

На правах рукописи



Соломатникова Анна Александровна

**МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ РАДИАЦИИ И ОБЩЕГО
СОДЕРЖАНИЯ
ОЗОНА СПЕКТРОМЕТРОМ УФОС НА СЕТИ
РОСГИДРОМЕТА**

Специальность: 25.00.30 - метеорология, климатология,
агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2010



Работа выполнена в государственном учреждении «Главная геофизическая обсерватория имени А.И.Воейкова»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
Шаламянский Аркадий Мордухович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Майборода Леонид Александрович

кандидат физико-математических наук
Коновалов Дмитрий Алексеевич

Ведущая организация: Российский государственный
гидрометеорологический университет

Защита состоится « 7 » апреля 2010 г. в 14 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д327.005.01 в ГУ «ГГО»
по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева д.7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГУ «ГГО».

Автореферат разослан 3 марта 2010 г.

Ученый секретарь совета по защите докторских и кандидатских диссертаций, *А.В.Мещерская*
доктор географических наук

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Введение

Озон, составляя весьма малую часть атмосферного воздуха, уже многие годы привлекает к себе внимание исследователей. Толщина защитного озонового слоя определяет уровень приходящей к земле биологически активной ультрафиолетовой (УФ) радиации. Изменения в озоносфере могут оказать ощутимое влияние на здоровье людей и на состояние биоты. В то же время атмосферный озон фактически определяет термический режим стратосферы, а вариации поля озона тесно связаны с макромасштабными процессами в нижней стратосфере и верхней тропосфере.

В настоящее время наиболее доступной, хорошо контролируемой и весьма информативной характеристикой состояния озонового слоя является общее содержание озона (ОСО). Результаты измерений ОСО на наземной сети являются опорными для других видов измерений (например, для измерений со спутника и для озонозондирования).

Специально для использования на российской озонометрической сети был разработан УФ озоновый спектрометр (УФОС), предназначенный для автоматизированных комплексных измерений спектрального состава УФ радиации и определения ОСО.

Представленная диссертационная работа посвящена разработке метода определения ОСО и расчёта биологически активной УФ радиации при автоматизированных измерениях спектрометрами УФОС.

Актуальность работы

Проблема автоматизации наблюдений ОСО и УФ радиации приобрела особую актуальность в последние годы, поскольку дальнейшая эксплуатация фильтровых озонометров М-124, которыми на данный момент оснащена российская озонометрическая и ультрафиолетовая сеть, крайне затруднена. Приборы устарели морально (широкополосные светофильтры, ручные наблюдения) и изношены физически (более 25 лет в эксплуатации), а их производство давно прекращено. Для дальнейшего нормального функционирования российских озонометрических станций необходимо их переоснащение аппаратурой современного уровня.

Анализ характеристик тех автоматизированных приборов для измерений УФ радиации и ОСО, которые использует мировая озонная сеть, показал, что они, к сожалению, не удовлетворяют условиям работы на сети Росгидромета, где требуются: простота устройства и эксплуатации, работа в широком диапазоне климатических и погодных условий и невысокая стоимость.

Автоматизация измерений потребовала не только новых технических решений, но и методического обновления. В наибольшей степени обновление относит-

ся к методике измерений ОСО при облачности, способы оценки влияния которой, применяемые при ручных наблюдениях, совершенно неприменимы к автоматизированным измерениям.

Отсутствие учета влияния облачности во время наблюдений может привести к величине ошибки в результате определения ОСО более 20 %. В то же время, опыт измерений на озонной сети Росгидромета показал, что наблюдения по Солнцу или ясному зениту возможны только в 30% случаев от всего объема наблюдений. При ручных наблюдениях для поправки на облачность используется визуальная оценка состояния неба оператором. При автоматизированных измерениях необходим инструментальный способ учета влияния облачности.

Цель и задачи работы

Цель настоящей работы - разработка метода автоматизированных измерений ОСО с помощью ультрафиолетового озонного спектрометра (УФОС) и оценка возможности применения УФОС для обеспечения мониторинга спектрального состава УФ радиации на сети Росгидромета.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи

- Сравнить и дать критическую оценку методов автоматизированных измерений УФ радиации и ОСО.
- Создать программное обеспечение для исследования спектральных характеристик экспериментальных образцов УФОС, произвести калибровку приборов, провести климатические испытания работоспособности УФОС в широком диапазоне погодных условий. На основании анализа полученных данных и процесса эксплуатации новой аппаратуры разработать технические рекомендации для разработки опытных образцов УФОС.
- Организовать наблюдения спектрального состава УФ радиации (прямой, суммарной и рассеянной из зенита неба) с помощью экспериментальных образцов УФОС на нескольких озонометрических станциях Росгидромета. Создать базу данных, содержащую основные характеристики приборов и результаты наблюдений.
- По результатам натуральных измерений УФОС определить закономерности и основные соотношения между спектральными составами прямой УФ радиации и рассеянной из зенита неба при безоблачных условиях. В целях разработки методики расчета ОСО исследовать влияние различных атмосферных факторов на спектральный состав приходящей к земле УФ радиации, рассеянной в зените неба. Найти предикторы в измеряемом спектре, которые могут быть использованы для оценки влияния облачности. Разработать методику расчёта ОСО по результатам автоматизированных измерений УФОС.

Научная новизна

В рамках выполненной работы впервые разработана методика определения ОСО по результатам автоматизированных измерений рассеянной из зенита неба УФ радиации, которая отличается от существующих применением для определения ОСО не эмпирически построенных номограмм, а расчетного способа с использованием выявленных в ходе работы закономерностей ослабления радиации. Предложен и реализован новый способ автоматического учёта влияния облачности при расчёте ОСО непосредственно в ходе измерений. На фактическом материале определены закономерности и количественные соотношения между прямой солнечной и рассеянной из зенита ясного неба УФ радиацией.

Практическая ценность

- Разработанная методика расчета ОСО при автоматизированных измерениях применяется в оперативном режиме для обеспечения работы экспериментальных образцов ультрафиолетового озонного спектрометра УФОС на станциях Цимлянск, Мурманск, Воейково.
- Переоснащение озонометрических станций Росгидромета автоматизированной аппаратурой с применением разработанной методики может многократно повысить объем и качество информации об УФ радиации и ОСО, поступающей с сети.

