

СПЕКТРОСКОПИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 551.501.793, 551.510.53

# Методика дифференциальной спектроскопии DOAS в задаче определения общего содержания озона из измерений наземного ультрафиолетового спектрометра УФОС

Д.В. Ионов<sup>1</sup>, В.И. Привалов<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет  
198504, г. Санкт-Петербург, Петергоф, ул. Ульяновская, 1

<sup>2</sup>Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова  
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7

Поступила в редакцию 7.09.2021 г.

Рассмотрен первый опыт применения методики дифференциальной спектроскопии DOAS в интерпретации результатов измерений наземного ультрафиолетового озонного спектрометра УФОС для определения общего содержания озона (ОСО). Приведены примеры спектров, зарегистрированных УФОС и аналогичной по характеристикам спектральной аппаратурой в ходе зенитных наблюдений. С использованием DOAS выполнены тестовые расчеты ОСО по результатам измерений УФОС на ст. Воейково в течение нескольких дней. Полученные значения ОСО сопоставлены с данными независимых наземных и спутниковых измерений. Предварительные результаты определения ОСО показывают их систематическое расхождение с независимыми данными, которое может быть устранено при более тщательной адаптации алгоритма DOAS к условиям задачи и характеристикам прибора УФОС.

*Ключевые слова:* общее содержание озона, УФОС, DOAS; total ozone content, UFOS, DOAS.

## Введение

Наземный мониторинг состояния озонного слоя над территорией России осуществляется по наблюдениям специализированной измерительной сети Росгидромета, оснащенной фильтровыми озонметрами М-124 [1]. Сеть насчитывает около трех десятков станций, а продолжительность рядов данных об общем содержании озона (ОСО) составляет уже около 50 лет. Достоверность данных обеспечивается использованием единой сетевой методики наблюдений и постоянным контролем шкалы измерений на основе регулярных калибровок по данным эталонного спектрофотометра Добсона. Методика измерений ОСО с помощью озонметров М-124, разработанная в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (ГГО), позволяет проводить наблюдения при малой высоте солнца и при наличии облачности [2, 3].

В начале 2000-х гг. было начато переоснащение российской озонметрической сети современной автоматизированной аппаратурой. Устаревший и снятый с производства озонметр М-124 был заменен ультрафиолетовым озонным спектрометром УФОС, предназначенным для комплексных измерений спек-

трального состава УФ-радиации и ОСО [4]. Специалистами ГГО была разработана методика расчета ОСО при автоматизированной регистрации прибором УФОС спектрального состава проходящего из зенита УФ-излучения в условиях ясного или облачного неба [4, 5].

Наземная спектрометрия рассеянного УФ- и видимого солнечного излучения, проходящего из зенита, используется для мониторинга ОСО в различных регионах земного шара и в разнообразных погодных условиях. В рамках международной сети NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change, <http://www.ndacc.org>) уже несколько десятилетий функционирует сегмент, состоящий из более чем 35 сертифицированных наземных приборов. Ведущая роль в нем принадлежит сети станций, оснащенных аппаратурой SAOZ (Système d'Analyse par Observation Zénithale [6]). SAOZ была разработана в конце 1980-х гг.; она представляет собой дифракционный спектрометр с многоканальным фотоприемником излучения типа ПЗС (прибор с зарядовой связью), измеряющий рассеянное из зенита УФ- и видимое солнечное излучение. Для высокоточных и всепогодных автоматизированных измерений ОСО используются результаты наблюдений на восходе и заходе солнца, в сумерки. Анализ спектров рассеянного излучения, зарегистрированных SAOZ, и определение ОСО выполняются методом дифференциального поглощения DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy [7]).

\* Дмитрий Викторович Ионов (ionov@troll.phys.spbu.ru); Вячеслав Иванович Привалов (reshal@peterlink.ru).

С 2004 г. в Санкт-Петербурге в НИИ Физики СПбГУ (Петродворец) также осуществляется мониторинг содержания  $\text{NO}_2$  и озона в атмосфере на основе зенитных измерений рассеянного видимого и УФ-излучения методом DOAS [8, 9]. В настоящей работе рассмотрена применимость аналогичного подхода к определению ОСО по результатам измерений УФОС.

