

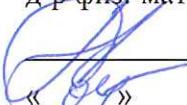
Министерство образования и науки Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

Радиофизический факультет  
Кафедра оптико-электронных систем и дистанционного зондирования

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК

Руководитель ООП

д-р физ.-мат. наук, профессор

 И.В. Самохвалов

« 04 » 06 2016 г.

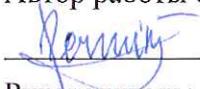
**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИНДУСТРИАЛЬНОГО ЦЕНТРА НА АЭРОЗОЛЬНОЕ  
ЗАМУТНЕНИЕ АТМОСФЕРЫ НА ПРИМЕРЕ Г. ТОМСКА**

по направлению подготовки 12.03.02 - Оптотехника

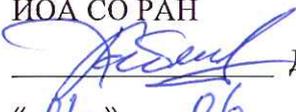
Перминов Владислав Валерьевич

Автор работы студент группы № 724

 В.В. Перминов

Руководитель: к.ф.-м.н., с.н.с.

ИОА СО РАН

 Д.М. Кабанов

« 04 » 06 2016 г.

Томск 2016

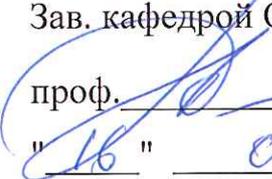
# ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Радиофизический факультет

Кафедра оптико-электронных систем и дистанционного зондирования

## УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой ОЭС и ДЗ

проф.  И.В.Самохвалов

" 16 " 09 2015 г.

## ЗАДАНИЕ

по бакалаврской работе студенту Перминову Владиславу Валерьевичу гр. 724

1. Тема работы «Оценка влияния индустриального центра на аэрозольное замутнение атмосферы на примере г. Томска»

Сроки защиты июнь 2016 г.

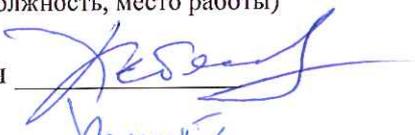
2. Содержание работы (вопросы, подлежащие разработке):
- а) выполнение измерений портативным солнечным фотометром SPM в центральных районах города;
  - б) расчет аппаратных функций каналов солнечного фотометра;
  - в) параметризация функций пропускания поглощения атмосферными газами для оптических каналов фотометра;
  - г) обработка и анализ результатов измерений;
  - д) подготовка отчета.
3. Сроки выполнения основных этапов работы:
- а) ноябрь – апрель;
  - б) декабрь – февраль;
  - в) декабрь февраль;
  - г) март – апрель;
  - д) май.

Студент обязан являться к руководителю бакалаврской работы с отчетом о проделанной работе и для получения консультаций не реже 1 раза в неделю

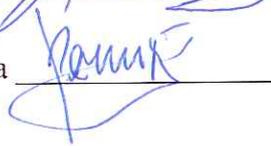
4. Дата выдачи задания 15.09.2015

Руководитель бакалаврской работы Кабанов Дмитрий Михайлович, к.ф.-м.н., с.н.с. ИОА СО РАН

(фамилия, имя, отчество, уч. степень, должность, место работы)

Телефон 492848 Комната 214, блок А Подпись руководителя 

Задание принял к выполнению Перминов В.В.

Подпись студента 

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ АОТ АТМОСФЕРЫ .....	7
1.1 Методика определения АОТ атмосферы.....	7
1.2 Расчет аппаратных функций фотометра SP .....	10
1.3 Расчет эффективных функций пропускания молекулярного поглощения .....	14
2 ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ АОТ АТМОСФЕРЫ.....	17
2.1 Солнечный фотометр SPM.....	17
2.2 Многоволновой солнечный фотометр SP-9 .....	19
2.3 Sun-Sky радиометр CE-318 сети AERONET .....	21
3 ХАРАКТЕРИСТИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА .....	25
3.1 Результаты интеркалибровки фотометров .....	25
3.2 Расположение пунктов наблюдения и сроки измерений .....	26
3.3 Результаты двухточечного эксперимента .....	26
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	31
Список использованных источников .....	32

## ВВЕДЕНИЕ

Атмосферный аэрозоль представляет собой наиболее распространенный в природных условиях тип дисперсной системы [3]. В общем случае под атмосферным аэрозолем понимают такие дисперсные системы, которые состоят из частиц твердого или жидкого вещества, находящихся во взвешенном состоянии в атмосферном воздухе. Часто под аэрозолем понимают только те частицы, которые обладают малой скоростью оседания, т. е. относительно стабильные в гравитационном поле. При таком узком понимании термина «аэрозоль» из рассмотрения исключается широкий класс частиц при различного рода осадках, которые относят к гидрометеорам.

В проблеме радиационных факторов климата большое значение придается изучению оптических характеристик аэрозоля всей атмосферной толщи. Основной и наиболее освоенной в экспериментальных исследованиях оптической характеристикой аэрозоля в столбе атмосферы является аэрозольная оптическая толщина атмосферы (АОТ).

Изучение аэрозольной составляющей в спектральной прозрачности атмосферы имеет важное значение для решения радиационно-климатических задач. В последние десятилетия исследования спектральной аэрозольной оптической толщи атмосферы в значительной степени стимулировались остротой таких проблем как: ускоренные изменения глобального климата, региональные особенности антропогенной нагрузки и влиянию естественных источников на замутнения атмосферы (в том числе вулканических извержений, пылевых бурь, крупных лесных пожаров и др.). Кроме того, результаты исследований спектральных АОТ находят широкое применение при разработке оптических систем, работающих через атмосферу, и интерпретации спутниковой информации.

Неослабевающий интерес к всестороннему изучению аэрозоля обусловлен его важной ролью в протекании многих физических и химических процессов в атмосфере, при формировании ее оптического состояния и во

влиянии на природу и климат планеты в целом. К настоящему времени накоплен значительный объем знаний об атмосферном аэрозоле и его оптических свойствах. В тоже время, сильная пространственно-временная изменчивость характеристик аэрозоля приводит к необходимости продолжения исследований с целью уточнения существующих представлений и моделей, получения новых данных о закономерностях его изменчивости и взаимосвязях с другими параметрами атмосферы.

Данная работа посвящена оценке пространственных (локальных) неоднородностей распределения АОТ атмосферы, обусловленных влиянием антропогенного аэрозоля, на основе двухточечных измерений (в центральных районах г. Томска и на юго-восточной окраине). Результаты подобных экспериментов [9,10] показали, что, например, в Екатеринбурге и Улан-Удэ, в среднем, наблюдаются более высокие значения АОТ относительно фоновых районов. Этот факт трудно объяснить какими-то другими причинами, кроме антропогенного влияния. В Приморье [11], тоже было обнаружено более высокое замутнение атмосферы во Владивостоке в сравнении с «фоновым» районам. Однако, здесь преобладающую роль в замутнении атмосферы прибрежного Владивостока играет не антропогенный фактор, а влияние грубодисперсного морского аэрозоля.

Многолетние измерения АОТ в районе Томска (Академгородок и обсерватория «Фоновая»), а также на восточном/западном берегах Байкала, не выявили статистически значимого отличия аэрозольного замутнения в соседних районах [11]. Поэтому для Томска представляет определенный интерес выяснить относится ли этот вывод только к Академгородку и существует ли вклад антропогенного аэрозоля в АОТ атмосферы над центральными районами города.

Кроме того, в первых двух главах дана характеристика методик определения АОТ и рассмотрены солнечные фотометры, результаты измерения которых использовались в работе.

Цель работы: оценка влияния индустриального центра на аэрозольное замутнение атмосферы (на примере г. Томска) с использованием методов солнечной фотометрии.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи.

1. Ознакомиться по литературным источникам с результатами исследований изменчивости характеристик АОТ в районе г. Томска и двухточечных экспериментов «Академгородок – фоновый район»;
2. Изучить устройство солнечных фотометров типа SPM, CE-318, SP-9;
3. Выполнить измерения портативным солнечным фотометром SPM в центральных районах города;
4. Рассчитать эффективные функции пропускания молекулярного поглощения атмосферными газами для оптических каналов фотометра;
5. Обработать и проанализировать результаты измерений.

# 1 МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ АОТ АТМОСФЕРЫ

Для изучения АОТ атмосферы используются методы солнечной фотометрии. В середине прошлого века был осуществлен переход к более информативным спектральным измерениям солнечной радиации и организации регулярных сетевых наблюдений – актинометрических, озонметрических, аэрозольных. Тем не менее, в настоящее время солнечная фотометрия остается одним из эффективных средств получения информации о характеристиках аэрозоля.

Несомненными достоинствами методов солнечной фотометрии являются относительная простота аппаратуры, т. к. не требуется создание высокочувствительных или энергоемких оптико-электронных систем, и несложный алгоритм проведения эксперимента. Основной недостаток методов – ограничение их реализации в условиях облачности [2].

