

АЗЕРБАЙДЖАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА

На правах рукописи

«Новые методы метеорологических измерений степени загрязненности приземного слоя атмосферы»

Специальность: 3337.01- Информационно-измерительные и
управляющие системы

Отрасль науки: Техника

Соискатель: **Фатуллаев Акиф Аллахверди оглы**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора философии

Баку – 2021

Диссертационная работа выполнена в Научно-Исследовательском Институте Аэрокосмической Информатики .

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Асадов Хикмет Гамид оглы

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Касимзаде Токай Мурад оглы

Доктор технических наук, профессор **Рустамов Газанфар Арастун оглы**

Доктор технических наук **Фарзана Эльдар Надирович**

Диссертационный совет ED 2.41 Высшей Аттестационной Комиссии при Президенте Азербайджанской Республики, действующий на базе Азербайджанского Технического Университета.

Председатель диссертационного совета: д.т.н., профессор
Вагиф Алиджавад оглы Гасымов

Ученый секретарь диссертационного совета: к.т.н., доцент
Вахид Гара оглы Фархадов

Председатель научного семинара: д.т.н., доцент **Намик Таир оглы Абдуллаев**



ВВЕДЕНИЕ

Актуальность и степень проработанности темы. Бурное развитие промышленности неразрывно связано с загрязнением окружающей среды и, в частности, атмосферы. Наличие температурной инверсии, сформированной по различным причинам на нижнем слое атмосферы, приводит к накоплению загрязнителей в слое перемешивания под слоем инверсии, что неизбежным образом отражается на экологическом состоянии всего приземного слоя атмосферы.

Наиболее загрязненной частью тропосферы является приземный слой атмосферы, который будучи нижней частью пограничного слоя, простирается от земной поверхности до высоты в несколько десятков метров.

В приземном слое атмосферы наблюдается резкое изменение метеорологических элементов с высотой: вертикальные градиенты скорости ветра, температуры и влажности в поверхностном слое атмосферы в десятки и сотни раз превышают соответствующие величины в вышележащих слоях, но уменьшаются по абсолютной величине с увеличением высоты.

С экологической точки зрения загрязненность приземного слоя тесно связана с загрязненностью всего пограничного слоя тропосферы. В пограничном слое тропосферы также наблюдается значительное скопление водяных паров, аэрозоля и малых токсичных газов. Все это показывает насущную необходимость и актуальность проведения метеорологических измерений аэрозольных загрязнителей в пограничном слое тропосферы. Необходимость в точном измерении паров воды также заключается в значительном поглощении энергии Солнечной радиации водяными парами в видимом и ближнем

инфракрасном диапазоне. Вышеуказанное подтверждает актуальность темы диссертационных исследований, заключающихся в разработке новых методов и средств метеорологических измерений степени загрязнения нижних слоев тропосферы.

Для исследования степени загрязнения нижнего слоя атмосферы обычно используют лидары, ДОАС, радиозонды, а также спутниковые микроволновые радиометры.

В последние годы в ряде работ японских ученых Йоши, Кузе, Шираки и др. был предложен оригинальный способ исследования приземного слоя тропосферы, заключающийся в использовании в качестве внешнего излучателя высотных сигнальных ламп, используемых в качестве огней безопасности в авиации. Среди метеорологических измерителей, используемых для исследования всей толщи атмосферы от Земли до Солнца, особое место занимают солнечные фотометры. Солнечные фотометры, установленные на Земле, позволяют исследовать аэрозоль, некоторые малые газы, водяные пары в атмосфере. Солнечными фотометрами также исследуются облака, ионосферные излучения, аэрозольные шлейфы, возникающие из-за песчаных бурь, извержений вулканов и т.д.

Для метеорологических измерений в нижнем слое тропосферы также пригоден метод газо-фильтровой корреляционной спектроскопии. Это относительно простой и надежный способ, позволяющий относительно быстро и селективно осуществлять измерения различных газов с достаточной чувствительностью. В этом методе флуктуации источника света, а также изменения других газов не влияют на результат измерений. Газо-фильтровый корреляционный метод, начиная с 60-х годов прошлого столетия, широко используется в бортовых измерителях.

В университете Чибэ (Япония) впервые была предложена особая разновидность ДООС спектрометра, в котором в качестве источника света была использована белая сигнальная лампа, установленная на крыше высотного объекта. Такие сигнальные лампы обычно предназначаются для безопасного функционирования авиационного транспорта.

В настоящей диссертационной работе предлагается дальнейшее развитие этого метода путем замены ДООС на солнечный фотометр, что позволяет также проводить измерения атмосферного аэрозоля. В работе предложены радиально-разностный и разностный методы метеорологического измерения приземного слоя атмосферы, разработаны теоретические основы и прикладные вопросы их реализации.