Личный вклад соискателя

Все представленные в работе результаты получены самим автором или при его участии.

Непосредственно автором предложен алгоритм расчёта ОСО по измеренным спектрам УФ радиации. Разработаны программы работы УФОС для исследования спектральных характеристик прибора и для натурных измерений. Выполнена калибровка экспериментальных образцов УФОС для измерения спектрального состава УФ радиации и ОСО. Установлены для регулярных наблюдений приборы на станциях Воейково, Мурманск, Цимлянск. На основе анализа полученного массива данных измерений определены и введены в программу эмпирические зависимости, которые позволяют реализовать оперативный расчёт ОСО и «автоматический» ввод поправки на облачность. На основе опыта эксплуатации экспериментальных образцов УФОС разработаны рекомендации для разработки опытных образцов.

Защищаемые результаты и положения

1. Разработанная для УФОС методика расчета ОСО.
2. Способ автоматического учёта влияния облачности при расчёте ОСО для приборов типа УФОС.
3. Соотношения между спектральным составом прямой и рассеянной из зенита ясного неба УФ радиации, выявленные при анализе результатов измерений УФОС.

Апробация работы

Основной материал диссертации опубликован в 17 работах, среди которых 6 статей (в том числе 3 статьи в рецензируемых журналах, входящих в список Высшей Аттестационной Комиссии) и 11 тезисов докладов, перечисленных в конце автореферата.

Структура диссертации

Диссертация состоит из 4-х глав. Содержит 100 страниц, 3 таблицы, 35 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении**, Формулируются основные цели и задачи работы, актуальность выбранной темы, обоснована научная новизна и практическая ценность работы, приведены краткие данные о структуре диссертации и содержании отдельных глав.

Глава 1 диссертации посвящена обзору современного состояния озонometriи. Рассмотрены основные приборы и методы для измерений ОСО и дана оценка возможности их применения на российской сети. Изложен процесс прохождения УФ радиации через атмосферу и основные факторы, влияющие на её спектральный состав.

На мировой озонной сети для регулярных измерений используются три вида приборов - озонный спектрофотометр Добсона [9,11], озонный спектрофотометр Брюера [8] и фильтровый озонметр М-124 [2]. При значительных различиях способов выделения рабочих спектральных интервалов во всех приборах используется дифференциальный метод измерений. ОСО определяется по отношению уровней УФ радиации в двух спектральных интервалах с различными коэффициентами поглощения озона.

Основным, самым надежным и теоретически обоснованным способом измерений ОСО, является определение ОСО по измерениям прямой солнечной радиации. В этом случае используют уравнение для расчета энергетической освещенности S_λ согласно закону Бугера- Ламберта- Бера) имеет вид

$$S_\lambda = S_{0\lambda} 10^{-\alpha_\lambda \mu X - \beta_\lambda m - \delta_\lambda n'} \quad (1)$$

где $S_{0\lambda}$ – энергетическая освещенность на верхней границе атмосферы, Вт/см²нм; α_λ – показатель поглощения озона, см⁻¹; β_λ – показатель рэлевского ослабления атмосферы; δ_λ – показатель аэрозольного ослабления; μ и m – соответственно, озонная и воздушная оптические массы; m' – оптическая масса аэрозольной составляющей; X – общее содержание озона, атм-см. [1].

ОСО рассчитывается по отношению интенсивности потоков УФ радиации на двух длинах волн. Для узкополосных приборов согласно [7] справедливо выражение

$$X = \frac{(LgS_{0\lambda_1} - LgS_{0\lambda_2}) - (LgI_{\lambda_1} - LgI_{\lambda_2}) - \Delta\beta_{\lambda_{12}}m - \Delta\delta_{\lambda_{12}}m'}{\Delta\alpha_{\lambda_{12}}\mu}, \quad (2)$$

где $I_\lambda = k S_\lambda$, зарегистрированный прибором отсчет на длине волны λ

При «зенитных» измерениях регистрируется радиация рассеянная из зенита неба в телесном угле около 15° (угол определяется «углом зрения» прибора). Для определения ОСО с помощью спектрофотометра Добсона по радиации, приходящей от зенита ясного неба, используют специальные номограммы или семейство полиномов, описывающие связь отношения сигналов на паре длин волн с высотой Солнца и ОСО. Эти зенитные номограммы получены эмпирическим путём по результатам многолетних измерений [11]. При измерениях с помощью спектрофотометра Брюера используется подобная методика. [8].

В отличие от «эмпирического» способа Добсона и Брюера, предполагающего многолетний набор данных, определение ОСО при зенитных измерениях фильтровым озонометром М-124 производится расчётным способом (с использованием формулы (1) в интегральном виде), но при этом вводится зенитный коэффициент Kz – определяющий соотношение между сигналами, измеренными по зениту неба и рассчитанными для прямого солнечного света. Зависимость Kz от высоты Солнца и содержания озона для каждого озонометра определяется в течение нескольких ясных дней [4,6].

Наличие облачности во время проведения наблюдений может привести к погрешности до 20%. Благодаря введению уникальной методики измерений по ясному и облачному зениту, озонометр М-124 обеспечивает почти всепогодные измерения ОСО при высоте Солнца более 5 градусов. Состояние неба оценивается наблюдателем визуально во время проведения наблюдений.

При измерениях спектрофотометром Добсона также существует возможность введения поправок на влияние облачности при зенитных измерениях (в условиях не очень плотной облачности) за счёт визуальной оценки состояния неба наблюдателем и с использованием специальных облачных номограмм. Методика измерений спектрофотометром Брюера не предусматривает введения поправок на облачность, а ненадёжные данные просто бракуются.

На мировой озонной сети по точности измерений ОСО лучшим является спектрофотометр Добсона (погрешность измерений- 1-2%), автоматизированные измерения спектрального состава УФ радиации и ОСО обеспечивает спектрофотометр Брюера. Однако конструкция этого прибора не может обеспечить надежность его эксплуатации на сети Росгидромета в широком диапазоне астрономических и погодных условий, при низкой квалификации операторов. Весьма высока стоимость их изготовления и дальнейшего метрологического сопровождения.