## 1.1 Методика определения АОТ атмосферы

В соответствии с законом Бугера-Ламберта, для монохроматической солнечной радиации, ослабленной толщиной атмосферы, можно записать:

$$I_{\lambda}(\xi_o) = (R/R_0)^2 \cdot I_{0\lambda} \cdot T_{\lambda}^{atm} = (R/R_0)^2 \cdot I_{0\lambda} \cdot T_{\lambda}^g(\xi_o) \cdot T_{\lambda}^a(\xi_o) \cdot T_{\lambda}^m(\xi_o), \quad (1)$$

где  $I_{\lambda}$  – прямая радиация, измеряемая фотометром на различных длинах волн  $\lambda$ ;  $R$ ,  $R_0$  – текущее и среднегодовое расстояние до Солнца;  $I_{0\lambda}$  – внеатмосферная радиация (калибровочные константы фотометра);  $T_{\lambda}^{atm}$ ,  $T_{\lambda}^a$ ,  $T_{\lambda}^m$ ,  $T_{\lambda}^g$  – функции пропускания атмосферы и ее отдельных компонентов, обусловленных аэрозольным ослаблением, молекулярным (рэлеевским) рассеянием и молекулярным поглощением (водяной пар, озон и другие газы), соответственно. Для упрощения записи, вместо произведения функций пропускания смеси атмосферных газов  $\prod_i T_{\lambda}^{gi}$  будем рассматривать функцию  $T_{\lambda}^g$  для одного газа.

Функции пропускания  $T_\lambda^a$  и  $T_\lambda^m$  описываются простыми формулами:

$$\begin{aligned} T_\lambda^a(\xi_o) &= \exp(-m \cdot \tau_\lambda^a), \\ T_\lambda^m(\xi_o) &= \exp(-m \cdot \tau_\lambda^m), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $m(\xi_o) \approx (1/\cos \xi_o)$  – оптическая масса атмосферы для зенитного угла Солнца  $\xi_o$ ;  $\tau_\lambda^m$  – оптическая толщина молекулярного рассеяния;  $\tau_\lambda^a$  – АОТ атмосферы.

Более сложной зависимостью определяется молекулярное поглощение газов. Для описания пропускания атмосферных газов часто используются аппроксимационные выражения, например в виде:

$$T_\lambda^g(\xi_o) = \exp[a - b(m \cdot X)^c], \quad (3)$$

где  $X$  – содержание газа,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коэффициенты аппроксимации, подобранные по результатам спектральных расчетов  $T_\lambda^g$  для различных оптических масс или зенитных углов  $\xi_o$ .

Заметим, что понятие «окна прозрачности» атмосферы относительно и небольшое поглощение газов приходится учитывать. На рисунке 1 иллюстрируется соотношение оптических толщ  $\tau_\lambda^m$ ,  $\tau_\lambda^a$  и

$$\tau_\lambda^g = \ln T_\lambda^g \text{ (при } m=1)$$

на примере спектральных каналов солнечного фотометра SP-9 для средних летних условий Сибири (г. Томск).

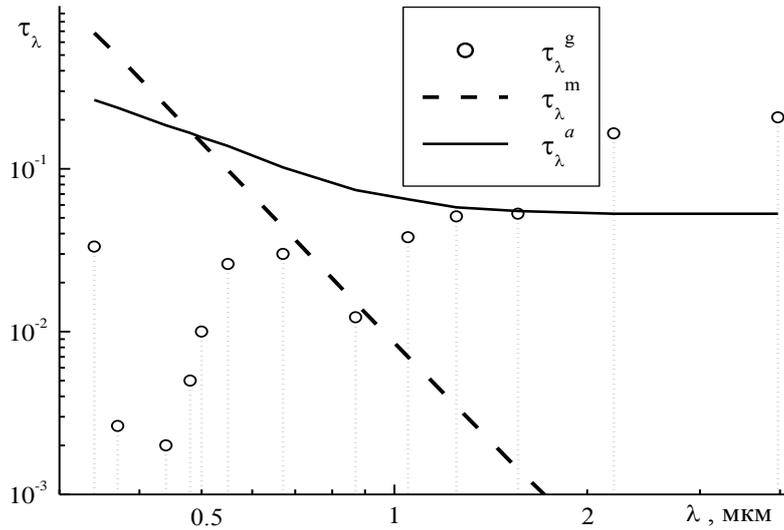


Рисунок 1 – Средние значения оптических толщ  $\tau_{\lambda}^g$ ,  $\tau_{\lambda}^m$ ,  $\tau_{\lambda}^a$  в летних условиях г. Томска

Наиболее просто АОТ атмосферы определяется в видимой области спектра, достаточно чистой от полос поглощения. При малом поглощении логарифмы функций пропускания линейно зависят от оптической массы, то есть полагается:

$$\ln T_{\lambda}^g = -m \cdot \tau_{\lambda}^g \text{ и, соответственно,}$$

$$T_{\lambda}^{atm} = \exp[-m(\tau_{\lambda}^a + \tau_{\lambda}^m + \tau_{\lambda}^g)]. \quad (4)$$

В этом случае уравнение 1 запишется в виде

$$I_{\lambda}(\xi_o) = (R/R_0)^2 \cdot I_{0\lambda} \cdot \exp[-m(\tau_{\lambda}^m + \tau_{\lambda}^g + \tau_{\lambda}^a)] \quad (5)$$

и получим формулу определения АОТ атмосферы

$$\tau_{\lambda}^a = m^{-1} \cdot \ln[(I_{0\lambda} / I_{\lambda}) \cdot (R/R_0)] - \tau_{\lambda}^m - \tau_{\lambda}^g. \quad (5a)$$

Расчет оптической массы атмосферы  $m$  при строгом подходе (особенно при больших  $\xi_o > 80^\circ$ ) требует индивидуального учета вертикального распределения плотности или коэффициентов ослабления отдельных компонентов атмосферы. Однако в большинстве практически важных случаев величину  $m$  определяют для условий чистого воздуха (релеевской атмосферы), с использованием формул типа:

$$m(\xi_o) = -700 \cos \xi_o + [4,9 \cdot 10^5 \cos^2 \xi_o + 1401]^{0,5} \quad (6)$$

Зенитный угол  $\xi_0$  и азимут  $\varphi_0$  Солнца рассчитываются по времени и географическим координатам места наблюдений:

$$\begin{cases} \cos \xi_0 = \sin \delta \sin \varphi_g + \cos \delta \cos \varphi_g \cos(t_h), \\ \sin \varphi_0 = \cos \delta \sin t_h / \sin \xi_0, \end{cases} \quad (7)$$

где  $t_h$  – часовой угол, связанный с истинным солнечным временем на географической долготе точки наблюдений;  $\varphi_g$  – географическая широта;  $\delta$  – склонение Солнца.

Оптическая толщина молекулярного рассеяния  $\tau_\lambda^m$  характеризуется степенным спадом с ростом длины волны (показатель степени около четырех), а в УФ диапазоне спектра необходимо еще учитывать зависимость от атмосферного давления. Среди множества аппроксимационных формул для расчета  $\tau_\lambda^m$ , наиболее точной считается формула, предложенная Хансеном и Тревисом:

$$\tau_\lambda^m = 0,008569\lambda^{-4} \cdot (1 + 0,0113\lambda^{-2} + 0,00013\lambda^{-4}) \cdot (p/p_0), \quad (8)$$

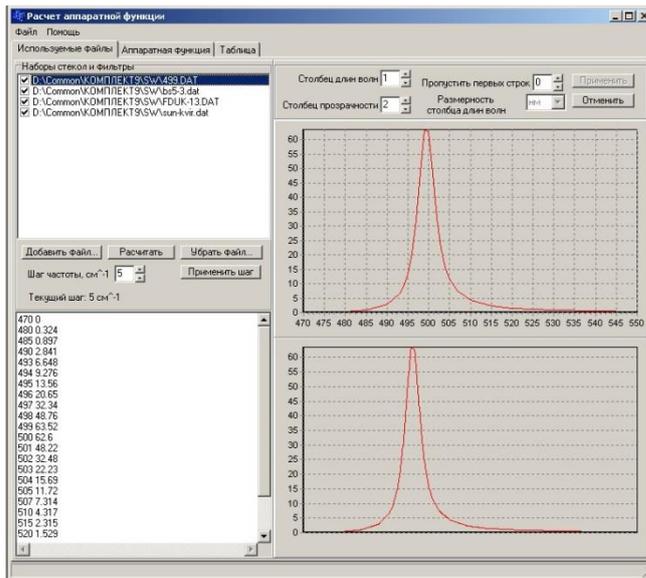
где  $p$  и  $p_0$  – реальное и стандартное (1013,25 mb) давление воздуха.

Среди поглощающих компонент, основной вклад в ослабление видимого излучения вносят водяной пар и озон. Оптические толщи их молекулярного поглощения  $\tau_\lambda^g$  рассчитываются с использованием спектральных моделей (кодов) типа LOWTRAN-7, HITRAN и др. для конкретных условий – сезонов и климатических зон.

