Министерство науки и высшего образования Российской Федерации НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ) Радиофизический факультет Кафедра оптико-электронных систем и дистанционного зондирования

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК

Руководитель ООП д-р физ.-иат. наук, профессор И.В. Самохвалов и.в. Самохвалов «<u>13</u>» <u>ОВ</u> 2021 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ В ПОЛЯРНЫХ РАЙОНАХ

по направлению подготовки 12.04.02 – Оптотехника направленность (профиль) «Оптические и оптико-электронные приборы»

Круглинский Иван Александрович

Руководитель ВКР д-р физумат наук, профессор В.А. Донченко

» ИЮНЯ 2021 г. "

Научный консультант ВКР канд. физ.-мат. наук, с.н.с. ИОА СО РАН Д.М. Кабанов adnuch » ИЮНЯ 2021 г. ~

Автор работы студент группы № 071952 И.А. Круглинский поблись «______ 2021 г.

Томск - 2021

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ) Радиофизический факультет

Кафедра оптико-электронных систем и дистанционного зондирования (ОЭСиДЗ)

УТВЕРЖДАЮ Руковедитель ООП д-р фил-мат. наук, профессор И.В. Самохвалов 20/9г.

б) в ГЭК – июнь 2021 г.

ЗАДАНИЕ

по выполнению выпускной квалификационной работы магистра обучающемуся Круглинскому Ивану Александровичу по направлению подготовки 12.04.02 - Оптотехника, направленность (профиль) «Оптические и оптико-электронные приборы»

1 Тема выпускной квалификационной работы

«Характеристики спектральной прозрачности атмосферы в полярных районах»

2 Сроки сдачи обучающимся выполненной выпускной квалификационной работы

а) в деканат – июнь 2021 г.

3 Исходные данные к работе:

Объект исследования - характеристики атмосферного аэрозоля в полярных районах. Предмет исследования - спектральная аэрозольная оптическая толща(АОТ) атмосферы, вклад мелко - грубодисперсной фракций аэрозоля в АОТ.

Цель исследования - определить закономерности пространственно-временной изменчивости аэрозольной оптической толщи атмосферы (АОТ) в полярных районах на основе анализа результатов, полученных в ходе экспедиционных исследований.

Задачи:

Выполнение работы предусматривает ознакомление по литературным источникам с ранее полученными результатами, освоение солнечных фотометров и методики определения АОТ, проведение измерений в экспедиционных условиях, обработку и анализ данных полученных в полярных районах. Планируется представить результаты, касающиеся межгодовой и сезонной изменчивости аэрозольного замутнения атмосферы над стационарными пунктами наблюдений в полярных районах, взаимосвязь с метеопараметрами, результаты измерений АОТ атмосферы в судовых экспедициях.

Методы исследования: Метод солнечной спектрофотометрии

Организация или отрасль, по тематике которой выполняется работа, - Институт оптики атмосферы СО РАН

4 Краткое содержание работы

Знакомство по литературным источникам с методикой определения АОТ атмосферы и имеющимися результатами.

Освоение солнечных фотометров (SPM, SP-9 и CE-318).

Обработка измерений АОТ атмосферы на ст. Мирный (Антарктида), в п. Баренцбург

(арх. Шпицберген), станции «Ледовая база «Мыс Баранова» (арх. Северная Земля) и судовых экспедиций.

Анализ результатов.

Подготовка и написание магистерской диссертации

Руководитель выпускной квалификационной работы д-р физ.-мат. наук, профессор

Консультант

с.н.с ИОА СО РАН канд.физ.-мат.наук

Задание принял к исполнению студент группы №071952

В.А. Донченко Д.М. Кабанов И.А. Круглинский

АННОТАЦИЯ

Ключевые слова: аэрозоль,солнечная радиация, атмосфера над океаном, индекс антарктического колебания, оптическая толща.

Обсуждаются закономерности пространственно-временной изменчивости аэрозольной оптической толщи атмосферы в полярных районах на основе анализа результатов, полученных в ходе экспедиционных исследований. Показано, что средний уровень замутнения в Баренцбурге выше чем в Мирном. Основную роль в изменчивости аэрозольной атмосферы, оптической толщи арктическом районе, играет В мелкодисперсный аэрозоль. В колебаниях аэрозольной оптической толщи атмосферы Антарктики вклад мелко- и грубодисперсной фракций аэрозоля Межгодовые колебания аэрозольной оптической толщи сопоставим. атмосферы обнаруживают значимую связь с индексом Антарктического колебания и качественно согласуются с повторяемостью основных форм атмосферной циркуляции в южной полярной области.

Работа выполнена на 47 страницах; состоит из введения, 3 глав, заключения, списка использованных источников, приложения, содержит 19 рисунков и 1 таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЭРОЗОЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИ АТМОСФЕРЫ	.11
1.1 Методика определения АОТ атмосферы	.11
1.2 Расчет функций пропускания молекулярного поглощения и рассеяни атмосферы	я . 14
1.3 Калибровка солнечных фотометров	. 18
2 АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ФОТОМЕТРЫ	. 20
2.1 Портативный солнечный фотометр SPM	. 20
2.2 Многоволновой солнечный фотометр SP-9	. 23
3 ОСОБЕННОСТИ МНОГОЛЕТНЕЙ И СЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ АЭРОЗОЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИ АТМОСФЕРЫ В ПОЛРЯНЫХ	
РАЙОНАХ	.26
3.1 Сезонная изменчивость АОТ атмосферы в п.Баренцбург и на антарктической обсерватории Мирный	. 27
3.2 Межгодовая изменчивость АОТ атмосферы на антарктической обсерватории Мирный	. 30
3.3 Взаимосвязь АОТ с характеристиками ветра на антарктической обсерватории Мирный	. 37
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	. 39
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	.41
ПРИЛОЖЕНИЕ А	.46

введение

Одним из наиболее динамичных компонентов атмосферы является аэрозоль, который играет важную роль в процессе радиационного переноса и обмена веществом в системе «континент-атмосфера-океан».

Актуальность исследований атмосферного аэрозоля, в полярных районах, обусловлена рядом причин:

1) Изменение климата, наиболее ярко проявившиеся именно в высоких широтах, и начавшимся освоением Арктического бассейна.

2) Осознание роли аэрозоля (наряду с парниковыми газами), как одного из климатообразующих факторов.

3) Необходимость коррекции спутниковых данных, а также развитие различных средств оптической связи и др.

4) Накопление рядов наблюдений спектральной прозрачности атмосферы в высокоширотных районах.

Среди приоритетных направлений в исследовании свойств аэрозоля и его воздействия на климат можно выделить: слежение за пространственновременной изменчивостью характеристик аэрозоля, изучение взаимозависимостей между свойствами аэрозоля и различными климатообразующими процессами.

Для получения статистически обеспеченных данных об оптических свойствах аэрозоля и их пространственно-временной изменчивости необходима информация для больших территорий за длительный период времени. Однако зачастую проводимые спектральные измерения в Мировом океане и полярных районах, на основе которых определяется АОТ морской атмосферы, как правило проводятся эпизодически и не охватывают больших территорий.

Целью настоящей работы является определение закономерности пространственно-временной изменчивости аэрозольной оптической толщи

атмосферы (AOT) в полярных районах на основе анализа результатов, полученных в ходе экспедиционных исследований.

Для достижения этой цели необходимо решение следующих задач:

1) Изучение принципов работы и устройства солнечных фотометров(на примере SPM и SP-9), приобретение навыков работы с ними.

2) Освоение методики определения АОТ атмосферы в ИК диапазоне спектра. Определение параметров спектральных каналов солнечного фотометра SPM (расчет зависимостей функций пропускания, обусловленных поглощением атмосферными газами).

3) Калибровка солнечных фотометров и обработка результатов экспедиционных измерений в п. Баренцбург (арх. Шпицберген), ледовая станция мыс Баранова (арх. Северная Земля), станция Мирный (Антарктида) и др.

 Анализ результатов измерений: сезонная изменчивость характеристик АОТ в различных пунктах наблюдений, межгодовая изменчивость характеристик АОТ, взаимосвязь АОТ с метеопараметрами.

При написании работы были использованы данные многолетних измерений прямой солнечной радиации, проводившиеся в различных климатических регионах с различными антропогенными факторами:

1) Данные измерений фотометром SPM в п. Баренцбург, арх. Шпицберген, 2011-2020гг. [1, 2].

