной интрузии (вторжение стратосферных масс воздуха, богатых озоном, в более низкие тропосферные слои) 23–28 апреля 2007 г. Видна интрузия стратосферного озона в тропосферу, его опускание 23–26 апреля и дальнейшая диссипация и опускание в поверхностный слой 26–28 апреля

на этом недельном отображении, демонстрирует временное и вертикальное пространственное разрешение и высокую точность нашего наземного метода, которая может быть достигнута на основе долговременных наблюдений. Мы полагаем, что дневные профили озона, полученные из наблюдений с фурье-спектрометром, ясно раскрывают сложную динамику озонового слоя, вызванную интрузией богатого озоном стратосферного воздуха в более низкие по высоте тропосферные слои 23 апреля и его опускание и диссипацию в ходе нескольких последующих дней.

Рис. 7 показывает восстановленные профили атмосферного озона для 18 июля 2007 г. по на-

**Рис. 7.** Атмосферные профили озона для 18 июля 2007 г.: *а* — 13 ч 35 мин, *б* — 14 ч 52 мин, *в* — 16 ч 10 мин, *г* — 17 ч 10 мин, *д* — 18 ч 15 мин, *е* — 19 ч 27 мин местного времени. Линии профилей те же, что на рис. 5



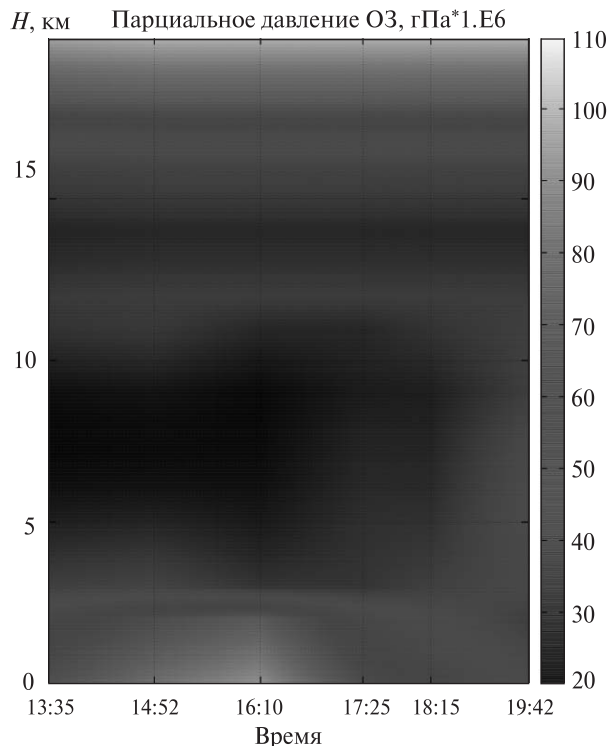
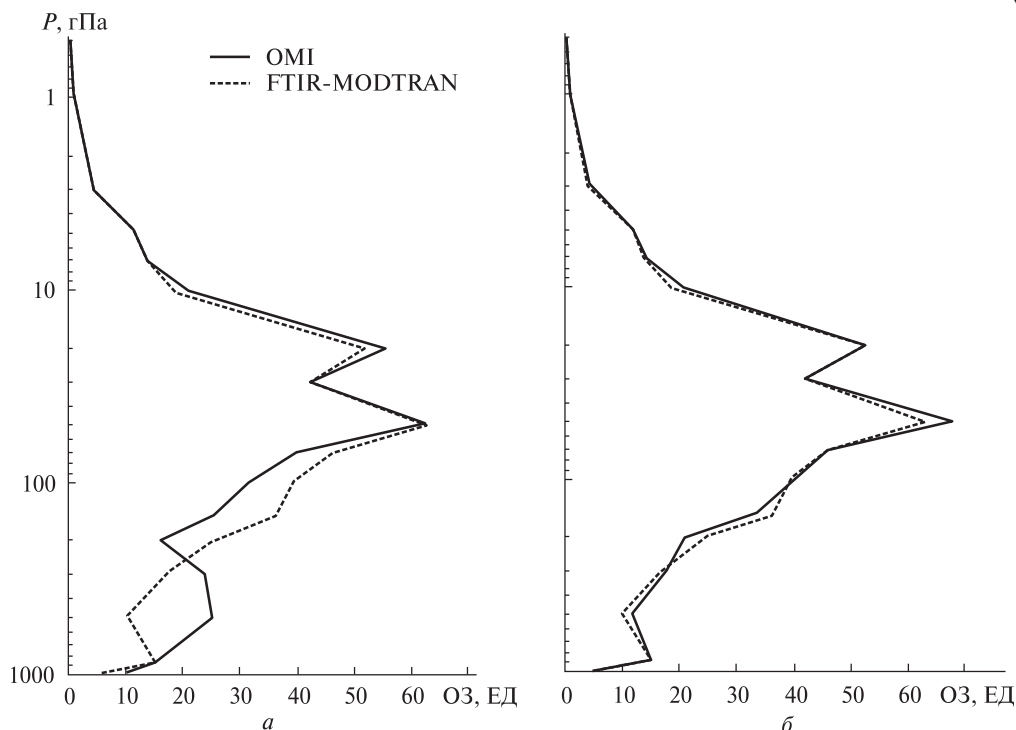