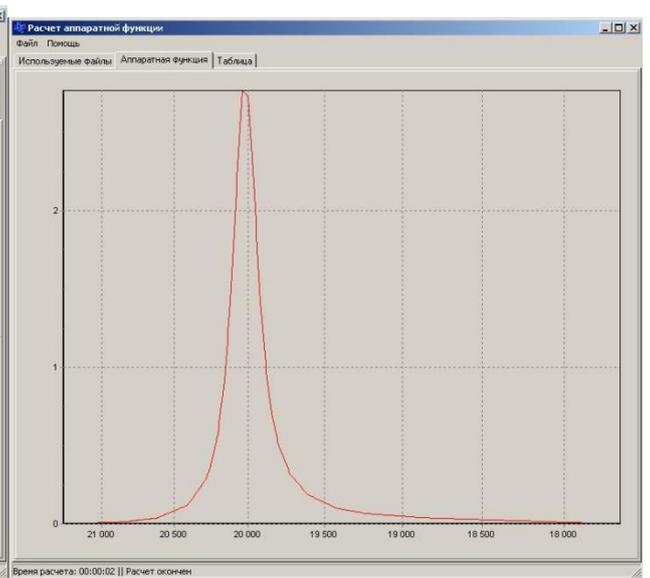
## 1.2 Расчет аппаратных функций фотометра SP

Расчет спектральных АОТ и влагосодержания атмосферы по измеренным сигналам прозрачности основывается на законе Бугера-Ламберта с учетом функций молекулярного поглощения и рассеяния газов в атмосфере. Все операции, выполняемые измерительной системы (ИС) можно разбить на два этапа. Первый этап – определение параметров необходимых для последующих вычислений: параметризация полосовых функций пропускания атмосферных газов для различных спектральных каналов (с учетом их аппаратных функций) и определение калибровочных констант. Второй – обработка

результатов измерений фотометров: вычисление АОТ, влагосодержания атмосферы, исключение ложных замеров (фильтрация облачных искажений) и восстановление параметров микроструктуры аэрозоля. Рассмотрим содержание отдельных программных модулей ИС.



а)



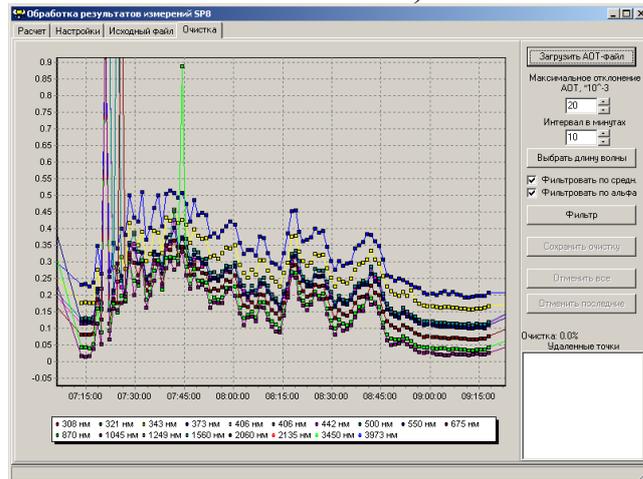
б)

№	Длина волны	Колонка в срт	Канал (мкм/м)	Озон (неокипель)	Озон (степень)	Газы (неокипель)
1	398	10	uv	0	0	0
2	323	11	uv	0	0	0
3	339	12	uv	0.05611	0.83156	0
4	367	13	uv	0.01651	0.57024	0
5	409	14	uv	0	0	0
6	868	16	sw	0	0	0
7	440	17	sw	0	0	0.00168
8	500	18	sw	0.02908	0.94204	0
9	550	19	sw	0.08291	0.94538	0
10	676	20	sw	0.03727	0.94563	0.00463
11	932	21	sw	0	0	0
12	409	23	sw	0	0	0
13	1045	24	sw	0	0	0
14	1247	25	ii	0	0	0.00713

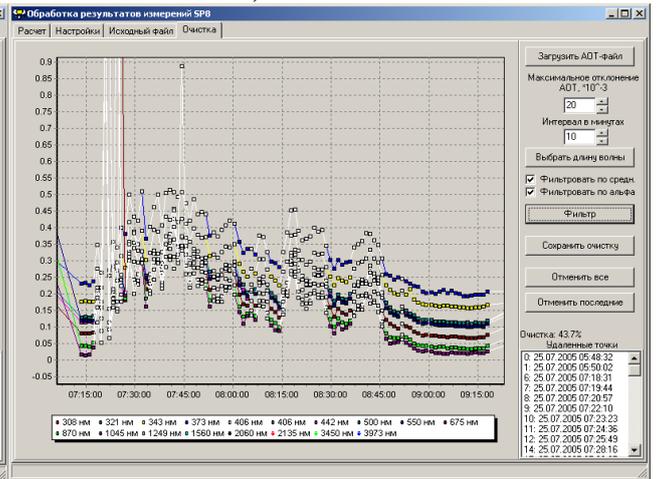
в)

Date	Time	HR	HA	308nm	323nm	3
25.08.2007	0:31:00	2.563509	2.558125	11.093737	11.227651	11.530
25.08.2007	0:31:33	2.554802	2.549479	11.083014	11.229235	11.522
25.08.2007	0:32:07	2.545903	2.540642	11.08515	11.23246	11.524
25.08.2007	0:32:41	2.537074	2.531874	11.088993	11.232217	11.520
25.08.2007	0:33:15	2.528316	2.523176	11.075566	11.224985	11.520
25.08.2007	0:33:49	2.519627	2.514546	11.083376	11.223809	11.516
25.08.2007	0:34:23	2.511007	2.505984	11.067811	11.191757	11.510
25.08.2007	0:34:57	2.502455	2.497489	11.084313	11.218326	11.510
25.08.2007	0:35:30	2.494219	2.489307	11.087212	11.233275	11.519
25.08.2007	0:36:04	2.485798	2.480943	11.086975	11.228885	11.519
25.08.2007	0:36:38	2.477444	2.472643	11.08475	11.225118	11.507
25.08.2007	0:37:12	2.469154	2.464408	11.076335	11.220463	11.515
25.08.2007	0:37:46	2.460929	2.456236	11.08541	11.228376	11.512
25.08.2007	0:38:20	2.452768	2.448128	11.082627	11.233774	11.516

г)



д)



е)

Рисунок 2 – Внешний вид интерфейсов пользователя программных модулей: а) и б) – расчета аппаратных функций, в) – страница ввода параметров функций пропускания, г) – страница расчета АОТ и влагосодержания, д) и е) – очистки данных от влияния облачности

Расчет и параметризация полосовых функций пропускания включает несколько процедур. Аппаратные функции спектральных каналов фотометра рассчитываются на основе спектрального пропускания фильтров, спектральной чувствительности фотоприемников и данных о спектре солнечного излучения. Программа позволяет оперативно менять набор оптических элементов, используемых в расчетах, легко адаптируется к формату вводимых данных, отображает результаты в графическом и табличном виде как показано на рисунках 2 а, б.

Расчет полосовых функций пропускания проводится с использованием полученных аппаратных функций и предварительно насчитанного архива спектроскопической информации о газовом поглощении со спектральным разрешением  $5 \text{ см}^{-1}$ . Архив формируется с применением базы параметров спектральных линий HITRAN-2000 и современных моделей непрерывного поглощения (MT\_CKD) для четырех сезонов (зима полярных широт, зима и лето умеренных широт, тропики) метеомодели AFGL и различных зенитных углов Солнца. В диапазоне спектра 0,45-5 мкм расчеты проводятся прямым методом для следующих газов:  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$  в сумме с другими газами. Для длин волн короче 0.45 мкм пропускание рассчитывается на основе данных по сечениям поглощения только для газов  $\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ .

Далее вычисляются зависимости функций пропускания газов от оптической массы  $m$  отдельно для переменных компонентов (озон, водяной пар) и для суммы всех остальных газов. Параметризация полученных зависимостей проводится в виде экспоненциальных зависимостей (3). Результаты заносятся в базу данных на рисунке 2в и используются при расчете АОТ. Отдельно рассчитывается зависимость отношения функций пропускания в полосе поглощения водяного пара и соседнем окне прозрачности (0.94 и 0.87 мкм) для определения общего влагосодержания атмосферы.

### 1.3 Расчет эффективных функций пропускания молекулярного поглощения

Оптическая толща молекулярного рассеяния  $\tau_{\lambda}^m$  характеризуется степенным спадом с ростом длины волны (показатель степени около четырех), а в УФ диапазоне спектра учитывается еще зависимость от атмосферного давления. Для расчета  $\tau_{\lambda}^m$ , наиболее точной является формула, предложенная Хансеном и Тревисом:

$$\tau_{\lambda}^m = 0,008569\lambda^{-4} \cdot (1 + 0,0113\lambda^{-2} + 0,00013\lambda^{-4}) \cdot (p/p_0) \quad (8)$$

где  $p$  и  $p_0$  – реальное и стандартное (1013,25 mb) давление воздуха.