Для переоснащения озонной сети РФ необходима современная автоматизированная аппаратура, сочетающая достоинства спектральных приборов (возможность измерения спектрального состава УФ радиации, высокая точность измерения ОСО) и фильтровых озонметров (возможность измерять ОСО при любой облачности, низкая стоимость).

В Главе 2 подробно описаны экспериментальные образцы ультрафиолетового озонного спектрометра УФОС, приведены фотографии и оптическая схема приборов, описаны модификации экспериментальных образцов, рассмотрены результаты климатических испытаний и проанализированы сложности, с которыми автор и его коллеги столкнулись при работе с экспериментальными образцами.

Разработка ультрафиолетового озонного спектрометра в данный момент находится на этапе испытаний и исследований экспериментальных образцов. (Согласно ГОСТ-15.001-88 (1997) –необходимые этапы разработки новой аппаратуры: НИР - макет, экспериментальный образец, ОКР - опытный образец).

Созданы и проходят испытания 3 экспериментальных образца УФОС, которые функционально полностью соответствуют приборам, ожидаемым при серийном производстве, но конструктивно могут значительно отличаться от них. В процессе испытаний и исследований оптическая и электрическая схемы экспериментальных УФОС неоднократно модернизировались.

УФОС был разработан с учетом требований озонной сети РФ. Прибор предназначен для автоматизированных комплексных измерений спектрального состава УФ радиации в диапазоне 290-400 нм и ОСО. Спектральный блок прибора представляет собой полихроматор на дифракционной решетке с ПЗС линейкой (миниатюрная линейка фотодиодов). Спектральное разрешение (определенное как половина разрешаемой полосы)- 0.5 нм. В зависимости от уровня приходящей радиации, время регистрации спектра может варьироваться, начиная от 0.05 с. Источниками света при измерениях могут быть Солнце, сектор неба в зените и полусфера неба. Переключение измерительных каналов обеспечивается системой зеркал. По своим характеристикам УФОС соответствует требованиям ВМО к спектральным приборам, предназначенным для измерений УФ радиации и ОСО (спектральный диапазон, разрешение по спектру и пр.), а по быстродействию значительно превосходит зарубежные аналоги, например по времени регистрации спек-

тра. Помимо этого, по предварительным оценкам, УФОС на порядок дешевле аналогичных импортных приборов.

Для натуральных и климатических испытаний экспериментальные образцы УФОС были установлены на станциях Воейково (УФОС-1), Мурманск (УФОС -2) и Цимлянск (УФОС – 3), представляющих разные климатические зоны. В процессе испытаний была подтверждена работоспособность аппаратуры в широком диапазоне погодных и климатических условий, но был обнаружен ряд существенных недостатков экспериментальных образцов УФОС, приводящих к нестабильности в работе аппаратуры. Разработаны технические рекомендации для совершенствования УФОС при разработке опытных образцов.

Глава 3 посвящена описанию метода измерений спектрального состава УФ радиации. Рассмотрены основные способы и результаты калибровок, которые проводились с экспериментальными образцами УФОС. Приведены результаты натуральных измерений и итоги сравнений измеренных потоков с потоками, рассчитанными по модели переноса радиации в атмосфере LibRadTran. Изложена методика расчёта уровней эритемной радиации и радиации диапазонов УФ-А и В.

Регистрация спектров УФ радиации (прямой, зенитной и суммарной) с помощью УФОС-1 проводилась с 2002 г. в Воейково и во время экспедиционных работ в Приэльбрусье в 2005 и 2007 г.г. Измерения спектрального состава зенитной и суммарной УФ радиации организованы с 2006 г. в Мурманске (УФОС-2) и с 2007 г. в Цимлянске (УФОС-3).

Выполненные в течение 2006 - 2009 гг. измерения спектрального состава зенитной и суммарной УФ радиации показали, что явным достоинством УФОС является высокая скорость регистрации спектра УФ радиации (диапазон 290-400 нм за доли секунды), что позволяет получать данные о спектральном составе суммарной радиации даже при быстро меняющейся облачности. (Для сравнения - время сканирования по спектру спектрофотометра Брюера составляет 8 минут). Регистрация спектрометрами УФОС полного спектрального состава УФ радиации позволяет осуществлять в ходе эксплуатации непрерывный контроль установки шкалы длин волн по фраунгоферовым линиям.

В 2009 году в ГГО был установлен эталонный излучатель УФ радиации. Экспериментальные образцы УФОС были прокалиброваны в абсолютной шкале. Сравнения результатов измерений спектрального состава суммарной УФ радиации с результатами расчета по модели переноса радиации в атмосфере LibRadTran продемонстрировали полное соответствие в структуре спектра, но отклонение в энергетической составляющей до 30 %.

В Главе 4 подробно изложены этапы разработки и основные положения методики расчёта ОСО при автоматизированных измерениях спектрального состава

радиации, поступающей от зенита ясного и облачного неба. Приведены результаты исследований влияния различных атмосферных факторов на спектральный состав УФ радиации рассеянной из зенита неба. Рассмотрены полученные соотношения и коэффициенты, описан процесс калибровки УФОС для измерений ОСО.

Во время разработки методики измерений ОСО по свету от зенита неба новыми спектральными приборами был принят во внимание успешный опыт измерений фильтровыми приборами М-124, у которых методика зенитных измерений максимально приближена к методике расчёта ОСО по прямой радиации. Такая методика полностью исключает необходимость многолетнего набора эмпирических соотношений между содержанием озона, оптической озонной массой и отсчетами прибора, как этого требует методика зенитных измерений ОСО спектрофотометрами Добсона и Брюера.

Было сделано предположение, что определение закономерностей, по которым меняется соотношение прямой и зенитной радиации (для каждой длины волны), позволит рассчитывать ОСО по измерениям зенитной радиации с применением экспоненциального выражения, подобного закону Бугера-Ламберта-Бера, где вместо прямой радиации будет использоваться измеренная зенитная радиация.