Рис. 8. Эпизод фотохимического производства озона в приповерхностных слоях загрязненной городской атмосферы 18 июля 2007 г. (время указано на нижней шкале)

блюдениям в 13 ч 35 мин, 14 ч 52 мин, 16 ч 10 мин, 17 ч 10 мин, 18 ч 15 мин и 19 ч 27 мин местного времени. Повышенные содержания озона в нижней тропосфере, близкой к поверхности, высокие значения поверхностных концентраций озона (см. таблицу) и их дневная динамика типичны для летних эпизодов высоких концентраций озона в тропосфере вследствие фотохимических процессов. Заметим, что в этот день общее содержание озона довольно низко (291.5 ЕД).

Рис. 8 показывает один день (18 июля 2007 г.) в нашем летнем эпизоде, выбранном по непрерывной регистрации поверхностного озона и большого ряда данных наблюдений с фурье-

Рис. 9. Сравнение наших восстановленных с помощью моделирования атмосферных профилей озона по наблюдениям с фурье-спектрометром (FTIR) для 15 ч 40 мин 23 апреля 2007 г. с профилями OMI (ОМОЗР): а — профиль OMI для Киева по данным ОМОЗР 2008 г., усредненный по 8×8° широты и долготы данных ОМОЗР; б — данные ОМОЗР версии конца 2009 г. для Киева (station overpass data, <http://avdc.gsfc.nasa.gov/?site=2002384453&id=79>). Шкала содержаний озона выражена в единицах ЕД для столбцов каждого слоя 18-слойной атмосферы аналогично данным ОМОЗР





спектрометром. Он раскрывает фотохимическое производство озона в поверхностных слоях загрязненной городской атмосферы. Отметим, что высокий уровень деталей, представленных в этот отдельный день, обнаруживает вертикальное разрешение и точность нашего метода, основанного на наземных наблюдениях, которая может быть достигнута при наблюдениях в течении одного дня.

Мы можем видеть утреннее уменьшение концентрации озона вследствие реакций с  $\text{NO}_x$  и довольно высокие концентрации озона позже днем как результат его фотохимического производства.

В 2008 г. появились также данные Aura-OMI по вертикальным атмосферным профилям озона, OMO3PR, которые мы смогли сравнить с восстановленными нами профилями. На рис. 9 мы показываем сравнение нашего профиля для 23 апреля, 15 ч 40 мин местного времени с профилем OMO3PR над Киевом, соответствующим 15 ч 04 мин местного времени по данным OMI 2008 г. (рис. 9, а) и 2010 г. (рис. 9, б). Рис. 9, а показывает большие расхождения в тропосферной части профилей, в то время как профиль новой версии 2010 г. довольно хорошо согласуется с нашим профилем. Напомним, что наши профили озона содержат в нижнем слое измерения поверхностного озона в ГАО НАНУ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы получили большой ряд оценок общего содержания озона из наземных наблюдений с инфракрасным фурье-спектрометром за 2005—2008 гг. Наши оценки общего содержания озона хорошо согласуются со спутниковыми данными Aura-OMI по содержанию озона. Различия находятся в диапазоне нескольких процентов, что удовлетворяет требованиям валидации. Выполнен анализ наших восстановленных профилей озона для двух репрезентативных случаев динамики тропосферного озона: весеннего эпизода повышенного общего содержания озона и летнего эпизода фотохимического производства озона.

Отмечен осенний эпизод низкого содержания стратосферного озона. Рис. 5—8 демонстрируют специфические особенности весеннего эпизода

стратосферной интрузии и одного дня летнего эпизода повышенной концентрации поверхностного озона, показывающего дневную динамику тропосферного озона вследствие фотохимических процессов.

Количественное сравнение наших восстановленных профилей с данными Aura-OMI версии 2008 г. указывает на некоторые существенные различия профилей озона для тропосферы. Новые данные OMI версии 2010 г. довольно хорошо согласуются с нашим профилем (рис. 9). Заметим, что лидарные или самолетные измерения озона на разной высоте над Киевом не проводились.