Учет молекулярного поглощения проводится с использованием предварительно насчитанного архива спектроскопической информации о газовом поглощении со спектральным разрешением  $5 \text{ см}^{-1}$ . Архив формируется с применением базы параметров спектральных линий HITRAN-2000.

Наконец, неизвестная внеатмосферная константа  $I_{0\lambda}$  определяется путем калибровки фотометра "долгим методом Бугера". Процедура калибровки состоит в построении зависимостей  $\ln I_{\lambda}(m)$ , измеренных при различных оптических массах в условиях стабильной и прозрачной атмосферы. В результате экстраполяции значений  $\ln I_{\lambda}(m)$  к массе  $m = 0$  находятся калибровочные константы  $I_{0\lambda}$ . После нахождения калибровочных констант  $I_{0\lambda}$ , с использованием формул (5б-8) рассчитывается АОТ атмосферы. Рассмотренный подход широко используется в диапазоне спектра 0,34-1.05 мкм.

При переходе в область спектра более 1 мкм, величина  $\tau_{\lambda}^g$  существенно возрастает (становится больше искомой  $\tau_{\lambda}^a$ ) и допущение (5б) уже не выполняется. Для преодоления трудностей определения АОТ в ИК диапазоне была разработана методика, особенность которой состоит в том, что исключение (учет) молекулярного поглощения осуществляется на начальном этапе (до калибровки) - путем деления измеренных сигналов на эффективные функции пропускания  $T_{\Delta\lambda i}^g$ .

После определения  $T_{\Delta\lambda i}^g$  осуществляется переход к "аэрозольным" сигналам  $Y_{\lambda i}$ :

$$Y_{\lambda i} = I_{\Delta\lambda i} / (T_{\lambda}^m \cdot T_{\Delta\lambda i}^g) = (R/R_0)^2 \cdot I_{0\lambda} \cdot \exp(-m\tau_{\lambda}^a) \quad (9)$$

и определяется искомое значение АОТ атмосферы

$$\tau_{\lambda}^a = m^{-1} \cdot \ln[I_{0\lambda} \cdot (R/R_0)^2 / Y_{\lambda i}]. \quad (10)$$

Детальный анализ методических и инструментальных ошибок, проведенный различными авторами, показал, что общая погрешность определения АОТ составляет 0.005-0.015 в коротковолновой области спектра (0,34-1 мкм) и 0.01-0.02 – в окнах прозрачности ИК диапазона (1-4 мкм).

Для определения общего влагосодержания атмосферы используется дифференциальная методика, основанная на измерении солнечного излучения в полосе поглощения водяного пара 0,94 мкм и в соседнем спектральном участке (вне полосы). Первые измерения влагосодержания таким методом были выполнены еще в середине прошлого века, а калибровки проводилась по данным радиозондовых измерений влажности. По мере развития спектроскопии атмосферы стала использоваться "модельная" калибровка, основанная на спектральных расчетах взаимосвязи между функцией пропускания водяного пара  $T_{0,94}^w$  с влагосодержанием  $W$ .

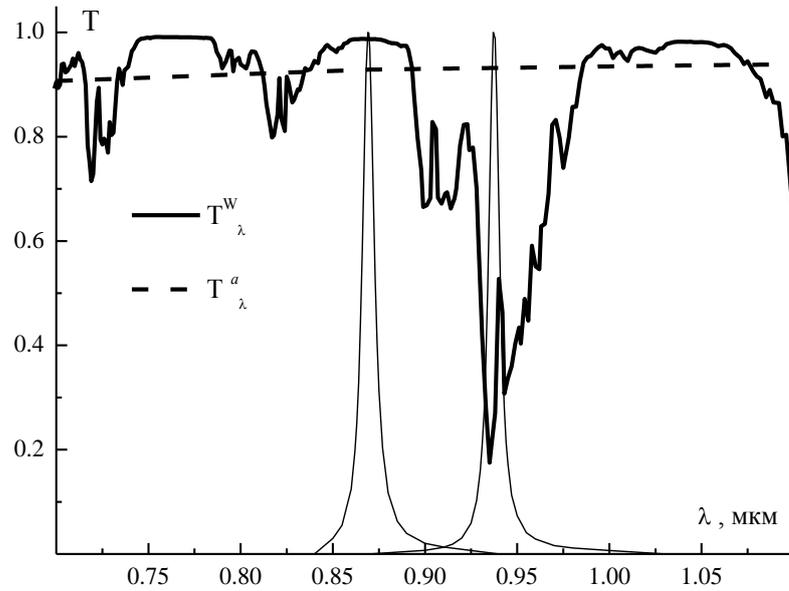


Рисунок 3 – Спектр пропускания  $\text{H}_2\text{O}$  -  $T_\lambda^W$ , вместе с контурами пропускания светофильтров 0.87 и 0.94 мкм (пунктиром показана спектральная зависимость  $T_\lambda^a$ )

Спектр пропускания водяного пара  $T_\lambda^W$ , вместе с контурами пропускания фильтров иллюстрируется на рисунке 3. В наиболее простом случае для сигналов, измеряемых в двух спектральных участках (например, 0.94 и 0.87 мкм) можно записать:

$$I_{0.94} = I_{0;0.94} \cdot T_{0.94}^a \cdot T_{0.94}^M \cdot T_{0.94}^W, \quad (11)$$

$$I_{0.87} = I_{0;0.87} \cdot T_{0.87}^a \cdot T_{0.87}^M, \quad (12)$$

$$V = (I_{0.94}/I_{0.87}) = (I_{0;0.94}/I_{0;0.87}) \cdot T_{0.94}^W \cdot \frac{\exp[-(\tau_{0.94}^a + \tau_{0.94}^M)m]}{\exp[-(\tau_{0.87}^a + \tau_{0.87}^M)m]} = V_0 \cdot T_{0.94}^W \cdot \delta^{am}(\tau^a; \tau^m; m), \quad (13)$$

где  $V_0$  – калибровочная константа двухканальной методики,

$$\delta^{am} = \frac{\exp[-(\tau_{0.94}^a + \tau_{0.94}^M)m]}{\exp[-(\tau_{0.87}^a + \tau_{0.87}^M)m]} \approx 1$$

– небольшая поправка, которая характеризует отличие оптических толщ  $(\tau_\lambda^a + \tau_\lambda^M)$  в соседних спектральных каналах (ее несложно учесть).

## 2 ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ АОТ

### АТМОСФЕРЫ

Оборудование для изучения АОТ атмосферы подробно описано Д.М. Кабановым и др. в работе [4]. Исследования АОТ атмосферы с использованием солнечных фотометров были начаты в ИОА СО РАН в 1989 г. За два десятилетия было разработано несколько типов многоволновых солнечных фотометров. При выборе технических решений основное внимание на первом этапе уделялось функционированию прибора в экспедиционных условиях и в более широком диапазоне спектра по сравнению с традиционным (~0,4-1,0 мкм). Затем, приоритетным стало обеспечение круглогодичного мониторинга, автоматизация процесса измерений и обработки данных.

#### 2.1 Солнечный фотометр SPM

В настоящее время существуют две модификации фотометра типа SP: SP9 и SPM. Отличие двух типов в том, что SP9 размещен на автоматической поворотной платформе оснащенной модулем наведения и слежения за Солнцем.



Рисунок 4 – Внешний вид портативного фотометра SPM

Портативный солнечный фотометр SPM (рисунок 4) предназначен для измерений АОТ и влагосодержание атмосферы в экспедиционных и мобильных условиях – из положения «с руки». Процедура измерений максимально упрощена и доступна любому пользователю. В сравнении с серийным анало-

гом (солнечным фотометром Microtops II) SPM имеет преимущество по спектральному диапазону и числу измерительных каналов (фильтров).

Принцип работы фотометра SPM можно понять, изучив его составляющие (рисунок 5).