## 1. Аппаратура и методика интерпретации измерений

### 1.1. Ультрафиолетовый озонный спектрометр УФОС

Спектрометр УФОС предназначен для автоматизированных измерений спектрального состава УФ-радиации и определения ОСО в атмосфере [4]. В зенитной модификации прибор имеет два независимых оптических канала, обеспечивающих прием рассеянного солнечного излучения из зенита неба в угле зрения  $1,5^\circ$  («зенит») и суммарного излучения из небесной полусферы в угле зрения  $180^\circ$  («полусфера»). С помощью оптоволоконного световода входящий световой поток направляется на входную щель полихроматора с дифракционной решеткой и многоэлементным фотоприемником типа ПЗС из 3600 элементов. УФОС позволяет регистрировать спектр излучения в УФ-области  $\sim 280\text{--}420$  нм со спектральным разрешением  $\sim 1$  нм. В зависимости от уровня освещенности время регистрации единичного спектра (экспозиция) составляет от 0,05 до 2 с. Управление спектрометром и обработка результатов измерений осуществляется специальным программным обеспечением UFOS с пользовательским интерфейсом на базе операционной системы Windows, установленным на персональный компьютер.

Прибор УФОС был разработан для переоснащения озонметрической сети Росгидромета, основой которой несколько десятилетий являлись фильтровые озонметры М-124 [4]. Методика определения ОСО из результатов измерений М-124 [2, 3] позволяет проводить наблюдения при малой высоте солнца над горизонтом (выше  $5^\circ$ ) и облачном небе, что существенно увеличивает объем получаемых данных, особенно для высокоширотных станций. В основе алгоритма расчета ОСО лежит дифференциальный подход, использующий отношение уровней УФ-излучения, зарегистрированных на двух длинах волн (или в двух спектральных интервалах), которые характеризуются существенно разными коэффициентами поглощения озона ( $\sim 310$  и  $330$  нм). Измерения озонметром М-124 осуществляются вручную и состоят из серии последовательных наблюдений как по прямому солнечному свету, так и по рассеянному свету, приходящему из зенита в условиях ясного или облачного неба. Для интерпретации зенитных измерений используется эмпирически найденная устойчивая связь между прямым и рассеянным из зенита солнечным излучением в условиях ясного неба, параметризуемая в резуль-

тате совместных измерений с эталонным прибором (спектрофотометр Добсона). При зенитных измерениях в присутствии облачности в расчет ОСО вносятся дополнительные поправки, определяемые на основе визуальных наблюдений оператора за состоянием неба (цвет и однородность облачности в зените).

Алгоритм определения ОСО из измерений УФОС в основном аналогичен методике, разработанной для озонметра М-124. Однако автоматизированные измерения УФОС не предполагают визуальных наблюдений за состоянием неба, поэтому в работе этого прибора задействован инструментальный способ введения поправок на облачность [4, 5]. Влияние облачности оценивается в УФ-области спектра  $330\text{--}350$  нм, лежащей вне зоны интенсивного поглощения озона, с последующей экстраполяцией этой оценки в область определения ОСО ( $310\text{--}330$  нм). В среднем относительная погрешность отдельного измерения ОСО спектрометром УФОС при высоте солнца более  $10^\circ$  составляет менее 7%, а погрешность среднедневных значений не превышает 3% [4].

### 1.2. Спектральный комплекс на основе УФ-спектрометра Ocean Optics

Данный спектральный комплекс предназначен для автоматизированной регистрации рассеянного из зенита солнечного УФ-излучения и сконструирован в СПбГУ на основе коммерческого спектрометра HR4000 фирмы Ocean Optics Inc. (<http://oceanoptics.com>). Основные компоненты комплекса и особенности методики выполняемых с его помощью измерений идентичны используемым при аналогичных наблюдениях в видимой области [9, 10]. УФ-излучение из зенита неба направляется гибким оптоволоконным световодом на входную щель спектрометра с голографической дифракционной решеткой и многоэлементным фотоприемником типа ПЗС из 3648 элементов. На конце входной части световода, фиксируемой вертикально в зенит, установлена линза, ограничивающая угловое поле зрения прибора в пределах  $3^\circ$ . Спектры рассеянного излучения регистрируются в УФ-области  $\sim 280\text{--}420$  нм со спектральным разрешением  $\sim 0,4$  нм. Измеренные спектры суммируются каждые 60 с; в зависимости от условий освещенности время регистрации единичного спектра составляет от 4 мс до 1 мин. Для управления работой спектрометра Ocean Optics и регистрации данных измерений используется программное обеспечение DOASIS (DOAS Intelligent System [11]). Прибор установлен на крыше здания НИИ Физики СПбГУ в Петродворцовом районе Санкт-Петербурга (Петергоф); непрерывные измерения ведутся с 2009 г.