Спектральный состав рассеянного света заметно отличается от состава прямой солнечной радиации. Интенсивность молекулярного рассеяния света в атмосфере обратно пропорциональна четвертой степени длины световой волны. Соответственно, все особенности структуры спектра солнечной радиации, приходящей к верхней границе атмосферы, сохраняются в спектре рассеянной радиации, однако вес радиации коротких длин волн возрастает (Рисунок 1).

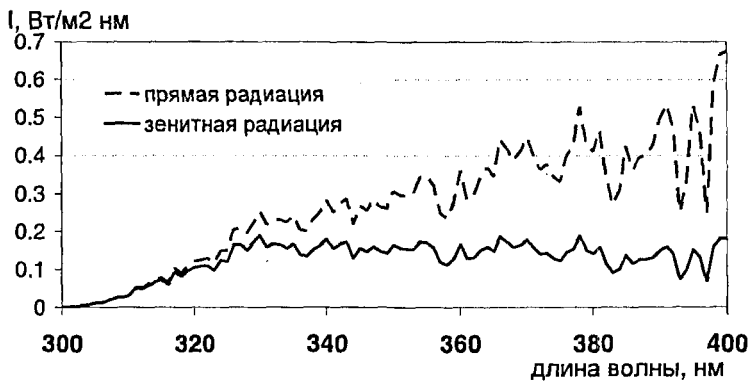


Рисунок 1. Пример спектрального состава прямой (пунктирная линия) и рассеянной из зенита (сплошная) УФ радиации. УФОС 1.

Шаджатмаз 09.09.2006 10:50

На основе большого экспериментального материала о спектральном составе УФ радиации, полученного при измерениях УФОС, показано, что при фиксированных значениях ОСО и высоты Солнца, в условиях высокой прозрачности атмосферы соотношение между прямой и приходящей из зенита неба УФ радиацией – величина постоянная для каждой отдельной длины волны.

Для расчета ОСО обычно используются два спектральных интервала УФ радиации с разными коэффициентами поглощения озона. Чувствительность пары длин волн к озону возрастает со смещением рабочих спектральных интервалов в коротковолновую область спектра, но при этом значительно падает уровень сигналов и возрастают шумы. Анализ измеряемых спектров показал, что для имеющихся образцов УФОС оптимальными по соотношению чувствительность к озону – уровень сигнал/шум оказались пары длин волн и диапазонов 310/330 нм, 311/331 нм, (310-312)/(330-332) нм.

Соотношение между прямой и зенитной радиацией на определённой длине волны можно записать в виде

$$K_{\lambda} = Lg S_{\lambda} - Lg I_{\lambda} \quad (3)$$

Следовательно, выражение (2), применяемое для расчета ОСО по прямой радиации, при измерениях по зенитной радиации принимает вид

$$X = \frac{(Lg S_{0\lambda_1} - Lg S_{0\lambda_2}) - (Lg I_{\lambda_1} - Lg I_{\lambda_2} + Kz) - \Delta\beta_{\lambda_{12}} m - \Delta\delta_{\lambda_{12}} m'}{\Delta\alpha_{\lambda_{12}} \mu} \quad (4)$$

где $Kz = K_{\lambda_1} - K_{\lambda_2}$

В процессе калибровки УФОС, которая проводится в условиях высокой прозрачности атмосферы (оптическая плотность $\tau_a < 0.12$) [3], определяются зенитные коэффициенты (Kz) для выбранных пар длин волн

$$Kz = f(R, \mu) \quad (5)$$

где $R = \lg(S_{\lambda_1}/S_{\lambda_2}) - \lg(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2})$, а S_{λ_1} и S_{λ_2} – прямая солнечная радиация на длинах волн λ_1 и λ_2 , рассчитанная по формуле (1), а I_{λ_1} и I_{λ_2} – измеренная зенитная радиация, на длинах волн λ_1 и λ_2

Kz и параметры полинома, аппроксимирующего зависимость Kz от озонной массы для одной из пар длин волн, приведены на рисунке 2.

Зенитный коэффициент зависит не только от озонной оптической массы, но и от ОСО. При оперативном расчете ОСО вводится поправка к Kz ($C_{\mu X}$), учитывающая изменение в Kz при отклонении ОСО от ОСО, при котором проводилось определение Kz . Параметры $C_{\mu X}$ определяются во время калибровки прибора.

$$C_{\mu X} = F[(Kz_X - Kz), (X - X_{Kz}), \mu] \quad (6)$$

где X – ОСО в момент проведения наблюдений, X_{Kz} – ОСО при определении Kz

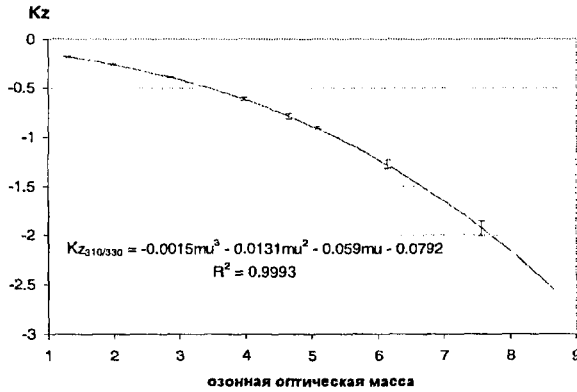


Рисунок 2. Зависимость зенитного коэффициента K_z от озонной массы для УФОС-2. Пара 310/330 нм

Тогда формула (4) для расчета ОСО по спектру УФР от зенита ясного неба с учётом (5) и (6) имеет вид:

$$X = \frac{\lg\left(\frac{S_{0\lambda 1}}{S_{0\lambda 2}}\right) - \lg\left(\frac{I_{\lambda 1}}{I_{\lambda 2}}\right) - \Delta\beta_{\lambda 12}m - K_z - C_{\mu\lambda}}{\Delta\alpha_{\lambda 12}\mu} \quad (7)$$

Серьезной проблемой при измерениях ОСО является наличие облачности. Рассеяние и поглощение УФ радиации на облачных частицах изменяет спектральный состав проходящей радиации, соответственно соотношения и коэффициенты, определённые при калибровке в условиях ясной погоды не обеспечивают корректного расчёта ОСО. Погрешность в результате измерений из-за отсутствия учёта влияния облачности может составлять до 20 %. При этом, по данным российской озонметрической сети, только треть наблюдений выполняется при безоблачных условиях.