2) Данные измерений фотометром ABAS на антарктической станции Мирный, 1979-2013гг. [3].

3) Данные измерений фотометром SPM на антарктической станции Мирный, 2013-2020гг. [4,5].

4) Данные об индексе антарктического колебания (ААК) [6].

5) Данные измерений трех основных форм атмосферной циркуляции, предоставленные коллегами из ААНИИ [7].

В связи с особенностями пассивных методов, измерения АОТ атмосферы проводятся в ситуациях, когда Солнце не закрыто облаками. Контроль за состоянием диска Солнца и измерениями, осуществляется оператором. В соответствии с общепринятыми требованиями метода измерений АОТ, проводится ежегодная калибровка солнечного фотометра в условиях стабильной чистой атмосферы. Кроме того, для повышения достоверности нахождения калибровочных констант И результатов измерений АОТ осуществляется ежегодная интеркалибровка с параллельно фотометром CimelCE 318 глобальной работающим сети AERONET (https://aeronet.gsfc.nasa.gov/).

Для решения большинства фундаментальных и прикладных задач оптики атмосферы, включая радиационные расчеты климатического воздействия аэрозоля, погрешность определения АОТ не должна превышать величины 0.01-0.02. Современные фотометры, измеряющие интенсивность (освещенность, яркость) оптического излучения с погрешностью не более 0,5-1% (с учетом методических ошибок) удовлетворяют вышеуказанным требованиям определения АОТ.

Основные параметры, используемые в данной работе - это спектральные АОТ 0,34-2,14 мкм, а так же АОТ мелко и грубо - дисперсного аэрозоля, параметры Ангстрема, привлекались метеопараметры.

В анализе использовались среднедневные, среднемесячные и среднегодовые значения спектральных АОТ с учетом среднеквадратичного отклонения (СКО), рассчитана периодограмма межгодовых колебаний АОТ. Проведена оценка сезонной и межгодовой изменчивости.

Защищаемое положение:

В межгодовой изменчивости АОТ атмосферы на длине волны 0.5 мкм на ст. Мирный (Антарктида) с 1996 по 2020 гг., обнаружены статистически значимые (по уровню 0.05) колебания АОТ с периодом в 5 лет и амплитудой 0.005, относительно среднего значения 0.022. По теме магистерской диссертации, были представлены следующие основные публикации:

1. Kabanov D.M., Sakerin S.M., Kruglinsky I.A., Ritter C, Sobolewski P.S., Zielinski T. Comparison of atmospheric aerosol optical depths measured with different sun photometers in three regions of Spitsbergen Archipelago // Proceedings of SPIE. –2018. –V. 10833. –P.1083342-1 - 1083342-5.

2. КабановД.М., КозловВ.С., СакеринС.М., ЧерновД.Г., Турчинович Ю.С., КруглинскийИ.А., ЛоскутоваМ.А., Лубо-Лесниченко К.Е., МакштасА.П., МовчанВ.В., РадионовВ.Ф.Сравнение характеристик аэрозоля на полярных станциях «мыс Баранова» и «Баренцбург» в измерительные сезоны 2018-2019 гг. // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XXVI Международного симпозиума. Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2020. – С-293 – С-297.

3. Сакерин C.M., Кабанов Д.М., Круглинский И.А., Лубо-Лесниченко К.Е., Радионов В.Ф., Сидорова О.Р. Сезонная и межгодовая изменчивость аэрозольной оптической толщи атмосферы в 2011-2019 гг. в Баренцбурге (Шпицберген) // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XXVI Международного симпозиума. Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2020. - С-418 - С-422.

4. Чернов Д.Г., Кабанов Д.М., Козлов В.С., Сакерин С.М., Турчинович Ю.С., Круглинский И.А., Мовчан В.В., Радионов В.Ф., Ризе Д.Д. Предварительные результаты измерений характеристик атмосферного аэрозоля на двух полярных станциях в 2019-2020 г.г. // Аэрозоли Сибири. XXVII Рабочая группа: Тезисы докладов. Томск: Изд-е ИОА СО РАН. 2020.

Атакжередакциейжурнала«Atmosphere»принятастатья«Spatialdistributio nofblackcarbonconcentrationsintheatmosphereoftheNorthAtlanticandtheEuropeans ectoroftheArcticOcean»СакеринС.М.. Кабанов Д.М, Копейкин В.М.,

Круглинский И.А., Новигатский А.Н., Полькин В.В., Шевченко В.П., Турчинович Ю.С., которая будет опубликована в 2021 г.

Первые измерения характеристик солнечной радиации с учетом ослабления излучения атмосферой Земли были выполнены почти столетие назад, а широкомасштабное изучение аэрозольной прозрачности началось во второй половине XX века, [8-16].

В нашей стране регулярные измерение интегральных (по спектру) характеристик прозрачности атмосферы начаты на актинометрической сети (с середины 50-х годов), а спектральные составляющие аэрозольной оптической толщи (0,34-0,63 мкм) – на озонометрической сети, созданной в 60-70гг. Результаты многолетних наблюдений позволили получить обширный экспериментальный материал и выявить многие закономерности пространственной и временной изменчивости АОТ. Обобщения данных отечественных станций проводятся в работах Г.П. Гущина [16,17], под руководством которого И создавалась озонометрическая сеть, разрабатывались аппаратура и методики.

По географии исследований, следует отметить, что основная часть данных об аэрозольной прозрачности атмосферы на сегодняшний день получена для континентальных условий[18]. Ряды наблюдений спектральных АОТ морской атмосферы остаются эпизодическими, прерывистыми, не всегда комплексными и охватывают только часть Мирового океана, а так же недостаточное количество данных для полярных районов.

Обращаясь к истории, отметим приоритет российских ученых (ААНИИ), начавших исследования арктического аэрозоля в 70-х годах прошлого века на нескольких высокоширотных островах и дрейфующих станциях «Северный полюс» (http://www.aari.ru/resources/d0014/np/np.html#top). В дальнейшем многочисленные результаты о дисперсном и химическом составе аэрозоля над субарктическими и арктическими морями были получены в экспедициях

Института океанологии РАН [19]. С начала 2000-х годов программа и методы исследований полярного аэрозоля были расширены благодаря участию научных групп из институтов СО РАН – ИХКГ, ИОА, ЛИН.

Регулярности исследований аэрозоля в арктической зоне способствовала организация совместной межведомственной «Лаборатории полярного аэрозоля», которая на неформальной основе объединила кадровые, научно-методические и материально-технические возможности ИОА СО РАН и ААНИИ. На основе этого сотрудничества были организованы регулярные наблюдения в Российском научном центре «Шпицберген», проведены измерения комплекса характеристик аэрозоля в 10-и экспедициях в арктических/субарктических морях и цикл измерений в метеорологической обсерватории «Тикси».

Продолжаются регулярные измерения аэрозольной оптической толщи атмосферы (АОТ) на антарктической станции Мирный, которые были начаты в 1979 г.

Проводятся измерения характеристик атмосферного аэрозоля на Научно – исследовательской станции (НИС) «Ледовая база «Мыс Баранова» (с 2018 ИОА СО РАН совместно с ААНИИ).

Тем не менее, на сегодняшний день, о состоянии исследований АОТ атмосферы можно сказать, что Мировой океан и полярные районы остаются наименее изученными регионами планеты.

1 АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЭРОЗОЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИ АТМОСФЕРЫ

1.1 Методика определения АОТ атмосферы

Метод измерения АОТ атмосферы является косвенным, бесконтактным – искомая физическая характеристика рассчитывается на основе измерений интенсивности прямой солнечной радиации. Процедура измерений заключается в наведении солнечного фотометра на Солнце и измерении прямой солнечной радиации в отдельных спектральных участках. Физико-математической основой метода является закон Бугера-Ламберта, в соответствии с которым для монохроматической солнечной радиации, ослабленной толщей атмосферы, можно записать

$$I_{\lambda}(\xi_{o}) = (R/R_{0})^{2} \cdot I_{0\lambda} \cdot T_{\lambda}^{g}(\xi_{o}) \cdot \exp(-m\tau_{\lambda}^{a}) \cdot \exp(-m\tau_{\lambda}^{m}), \qquad (1)$$

где *I*_λ – прямая радиация, измеряемая фотометром на различных длинах волн λ;

R, R_0 – текущее и среднее расстояние до Солнца;

*І*_{0λ}- внеатмосферная радиация (калибровочные константы фотометра);

 $m(\xi_o) \approx (1/\cos \xi_o)$ - оптическая масса атмосферы для зенитного угла Солнца ξ_o ;

т^{*m*}_{*l*} – оптическая толща молекулярного рассеяния;

 τ^a_{λ} – AOT;

T^{*g*}_{*λ*} – функция пропускания, обусловленная молекулярным поглощением газов (водяной пар, озон и др.).