Цель и задачи исследований. Целью диссертационной работы является разработка научно-методических основ создания высокоэффективных методов и средств для метеорологических измерений степени загрязнения приземного слоя тропосферы.

1. Исследование возможности метеорологического фотометрического измерения оптической толщины приземного слоя тропосферы с использованием высотных сигнальных ламп в качестве излучателя и разработка нового радиально-разностного метода фотометрических измерений, позволяющего исключить временную нестабильность интенсивности излучения высотных сигнальных ламп и определить основное направление загрязнения приземного слоя атмосферы.

2. Разработка разностного метода измерения оптической толщины приземного слоя тропосферы, заключающегося в проведении двух солнечно-фотометрических измерений на противоположных границах исследуемого слоя и дальнейшего вычитания полученных результатов измерения.

3. Разработка следующих методов измерения, коррекции и оптимизации, связанных с атмосферным аэрозолем:

- разработка метода измерения малой аэрозольной нагрузки атмосферы в сети аэрозольных измерений с использованием суммарной и рассеянной радиации при низких высотах Солнца;

- разработка аппроксимационного способа определения коэффициентов коррекции аэрозольной погрешности солнечных фотометров при измерении общего количества водяных паров в атмосфере;

- разработка способа нахождения оптимальных величин оптических толщин мелких и грубых дисперсных составляющих атмосферного аэрозоля, обеспечивающих достижение минимальной величины сигнала коррекции влияния диффузной радиации.

4. Разработка математической модели воздействия сажи на фотолитические процессы, происходящие в приграничном слое тропосферы с учетом взаимодействия приземных сажи и озона.

5. Разработка алгоритма повышения точности фотометрического метода измерений, характеристики которого подвержены временному дрейфу из-за временной нестабильности характеристики опто-электронного тракта фотометра.

6. Разработка варианта реализации трехволнового фотометрирования, в котором достигается значительное увеличение отношения сигнал/шум на выходе за счет изменения некоторых режимных показателей и усовершенствованного метода диаграмм Ленгли, используемого для калибровки солнечных фотометров.

Методы исследований. В процессе решения поставленных научных задач были использованы соответствующие положения теории оптических атмосферных измерений, математического анализа сигналов, теории вариационной оптимизации, теории случайных процессов, теории атмосферной оптики.

С целью подтверждения полученных результатов были проведены экспериментально-модельные исследования оптических показателей приземного слоя атмосферы.

Основные положения выносимые на защиту.

1. Предложенный радиально-разностный метод метеорологических измерений, позволяющий исключить временную нестабильность интенсивности излучения высотных сигнальных ламп и определить основное направление загрязнения приземного слоя атмосферы.

2. Предложенный разностный метод метеорологических измерений оптической толщины приземного слоя тропосферы, заключающийся в проведении двух солнечно-фотометрических измерений – один при помощи наземного фотометра, другой с помощью фотометра, установленного на верхней границе приземного слоя и дальнейшего вычитания полученных результатов измерения, в двух вариантах реализации.

3. Новые методы измерения, коррекции и оптимизации, связанные с атмосферным аэрозолем:

- метод измерения малой аэрозольной нагрузки атмосферы в сети аэрозольных измерений с использованием суммарной и рассеянной радиации при низких высотах Солнца;

- аппроксимационный способ определения коэффициентов коррекции аэрозольной погрешности солнечных фотометров при измерении общего количества водяных паров в атмосфере;

- способ нахождения оптимальных величин оптических толщин мелких и грубых дисперсных составляющих атмосферного аэрозоля, обеспечивающих достижение минимальной величины сигнала коррекции влияния диффузной радиации.

4. Построенная математическая модель воздействия сажи на фотолитические процессы, происходящие в приграничном слое тропосферы, согласно которой: для обеспечения поступления минимального количества солнечной радиации на

приграничный слой следует обеспечить взаимно инверсное отношение между концентрациями сажи и приземного озона.

5. Предложенный алгоритм повышения точности фотометрического метода, изменений характеристики которого подвержены дрейфу из-за временной нестабильности характеристики опто-электронного тракта фотометра, в двух вариантах реализации.

6. Предложенный вариант построения трехволнового фотометра, в котором достигается значительное увеличение отношения сигнал/шум за счет моделирования фотометрических измерений при малых значениях оптической воздушной массы по сравнению с реальным значением этого показателя и предложенное усовершенствование метода диаграмм Ленгли, используемого для калибровки солнечных фотометров, заключающееся в реализации стабилизации диаграмм Ленгли путем изменения длины волны в соответствии с изменением видимости на поверхности Земли.

Научная новизна исследований.