При наличии облачности и ее уплотнении меняется интенсивность УФР и крутизна её спектрального хода (при этом структура спектра практически не меняется). На рисунке 3 приведены примеры отношений измеряемых спектров УФ радиации, приходящей от зенита облачного неба к спектру, полученному от зенита ясного неба, при одной и той же высоте Солнца (30°) и близких значениях ОСО.

Рисунок 3 демонстрирует, как при появлении в зените неба облачности изменяется спектральный ход УФ радиации. Выявлены основные особенности влияния облачности:

- 1) изменения происходят как в области поглощения озона (до 330 нм) так и вне её
- 2) отличие облачного спектра от спектра УФР при ясном небе возрастает с длиной волны и с увеличением мощности (оптической плотности) облака
- 3) спектральный ход отношения спектров при облачном и ясном небе является функцией гладкой, непрерывной, близкой к линейной.

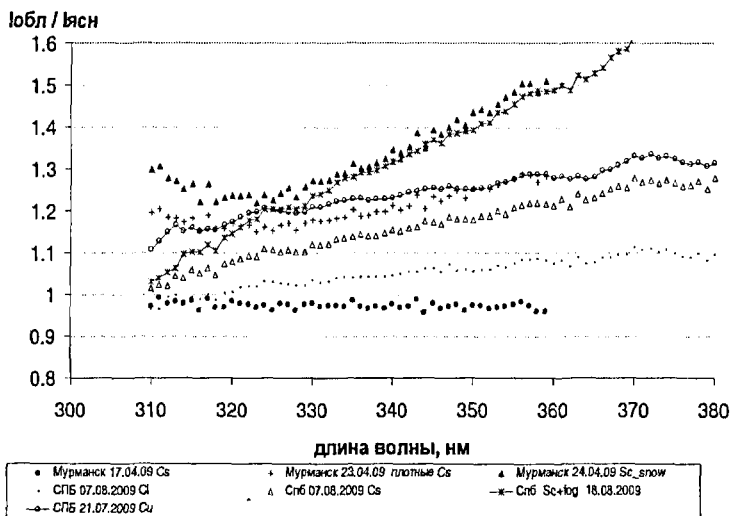


Рисунок 3. Отношение спектров УФ радиации, приходящей от зенита неба при разных видах облачности, к спектру УФ радиации при ясном небе. УФОС-2. Высота Солнца 30°.

В коротковолновой «озонной» области, где расположены рабочие спектральные интервалы большинства озонметров, практически невозможно отделить вклад аэрозоля и облачности в изменение спектра от вклада озона. Однако показанные выше особенности влияния облачности позволяют предположить, что при условии одновременной регистрации коротковолнового и длинноволнового участков УФ спектра можно оценить степень изменения спектрального состава за счет влияния облачности в длинноволновой области (330 - 400 нм), где влияние озона фактически отсутствует, и экстраполировать эту оценку на область поглощения озона. УФОС позволяет регистрировать весь спектр УФ радиации (А и В) в течение долей секунды, что позволяет получить информацию о полном спек-

тральном составе УФ радиации при одном состоянии неба даже в условиях быстро меняющейся облачности.

Для оценки влияния облачности при измерениях с помощью УФОС можно использовать параметр, характеризующий крутизну спектрального хода УФ радиации вне полосы поглощения озона, но в диапазоне, непосредственно примыкающем к ней. В настоящей работе таким параметром является логарифм отношения сигналов для пары длин волн 330 нм и 350 нм - $\lg(I_{330}/I_{350})$. При анализе данных было определено, что данный параметр в безоблачную погоду зависит только от высоты Солнца (оптической воздушной массы). Для условий калибровки зависимость параметра $\lg(I_{330}/I_{350})$ от атмосферной массы может быть описана полиномом 3-й степени (сплошная линия на рис. 4). При наличии облачности величина рассматриваемого параметра зависит от оптической воздушной массы и оптической плотности облачности и атмосферного аэрозоля. На рис. 4 отдельными точками нанесён параметр $\lg(I_{330}/I_{350})$ определённый для результатов измерений проведённых в условиях ясного и облачного неба

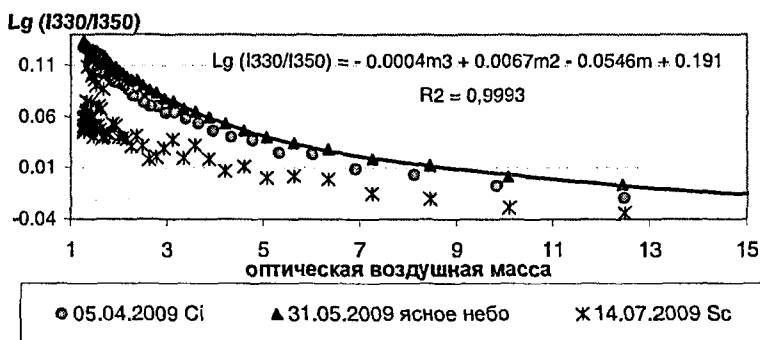


Рисунок 4. Зависимость логарифма отношения сигналов для пары длин волн (330 и 350 нм) от оптической воздушной массы при безоблачных условиях и при облачности разных типов.

Для количественной оценки изменения крутизны спектра УФ радиации во внеозонной области за счёт появления облачности, может быть использована мера отклонения (Δ) текущего параметра $\lg(I_{330}/I_{350})$, определённого по результатам измерений ($\lg(I_{330}/I_{350})_{real}$) от рассчитываемого параметра ($\lg(I_{330}/I_{350})_{bl}$), определённого во время калибровки по зениту ясного неба.

$$\Delta = \lg(I_{330}/I_{350})_{bl} - \lg(I_{330}/I_{350})_{real} \quad (8)$$

Для переноса оценки влияния облачности, полученной в длинноволновом участке спектра, на рабочий интервал определения ОСО предложено использовать связь между параметром Δ и соответствующим ему отклонением C_{zc} реаль-

ного зенитного коэффициента $K_{\text{Зобл}}$ от коэффициента, рассчитываемого для ясных условий, C_{Zc} также, как $C_{\mu\lambda}$, является поправкой к Kz и учитывает не только влияние облачности, но и влияние атмосферного аэрозоля, поэтому будем называть его облачно-аэрозольным коэффициентом.