(Для упрощения записи, вместо произведения функций пропускания смеси атмосферных газов $\prod_i T_{\lambda}^{gi}$ можно рассматривать функцию T_{λ}^{g} для одного газа).

Для описания пропускания атмосферных газов часто используются выражения в виде:

$$T_{\lambda}^{g}(\xi_{o}) = \exp[a - b(m \cdot X)^{c}], \qquad (2)$$

где *X* – содержание газа;

a, b, c – коэффициенты аппроксимации, подобранные по результатам спектральных расчетов T^{s}_{λ} для разных оптических масс или зенитных углов ξ_{o} .

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

$$\ln T_{\lambda}^{g} = -m \cdot \tau_{\lambda}^{g}, \qquad (3)$$

где τ_{λ}^{g} – оптическая толща молекулярного поглощения. Тогда из (1) получим формулу для определения АОТ атмосферы:

$$\tau_{\lambda}^{a} = m^{-1} \cdot \ln[(I_{0\lambda} / I_{\lambda}) \cdot (R / R_{0})] - \tau_{\lambda}^{m} - \tau_{\lambda}^{g}, \qquad (4)$$

Оптическая масса атмосферы *m* в большинстве практически важных случаев (при зенитном угле Солнца $\xi_0 < 80^\circ$) рассчитывается по формулам типа :

$$m(\xi_o) = -700\cos\xi_o + [4.9 \cdot 10^5 \cos^2\xi_o + 1401]^{0.5}$$
(5)

Зенитный угол ξ_o и азимут φ_o Солнца рассчитываются по времени и географическим координатам места наблюдений :

$$\begin{cases} \cos \xi_o = \sin \delta \sin \varphi_g + \cos \delta \cos \varphi_g \cos(t_h), \\ \sin \varphi_o = \cos \delta \sin t_h / \sin \xi_0, \end{cases}$$
(6)

где *t_h*— часовой угол, связанный с истинным солнечным временем на географической долготе точки наблюдений;

 φ_g - географическая широта;

δ– склонение Солнца.

Оптическая толща молекулярного рассеяния τ_{λ}^{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 τ_{λ}^{m} , наиболее точной является формула, предложенная Хансеном и Тревисом [20]:

$$\tau_{\lambda}^{m} = 0,008569\lambda^{-4} \cdot (1+0,0113\lambda^{-2}+0,00013\lambda^{-4}) \cdot (p/p_{0})$$
(7)

где 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 см⁻¹. Архив формируется с применением базы параметров спектральных линий HITRAN-2000 (http://www.hitran.com).

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 (4-7) рассчитывается АОТ атмосферы. Рассмотренный подход широко используется в диапазоне спектра 0,34-1.05 мкм. Более детально этот вопрос освещен в параграфе 1.3.

Таким образом, алгоритм определения АОТ, исходя из (1) состоит в следующем:

 прямая радиация, измеряемая фотометром на различных длинах волн
 λ делится на внеатмосферную радиацию (калибровочные константы фотометра)

2) от толщи атмосферы отнимаются все газы, которые есть на этой длине волны, а так же молекулярное рассеяние, подробно описанное в следующем параграфе

3) в результате получаем аэрозольную толщу.

При переходе в область спектра более 1 мкм, величина τ_{λ}^{s} существенно возрастает (становится больше искомой τ_{λ}^{a}) и допущение (4) уже не выполняется. Для преодоления трудностей определения АОТ в ИК диапазоне была разработана специальная методика [21], 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_{Mi}^{s} .

1.2 Расчет функций пропускания молекулярного поглощения и рассеяния атмосферы

Функции $T_{\Delta\lambda i}^{g}$ рассчитываются для различных оптических масс по спектральным данным HITRAN-2000 и MT_CKD (H₂O, CO₂, O₃, N₂O, CO, CH₄, SO₂, NO₂) с учетом реальной изменчивости содержания газов (H₂O, O₃

водяного пара и озона) и спектральных аппаратных функций фотометра (произведение спектров Солнца, пропускания фильтров и чувствительности фотоприемника).

Пример аппаратных функций фотометра SPM представлен на рисунке 1.

Полосовая функция пропускания газа выражается в виде:

$$T^{g}_{\Delta\lambda i} = \left(\int_{\lambda 1}^{\lambda 2} A_{\lambda} \cdot T^{g}_{\lambda} \cdot d\lambda\right) / \left(\int_{\lambda 1}^{\lambda 2} A_{\lambda} \cdot d\lambda\right).$$
(8)

Для описания пропускания атмосферных газов используется выражение (2).



Рисунок 1 – Аппаратные функции спектральных каналов фотометра

Далее, полученные зависимости $T^{g}_{\Delta\lambda i}(m)$ (рисунок 2), аппроксимировались в виде выражения (9)



Рисунок 2 – Примеры функций пропускания газового поглощения для оптических каналов фотометра: озона (а), водяного пара (б) и других газов в атмосфере (в). Прямыми показаны результаты аппроксимации

Подобранные таким образом параметры *a* и *b* (*b* и *c*) заносились в программу расчёта АОТ (AOTcalc.exe) [22, 23], предназначенную для обработки результатов измерений фотометров SPM и SP9. Скриншот страницы программы AOTcalc с параметрами учета молекулярного поглощения и рассеяния представлен на рисунке 3.