Зарегистрированные спектры рассеянного излучения интерпретируются с использованием традиционной методики DOAS [7] в сочетании с численным моделированием переноса излучения в атмосфере. Алгоритм DOAS реализован средствами программного обеспечения WinDOAS (DOAS Analysis Program

for Windows [12]), разработанного в Бельгийском институте аэронавтики (BIRA-IASB) для обработки методом DOAS данных международной наблюдательной сети NDACC. Детали алгоритма анализа спектров и выбор ключевых параметров алгоритма изложены в [8–10]. В работе [13] подробно описана методика восстановления ОСО из результатов зенитных измерений рассеянного УФ-излучения, используемая на станции наблюдений СПбГУ (раздел «Наземные тесты: определение общего содержания озона из результатов зенитных измерений»). Оперативная спектральная калибровка с определением аппаратной функции спектрометра автоматически осуществляется средствами WinDOAS на основе анализа положений фраунгоферовых линий в интервале 330–390 нм.

Для оценки эффективного содержания озона на трассе распространения солнечного излучения («наклонного содержания») используется участок спектра 330–350 нм. Полученные серии наклонных содержаний (НС), измеренные в интервале зенитных углов солнца (ЗУС) 70–80°, приводятся к вертикальному содержанию озона в соответствии с формулой  $ОСО = НС[ЗУС]/AMF[ЗУС]$ , где  $AMF$  – фактор воздушной массы, рассчитываемый в модели переноса излучения SCIATRAN [14] исходя из заданной априорной информации о состоянии и составе атмосферы (стандартная среднегодовая модель U.S. Standard Atmosphere [15]).

Сопоставлений результатов измерений УФ-спектрометра Ocean Optics с данными наземных эталонных озонметров ранее не проводилось. Сравнение ряда многолетних ежедневных измерений ОСО УФ-спектрометром Ocean Optics (полусумма средних по до- и послеполуденным наблюдениям в интервале ЗУС = 70–80°) в период 2009–2019 гг. с данными околополуденных спутниковых измерений прибора OMI (Ozone Monitoring Experiment [16], спутник AURA) в районе Санкт-Петербурга показывает относительное среднее расхождение на уровне 1,8% при стандартном отклонении от среднего 4,6% (оценка погрешности измерения ОСО прибором OMI составляет ~3% [17]).

## 2. Интерпретация спектров измерений УФОС методом DOAS

### 2.1. Синхронные измерения УФОС и УФ-спектрометром Ocean Optics

Для тестирования возможностей метода DOAS в интерпретации измерений УФОС были выполнены серии одновременных зенитных измерений рассеянного УФ-излучения УФОС и спектрометром Ocean Optics на ст. Воейково (Санкт-Петербург) в течение двух дней – 3 февраля и 13 марта 2015 г. (13 марта измерения УФОС выполнялись недолго, с 08:10 до 08:26 и с 14:11 до 14:26 по местному времени). Тестируемый алгоритм определения ОСО основан на интерпретации спектров рассеянного

из зенита солнечного УФ-излучения, зарегистрированных при существенно разных ЗУС. Примеры таких спектров, синхронно зарегистрированных обоими приборами при относительно высоком (ЗУС = 64,2°) и низком (ЗУС = 84,6°) положениях солнца, представлены на рис. 1.

Спектры при низком солнце зарегистрированы вечером 3 февраля (16:09 по местному времени) в условиях сплошной облачности, при высоком солнце – днем 13 марта (14:11 по местному времени) при безоблачном небе. Поскольку разрядность АЦП ПЗС-приемника спектрометра Ocean Optics выше (14 бит), чем УФОС (12 бит), дискретность отсчетов последнего по шкале интенсивности (в условных единицах) ниже. В длинноволновой части спектров отчетливо выделяются фраунгоферовы линии понижированного кальция на ~393 и ~397 нм. Отличия в общем ходе спектров, зарегистрированных УФОС и УФ-спектрометром Ocean Optics, объясняются, по-видимому, разной спектральной чувствительностью используемых в этих приборах ПЗС-приемников.

Спектральная калибровка и параметры аппаратной функции (спектральное разрешение) обоих приборов контролировались средствами программного обеспечения WinDOAS, используемого при интерпретации измерений спектрометра Ocean Optics. Измеренный спектр автоматически сравнивается с эталонным спектром высокого разрешения с точно вышолненной спектральной калибровкой. В качестве эталона мы использовали спектр прямого солнечного излучения, измеренного с высоким спектральным разрешением (~0,0001 нм) с помощью Фурье-спектрометра в обсерватории Кит-Пик, США, из «солнечного атласа Куруц» (Solar Flux Atlas by Kurucz) [18]. Согласно полученным оценкам спектральное разрешение составило ~0,4 ÷ 0,5 нм для измерений спектрометром Ocean Optics и ~0,7 ÷ 0,8 нм для измерений УФОС. Визуально спектры излучения, зарегистрированные первым прибором, более детализированы, чем результаты измерений УФОС (см. рис. 1).