Для определения связи C_{Zc} и параметра Δ были использованы результаты синхронных измерений УФОС со стационарными озонметрами М-124 в облачные дни. Всего было отобрано около 30 дней, с различными формами облачности. Облачно-аэрозольный коэффициент, также, как $C_{\mu\lambda}$, является поправкой к Kz и при калибровке определялся из выражения

$$C_{\text{Zc}} = K_{\text{Зобл}} - Kz - C_{\mu\lambda} \quad (9)$$

Где $K_{\text{Зобл}}$ – реальный зенитный коэффициент- рассчитывался по преобразованному выражению (4), в которое вводится значение ОСО измеренное озонметром М-124

Сопоставление параметров Δ и C_{Zc} для каждого спектра выявило наличие устойчивой линейной связи между ними (рисунок 5).

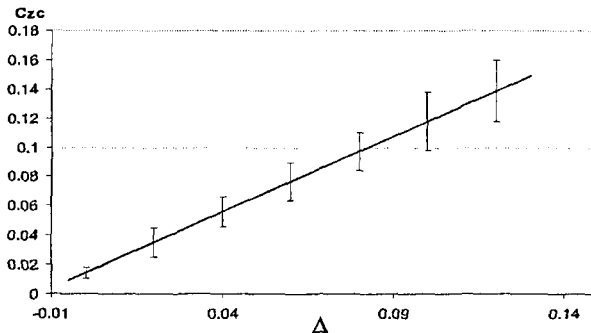


Рисунок 5. УФОС 2. Связь параметров Δ и C_{Zc} .

Соответственно, для расчёта ОСО при измерениях спектрального состава УФР от ясного и облачного зенита с помощью УФОС применяется следующее выражение:

$$X = \frac{\lg\left(\frac{S_{0\lambda 1}}{S_{0\lambda 2}}\right) - \lg\left(\frac{I_{\lambda 1}}{I_{\lambda 2}}\right) - \Delta \beta_{\lambda 12} m - Kz - C_{\mu\lambda} - C_{\text{Zc}}}{\Delta \alpha_{\lambda 12} \mu} \quad (10)$$

Где $C_{\text{Zc}} = f(\Delta)$ (11)

$$\Delta = \lg\left(\frac{I_{330}}{I_{350}}\right) \cdot b - \lg\left(\frac{I_{330}}{I_{350}}\right) \quad (12)$$

Разработанный метод расчёта ОСО при автоматизированных спектральных измерениях УФ радиации прошел апробацию и показал хорошие результаты во время измерений с помощью экспериментальных образцов УФОС.

Пример результатов расчета ОСО для дня с переменной облачностью без введения поправки на облачность и после введения коррекции представлены на рисунке 6. Очевидно, что введение облачного коэффициента позволяет обеспечить необходимую точность автоматизированных измерений ОСО по свету от зенита не только ясного, но и облачного неба.

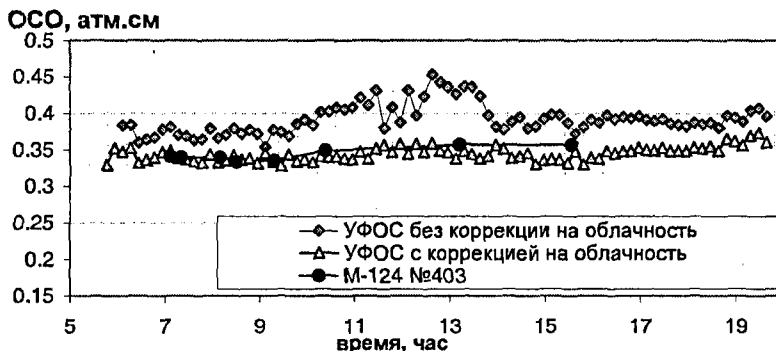


Рисунок 6. Результаты расчёта ОСО до и после введения коррекции на облачность. УФОС 2 . Воейково. 16.05.09

Для иллюстрации результатов применения разработанной методики рассмотрим также результаты сравнений среднедневных значений ОСО, полученных по стационарному М-124, эталонному спектрофотометру Добсона и УФОС-2, которые приведены на рисунке 7. Хорошо видно, что расчет ОСО для УФОС без введения коррекции на облачность приводит к значительным отличиям значений ОСО от результатов измерений М-124. Отличие среднедневных значений в отдельные дни превышало 20 %, и соответственно в среднемесечном значении ошибка достигала 9 %. При использовании предложенного метода расчёта ОСО с введением коррекции на облачность отклонение в среднедневном значении составляло не более 3%, а в среднемесечном — 1 Д.е. (значительно меньше одного процента).

Анализ непрерывного ряда данных об ОСО полученного при расчете с введением коррекции на облачность для станции Воейково (апрель-сентябрь 2009 г, показал, что относительная погрешность отдельного измерения при высоте Солнца более 10° составляет не более 7%. Погрешность среднедневных значений редко превышает 3%. Таким образом предложенная методика расчета ОСО уже при использовании экспериментальных образцов УФОС, обладающих рядом технических несовершенств и требующих серьезных усовершенствований, обеспечивает автоматизированные измерения ОСО, сравнимые по точности с точностью измерений фильтровыми озонόμεтрами М-124.

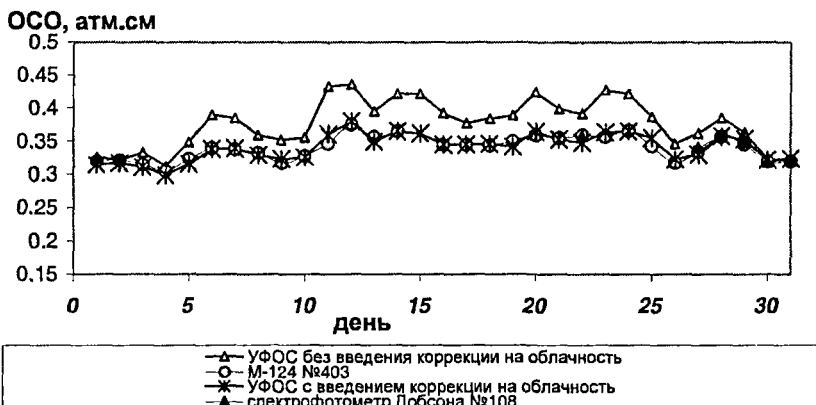


Рисунок 7. Средние за день значения ОСО. Воейково. Май 2009г.