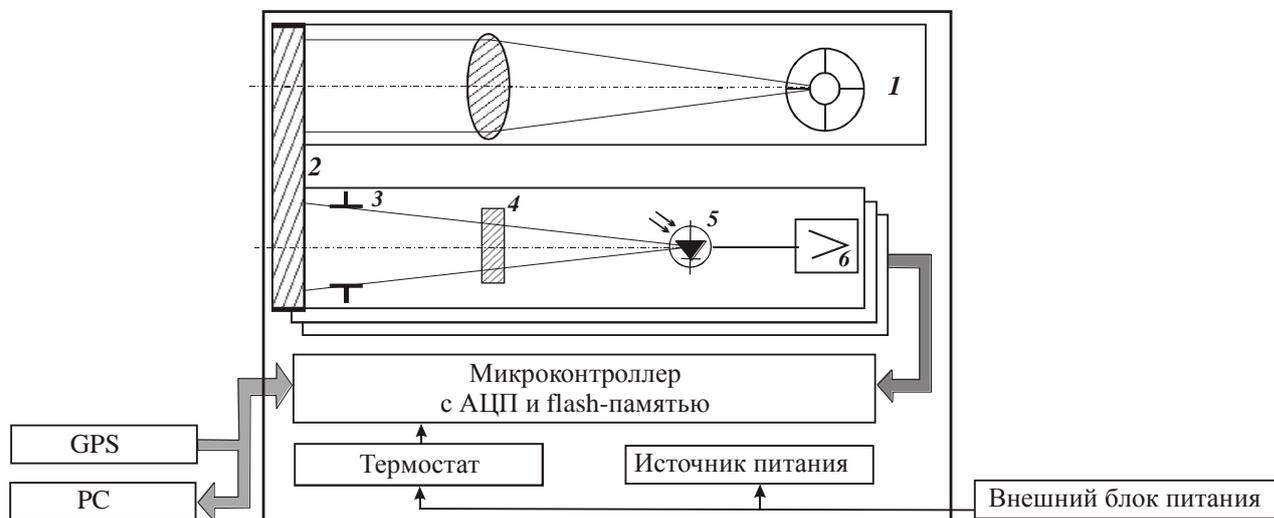


Рисунок 5 – Блок-схема фотометра SPM

В состав фотометра входят: линзовый визир 1 для наведения на Солнце; кварцевое входное окно 2; 12 идентичных фотоприемных каналов, в каждом из которых установлены диафрагма поля зрения 3, интерференционный светофильтр 4, фотодиод 5 и усилитель 6; микроконтроллер; термостат и источник питания на основе аккумулятора. В зависимости от выбранного диапазона спектра используются два или три типа фотоприемников: фотодиоды ФД УФ-1 (GaP), ФДУК-13у (Si) и Hamamatsu G 8373-01 (InGaAs). Управление процессом измерений осуществляется по программе встроенного контроллера. В его состав входят: RISC-микроконтроллер ATmega-128, flash-память объемом 512 Кбайт, 14-разрядный 16-канальный АЦП и часы реального времени с автономным источником питания. Объем внутреннего программного обеспечения составляет около 40 кбайт.

Через два последовательных порта RS-232 к фотометру подключаются внешние устройства: компьютер (PC) – для передачи накопленных в памяти данных и GPS-приемник (типа Garmin GPS-38 или аналогичный) – для регистрации географических координат места наблюдений. Подключение GPS-

приемника позволяет одновременно переустанавливать точное время, что важно при эксплуатации солнечных фотометров. Электропитание SPM осуществляется от встроенного аккумулятора или внешнего блока питания (12 и  $\pm 5$  В), обеспечивающего также подзарядку аккумулятора. Для увеличения продолжительности измерений (снижения энергопотребления) режим термостатирования включается только при внешнем источнике питания. Основные характеристики прибора приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные характеристики солнечного фотометра SPM

Характеристики	Коротковолновые каналы	ИК каналы
Угол поля зрения, градусов	1.8-2	2.4
Количество длин волн	10	2
Максимумы полос пропускания фильтров, мкм	0,34; 0,37; 0,44; 0,5; 0,55; 0,67; 0,78; 0,87; 0,94; 1,04	1,55; 2,14
Полуширина пропускания фильтров, нм	5-10	15-30
Время единичного цикла измерений, сек	1	
Объем памяти (накопления данных), дней	15	
Погрешность измерений, %	0.5	
Температура термостата, °С	25 $\pm$ 0,5	
Размеры, мм	200×118×64	

Процедура измерений заключается в наведении фотометра на Солнце с помощью визира по солнечному зайчику на прицельной сетке в фокусе визира. После наведения, нажатием кнопки «Замер» проводятся измерения – поочередный опрос спектральных каналов и GPS-приемника (если он подключен). Учитывая, что наведение на Солнце выполняется вручную, из текущих замеров в каждом цикле выбираются максимальные значения сигналов, которые записываются во flash-память. Такой подход позволяет исключить ложные замеры, связанные с неточностью или сбоями наведения фотометра на Солнце.

## 2.2 Многоволновой солнечный фотометр SP-9

Фотометр предназначен для круглогодичного мониторинга АОТ и вла­госодержания атмосферы на региональной сети станций. Процесс измерений полностью автоматизирован и выполняется без участия оператора.



Рисунок 6 – Внешний вид фотометра SP-9 с системой наведения-слежения за Солнцем (1 – фотометр, 2 – устройство наведения, 3 – блок координатных датчиков, 4 – блок управления)

Оптико-электронная схема фотометра аналогична портативному SPM как изображено на рисунке 10, но число спектральных каналов увеличено до 17. Автоматизированный режим работы прибора предусматривает выполнение следующих функций:

- 1) определение с помощью датчика DS ситуаций "безоблачного Солнца";
- 2) сначала грубое наведение фотометра, затем точное слежение за Солнцем;
- 3) измерение и накопление сигналов спектральной прозрачности атмосферы;
- 4) при закрытии Солнца облаками - перевод фотометра в положение "парковка";
- 5) самодиагностика - контроль температуры фотометра, напряжений пи-

тания и др.

Процесс автоматического наведения и измерений осуществляется следующим образом. В ждущем режиме поворотная платформа с фотометром запаркованы – развернуты вниз и ориентированы на юг. По сигналу датчика DS, управляющий контроллер последовательно подает команды на грубое наведение фотометра, а затем – на слежение за Солнцем и включение фотометрических замеров. Если в течение заданного времени (~1 мин) Солнце не было найдено, или перекрылось облаком, то контроллером подается команда на "парковку" фотометра и включение датчика DS. То есть, система AST и датчик DS работают поочередно: когда Солнце закрыто облаками включен DS, а AST находится в ждущем режиме (фотометр запаркован); при безоблачном Солнце – AST осуществляет слежение, работает фотометр, а датчик DS выключен.

Процедура регистрации сигналов включает: 1) опрос (50 мсек) и усреднение сигналов всех каналов с записью в ОЗУ; 2) проведение 20 таких замеров и выбор максимальных значений по каждому каналу; 3) опрос GPS-приемника (если он подключен); 4) запись всей полученной информации во flash-память. Через 1 мин измерительный цикл повторяется.

Кроме измерительной программы фотометра, в состав программного обеспечения фотометров SP входят: сервисная программа (ReadSP2009.exe) для связи фотометра с компьютером и комплекс программ обработки данных (информационная система).

### 2.3 Sun-Sky радиометр CE-318 сети AERONET

Требованию автоматизированного мониторинга в наибольшей степени отвечает сеть AERONET, созданная на базе Sun-Sky радиометров CE 318. Важными достоинствами сети AERONET являются высокая информативность и развитая инфраструктура, которая характеризуется глобальным охватом (около 300 фотометров на всех континентах), отлаженной технологией калибровок, централизованной системой обработки и INTERNET -доступной базой аэрозольных данных. Благодаря применению современных методов и

алгоритмов решения обратных задач, кроме АОТ и влагосодержания атмосферы, восстанавливаются следующие основные характеристики:

- объемное распределение частиц по размерам в 22 интервалах размеров;
- объемная концентрация, объемный медианный радиус, стандартное отклонение  $\sigma$  и эффективный радиус  $r_{eff}$  для общей, мелкодисперсной  $f$  и грубодисперсной  $s$  фракций частиц;
- спектральный комплексный показатель преломления (действительная  $n$  и мнимая  $k$  часть);
- спектральный фактор асимметрии индикатрисы аэрозольного рассеяния  $\langle \mu \rangle$ ;
- спектральное альbedo однократного рассеяния (АОР) аэрозоля  $A$ .

Sun-Sky радиометр CE-318 функционирует автоматически – по программе контроллера: в заданное время проводится наведение прибора на Солнце и поочередное измерение на разных длинах волн прямой (Sun) и небесной (Sky) радиации. В состав CE-318 входят следующие основные блоки (рисунок 7): измерительная (оптическая) головка; "робот" – двухкоординатный (зенит/азимут) блок сканирования; блок управления с контроллером и буферной памятью (32 кбайт); блок питания.