Для оценки возможностей метода DOAS в определении ОСО из данных зенитных измерений УФОС соответствующий алгоритм был применен для интерпретации спектров, одновременно зарегистрированных УФОС и УФ-спектрометром Ocean Optics на ст. Воейково. В качестве примера на рис. 2 показана дифференциальная оптическая плотность озона, полученная на основе DOAS-анализа зенитных спектров, зарегистрированных вечером 3 февраля (ЗУС = 84,6°, см. рис. 1); в качестве опорного «внеатмосферного» спектра (т.е. соответствующего наиболее высокому положению солнца) был взят спектр, зарегистрированный днем 13 марта (ЗУС = 64,2°, см. рис. 1).

Оценка содержания молекул озона на трассе распространения излучения при регистрации спектра УФОС 3 февраля составила ~5,0 · 10<sup>19</sup> см<sup>-2</sup>. Дополнительное содержание озона в момент регистрации опорного спектра 13 марта было рассчитано

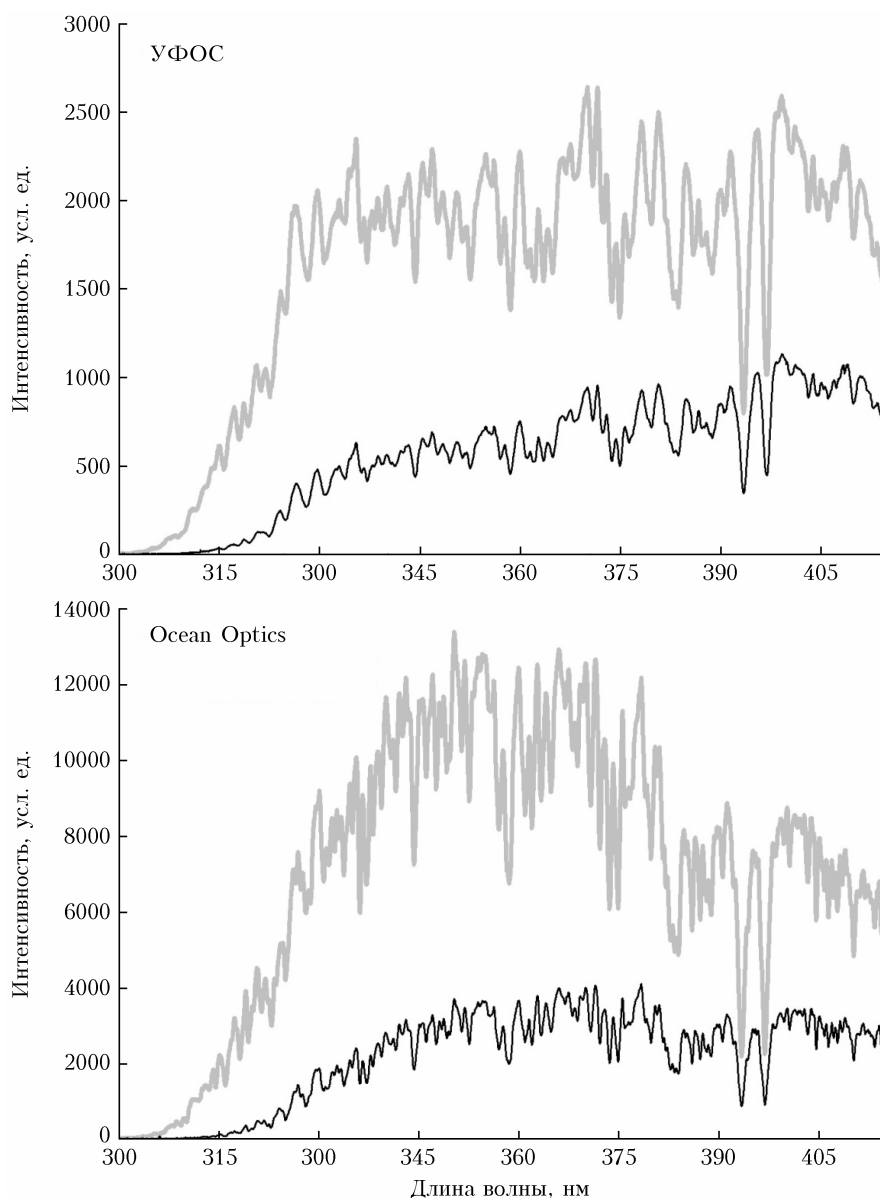


Рис. 1. Одновременные зенитные измерения спектров рассеянного солнечного УФ-излучения, выполненные на ст. Воейково 3 февраля (16:09, ЗУС = 84,6°) (серая кривая) и 13 марта 2015 г. (14:11, ЗУС = 64,2°) (черная кривая)