В ходе испытаний экспериментальных образцов УФОС отрабатывались различные варианты программ обработки полученных спектров, в результате эксплуатации приборов были разработаны предложения по усовершенствованию УФОС, реализация которых предполагается в опытных образцах.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы:

- Создано программное обеспечение для работы спектрометров. Исследованы характеристики трёх экспериментальных образцов УФОС и произведена их калибровка. Приборы установлены на станциях Мурманск, Цимлянск и Воейково для проведения натурных испытаний.
- В ходе эксплуатационных испытаний в стационарных и экспедиционных условиях определено, что спектрометры пригодны для работы в диапазоне погодных и климатических условий сети Росгидромета, однако выявлен ряд недостатков приборов, которые приводят к нестабильности в работе оптической и электронной схем и увеличению погрешностей измерений. Часть недостатков устранена в ходе работы. Разработаны рекомендации по усовершенствованию УФОС при разработке опытных образцов.
- Накоплен массив данных о спектральном составе прямой, суммарной и зенитной УФ радиации в широком диапазоне погодных условий.
- Разработан метод оперативного расчёта ОСО при автоматизированных измерениях спектрального состава зенитной радиации спектрометрами УФОС. Предложенный метод отличается от существующих применением расчётного способа, который опирается на выявленные в ходе работы соотношения между

прямой и рассеянной радиацией и исключает необходимость многолетнего набора данных для калибровки прибора.

- Впервые для автоматизированных измерений ОСО предложен способ оперативного введения поправки на облачность. Изменение спектрального состава УФ радиации из-за влияния облачности и атмосферного аэрозоля предложено оценивать в длинноволновой области (330 - 400 нм), где влияние озона фактически отсутствует, и затем эту оценку экстраполировать на область поглощения озона. Применение такого способа возможно только благодаря способности УФОС регистрировать весь спектр УФ радиации (А и В) в течение долей секунды.
- Испытание предложенной методики при работе экспериментальных образцов УФОС показало, что относительная погрешность отдельного измерения ОСО при высоте Солнца более 10 градусов составляет не более 7 процентов. Ошибка в средних за день значениях редко превышает 3 %. Таким образом предложенная методика расчета ОСО, даже при использовании экспериментальных образцов УФОС, требующих серьёзных усовершенствований, обеспечивает автоматизированные измерения ОСО, сравнимые по точности с точностью измерений озонметрами М-124.
- Опробованы разные способы калибровки экспериментальных образцов УФОС для измерений спектрального состава УФ радиации. Рекомендована калибровка в абсолютной шкале по высокостабильным источникам излучения, дополняемая калибровкой по эталонным приборам в натуральных условиях.
- Сравнения результатов измерений спектрального состава суммарной УФ радиации экспериментальными образцами УФОС с результатами расчета по модели переноса радиации в атмосфере LibRadTran продемонстрировали полное соответствие в структуре спектра, но отклонение в энергетической составляющей до 30 %.
- Подтверждена возможность применения спектрометров УФОС (с учётом проведения рекомендованных усовершенствований при разработке опытных и серийных приборов) для мониторинга спектрального состава суммарной УФ радиации на сети Росгидромета. Расширенный спектральный диапазон и высокое разрешение регистрируемых спектров предоставляет возможность получения дополнительной информации при измерениях УФ радиации.

По теме диссертации были опубликованы следующие работы

1. Привалов В.И., Шаламянский А.М., Соломатникова А.А., Гулидов С.С., Ультрафиолетовый озонный спектрометр. Измерения спектрального состава УФ радиации и оптической плотности атмосферного аэрозоля. // Труды НИЦ ДЗА (филиал ГГО), 2006, вып. 7(555), с.106-121

2. Кароль И.Л., Сыроваткина О.А., Соломатникова А.А., Шаламянский А.М., Анализ межгодовых изменений общего содержания озона над территорией России в 1973-2002 гг. по данным измерений наземных станций // Метеорология и Гидрология, 2006, № 4 с. 19-28

3. Соломатникова А.А., Расчёт общего содержания озона при автоматизированных измерениях по свету от зенита ясного и облачного неба // Труды ГГО, 2009, вып. 560, с. 255-267

4. Титова Е.А., Кароль И.Л., Шаламянский А.М., Клягина Л.П., Соломатникова А.А., Статистический анализ и сравнение эффектов внешних факторов, влияющих на поле общего содержания озона над территорией России в 1973-2007 г.г. // Метеорология и гидрология, 2009, №7, с.48-64

5. Зашакуев Т.З., Кремешков В.К., Парамонова Н.Н., Першина Н.А., Полищук А.И., Привалов В.И., Соломатникова А.А., Тапасханов В.О., Шаламянский А.М., Обследование предполагаемых мест размещения глобальных (региональных) станций ГСА. Приэльбрусье - Пик Терскол // Прикладная метеорология, Труды Филиала ГГО НИЦ ДЗА, 2006, вып 7(555).С. 122-132

6. Соломатникова А.А., Некоторые результаты измерений ОСО по свету от зенита ясного и облачного неба с помощью УФ озонного спектрометра (УФОС-3) // X Всероссийская конференция молодых ученых «Состав атмосферы. Климатические эффекты. Атмосферное электричество» Тезисы докладов.- М. МАКС Пресс, 2006, с.39

7. Соломатникова А.А., Привалов В.И., Шаламянский А.М., Использование ультрафиолетового озонного спектрометра (УФОС) для контроля уровня биологически активного облучения // Экологические и гидрометеорологические проблемы больших городов и промышленных зон. Материалы международной конференции. 25-27 мая 2005 г.- СПб.: изд-во РГТМУ, 2005. –с. 101