k1 340 10 0.50457 0 0 0.02345 0.95874 0.00187 1 k2 371 10 0.61176 0 0 0 0 0.00257 1 k3 407 10 0.73053 0 0 0.0111 1 0.00247 1 k4 438 10 0.78176 0 0 0.00325 1 0.00177 0.3664 k5 499 10 0.8674 0 0 0.33955 1 0.00127 0.3664 k6 553 10 0.91037 0 0 0.33955 1 0.00127 0.3664 k7 669 10 0.95754 0.00171 0.73003 0.5343 1.01366 0.00193 0.45024 k8 776 10 0.9767 0.00263 0.7364 0 0 0.1361 0.33198 k10 936 0 0 0.49748 0.0251 1			10	Релей	Вода1	Вода2	Озон1	Озон2	Газы1	Газы2
k2 371 10 0.61176 0 0 0 0.00257 1 k3 407 10 0.73053 0 0 0.00111 1 0.00247 1 k4 438 10 0.78176 0 0 0.00325 1 0.00197 1 k5 499 10 0.8674 0 0 0.3995 1 0.00127 0.93664 k6 553 10 0.91037 0 0 0.39955 1.0137 0.0044 0.95162 k7 669 10 0.95754 0.0171 0.73033 0.5343 1.0136 0.00131 0.45024 k8 776 10 0.9767 0.00253 0.0135 1.01482 0.0051 0.3198 k10 936 0 0.98461 0.0131 0.49748 0.0251 1.01482 0.0051 0.5065 k11 1555 10 0.99848 0.2054 6.5085 0	k1	340	10	0.50457	0	0	0.02345	0.95874	0.00187	1
k3 407 10 0.73053 0 0 0.00111 1 0.00247 1 k4 438 10 0.78176 0 0 0.00325 1 0.00197 1 k5 499 10 0.8674 0 0 0.03955 1 0.00127 0.93664 k6 553 10 0.91037 0 0 0.1609 1.0137 0.0044 0.95162 k7 669 10 0.95754 0.00171 0.73033 0.53433 1.01366 0.0193 0.45024 k8 776 10 0.9767 0.00263 0.7364 0 0.1136 0.30151 1.01482 0.00051 0.31318 k9 866 10 0.98461 0.0131 0.49748 0.00251 1.01482 0.00051 0.50065 k11 1555 10 0.99848 0.20544 0.60855 0 0 0.00151 0.6174 k12 1044	k2	371	10	0.61176	0	0	0	0	0.00257	1
k4 438 10 0.78176 0 0 0.00325 1 0.00197 1 k5 499 10 0.8674 0 0 0.3995 1 0.00127 0.93664 k6 553 10 0.91037 0 0 0.11609 1.0137 0.0044 0.95162 k7 669 10 0.95754 0.00171 0.73033 0.5343 1.01366 0.0193 0.45024 k8 776 10 0.9767 0.00263 0.7364 0 0.11360 0.11361 0.3198 k9 866 10 0.98461 0.0131 0.49748 0.00251 1.01482 0.00051 0.5065 k10 936 0 0.99848 0.02054 0.60855 0 0 0.00491 0.86197 k12 1044 10 0.99263 0.0666 0.49087 0 0 0.03150 1	k3	407	10	0.73053	0	0	0.00111	1	0.00247	1
k5 499 10 0.8674 0 0 0.03995 1 0.00127 0.93664 k6 553 10 0.91037 0 0 0.11609 1.0137 0.00044 0.95162 k7 699 10 0.95754 0.00171 0.73033 0.5333 1.01366 0.0193 0.45024 k8 776 10 0.9767 0.00263 0.73364 0 0 0.1361 0.33198 k9 866 10 0.98461 0.0131 0.49748 0.00251 1.01482 0.0051 0.50055 k10 936 0 0.99848 0.02054 0.65085 0 0 0.0041 0.86197 k12 1044 0.99923 0.0066 0.49087 0 0 0.0315 1	k4	438	10	0.78176	0	0	0.00325	1	0.00197	1
k6 553 10 0,91037 0 0 0.11609 1.0137 0.00044 0.95162 k7 669 10 0.95754 0.00171 0.73003 0.05343 1.01360 0.00193 0.45024 k8 76 10 0.9767 0.00263 0.73044 0 0 0.1361 0.3198 k9 866 10 0.98461 0.01131 0.49748 0.00251 1.01482 0.00051 0.50055 k10 936 0 0 0.2054 0.65085 0 0 0.00491 0.86197 k11 1555 10 0.99263 0.0666 0.49087 0 0 0.00315 1 k12 1044 10 0.99263 0.0666 0.49087 0 0 0.0315 1	k5	499	10	0.8674	0	0	0.03995	1	0.00127	0.93664
k7 669 10 0.95754 0.00171 0.73033 0.05343 1.01366 0.00193 0.45024 k8 776 10 0.9767 0.00263 0.73064 0 0 0.1361 0.33198 k9 866 10 0.98461 0.01131 0.49748 0.00251 1.01482 0.00051 0.50065 k10 936 0 0 0.49748 0.60508 0 0 0 0 0.50065 k11 1555 10 0.99848 0.02054 0.65085 0 0 0.00491 0.86197 k12 1044 10 0.99263 0.0066 0.49087 0 0 0.00315 1	k6	553	10	0.91037	0	0	0.11609	1.0137	0.00044	0.95162
k8 776 10 0.9767 0.00263 0.7364 0 0 0.1361 0.33198 k9 866 10 0.98461 0.01131 0.49748 0.00251 1.01482 0.00051 0.50065 k10 936 0 <td>k7</td> <td>669</td> <td>10</td> <td>0.95754</td> <td>0.00171</td> <td>0.73003</td> <td>0.05343</td> <td>1.01366</td> <td>0.00193</td> <td>0.45024</td>	k7	669	10	0.95754	0.00171	0.73003	0.05343	1.01366	0.00193	0.45024
k9 866 10 0.98461 0.0131 0.49748 0.00251 1.01482 0.00051 0.50065 k10 936 0 0 0 0 0 0 0 0 k11 1555 10 0.99848 0.0254 0.65085 0 0 0.00491 0.86197 k12 1044 0.99263 0.0066 0.49087 0 0 0.0315 1	k8	776	10	0.9767	0.00263	0.73364	0	0	0.1361	0.33198
k10 936 0 0 0 0 0 0 0 0 k11 1555 10 0.99848 0.02054 0.65085 0 0 0.00491 0.86197 k12 1044 10 0.99263 0.0066 0.49087 0 0 0.00315 1	k9	866	10	0.98461	0.01131	0.49748	0.00251	1.01482	0.00051	0.50065
k11 1555 10 0.99848 0.02054 0.65085 0 0 0.00491 0.86197 k12 1044 10 0.99263 0.0066 0.49087 0 0 0.00315 1	k10	936	0	0	0	0	0	0	0	0
k12 1044 10 0.99263 0.0066 0.49087 0 0 0.00315 1	k11	1555	10	0.99848	0.02054	0.65085	0	0	0.00491	0.86197
	2 k12	1044	10	0.99263	0.0066	0.49087	0	0	0.00315	1
	анал 940 ни	4 k10		Канал 870 нм 149						
знал 940 нм k10 v Канал 870 нм k9 v		1 /110								
анал 940 нм k10 💌 Канал 870 нм k9										

Рисунок 3 – Вид страницы программы AOTcalc с параметрами учета молекулярного рассеяния и поглощения для каналов фотометра SPM

Параметры с индексом 1 соответствует *b* в формуле (9), а с индексом 2 – коэффициенту *c*.

После определения $T^{s}_{\Delta\lambda i}$ осуществляется переход к "аэрозольным" сигналам $Y_{\lambda i}$:

$$Y_{\lambda i} = I_{\Delta \lambda i} / (T_{\lambda}^{m} \cdot T_{\Delta \lambda i}^{g}) = (R/R_{0})^{2} \cdot I_{0\lambda} \cdot \exp(-m\tau_{\lambda}^{a})$$
(10)

и определяется искомое значение АОТ атмосферы

$$\tau_{\lambda}^{a} = m^{-1} \cdot \ln[I_{0\lambda} \cdot (R/R_{0})^{2}/Y_{\lambda i}].$$
(11)

1.3 Калибровка солнечных фотометров

Общепризнанным, классическим способом калибровки солнечных фотометров (определения внеатмосферной константы $I_{0\lambda}$) является «долгий метод Бугера». Метод базируется на выполнении условия (1) и заключается в построении зависимости $\ln I_{\lambda}(m)$ (или $\ln Y_{\lambda}(m)$), измеренных при различных оптических массах. Пример таких зависимостей, построенных для измерений фотометром SP-9 в п.Баренцбург иллюстрируются на рисунке 4.



Рисунок 4 – Пример калибровочных зависимостей по методу Бугера для фотометра SP-9 по измерениям в п. Баренцбург (25.07.2016)

Калибровочная константа определяется путем экстраполяции зависимости $Y_{\lambda}(m)$ к значениям m=0. Точность калибровки по этой методике во многом определяется стабильностью замутнения атмосферы в период измерений. Однако, для повышения надежности, лучшими условиями для калибровки считаются измерения на территории горных обсерваторий с высотами более двух километров. В связи с этим возникают трудности, так как проведение калибровки в горных условиях достаточно дорого, а использование в качестве «мастер-прибора» фотометра CE-318 (AERONET) в Томске не всегда возможно, например, для фотометров SP, работающих в п. Баренцбург, на станции Мирный (Антарктида) и в других экспедициях. В таких случаях для определения $I_{0\lambda}$ применялась методика [24, 25] в основе которой лежит предположение, что в условиях высокой прозрачности атмосферы ($\tau_{\lambda}^{a} \leq 0,05$) изменчивость АОТ должна быть минимальной (не превышающей погрешность её определения $\Delta \tau_{\lambda}^{a} \leq 0,01$). Как показывает практика, это допущение особенно хорошо выполняется в морских и полярных условиях. Поясним суть методики. Если вместо истинного значения $I_{0\lambda}$ было выбрано $I^*_{0\lambda}=I_{0\lambda}+\Delta$, то согласно (1), различие между рассчитанным и истинным значениями АОТ ($\Delta \tau^{a}_{\lambda}=\tau^*_{\lambda}{}^{a}-\tau_{\lambda}{}^{a}$) будет изменяться обратно пропорционально оптической массе. То есть максимальные $\Delta \tau^{a}_{\lambda}$ будут в полуденные часы и уменьшаться к утру и вечеру. Наиболее заметно эти различия проявляются в области минимальных значений АОТ. На рисунке 5 приведен пример дневной изменчивости АОТ в п. Баренцбург в трех вариантах: для $\ln I_{0\lambda}$, выбранного как истинное, $\ln I_{0\lambda}+0.02$ и $\ln I_{0\lambda}-0.02$

Таким образом, калибровка фотометра сводится к подбору такого значения $\ln I_{0\lambda} \rightarrow \ln I_{0\lambda}$, чтобы в области минимальных АОТ не наблюдалось увеличения или спадат λ^{a} к полудню.