*Авторы благодарны администрациям веб-страниц AVDC, Aura-MLS, Aura-TES и Aqua-AIRS за обеспечение необходимых спутниковых данных по зондированию атмосферы. Работа была частично поддержана грантом НТЦУ (2005—2007 гг.) и космическим агентством Украины (2007—2008 гг.).*

1. Ежеская Т. Б., Власов А. М., Библиков А. В. Инфракрасный Фурье-спектрометр «Infralum FT-801» // Наука Производству. — 2001. — № 12. — С. 38—41.
2. Шаврина А. В., Павленко Я. В., Велесь А. А. и др. Общее содержание озона в тропосфере и тропосферные профили озона над Киевом в 2007 году // Космічна наука і технологія. — 2008. — **14**, № 5. — С. 85—94.
3. Bernstein L. S., Berk A., Acharya P. K., et al. Very Narrow Band Model Calculations of Atmospheric Fluxes and Cooling Rates // J. Atmospheric Sci. — 1996. — **53**. — P. 2887—2904.
4. Bhartia P. K., Wellemeyer C. TOMS-V8 total O3 algorithm, in OMI Algorithm // Theoretical Basis Document. Vol. II. OMI Ozone Products, ATBD-OMI-02 / Ed. by P. K. Bhartia. — 2002. — P. 15—31. — NASA Goddard Space Flight Cent., Greenbelt, Md. (Available at [http://eospsso.gsfc.nasa.gov/eos\\_homepage/for\\_scientists/atbd/index.php](http://eospsso.gsfc.nasa.gov/eos_homepage/for_scientists/atbd/index.php))
5. Kroon M., Veefkind J. P., Sneep M., et al. Comparing OMI-TOMS and OMI-DOAS total ozone column data // J. Geophys. Res. — 2008. — **113**. — D16S28, doi:10.1029/2007JD008798.
6. Levelt P. F., van den Oord G. H. J., Dobber M. R., et al. The Ozone Monitoring Instrument // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. — 2006. — **44** (5). — P. 1093—1101.
7. Levelt P. F., Hilsenrath E., Leppelmeier G. W., et al. Science objectives of the Ozone Monitoring Instrument // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. — 2006. — **44** (5). — P. 1199—1208.

8. Rothman L. S., Jasquart D., Barbe A., et al. The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* — 2005. — **96**. — P. 139–204.
9. Schoeberl M. R., Douglass A. R., Hilsenrath E., et al. Overview of the EOS Aura Mission // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* — 2006. — **44** (5). — P. 1066–1074.
10. Shavrina A. V., Pavlenko Ya. V., Veles A., et al. Ozone columns obtained by ground-based remote sensing in Kiev for Aura Ozone Measuring Instrument validation // *J. Geophys. Res.* — 2007. — **112**. — D24S45, doi:10.1029/2007JD008787.
11. Veeffkind J. P., de Haan J. F., Brinksma E. J., et al. Total ozone from the Ozone Monitoring Instrument (OMI) using the DOAS technique // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* — 2006. — **44**. — P. 1239–1244. — doi:10.1109/TGRS.2006.871204.

*Надійшла до редакції 15.01.10*

*A. V. Shavrina, M. Kroon, V. A. Sheminova, Ya. V. Pavlenko, A. A. Veles, I. Sinyavskiy, Ya. O. Romanyuk*

#### TOTAL COLUMNS AND VERTICAL PROFILES OF OZONE ABOVE KYIV IN 2005–2008

The total ozone columns above Kyiv and variations of ozone concentrations in the troposphere at different altitudes above Kyiv were studied using ground-based Fourier Transform InfraRed (FTIR) spectrometric observations performed on a routine basis at the Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine (MAO NASU). The study was carried out within the framework of the international ESA-NIVR-KNMI project no. 2907 «OMI validation by ground-based remote sensing: ozone columns and atmospheric profiles» during 2005–2008. The infrared FTIR spectral observations of direct solar radiation in the wavelength range of 2 to 12 microns as transmitted through the Earth's

atmosphere were performed every year from April to October. The aim of the project was the validation of data on the total ozone columns and vertical ozone profiles which were obtained with the Ozone Monitoring Instrument (OMI) aboard the NASA EOS-Aura scientific satellite. The simulation of the ozone spectral band shape near 9.6 microns was performed with the MODTRAN code and the molecular band model based on the HITRAN-2004 molecular database. The a priori information for the spectral simulation consisted of water vapor and temperature profiles from the NASA Aqua-AIRS satellite instrument, stratospheric ozone profiles from the NASA EOS-Aura-MLS satellite instrument, TEMIS-KNMI climatological ozone profiles and surface ozone measurements for the specific times of infrared spectral observations. New precise Aura-MLS stratospheric ozone profiles with accuracies better than 2 % as compared to ozone sondes allowed us to retrieve tropospheric ozone profiles. For some observational days, tropospheric ozone profiles as observed by the NASA-Aura-TES satellite instrument were available and these were compared with our retrieved profiles for the purpose of validation. The tropospheric ozone variability was analyzed for two typical episodes: the spring episode of enhanced total ozone columns and the summer episode of enhanced surface ozone concentrations. Continuous automated observations from April to October demonstrate daily photochemical variability of the tropospheric ozone depending on the solar zenith angle and reveal mixing processes occurring during the night. The high vertical and temporal resolution of our observations enables us to reveal clearly the intricate dynamics of the ozone layer which is caused by the penetration of the stratospheric ozone rich air into lower tropospheric layers, by its sinking and dissipation into the troposphere over the course of the following few days. Our procedure can in principle be used for any FTIR observational stations, since it allows one to make a better characterization for the horizontal and vertical dynamics of the ozone layer all over the world from ground-based observations alone.