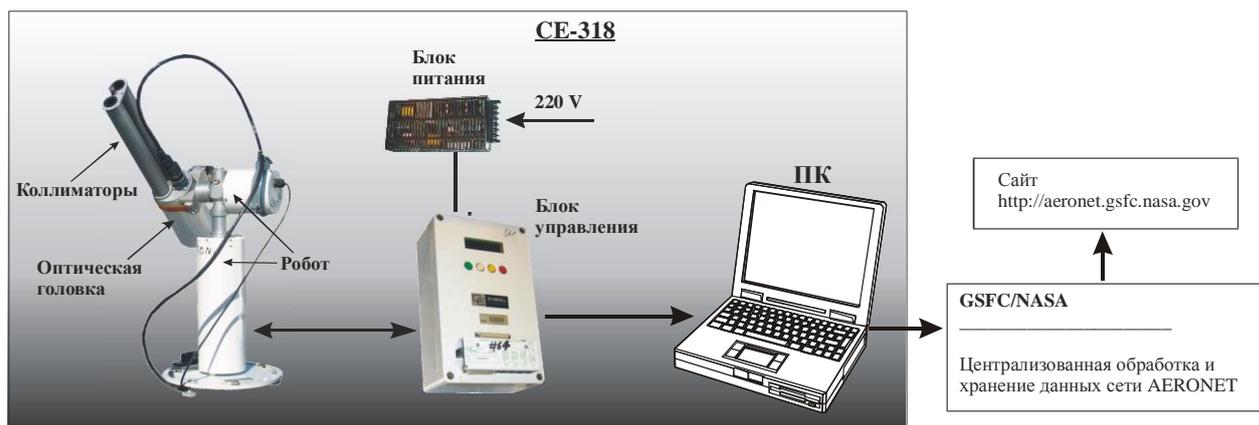


Рисунок 7 – Состав Sun-Sky радиометра CE 318 (AERONET)

Оптико-электронная схема измерительной головки фотометра включает (рисунок 8): линзовый коллиматор 1 для измерения рассеянного излучения и безлинзовый 2 – для прямого излучения; блок смены светофильтров 3 с шаговым двигателем; фотоприемники – Si фотодиоды 4 с усилителями сигналов

5, четырехсекторный датчик 6 системы точной подстройки фотометра на Солнце. Основные характеристики радиометра СЕ-318:

- угол поля зрения Sun и Sky каналов 1.2°;
- количество интерференционных светофильтров – 8;
- максимумы полос пропускания светофильтров 0,34, 0,38, 0,44, 0,50, 0,67, 0,87, 0,94 1,02 мкм (в отдельных экземплярах добавлен девятый спектральный канал – 1.6 мкм);
- полуширина пропускания светофильтров 0,003÷0,010 мкм.

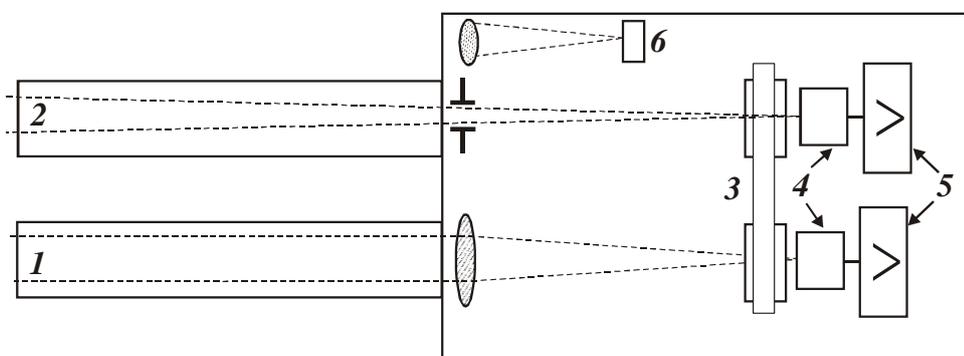


Рисунок 8 – Условная схема оптической головки СЕ-318. линзовый коллиматор 1 для измерения рассеянного излучения и безлинзовый 2 – для прямого излучения; блок смены фильтров 3 с шаговым двигателем; фотоприемники – Si фотодиоды 4 с усилителями сигналов 5, четырехсекторный датчик 6 системы точной подстройки фотометра на Солнце.

Электромеханическое устройство "робота" выполнено на основе двух шаговых двигателей, которые управляются контроллером и обеспечивают расчетное (по координатам и времени) наведение фотометра на Солнце, а также его программное сканирование на альмукантарате Солнца и в главной плоскости солнечного вертикала.

Блок управления обеспечивает функционирование фотометра в режимах Sun и Sky: рассчитывает координаты Солнца, управляет работой шаговых двигателей "робота" и блока смены светофильтров, обеспечивает анало-

го-цифровое преобразование измеренных сигналов и сохранение данных в буферной памяти, контролирует состояние отдельных блоков прибора.

При больших зенитных углах Солнца, измерения Sun/Sky радиации проводятся для заданных оптических масс атмосферы  $m = 7; 6.5; 6; \dots; 2; 1.7$ , а при  $\xi_o < 54^\circ$  – через каждые 15 минут времени. В автоматическом режиме предусмотрено проведение трех циклов измерений (триплет) прямой радиации на всех длинах волн с общей продолжительностью 30 сек. Измерения яркости неба на альмукантарате Солнца и в плоскости солнечного вертикала осуществляются последовательно на четырех длинах волн (0.44, 0.67, 0.87, 1.02 мкм) путем последовательных сканирований фотометра влево/вправо и вверх/вниз относительно направления на Солнце. Измерения выполняются в 28 фиксированных углах от 0 до  $\pm 180^\circ$ , а в солнечном вертикале – в 38 углах от -6 до  $150^\circ$ . Продолжительность цикла измерений на 4-х длинах волн составляет около 5 мин.

## 3 ХАРАКТЕРИСТИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

### 3.1 Результаты интеркалибровки фотометров

Важным условием проведения экспериментов в двух разнесенных в пространстве точках является качественная калибровка фотометров и сравнение показаний используемых приборов, размещенных в одном месте – интеркалибровка.

Классический способ калибровки солнечных фотометров по методу Бугера заключается в проведении измерений в горных условиях (на высотах более 2 км) в течении нескольких дней и построении калибровочных графиков логарифмов сигналов от оптической массы атмосферы. Калибровочная константа при этом определяется путем экстраполяции полученной зависимости (прямой) к значению оптической массы равной нулю рисунок 10. Проведение горных калибровок достаточно дорогостоящее мероприятие, поэтому на практике калибровочные константы часто определяются путем проведения совместных измерений с «мастер-приборами», которые либо сами проходили калибровку в горах, либо калибровались по таким приборам.

Проверка качества градуировки фотометров SPM и SP6 выполнялась с привлечением калиброванных фотометров CE-318 и Microtops II, используемых в сети AERONET (NASA).

К настоящему времени накоплен достаточно большой объем данных параллельных измерений фотометрами SP6 и CE-318 (237 дней, средних за час – 931) Сопоставление результатов показало, что среднеквадратические отклонения между значений  $\tau_{\lambda}^a$  находятся в пределах от 0.019 для  $\lambda=0.38$  мкм до 0.013 для  $\lambda=1.02$  мкм при коэффициентах корреляции R от 0.97 до 0.86.

Параллельные измерения фотометрами SPM и Microtops II выполнялись в ходе рейса НИС «Академик Страхов» в период с 16 декабря 2015 г. по 17 января 2016 г. Средний квадрат отклонения величин спектральных АОТ для двух приборов составил от 0.02 до 0.01 для 0.44 и 0.87 мкм, соответ-

ственно. Величины коэффициентов корреляций между параллельными измерениями  $\tau_{\lambda}^a$  – более 0.98.

Таким образом, СКО между результатами двух приборов описанных выше не превышают погрешности определения сопоставляемых характеристик. Например, для АОТ эта величина оценивается как 0.01–0.02 (рисунки 9 б, в). Это свидетельствует, с одной стороны, о достаточно высокой достоверности получаемых данных, с другой – о корректности сопоставления результатов двух типов фотометров, размещенных в разных пунктах.

### 3.2 Расположение пунктов наблюдения и сроки измерений

Двухточечные измерения выполнялись в осенний и весенний сезоны. В зимний период измерения не выполнялись по причине низких положений Солнца, использованием фотометра SPM в морской экспедиции и выполнении профилактических работ с фотометром SP6е.

Осенний цикл измерений выполнялся в период с 28 октября по 15 ноября 2015 г. Измерения выполнялись фотометром SPM на площади им. Кирова и фотометром SP6е в академгородке г.Томск. В этот период было получено 24 совместных серии замеров спектральных АОТ атмосферы, охватывающих 4 дня.

Весенний цикл проводился с 22 марта по 5 мая 2016 г. Измерения фотометром SPM выполнялись на площади им. Кирова и вблизи пл. Транспортной. Вторая точка (фотометр CE-318) в марте-апреле располагалась в Академгородке, а с 22 марта была перенесена на обсерваторию «Фоновая» ИОА СО РАН (~60 км. к западу от города). В период весенних наблюдений было получено 6 совместных среднечасовых спектра АОТ, охватывающих 5 дней).

### 3.3. Результаты двухточечного эксперимента

Примеры временной изменчивости АОТ в период наблюдений представлены на рисунках 9а-10.