Рисунок 5 – Пример трансформации дневного хода в области малых значений АОТ для величины $\ln I_{0\lambda}$, выбранной, как истинное (a), $\ln I_{0\lambda}$ +0.02 (б) и $\ln I_{0\lambda}$ -0.02 (в)

В следующей главе рассмотрим солнечные фотометры – приборы необходимые для измерений спектральной прозрачности атмосферы.

2 АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ФОТОМЕТРЫ

В настоящее время выпускается достаточное количество различных моделей солнечных фотометров для определения АОТ атмосферы. Условно их можно разделить на два типа. Первый – портативные (мобильные) устройства, предназначенные для измерений в экспедиционных и судовых условиях. Примером таких приборов являются Microtops II (https://solarlight.com) и CE-317 (https://www.cimel.fr). Второй тип стационарные устройства для проведения регулярных автоматических измерений: CE-318 (https://www.cimel.fr), PSR (http://www.pmodwrc.ch), MS-120 (https://eko-eu.com), радиометр с теневым экраном MFR-7 (http://www.yesinc.com) и др. Ниже рассмотрены две версии фотометра, разработанных в ИОА СО РАН и использовавшихся при выполнении настоящей работы.

2.1 Портативный солнечный фотометр SPM

Солнечный фотометр SPM [27, 28] – это портативный прибор для измерений спектральной прозрачности в окнах прозрачности атмосферы (в диапазоне 0,34 – 2,14 мкм) и полосе поглощения водяного пара (0,94 мкм). Измерения проводятся оператором из положения «с руки». Процесс измерений автоматизирован – выполняется по программе микроконтроллера. Внешний вид фотометра представлен на рисунке 5.



Рисунок 5 – Внешний вид фотометра SPM

В состав фотометра SPM входят следующие основные компоненты (рисунок 6): 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; GPS-приемник ;датчик атмосферного давления; термостат и источник питания на основе аккумулятора. Основные характеристики представлены в таблице 1.



Рисунок 6 – Блок-схема фотометра SPM

Таблица 1 – Основные характеристики солнечного фотометра SPM (SP-9)

	Коротковолновые каналы	ИК-каналы
Диапазон спектра, мкм	0.34 - 1.05	1.24 - 2.13
Максимумы полос пропускания	340, 370, 440, 500, 550,	1240, 1555,
фильтров, нм	670, 870, 940, 1046	2140
Полуширина пропускания фильтров,	5-10	14-18
НМ		
Угол поля зрения, градусов	1,5-2	2 - 2,5
Количество спектральных каналов	12 (17)	
Объем flash-памяти, Мбит	32	
Объем памяти (накопления данных),	65000 / ~80	
количество замеров / дней		
Погрешность измерений, не более %	0.5	
Температура термостата, °С	24±1 (36± 0,3)	

В зависимости от выбранного диапазона спектра используются два или три типа фотоприемников: фотодиоды ФД УФ-1 (GaP), ФДУК-13у (Si) и HamamatsuG 8373-01 (InGaAs). Управление процессом измерений осуществляется по программе встроенного контроллера. В его состав входят: RISC-микроконтроллер ATmega-128 (www.atmel.com), flash-память объемом 32 Мбит, 14-разрядный 16-канальный АЦП и часы реального времени с Объем автономным источником питания. внутреннего программного обеспечения составляет около 40 кбайт.

Собственно, процесс измерения фотометром SPM заключается в наведении прибора по визиру на Солнце, нажатии кнопки «Замер» и удержании её в течение нескольких секунд. В режиме «Замер» в циклическом режиме выполняются следующие процедуры: 1) опрос (50 мсек) и усреднение сигналов всех каналов фотометра; 2) сопоставление результатов текущего цикла с результатом предыдущего и выбор максимального сигнала для каждого канала; 3) запись максимальных сигналов в ОЗУ. При выходе из режима (кнопка «Замер» отпущена) выполняется опрос GPS-приемника, датчика давления и эта информация вместе с отобранными максимальными сигналами записывается на flashпамять.

2.2 Многоволновой солнечный фотометр SP-9

Солнечный фотометр SP-9 [18] предназначен для круглогодичных автоматизированных измерений АОТ атмосферы без участия оператора. В состав фотометра входят (рисунок 7): собственно фотометр, двухкоординатная (зенит/азимут) поворотная платформа, блок фотодатчиков системы наведения и слежения, блок управления, датчик Солнца, блок питания и пульт ручного управления поворотной платформой (используется при настройке прибора).



Рисунок 7 – Внешний вид фотометра SP-9 с системой наведения-слежения за Солнцем

Алгоритм работы фотометра следующий:

1) В режиме ожидания фотометр находится в режиме «парковка» (в положении «вниз» и «на юг»).

2) При условии, когда Солнце не перекрыто облачностью датчик Солнца подает команду на включение системы наведения.

3) Система наведения, сначала по датчикам грубого наведения выводит фотометр на Солнце и передает управление системе слежения. При включении режима слежения на фотометр поступает команда начала измерений.

4) Измерения выполняются пока Солнце не перекрыто облачностью.
 Длительность одного замера составляет 1 сек, а интервал между замерами –
 1 мин. После каждого выполняется опрос GPS, встроенных датчиков

атмосферного давления, температуры в корпусе фотометра и вся информация записывается на flash-память.

5) При перекрытии Солнца облаками (сигнал на системе слежения ниже заданного порога) измерения прекращаются поворотная платформа переходит в состояние «парковка», а управление передается датчику Солнца.

6) Оптико-электронная схема SP-9 аналогична фотометру SPM (рисунок 8, таблица 1), но корпус выполнен в герметичном исполнении и оснащен постоянно работающим термостатом. Считывание накопленной информации на компьютер осуществляется через последовательный порт RS-232.



Рисунок 8 – Блок-схема солнечного фотометра SP-9 [6]

З ОСОБЕННОСТИ МНОГОЛЕТНЕЙ И СЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ АЭРОЗОЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИ АТМОСФЕРЫ В ПОЛРЯНЫХ РАЙОНАХ

Атмосфера Антарктиды обеднена собственными источниками аэрозоля, поскольку поверхность и прибрежная зона океана здесь покрыты льдом. Удаленность от других континентов значительно затрудняет дальний перенос аэрозоля. Поэтому характеристики аэрозоля в данном регионе можно рассматривать в качестве фонового уровня на планете. В Арктике, где основную часть занимает Северный Ледовитый океан, содержание аэрозоля так же невелико, в сравнении с континентальными районами. Однако, этот регион окружен сушей и подвержен выносу континентального аэрозоля (в том числе дымов крупных лесных пожаров и антропогенного) [29, 30].

Измерения спектральной прозрачности атмосферы на антарктической обсерватории Мирный были начаты с 1979г. С января 2013г. измерения АОТ проводятся с использованием портативного солнечного фотометра SPM, изготовленного в ИОА СО РАН.

Архипелаг Шпицберген это один из самых высокоширотных районов, где ведутся многолетние измерения спектральных АОТ атмосферы на трех научных станциях : 1) Ню-Олесунн (AWI, Germany); 2) Баренцбург (ААНИИ и ИОА СО РАН, Россия); 3)Хорсунд (IGFandIOPAN, Poland), ранее были проведены сравнения АОТ в этих трёх пунктах. Тогда сравнительный анализ районах небольшое, характеристик AOT В соседних показал но статистически значимое превышение АОТ в Баренцбурге относительно станций Ню-Олесунн и Хорсунд. Максимальная величина различий (Δ) в наблюдается обоих случаях В коротковолновой части спектра. более Следовательно, крупном поселке Баренцбург содержание В мелкодисперсного аэрозоля немного больше, чем в районе других научных станций. Малая величина различий АОТ (10-20%), сопоставимая С

погрешностью, свидетельствует о близости исследуемых характеристик в трех районах Шпицбергена и повышает достоверность получаемых данных [2, 5,30-32].

В этой работе более подробно остановимся на результатах исследований в Баренцбурге и на обсерватории Мирный.

3.1 Сезонная изменчивость АОТ атмосферы в п.Баренцбург и на антарктической обсерватории Мирный

Проводя сравнение в двух пунктах по всем данным, по среднедневным значениям АОТ (рисунок 9) видно, что изменчивость АОТ в Баренцбурге гораздо выше (касаемо мелкодисперсного аэрозоля) при более высоком среднем уровне.