8. Титова Е.А., Кароль И.Л., Шаламянский А.М., Соломатникова А.А. Статистический анализ рядов общего содержания озона по данным наземной озонметрической сети Российской Федерации // X Всероссийская конференция молодых ученых «Состав атмосферы. Климатические эффекты. Атмосферное электричество» Тезисы докладов.- М. МАКС Пресс, 2006.-с.50

9. Соломатникова А.А., Проблемы переоснащения озонметрических станций Росгидромета. Результаты испытаний УФ озонного спектрометра // Тезисы докладов Второй конференции молодых ученых национальных гидрометслужб государств-

участников СНГ «Новые методы и технологии в гидрометеорологии» - Москва, 2006. - с.55-56

10. Соломатникова А.А., Соотношение прямой и рассеянной из зенита неба УФ радиации по результатам автоматизированных измерений.- Всероссийская школа-конференция- «Состав Атмосферы, Атмосферное электричество. Климатические эффекты» 15-17 мая.-тезисы докладов.-Нижний Новгород-2007 с.23

11. Шаламянский А.М., Ромашкина К.И., Елисеев А.А., Соломатникова А.А., Русина Е.Н., Состояние и возможности развития системы мониторинга общего содержания озона, ультрафиолетовой радиации и оптической плотности атмосферного аэрозоля. Всероссийская конференция «Развитие системы мониторинга состава атмосферы». 16 - 18 октября 2007 г, Москва. Тезисы докладов.

12. Кароль И.Л., Шаламянский А.М., Зубов В.А., Соломатникова А.А., Сыроваткина О.А., Титова Е.А.. Пространственные и временные вариации общего содержания озона над территорией России по данным наземной озонометрической сети в 1973 - 2005 г.г., Всероссийская конференция «Развитие системы мониторинга состава атмосферы». 16 - 18 октября 2007 г. Москва. Тезисы докладов.

13. Соломатникова А.А., Привалов В.И., Шаламянский А.М., Гулидов С.С., Автоматизированная аппаратура для комплексных измерений общего содержания озона, спектрального состава ультрафиолетовой радиации и оптической плотности атмосферы. Всероссийская конференция «Развитие системы мониторинга состава атмосферы». 16 - 18 октября 2007 г. Москва. Тезисы докладов.

14. Соломатникова А.А., Зубов В.А., Шаламянский А.М., Результаты сравнения потоков УФР, измеренных спектрометром УФОС и рассчитанных с помощью численной модели «LibRadTran» // XII Всероссийская конференция молодых ученых «Состав атмосферы. Климатические эффекты. Атмосферное электричество» Тезисы докладов.- Барок, 2008.-с 108

15. А.А. Соломатникова, В.И. Привалов, А.М. Шаламянский, Ультрафиолетовый озонный спектрометр УФОС. модификации, некоторые результаты измерений // Международный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика» 22-26 июня 2009г. Санкт-Петербург, тезисы докладов, с.с.133-134

16. А.А.Соломатникова, А.М Шаламянский, Инструментальная оценка влияния облачности при автоматизированных измерениях общего содержания озона //Международный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика» 22-26 июня 2009г. Санкт-Петербург, тезисы докладов, с.с.122-123

17. I.L.Karol, A.M.Shalamynsky, A.A.Solomatnikova, E.A.Titova, Winter Ozone Transport variation and the Montreal protocol Impact as Revealed by the Total ozone ground-based Measurements over the Russian Territory in 1997-2005 //2009, proceeding of the symposium "Twenty Years of Ozone Decline" p.p. 349-356

Литература

1. Гуцин Г.П., Виноградова Н.Н. Суммарный озон в атмосфере. 1983 // Л.: Гидрометеонздат, - 241 с.
 2. Гуцин Г.П., Соколенко С.А. Новый малогабаритный озонометр М-124, предназначенный для измерения суммарного озона. 1987 // Атмосферный озон. Тр. VI Всесоюз. Симпоз. Ленинград, 15-17 мая 1985 г. Л., -С. 49-56.
 3. Пивоварова З.И., Краюшкина Т.А. К вопросу о понижении прозрачности атмосферы // Труды ГГО. 1970. Вып.263. С.19-38
 4. Ромашкина К.И. Усовершенствованная методика градуировки озонометра М-83 по свету от зенита неба. 1984 // Труды ГГО, вып. 472, с.74-82
 5. Шаламянский А.М. Озонометрическая сеть СНГ. 1993 // Метеорология и гидрология, № 9
 6. Шаламянский А.М., Ромашкина К.И., Игнатенко В.М. Усовершенствование методики измерений ОСО по свету от зенита неба. 2002 // Труды ГГО, вып. 582, с.102-109
 7. Шаламянский А.М., К.И. Ромашкина, В.И. Привалов. Сравнительный анализ методов и приборов для наземных измерений общего содержания озона. 2004 // Прикладная метеорология, Труды НИЦ ДЗА (филиала ГГО), вып. 5 (553), С.187-206.
 8. Evans W.F.J., Forester A.J., Henderson G.S. et al. Stratospheric ozone science in Canada: A.N. agenda for research and monitoring. Atmospheric Environment report 1987,ARD-87-3, 127 p.
 9. Dobson G.M.B. Observers' handbook for the ozone spectrophotometer. 1957, Ann. IGY, part 1, pp. 46-89.
 10. Feister U, Gericke K. Cloud flagging of UV spektral irradiance measurements. 1998 //Atmos.Res. -vol 49 № 2,-pp115-138.
 11. Komhyr W.D. Operator handbook Ozone observations with a Dobson spectrophotometer. 1980 // WMO
- WMO-UMAP Workshop on broad band UV-radiometers (Garmish-Partenkirchen, Germany, 22-23 April 1996) //WMO Report No 120, 45 pp.

Отпечатано с готового оригинал-макета в ЦНИГ «АСТЕРИОН»
Заказ № 51. Подписано в печать 25.02.2010 г. Бумага офсетная.
Формат 60×84¹/₁₆. Объем 1,5 п. л. Тираж 100 экз. Санкт-Петербург, 191015, а/я 83,
тел. /факс (812) 275-73-00, 275-53-92, тел. 970-35-70