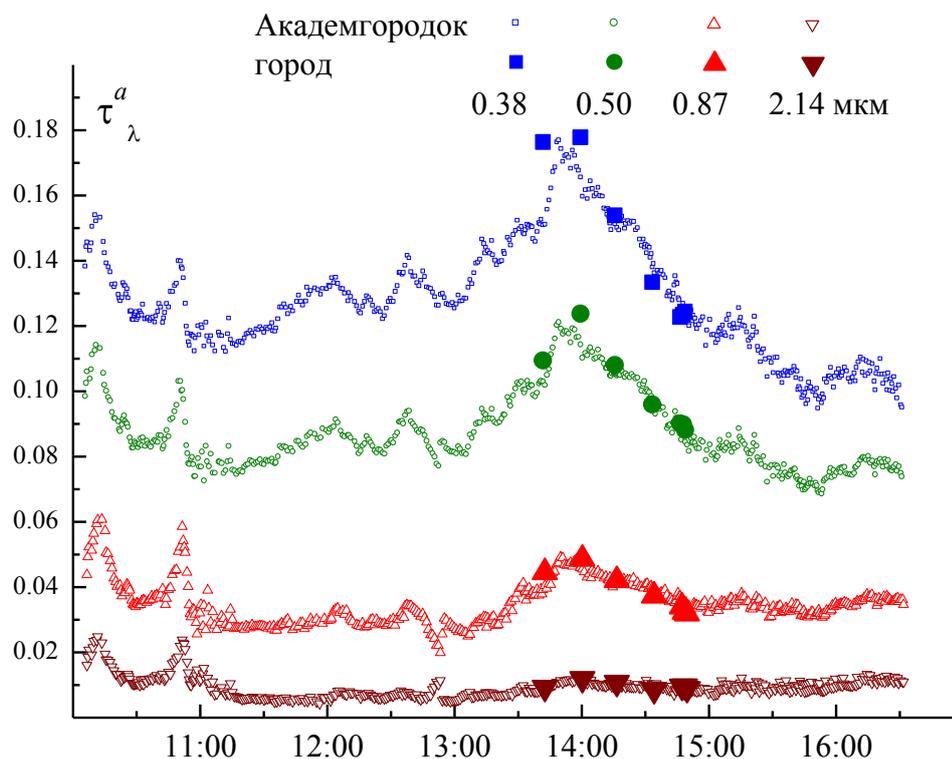


Рисунок 9 а – Временная изменчивость АОТ атмосферы в двух пунктах наблюдения 28/10/2015.

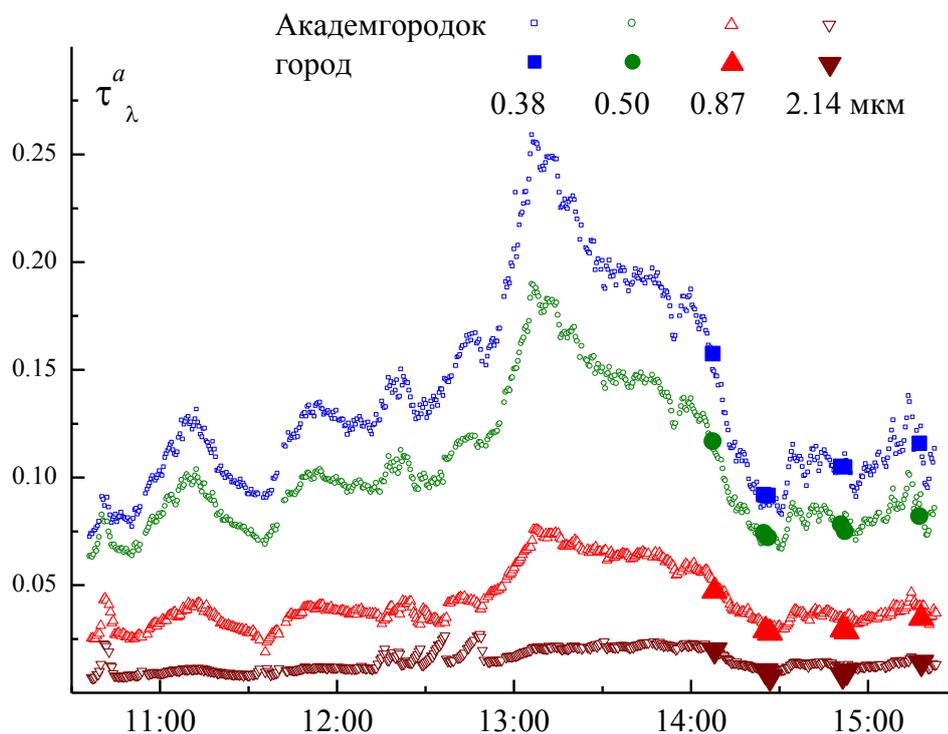


Рисунок 9 б – Временная изменчивость АОТ атмосферы в двух пунктах наблюдения 13/11/2015

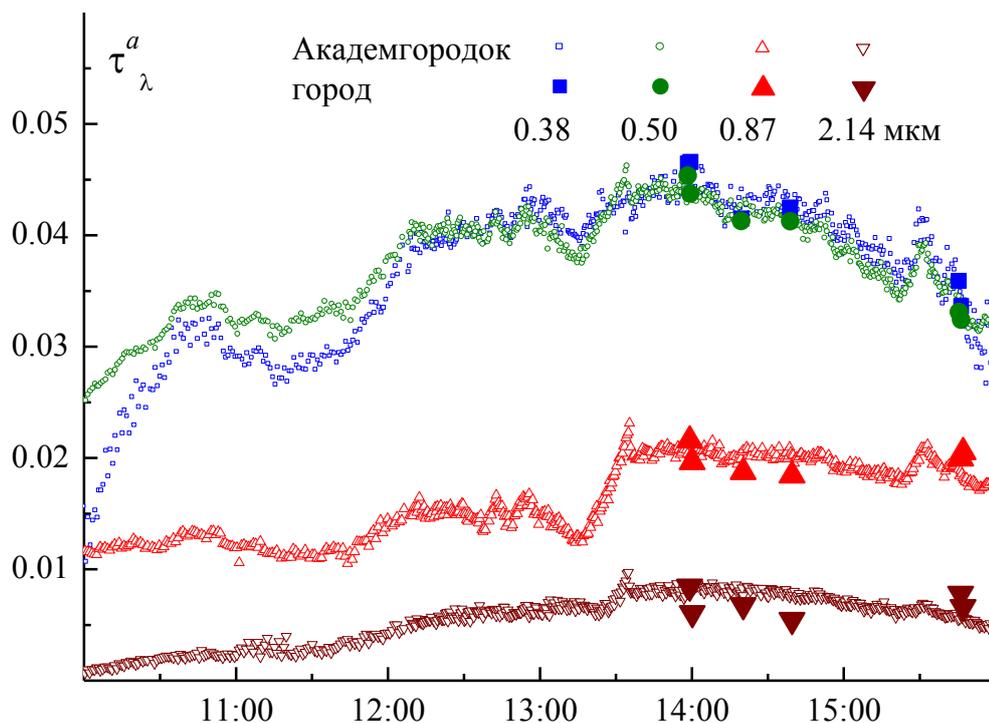


Рисунок 9 в – Временная изменчивость АОТ атмосферы в двух пунктах наблюдения 15/11/2015

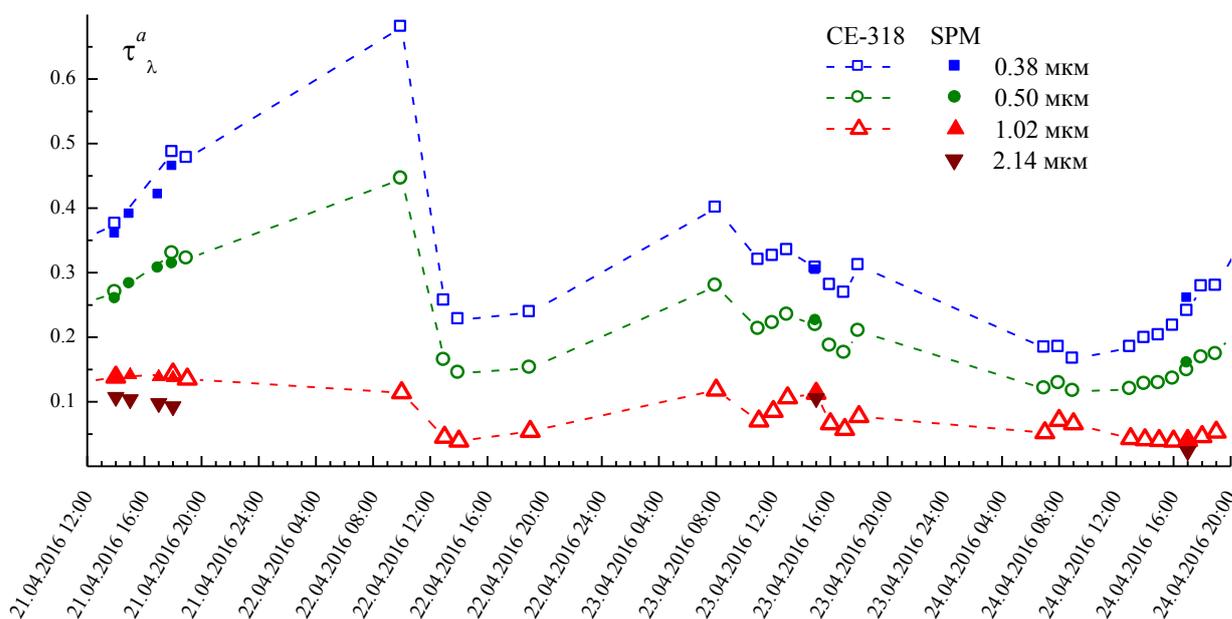


Рисунок 10 – Временная изменчивость АОТ атмосферы в двух пунктах наблюдения с 21 по 24 апреля 2016 г.