Рисунок 9- Среднедневные значения АОТ

Из рисунка 10, где представлены средние спектральные зависимости видно, что АОТ в Баренцбурге в разы выше. Сравнивая АОТ в Баренцбурге и Мирном, нужно заметить, что АОТ на длине волны 0.5 в 3.8 раза выше, АОТ мелкодисперсного аэрозоля в 4.2 раза, АОТ грубодисперсного в 2.9 раза. Вклад мелкодисперсного аэрозоля в АОТ в Баренцбурге 0,74, в Мирном 0,66.



Рисунок 10 – Средние спектральные зависимости АОТ

Остановимся на сезонной изменчивости АОТ мелкодисперсного аэрозоля (рисунок 11). Для оценки τ^c используется минимальное значение $\tau^a_{\lambda}[18]$ при $\lambda \ge 1$ мкм, а $\tau^f_{0.5} = \tau^a_{0.5} - \tau^c$.

В обоих пунктах наблюдается весенний максимум $\tau^{f}_{0.5}$ и спад к осени. В Баренцбурге уровень $\tau^{f}_{0.5}$ выше в 4 раза, из-за выносов мелкодисперсного аэрозоля с континента, а также влияние пожаров [34-36] привело к появлению второго летнего максимума. Исключение дымовых ситуаций (обозначено синим пунктиром), делает летний максимум слабо выраженным (ниже весеннего). В целом, в обоих пунктах наблюдается спад АОТ от весны к осени.



Рисунок 11- Сезонная изменчивость АОТ мелкодисперсного аэрозоля

О сезонном ходе АОТ грубодисперсного аэрозоля (рисунок 12) в Баренцбурге можно сказать, что он близок к нейтральному. Минимум в летний период статистически не значим. В Мирном наблюдается максимум в летний период, связанный с уменьшением ледового покрова и ростом содержания морского аэрозоля.



Рисунок 12-Сезонная изменчивость АОТ грубодисперсного аэрозоля

Сезонный ход $\tau^{a}_{0.5}$ (рисунок 13) отражает совокупную изменчивость АОТ грубо- и мелкодисперсного аэрозоля. Наблюдается проявление весеннелетнего максимума в Мирном и весеннего в Баренцбурге. Учитывая, что в Баренцбурге основной вклад в аэрозольное замутнение атмосферы вносит мелкодисперсная компонента, сезонный ход $\tau^{a}_{0.5}$ близок к сезонному ходу $\tau^{f}_{0.5}$.



Рисунок 13 – Сезонная изменчивость АОТ атмосферы

3.2 Межгодовая изменчивость АОТ атмосферы на антарктической обсерватории Мирный

Межгодовая изменчивость АОТ в п. Баренцбург (рисунок 14) определяется вариациями мелкодисперсной компоненты аэрозоля континентального происхождения, в том числе, значительным влиянием дымового аэрозоля. Отметим, что значимых трендов АОТ в исследуемый период не обнаружено.

Однако, нельзя не заметить характерные особенности в Мирном. Из рисунка 14 видно, что согласованные колебания прослеживаются для АОТ как грубодисперсного (τ^c), так и мелкодисперсного аэрозоля ($\tau^f_{0.5}$).



Рисунок 14 – Межгодовая изменчивость АОТ атмосферы

Рассмотрим более продолжительные ряды наблюдений. До 2013 года измерения проводились фотометром ABAS [3], а далее фотометром SPM [4]. Ниже, на рисунке 15, представлены вариации межгодовой изменчивости АОТ. Два пика отражают влияние вулканов Эль-Чичон (1992 г.) и Пинатубо (1991 г.). После релаксации атмосферы, с 1996 по 2020 г., наблюдается статистически не значимое снижение замутнения атмосферы при среднем значении $\overline{\tau}^a_{0.5}=0.022\pm0.005$ и колебания среднегодовых величин АОТ с периодом в несколько лет.



Рисунок 15- Межгодовая изменчивость АОТ атмосферы в Мирном

Для периода 1996-2020 гг., используя Фурье-преобразование была рассчитана периодограмма среднегодовых значений АОТ (Рисунок 16), на которой выделяется максимум, соответствующий пяти годам.

Выявление периодичности данных осуществлялось по данным об амплитудном спектре:

$$A_{s_i}(k) = \sqrt{B_k^2 + C_k^2},$$
 (12)

где

$$B_{k} = \frac{2}{T} \sum_{i=1}^{T} S_{i} \cos(ki); \ C_{k} = \frac{2}{T} \sum_{i=1}^{T} S_{i} \sin(ki);$$
(13)

k – текущее значение параметра;

S_i- спектральная прозрачность;

T – период расчета; i = 1, 2, 3, ...

Значимость полученных на спектральной кривой амплитуд проверялась с помощью критерия Брукса – Карузерса [24]:

$$\left(A_{S_i}\right)_{0.05} = \frac{2(ln20k)^{1/2}\sigma_{S_i}}{\sqrt{n}},\tag{14}$$

где *n*-амплитуды,

 σ – среднеквадратичное отклонение.



Рисунок 16 – Периодограмма среднегодовых значений АОТ и сопоставление экспериементальных данных с восстановленными значениями для периода в в диапазоне 4.3-5.5 лет

Оценка значимости амплитуд В периодограмме показала, что отмеченный выше пятилетний максимум на рисунке 16a, является единственным статистически значимым (по уровню Р=0.05). Дополнительно проведён обратный расчет значений АОТ для интервала периодов 4.3÷5.5 лет и выполнено сопоставление с результатами измерений. Из рисунка166 видно, что восстановленные по периодограмме колебания хорошо согласуются с результатами измерений (*R*=0.726).Возникновение этого максимума требует дальнейшего анализа, но заметим, что этот период 5 лет, близок к индексу антарктического колебания (ААК) изменчивости циркуляции потоков в Антарктиде, его возникновение связывают с колебанием Эль-Ниньо.

Индекс Антарктического колебания, определяется как разница между средними величинами приземного атмосферного давления на 40° и 65° ю.ш.,

то есть на параллелях характеризующих среднее положение стрежней соответствующих зон максимальных альтернативных колебаний давления. Индекс ААК – общий показатель, обобщающий характер колебаний давления во всей высокоширотной области.

Индекс Антарктического колебания бывает отрицательным И положительным. Отрицательные значения индекса соответствуют периодам развития Эль-Ниньо, когда температура воды в тропической зоне Тихого океана превышает норму, ослабевают пассаты, сокращается количество облаков и осадков в тропиках и субтропиках Южного полушария и формируется положительная аномалия геопотенциала в средней тропосфере над Западной Антарктикой. Напротив, явление Ла-Нинья характеризуется отрицательной аномалией температуры в тропической зоне Тихого океана, конвективных процессов усилением при формировании тропической облачности, усилением пассатов, высокими положительными значениями индекса Южного колебания и отрицательными аномалиями геопотенциала на уровне 500 гПа [40, 42].

В положительной фазе пояс западных ветров, движущий антарктическим циркумполярным течением, усиливается и сужается в сторону Антарктиды. Отрицательная фаза связана с движением пояса западных ветров к экватору.

Проверяя связь данной периодичности(рисунок 16) с крупномасштабными атмосферными процессами, связанными с колебаниями циркуляционных процессов в Южной полярной области, было проведено сопоставление среднегодовых АОТ и индексов ААК [6].

Из результатов, представленных на рисунке 17а видно, что на периодограмме индекса ААК выделяется амплитуда с периодом 5.23 года, хотя она и не является статистически значимой. Сопоставление же, средних за год величин АОТ и рассчитанных для тех же периодов средних индексов ААК (рисунок 17б) показывает их значимую связь (*R*=0.41). Среднее

значение АОТ для отрицательных индексов составляет $\tau^{a}_{0.5}=0.021\pm0.004$, а $\tau^{a}_{0.5}$ =0.024 \pm 0.006. Таким образом, учитывая, положительных что колебания AOT грубо-И мелкодисперсного аэрозоля происходят одновременно, можно предположить следующее. В среднем, смещения пояса ветров в сторону Антарктиды сопровождаются увеличением притока морского аэрозоля в район измерений и, наоборот, его уменьшением при смещении со стороны Антарктиды.