исходя из независимых данных о величине ОСО в этот день (374 е.Д., или  $374 \cdot 2,69 \cdot 10^{16}$  мол. · см<sup>-2</sup>, по измерениям эталонного спектрофотометра Добсона на ст. Воейково) и модельном значении AMF = 2,51 для ЗУС = 64,2°:  $374 \cdot 2,69 \cdot 10^{16} \times 2,51 \approx 2,5 \cdot 10^{19}$  см<sup>-2</sup>. Следовательно, полное истинное содержание молекул озона на трассе распространения излучения при регистрации спектра 3 февраля в 16:09 составит  $\sim (5,0 + 2,5) \cdot 10^{19} = \sim 7,5 \times 10^{19}$  см<sup>-2</sup>. Используя модельное значение AMF = 7,32 для ЗУС = 84,6°, находим оценку ОСО по измерениям УФОС вечером 3 февраля:  $7,5 \cdot 10^{19} / 7,32 / 2,69 \cdot 10^{16} \approx 380$  е.Д.

Серии значений ОСО, полученные по результатам зенитных измерений УФОС и УФ-спектрометром Ocean Optics 3 февраля, приведены на рис. 3.

Значения ОСО были восстановлены из измерений УФОС двумя способами: с помощью стандартного алгоритма и методом DOAS. Оба подхода дают очень близкие результаты (среднедневное значение ОСО в обоих случаях составило  $\sim 404$  е.Д.). Среднее значение ОСО по измерениям фильтрового озонметра М-124 на той же станции в этот день составило 406 е.Д. (из-за облачной погоды измерения спектрофотометром Добсона 3 февраля не проводились). Данные измерений УФ-спектрометром Ocean Optics охватывают только половину периода наблюдений (прибор начал работать в этот день после полудня). Величина ОСО, полученная по измерениям спектрометра Ocean Optics, заметно превышает значения, восстановленные из измерений УФОС — расхождение достигает  $\sim 20$  е.Д. в вечернее время.