Из рисунков видно, что спектральные АОТ в двух пунктах достаточно хорошо совпадают по величине и обнаруживают близкую временную динамику. Можно предположить, что основным фактором, влияющим на изменчивость замутнения атмосферы в обоих пунктах, являются синоптические

процессы (перенос различных воздушных масс и др.), носящие региональный характер.

Для оценки влияния города на замутнения атмосферы были проанализированы только совместные (ближайшие по времени) измерения АОТ в обеих точках. Средние спектральные зависимости АОТ для весеннего цикла представлена на рисунке 11.

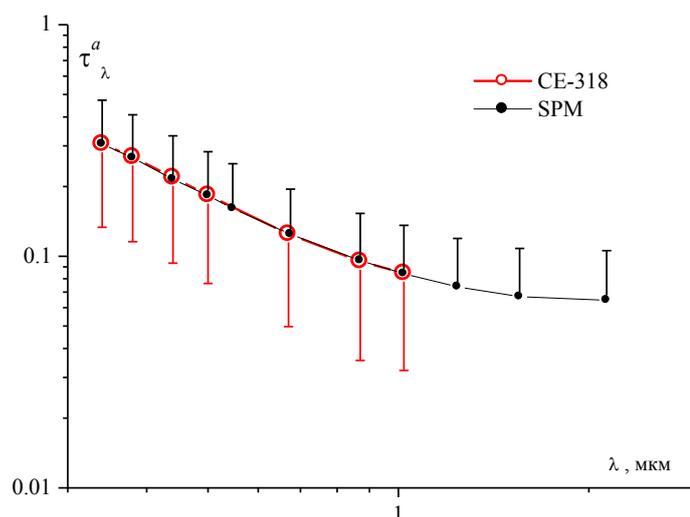


Рисунок 11 – Средние спектральные зависимости АОТ атмосферы в двух пунктах наблюдений для весеннего цикла (по результатам совместных измерений).

Видно, что зависимости  $\tau^a(\lambda)$  в городе и вне города практически совпадают. По абсолютной величине средние значения различий  $\tau_\lambda^a$  между двумя пунктами указанных в таблице 2 в осенний и весенний период не превышали 0.002 при СКО 0.007 и 0.015, и соответствовали коротковолновой части спектра. Большой разброс значений АОТ в весенний период объясняется тем, что часть данных сопоставлялась с измерениями, выполненными на удалении около 60 км.

Таким образом, представленные результаты сопоставления указывают на то, что влияние г. Томска на аэрозольное замутнение атмосферы если и есть, то достаточно слабое, поскольку выявленные различия не превышают погрешность определения АОТ.

Таблица 2 – Средние и среднеквадратические значения различий между измерениями АОТ в двух пунктах.

Характеристика	Осенний цикл		Весенний цикл	
	$\bar{\Delta}$	$\sigma$	$\bar{\Delta}$	$\sigma$
$\tau^a_{0.38}$	0.002	0.007	-0.002	0.015
$\tau^a_{0.44}$	0.0003	0.004	-0.004	0.013
$\tau^a_{0.50}$	0.001	0.004	-0.0005	0.011
$\tau^a_{0.675}$	-0.0001	0.003	-0.0003	0.008
$\tau^a_{0.87}$	-0.0001	0.003	0.0006	0.005
$\tau^a_{2.14}$	-0.0004	0.002		

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По литературным данным были изучены результаты исследований изменчивости характеристик АОТ в районе г. Томска и двухточечных экспериментов «Академгородок – фоновый район».

Изучены принципы действия и методика проведения эксперимента фотометра типа SPM, CE-318, SP-9, а также проведены измерения портативным солнечным фотометром SPM в центре города.

Рассчитаны эффективные функции пропускания молекулярного поглощения атмосферными газами для оптических каналов фотометра и выполнена их параметризация.

Результаты эксперимента после обработки, анализа результатов измерений и сопоставления указывают на то, что влияние г. Томска на аэрозольное замутнение атмосферы если и есть, то достаточно слабое, поскольку все выявленные различия с фоновым районом не превышают погрешность определения АОТ.

## Список использованных источников

1. Горбаренко Е.В. Аэрозольная составляющая оптической толщи атмосферы как характеристика антропогенного загрязнения воздуха над промышленными центрами // Метеорология и гидрология – 1997 - № 3 - С. 12–18.
2. Гущин Г.П. Методы, приборы и результаты измерения спектральной прозрачности атмосферы. Л.:Гидрометеиздат, 1988 - 200 с.
3. Кабанов М.В., Панченко М.В. Рассеяние оптических волн дисперсными средами. Часть III. Атмосферный аэрозоль. Томск, 1984 - 189с.
4. Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Турчинович С.А. Солнечный фотометр для научного мониторинга (аппаратура, методики, алгоритмы) // Оптика атмосф. и океана – 2001 - Т. 14 - № 12 - С. 1162–1169.
5. Кабанов Д.М. Экспериментальные исследования аэрозольной оптической толщи атмосферы над океаном и континентом. Автореф. дисс. ... канд. физ-мат. наук. – Томск, 2002. – 209 с.
6. Сакерин С.М., Горбаренко Е.В., Кабанов Д.М. Особенности многолетней изменчивости аэрозольной оптической толщи атмосферы и оценки влияния различных факторов // Оптика атмосф. и океана – 2008 - Т. 21 - № 7 - С. 625–631.
7. Исследование радиационных характеристик аэрозоля в азиатской части России // под общей ред. С.М. Сакерина. Томск, 2012 - 484с.
8. Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., and other AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization // Rem. Sens. Env – 1998 - P. 1–16.
9. Поддубный В.А., Лужецкая А.П., Маркелов Ю.И. и др. Оценка влияния города на аэрозольное замутнение атмосферы по данным двухточечных измерений "фон - промышленный город" // Оптика атмосферы и океана – 2012 - Т. 25 - № 4 - С. 319–326.

10. Заяханов А.С., Жамсуева Г.С., Нагуслаев С.А. и др. Результаты исследований аэрозольной оптической толщи атмосферы в Байкальском регионе. // Оптика атмосферы и океана – 2010 – Т. 23 - № 06 - С. 466–470.
11. Кабанов Д.М., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С. и др. О результатах двухточечных измерений аэрозольной оптической толщи атмосферы в нескольких регионах России // Аэрозоли Сибири. XXII Рабочая группа: Тезисы докладов. Томск: Изд-е ИОА СО РАН – 2015 – С. 86.

Уважаемый пользователь! Обращаем ваше внимание, что система «Антиплагиат» отвечает на вопрос, является ли тот или иной фрагмент текста заимствованным или нет. Ответ на вопрос, является ли заимствованный фрагмент именно плагиатом, а не законной цитатой, система оставляет на ваше усмотрение.

## Отчет о проверке № 1

**ФИО:** Перминов Владислав  
**дата выгрузки:** 19.06.2016 07:32:03  
**пользователь:** [ya.vladperminov2013@yandex.ru](mailto:ya.vladperminov2013@yandex.ru) / ID: 3062219  
 отчет предоставлен сервисом «Антиплагиат»  
 на сайте <http://www.antiplagiat.ru>

### Информация о документе

**№ документа:** 4  
**Имя исходного файла:** Перминов Владислав\_бакалаврская работа\_.docx  
**Размер текста:** 3206 кБ  
**Тип документа:** Прочее  
**Символов в тексте:** 34002  
**Слов в тексте:** 4052  
**Число предложений:** 167

### Информация об отчете

**Дата:** Отчет от 19.06.2016 07:32:03 - Последний готовый отчет  
**Комментарии:** не указано  
**Оценка оригинальности:** 93.53%  
**Заимствования:** 6.47%  
**Цитирование:** 0%



Оригинальность: 93.53%  
 Заимствования: 6.47%  
 Цитирование: 0%

### Источники

Доля в тексте	Источник	Ссылка	Дата	Найдено в
1.74%	[1] Журнал "Оптика атмосферы и океана"	<a href="http://ao.iao.ru">http://ao.iao.ru</a>	17.10.2014	Модуль поиска Интернет
1.39%	[2] (.pdf)	<a href="http://aari.ru">http://aari.ru</a>	08.08.2014	Модуль поиска Интернет
1.37%	[3] Журнал "Оптика атмосферы и океана"	<a href="http://ao.iao.ru">http://ao.iao.ru</a>	17.10.2014	Модуль поиска Интернет