Рисунок 17 – Периодограмма индекса ААК (а), взаимосвязь среднегодовых величин индекса ААК и $\tau^{a}_{0.5}$ (б)

Вышесказанное подтверждается результатами сопоставления среднегодовых величин АОТ с повторяемостью в период измерений трех основных форм атмосферной циркуляции [7, 43]: зональной (Z) и двумя

меридиональными, связанными с нарушением западно-восточного переноса в сторону Антарктиды (Ма) и из внутренних районов Антарктиды (Мb). Из рисунка 18 видно, что с увеличением повторяемости форм Z и Ма замутнение атмосферы в среднем возрастает, а при увеличении количества выносов воздушных масс с континента (Mb) величина АОТ снижается. Сходный характер изменчивости АОТ наблюдается и при сравнении выборок среднечасовых значений $\tau^a_{0.5}$, соответствующих южной и северной составляющей направления ветра на высоте 10м.



Рисунок 18 – Взаимосвязь среднегодовых значений $\tau^{a}_{0.5}$ с повторяемостью в период измерений основных типов циркуляции атмосферы

Наблюдаемая связь АОТ с основными типами атмосферных циркуляций, вызывает дополнительный интерес к взаимосвязи АОТ с характеристиками ветра.

3.3 Взаимосвязь АОТ с характеристиками ветра на антарктической обсерватории Мирный

Дополнительно была рассмотрена связь АОТ с восточной (EW) и северной (NW) составляющими вектора скорости ветра на высоте 10м для периода 2013÷2020 гг. Отметим, что общих закономерностей в межгодовой изменчивости $\tau^{a}_{0.5}$ и NW, EW не обнаруживается. Однако, если рассмотреть средние распределения часовых АОТ от EW и NW (рисунок 19), можно выделить ряд характерных особенностей.



Рисунок 19 – Средние распределения τ^f_{0.5} (a), τ^c (б) и τ^a_{0.5} (в), гистограмма повторяемости вектора скорости ветра (г) и взаимосвязь τ^a_{0.5} с северной (д) и восточной (е) составляющими вектора скорости ветра

Основная изменчивость АОТ мелкодисперсного аэрозоля наблюдается при направлении ветра с юго-востока. С ростом скорости ветра увеличивается и величина $\overline{\tau}_{0.5}^{f}$ (рисунок 19а). Характер распределения АОТ грубодисперсного аэрозоля иной – наиболее сильные изменения $\overline{\tau}^{c}$ наблюдаются в направлении с севера на юг (рисунок 19б). С ростом NW (т.е. увеличением притока морского аэрозоля) происходит уменьшение $\overline{\tau}^{c}$. Распределение $\overline{\tau}_{0.5}^{a}$, соответственно, отражает обе отмеченные выше закономерности (рисунок 19в).

Сравнение выборок среднечасовых значений $\tau^{a}_{0.5}$, соответствующих южной и северной составляющей направления ветра (рисунок 19д) показало следующее: при ветрах из северного сектора (NW<0, ветер со стороны океана) – $\tau^{a}_{0.5}$ =0.025±0.010, а из южного сектора (NW>0, ветер с континента) – $\tau^{a}_{0.5}$ =0.023±0.011. Превышение средних значений $\tau^{a}_{0.5}$ при ветрах из северного сектора невелико, но статистически значимо. При этом следует отметить, что доля таких ситуаций в общем массиве составляет лишь 6% (рисунок 19г).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены аппаратурно-методические основы определения АОТ атмосферы и представлены результаты измерений в полярных районах: обсерватория Мирный (Антарктида) и архипелаг Шпицберген (п. Баренцбург).

Описанная в работе методика позволяет определять АОТ атмосферы в спектральном диапазоне солнечных фотометров SPM и SP-9 (0,34–2,14 мкм). Погрешность восстановления АОТ составляет 0,01–0,02.

Средний уровень замутнения в Баренцбурге в ~3.8 раза выше чем в Мирном ($\bar{\tau}^a_{0.5}=0.085$ и 0.022, соответственно).

В арктическом районе основную роль в изменчивости АОТ атмосферы играет мелкодисперсный аэрозоль ($\overline{\tau}_{0.5}^{f}/\overline{\tau}_{0.5}^{a}=0.074$). В колебаниях АОТ атмосферы Антарктики вклад мелко- и грубодисперсной фракций аэрозоля сопоставим ($\overline{\tau}_{0.5}^{f}/\tau_{0.5}^{a}=0.066$).

Общим в сезонном ходе для двух регионов является весенний максимум (в Мирном – весенне-летний). Из-за влияния континентального аэрозоля, в том числе дымового, в Баренцбурге проявляется и летний максимум, который может превышать весенний.

Межгодовые колебания АОТ обнаруживают значимую связь (R=0.41) с индексом Антарктического колебания и качественно согласуются с повторяемостью основных форм атмосферной циркуляции в южной полярной области. Межгодовые изменения АОТ обусловлены, по-видимому, периодическими смещениями пояса ветров в сторону Антарктиды, что сопровождается увеличением притока морского аэрозоля в район измерений и, наоборот, его уменьшением при смещении пояса ветров со стороны Антарктиды. Среднее значение АОТ для отрицательных индексов ААК составляет $\overline{\tau}^a_{0.5}$ =0.021±0.004, а положительных – $\overline{\tau}^a_{0.5}$ =0.024±0.006.

Из взаимосвязей АОТ с характеристиками ветра, отметим значимое различие средних величин $\overline{\tau}^a_{0.5}$ для положительных ($\overline{\tau}^a_{0.5}=0.023\pm0.011$, ветер с континентальной части Антарктиды) и отрицательных ($\overline{\tau}^a_{0.5}=0.025\pm0.010$, ветер со стороны океана) значениях северной составляющей вектора скорости ветра.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 ThecurrentstateofthenaturalenvironmentonSpitzbergenarchipelagomultiauthoredmonograph/ underthegeneraleditorshipofL.M. Savatyugin. -St. Petersburg: AARI. 2020. – 302 p.

2 Кабанов Д.М., Круглинский И.А., Ritter С. Оценки влияния ветра на аэрозольную оптическую толщу атмосферы в двух пунктах наблюдений на арх. Шпицберген // Аэрозоли Сибири. XXV Рабочая группа: Тезисы докладов. – Томск: Изд-е ИОА СО РАН. 2018. – С. 109.

3 Leiterer W., Weller M. BAS/ABAS Solar Photometer for Atmospheric Research. –Geneva: World Meteorol. Org. 1988.–21p.

4 Kabanov D.M., Radionov V.F., Sakerin S.M. Results of 5-year SPM photometer measurements of spectral atmospheric transparency at Antarctic Mirny observatory // Proceedings of SPIE. – 2017.–V. 10466. – P.104662K-1–104662K-6.

5 Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Круглинский И.А., Радионов В.Ф. Особенности многолетней и сезонной изменчивости аэрозольной оптической толщи атмосферы в полярных районах южного и северного полушарий // Аэрозоли Сибири. XXVII Рабочая группа: Тезисы докладов. –Томск: Изд-е ИОА СО РАН. 2020. – С. 108.

6 Climate Prediction Center: Antarctic Oscillation [Электронныйресурс]. – URL:

https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/aao/aao.s html (датаобращения05.05.2021).

7 ЛагунВ.Е., КлепиковА.В., ДаниловА.И., Коротков А.И. О потеплении в районе Антарктического полуострова // Проблемы Арктики и Антарктики.– 2010. – Т. 1. – № 2. – С.85–97.

8 Зуев В.Е., Зуев В.В. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. –СПб.:Гидрометеоиздат. 1992.–232 с.

9 Зуев В.Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. –М: Сов. Радио. 1970. –496 с.

10 Зуев В.Е., Кабанов М.В. Оптика атмосферного аэрозоля. Т. 4. – Л.:Гидрометеоиздат. 1987. –254 с.

11 Розенберг Г.В. Рассеяние и ослабление электромагнитного излучения атмосферными частицами. –Л.:Гидрометеоиздат. 1972.–342 с.

12 Ивлев Л.С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. –Л.: Изд. ЛГУ. 1982. –366 с.

13 Белан Б.Д., Задде Г.О. Спектральная прозрачность и аэрозольное ослабление над территорией СССР. –Томск:Изд. ТФ СО АН СССР. 1987.–180 с.

14 Fernald Frederick G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments // Optical Society of America. –1984.–V. 23.–P. 652–653.