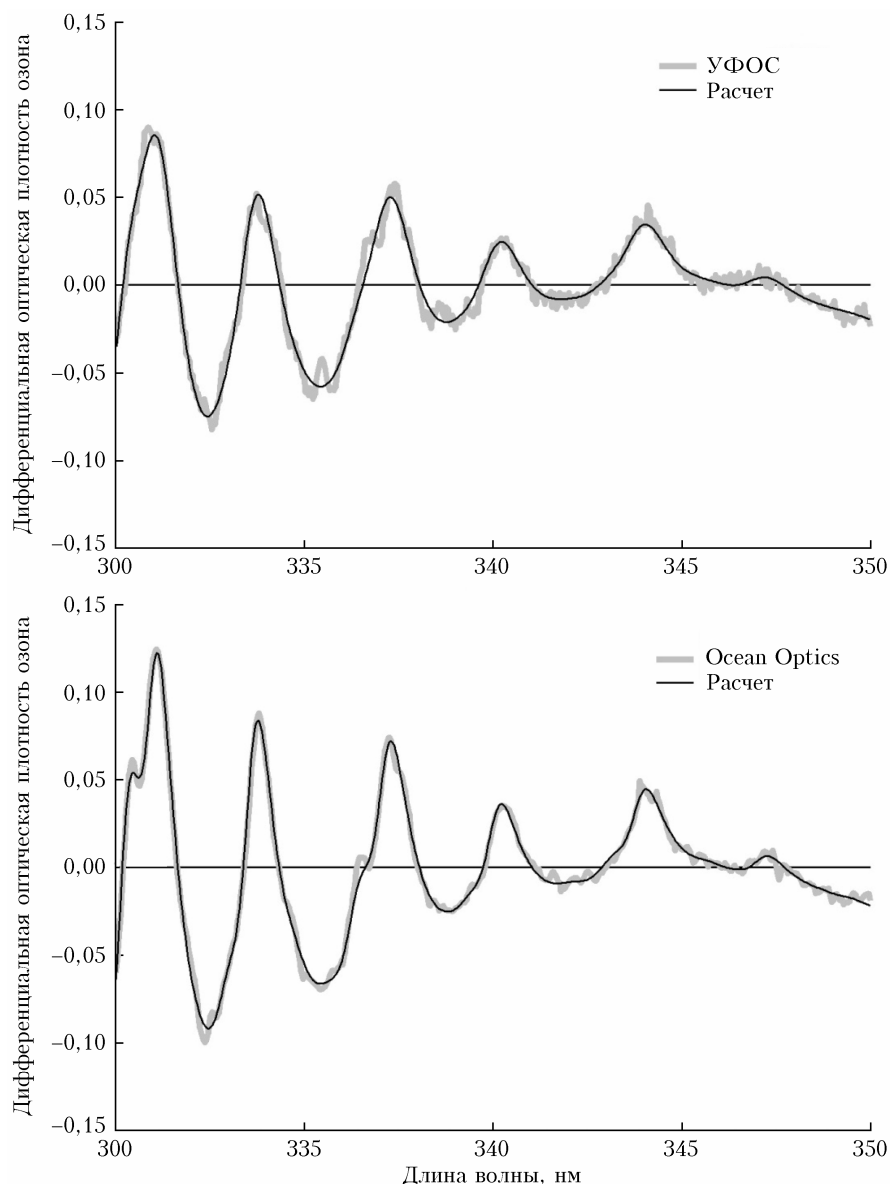


Рис. 2. Дифференциальная оптическая плотность озона, рассчитанная по зенитным измерениям УФОС и УФ-спектрометром Ocean Optics на ст. Воейково 3 февраля 2015 г. (16:09, ЗУС = 84,6°)

Любопытно, что, согласно измерениям спутникового прибора ОМІ, выполнявшимся в этот день вблизи Санкт-Петербурга, ОСО составило 419 и 428 е.Д. в 13:02 и 14:40 соответственно (см. рис. 3). Среднее значение ОСО, полученное из измерений спектрометром Ocean Optics, – 422 е.Д. – хорошо согласуется со средним значением по данным ОМІ (424 е.Д.).

## 2.2. Сравнение результатов измерений УФОС (метод DOAS) с независимыми данными

Алгоритм DOAS, реализованный при интерпретации измерений УФ-спектрометра Ocean Optics и адаптированный для измерений УФОС (см. 2.1) был использован для обработки спектров зенитных

измерений УФОС на ст. Воейково в течение нескольких безоблачных дней в августе 2015 г. – 11, 19, 22, 23 и 24-го. В качестве опорного спектра использовался результат измерений УФОС при максимальной высоте солнца (44,6°), в полдень 11 августа; остаточное содержание озона для выбранного опорного спектра определялось исходя из данных измерений ОСО прибором ОМІ в этот день (273 е.Д.) и составило  $1,2 \cdot 10^{19}$  мол. · см<sup>-2</sup>. Полученные значения ОСО сравнивались с результатами измерений установленного на станции фильтрового озонметра М-124, а также с данными ОМІ. Результаты представлены на рис. 4 (данные УФОС – средние по результатам до- и послеполуденных измерений в интервале ЗУС = 70–80°, данные М-124 – средние по нескольким срокам наблюдений, данные ОМІ – ближайшее к ст. Воейково измерение в этот день).

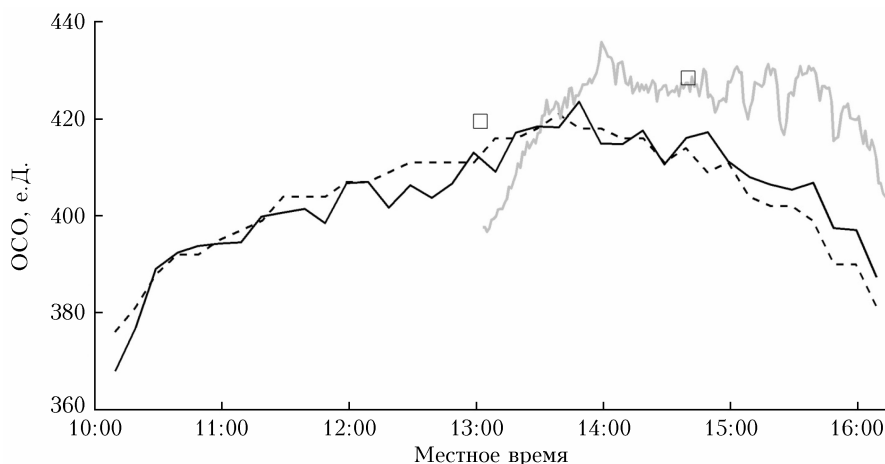


Рис. 3. Величина ОСО, полученная по результатам зенитных измерений УФОС с помощью стандартного алгоритма обработки (штриховая кривая) и обработки по методу DOAS (сплошная черная кривая) и УФ-спектрометром Ocean Optics (DOAS, сплошная серая кривая) на ст. Воейково 3 февраля 2015 г.; квадратами отмечены данные измерений ОСО спутниковым прибором OMI в районе Санкт-Петербурга (13:02 и 14:40)