15 Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. – Новосибирск.: Наука. 1982.–198 с.

16 Шифрин К.С. Рассеяние света в мутной среде. –М.-Л.: ГИТТЛ. 1951. –288 с.

17 Гущин Г.П.Методы, приборы и результаты измерения спектральной прозрачности атмосферы. –Л.:Гидрометеоиздат. 1988.–200 с.

18 Исследование радиационных характеристик аэрозоля в азиатской части России // –под общей ред. С.М. Сакерина. Томск. 2012. –484 с.

19 Виноградова А.А., Шевченко В.П. Роль атмосферных аэрозолей в загрязнении Северного Ледовитого океана и его морей // – 2005. – Т. 18. – № 5-6. –С.387-392.

20 Hansen J.E., Travis L.D. Light scattering in planetary atmospheres // Space Sci. Rev. –1974. –T.16.–P.527-610.

21 Ignatov A.M., Dergileva I.L., Sakerin S.M., Kabanov D.M. An algorithm for the sun photometer calibration // Proc. IGARSS. –1993.–P. 1091-1093.

22 Кабанов Д.М., Веретенников В.В., Воронина Ю.В., Сакерин С.М.,

Турчинович Ю.С. Информационная система для сетевых солнечных фотометров // Оптика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 22. –№ 01. –С. 61-67.

23 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014614193 от 17.04.2014 // Турчинович Ю.С., Кабанов Д.М., Сакерин С.М. Программа расчета спектральной аэрозольной толщи и интегрального влагосодержания атмосферы «SPAOTCalc».

24 Бартенева О.Д., Никитинская Н.И., Сакунов Г.Г., Веселова Л.К. Прозрачность толщи атмосферы в видимой и ИК-области спектра. –Л.: Гидрометеоиздат. 1991. –224 с.

25 Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakadjima T., Lavenu F., Jankowiak I., and Smirnov A. AERONET - A federated instrument network and data archive for aerosol characterization // Rem. Sens. Env. –1998. – T. 66. –№1. –P. 1-16.

26 Кабанов М.В., Панченко М.В. Рассеяние оптических волн дисперсными средами. Часть III. Атмосферный аэрозоль. 1984. –189 с.

27 Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Ростов А.П., Турчинович С.А., Князев В.В. Солнечные фотометры для измерений спектральной прозрачности атмосферы в стационарных и мобильных условиях // Оптика атмосферы и океана. –2012.–Т. 25.–№ 12.–С.1112-1117.

28 Kabanov D.M., Sakerin S.M., Kruglinsky I.A., Ritter C, Sobolewski P.S., Zielinski T. Comparison of atmospheric aerosol optical depths measured with different sun photometers in three regions of Spitsbergen Archipelago // – Proceedings of SPIE. 2018. V. 10833.–P.1083342-1 - 1083342-5.

29 Tomasi C., Lupi A., Mazzola M., Stone R.S., Dutton E.G., Herber A., Radionov V.F., Holben B.N., Sorokin M.G., Sakerin S.M., Terpugova S.A., Sobolewski P.S., Lanconelli C., Petkov B.H., Busetto M., Vitale V. An update on polar aerosol optical properties using POLAR-AOD and other measurements performed during the International Polar Year // Atmos. Environ. –2012.–P.47.

30 Tomasi C., Vitale V., Lupi A., Di Carmine C., Campanelli, M., Herber A., Treffeisen R., Stone R.S., Andrews E., Sharma S., Radionov V., von Hoyningen-Huene W., Stebel K., Hansen G.H., Myhre C.L., Wehrli C., Aaltonen V., Lihavainen H., Virkkula A., Hillamo R., Ström J., Toledano C., Cachorro V.E., Ortiz, P., de Frutos A.M., Blindheim S., Frioud M., Gausa M., Zielinski T., Petelski T., Yamanouchi T. Aerosols in polar regions: a historical overview based on optical depth and in situ observations // J. Geophys. Res. –2007. –P. 16205 1-28

31 Sakerin S.M., Kabanov D.M., Kruglinsky I.A., Lubo-Lesnichenko K.E., Radionov V.F., Sidorova O.R. Seasonal and interannual variations in atmospheric aerosol optical depth during 2011-2019 in Barentsburg (Spitsbergen) // Proc. SPIE. -2020.– V. 11560. –P.115602J-1-7.

32 Kabanov D.M., Kozlov V.S., Kruglinsky I.A., Loskutova M.A., Lubo-Lesnichenko K.E., Makshtas A.P., Movchan V.V., Radionov V.F., Sakerin S.M., Chernov D.G., TurchinovichYu.S. Comparison of aerosol characteristics at polar station "Cape Baranov" and "Barentsburg" in measurement seasons of 2018-2019 // Proc. SPIE.–2020.– V. 11560. –P. 1156031-1-8.

33 Чернов Д.Г., Кабанов Д.М., Козлов В.С., Круглинский И.А., Сакерин С.М., Турчинович Ю.С., Макштас А.П., В.Ф. Радионов, Результаты измерений оптических и микрофизических характеристик аэрозоля в двух полярных районах (на архипелагах Шпицберген и Северная Земля) в 2018-2019 гг. // Аэрозоли Сибири. XXVI Конференция: Тезисы докладов. Томск: Изд-е ИОА СО РАН. 2019. –С. 94-95.

34 FireInformationforResourceManagementSystem[Электронныйресурс].–URL:https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov(Датаобращения15.02.2021).

35 READY - Real-time Environmental Applications and Display sYstem[Электронныйресурс].–URL:https://www.ready.noaa.gov/index.php(Датаобращения10.04.2021).

36 AccessNASAEarthScienceData[Электронныйресурс].-URL:https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/ (Датаобращения15.04.2021).

37 Свириденков М.А. Определение характеристик атмосферного аэрозоля по спектральным измерениям прозрачности и малоуглового рассеяния // Оптика атмосферы и океана. – 2001. – Т.14. – № 12. – С. 1115-1118.

38 Брукс К., Карузерс Н. Применение статистических методов в метеорологии. – Л.: Гидрометеоиздат. 1963. –415 с.

39 Грин Х., Лейн В. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы. –Изд. 2- е, стер. Изд-во «Химия».1972.–С.428.

40 Ивлев Л.С., Довгалюк Ю.А. Физика атмосферных аэрозольных систем. – СПб.:НИИХСПбГУ. 1999.–С.194.

41 Kabanov D.M., Ritter C., Sakerin S.M. Interannual and seasonal variations in aerosol optical depth of the atmosphere in two regions of Spitsbergen Archipelago (2002-2018) // Atmospheric Measurement Techniques. – 2020. – V. 13.–P. 5303-5317.

42 Масленников 6.В. Mil Климатические колебания и морская экосистема Антарктики, – М.: Изд-во ВНИРО. – 2003. – 295с.

43 Александров В.Я., Угрюмов А.И. Связь многолетних колебаний температуры воздуха в районе российской антарктической станции Беллинсгаузен с особенностями циркуляции атмосферы в южной полярной области // Учёные записки РГГМУ. – 2013. – №. 32.–С.36-42.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ОТЧЕТ О ПАТЕНТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Exactus Like - поиск текстовых заимствований

Введите текст:		
или загрузите файл:		
Файл не выбран		Выбрать файл
Pranovre rod trydrexadjew: 2021 V		
Выберите коллекции		
Boe	Berning and an and an an	
Рефереты Вихиподия Автоонфераты Российские конференции	Энциклопедии	
Иностранные конференции Иностранные журналы	Англонзычная викиледия	
PubMed		
		Анализироват
Проверить по расширенному списку коплекций системы Рухонтекст	(http://text.rucont.ruflike)	
	(independent second second)	
Обработан файл:		
ngy runnang process		
Год публикации: 2021.		
Оценка оригинальности документа - 100.0%		
Процент условно корректных заниствований - 0.0%		
Thought Totono Kopperiner Samereosanni - 0.078		
Процент некорректных заимствований - 0.0%		
Поосматр заимотиранны в документе		
		100.00%
Врени митолненик: 149 с.		
Заимствования отсутствуют		
		Дополнительно

Руководитель ВКР: д-р физ. мат. наук, профессор, Донченко В.А.

Научный консультант ВКР: с.н.с. ИОА СО РАН, к.ф.-м.н, Кабанов Д.М.

pell

Автор работы: Круглинский И.А.