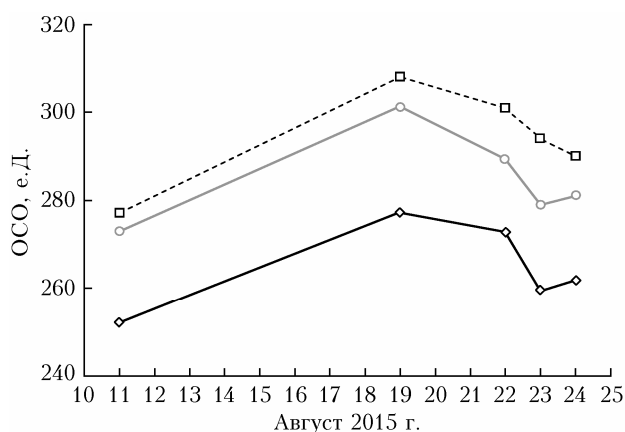


Рис. 4. Величина ОСО, полученная по результатам измерений УФОС методом DOAS (черная кривая), выполненных на ст. Воейково в августе 2015 г., в сравнении с данными измерений наземного озонметра М-124 (штриховая кривая) и ближайших к станции спутниковых измерений OMI (серая кривая)

Все три сравниваемые ряда демонстрируют хорошее согласие в описании временной изменчивости ОСО, но систематически отличаются друг от друга: данные М-124 в среднем на ~8 е.д. превышают измерения OMI, а УФОС – примерно на 20 е.д. ниже измерений OMI. Последний результат – систематическое занижение величины ОСО в измерениях УФОС по сравнению с данными УФ-спектрометра Ocean Optics и OMI – согласуется с полученным ранее для наблюдений 3 февраля (см. 2.1).

### Заключение

В работе рассмотрены возможности применения методики дифференциальной спектроскопии DOAS в задаче определения ОСО из результатов измерений наземного УФ-спектрометра УФОС. Использован опыт многолетних DOAS-измерений ОСО УФ-спектрометром Ocean Optics, имеющим близкие

к УФОС технические характеристики и непрерывно функционирующим на станции СПбГУ в Петергофе начиная с 2009 г. Проведены синхронные зенитные измерения рассеянного УФ-излучения УФОС и спектрометром Ocean Optics на ст. Воейково (Санкт-Петербург). Представлены примеры зарегистрированных спектров и продемонстрированы возможности методики DOAS в спектральной калибровке и в определении параметров спектральной аппаратной функции (спектрального разрешения) рассматриваемых приборов. Используя DOAS, выполнены тестовые расчеты ОСО по результатам измерений УФОС на ст. Воейково в течение нескольких дней. Полученные значения сопоставлены с данными независимых наземных измерений спектрометром Ocean Optics, фильтровым озонметром М-124, спектрофотометром Добсона, а также с данными спутникового прибора OMI.

Методика DOAS обладает некоторыми преимуществами по сравнению с традиционным подходом к определению ОСО из результатов измерений УФОС, разработанным на основе алгоритмов интерпретации результатов наблюдений фильтрового озонметра М-124. В частности, DOAS позволяет автоматически определять и учитывать спектральные характеристики аппаратуры (шкала длин волн и спектральное разрешение), существенно меняющиеся для различных экземпляров УФОС, а также при эксплуатации одного и того же прибора.

Предварительные результаты определения ОСО показывают систематическое расхождение с данными независимых измерений, которое, по-видимому, может быть устранено при более тщательной адаптации алгоритма DOAS к условиям задачи и характеристикам прибора УФОС, которая должна включать в себя, в частности, оптимальный выбор рабочего спектрального интервала и ЗУС, регистрацию качественного опорного («внеатмосферного») спектра с точным определением остаточного содержания озона, подбор априорной информации при расчетах фактора воздушной массы (AMF).

В работе использовалось оборудование ресурсного центра СПбГУ «Геомодель».

1. *Гуцин Г.П., Соколенко С.А.* Новый малогабаритный озонометр М-124, предназначенный для измерения суммарного озона. 1987 // Атмосферный озон: сб. тр. VI Всесоюз. симпоз., Ленинград, 15–17 мая 1985 г. С. 49–56.
2. *Ромашкина К.И.* Усовершенствованная методика градуировки озонометра М-83 по свету от зенита неба // Тр. ГГО. 1984. Вып. 472. С. 74–82.
3. *Шаламянский А.М., Ромашкина К.И., Игнатенко В.М.* Усовершенствование методики измерений ОСО по свету от зенита неба // Тр. ГГО. 2002. Вып. 552. С. 102–109.
4. *Соломатникова А.А.* Метод автоматизированных измерений ультрафиолетовой радиации и общего содержания озона спектрометром УФОС на сети Росгидромета: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2010. 100 с.
5. *Соломатникова А.А.* Расчет общего содержания озона при автоматизированных измерениях по свету от зенита ясного и облачного неба // Тр. ГГО. 2009. Вып. 560. С. 102–109.
6. *Pommerehne J.-P., Goutail F.* O<sub>3</sub> and NO<sub>2</sub> ground-based measurements by visible spectrometry during arctic winter and spring 1988 // Geophys. Res. Lett. 1988. V. 15. P. 891–894.
7. *Platt U., Stutz J.* Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS), Principles and Applications. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. 598 p.
8. *Поберовский А.В., Шашкин А.В., Ионов Д.В., Тимофеев Ю.М.* Вариации содержания NO<sub>2</sub> в районе Санкт-Петербурга по наземным и спутниковым измерениям рассеянного солнечного излучения // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2007. Т. 43, № 4. С. 112–120.
9. *Ионов Д.В., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В.* Спектроскопические измерения содержания O<sub>3</sub> и NO<sub>2</sub> в атмосфере: коррекция наземного метода и результаты сопоставления с данными спутниковых измерений // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 8. С. 704–710; *Ionov D.V., Timofeyev Yu.M., Poberovskii A.V.* Spectroscopic measurements of O<sub>3</sub> and NO<sub>2</sub> atmospheric content: Correction of ground-based method and comparison with satellite data // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 6. P. 526–532.
10. *Ионов Д.В., Поберовский А.В., Ионов В.В.* Дистанционные спектроскопические измерения содержания NO<sub>2</sub> в городском воздухе (на примере Санкт-Петербурга) // Журн. прикл. спектроскоп. 2017. Т. 84, № 1. С. 127–131.
11. *Kraus S.G.* DOASIS: A Framework Design for DOAS. Germany: Shaker Verlag GmbH, 2006. 182 p.
12. *Fayt C., van Roozendaal M.* WinDOAS 2.1 Software user manual. Brussels: Belgian Institute for Space Aeronomy, 2001. URL: <http://uv-vis.aeronomie.be/software> (last access: 6.08.2021).
13. *Доброленский Ю.С., Ионов Д.В., Кораблев О.И., Федорова А.А., Жеребцов Е.А., Шаталов А.Е., Поберовский А.В.* Наземные полевые измерения и калибровки нового спутникового спектрометра для мониторинга озонового слоя Земли // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 5. С. 82–92.
14. *Rozañov V.V., Buchwitz M., Eichmann K.-U., de Beek R., Burrows J.P.* SCIATRAN – a new radiative transfer model for geophysical applications in the 240–2400 nm spectral region: The pseudo-spherical version // Adv. Space Res. 2002. V. 29, N 11. P. 1831–1835.
15. *U.S. Standard Atmosphere.* URL: [http://modelweb.gsfc.nasa.gov/atmos/us\\_standard.html](http://modelweb.gsfc.nasa.gov/atmos/us_standard.html) (last access: 6.08.2021).
16. *Levelt P.F., Hilsenrath E., Leppelmeier G.W., van den Oord G.H.J., Bhartia P.K., Tamminen J., Haan J.F., Veefkind J.P.* Science objectives of the Ozone Monitoring Instrument // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2006. V. 44, N 5. P. 1199–1208.
17. *Bhartia P.K., Wellemeyer C.W.* OMI TOMS-V8 total O<sub>3</sub> algorithm // Algorithm Theoretical Baseline Document: OMI Ozone Products / P.K. Bhartia (ed.). V. 2. ATBD-OMI-02. version 2.0. 2002.
18. *Kurucz R.L., Furenlid I., Brault J., Testerman L.* Solar Flux Atlas from 296 to 1300 nm. New Mexico: National Solar Observatory, 1984.

*D.V. Ionov, V.I. Privalov.* **The differential spectroscopy technique DOAS in the problem of determining the total ozone content from measurements of ground-based UV spectrometer UFOS.**

The first experience of using the differential spectroscopy technique DOAS for retrieving the total ozone content (TOC) from measurements of the ground-based UV spectrometer UFOS is considered. Examples of spectra recorded by UFOS and similar spectral equipment are presented. Test calculations of TOC with the use of DOAS are performed based on the UFOS measurements for several days at the Voeikovo station. The resulted TOC values are compared with independent ground-based and satellite measurements. The TOC calculations systematically differ from independent data, which can apparently be eliminated by means of a more accurate adjustment of the DOAS algorithm to the problem conditions and UFOS parameters.