1. Исследована возможность метеорологического фотометрического измерения оптической толщины приземного слоя тропосферы с использованием высотных сигнальных ламп в качестве излучателя. Предложен радиально-разностный метод метеорологических фотометрических измерений, позволяющий исключить временную нестабильность интенсивности излучения высотных сигнальных ламп и определить основное направление загрязнения приземного слоя атмосферы.

2. Предложен разностный метод метеорологических измерений оптической толщины приземного слоя тропосферы, заключающийся в проведении двух солнечно-фотометрических измерений – одного при помощи наземного фотометра, другого с помощью фотометра, установленного на верхней границе приземного слоя и дальнейшего вычитания полученных

результатов измерения. Предложены два варианта реализации предлагаемого метода.

3. Предложены следующие новые методы измерения, коррекции и оптимизации, связанные с атмосферным аэрозолем:

- метод измерения малой аэрозольной нагрузки атмосферы в сети аэрозольных измерений с использованием суммарной и рассеянной радиации при низких высотах Солнца, при реализации которого нет необходимости проведения измерения прямого солнечного излучения;

- аппроксимационный способ определения коэффициентов коррекции аэрозольной погрешности солнечных фотометров при измерении общего количества водяных паров в атмосфере;

- способ нахождения оптимальных величин оптических толщин мелких и грубых дисперсных составляющих атмосферного аэрозоля, обеспечивающих достижение минимальной величины сигнала коррекции влияния диффузной радиации при заданных ограничениях на минимальные значения оптических толщин аэрозоля на трех фиксированных длинах волн.

4. Построена математическая модель воздействия сажи на фотолитические процессы, происходящие в приграничном слое тропосферы. Согласно этой модели:

- существует характер взаимосвязи между приземным озоном и сажой, при котором обеспечивается поступление минимального количества солнечной радиации на приграничный слой нижней тропосферы;

- для обеспечения поступления минимального количества солнечной радиации на приграничный слой следует обеспечить взаимно инверсное отношение между концентрациями сажи и приземного слоя;

- появление определенного количества сажи приводит к уменьшению солнечной радиации, поступающей на

приграничный слой, что в свою очередь приводит к уменьшению генерируемого количества приземного озона.

5. Предложен алгоритм повышения точности фотометрического метода, изменений характеристики которого подвержены дрейфу из-за временной нестабильности характеристики опто-электронного тракта фотометра. Предложены два способа реализации предложенного алгоритма.

6. Предложен вариант построения трехволнового фотометра, в котором достигается значительное увеличение отношения сигнал/шум за счет моделирования фотометрических измерений при низких значениях оптической воздушной массы в случае проведения измерения в реальности, при более высоких значениях этого параметра.

7. Предложено усовершенствование метода диаграмм Ленгли, используемого для калибровки солнечных фотометров, заключающееся в реализации стабилизации диаграмм Ленгли путем изменения длины волны в соответствии с изменением видимости на поверхности Земли.

Теоретическое и практическое значение исследований.

1. Получил дальнейшее развитие метод метеорологического фотометрического измерения оптической толщины приземного слоя тропосферы с использованием сигнальных ламп устанавливаемых на высотных сооружениях в качестве излучателя впервые предложенный японскими учеными разработан радиально-разностный метод приземных фотометрических измерений, позволяющий существенно уменьшить влияние временной нестабильности интенсивности излучения высотных сигнальных ламп на результат измерений и определить основное направление загрязнения приземного слоя атмосферы. Полученные результаты в этом направлении могут быть внедрены в практику метеорологических измерений для исследования динамики аэрозольного загрязнения приземного слоя.

2. Разработанный разностный метод метеорологических измерений оптической толщины приземного слоя тропосферы, в двух вариантах реализации позволяет определить высотных градиент аэрозольного загрязнения приземного слоя и наиболее пригоден для проведения метеорологических измерений в городской среде.

3. Предложенные методы измерения, коррекции и оптимизации, связанные с учетом влияния атмосферного аэрозоля и приземного озона, в том числе:

- метод измерения малой аэрозольной нагрузки атмосферы в сети аэрозольных измерений с использованием суммарной и рассеянной радиации при низких высотах Солнца;

- аппроксимационный способ определения коэффициентов коррекции аэрозольной погрешности солнечных фотометров при измерении общего количества водяных паров в атмосфере;

- способ нахождения оптимальных величин оптических толщин мелких и грубых дисперсных составляющих атмосферного аэрозоля, для достижения минимальной величины сигнала коррекции влияния диффузной радиации позволяют значительно уменьшить неточность метеорологических измерений показателей загрязнения приземного слоя осуществляемых с помощью солнечных фотометров.

4. Предложенная математическая модель воздействия сажи на фотолитические процессы, происходящие в приграничном слое тропосферы позволяет на практике учесть влияния динамики изменения количественных показателей аэрозоля и озона в нижнем слое атмосферы на солнечную радиацию поступающую на поверхность Земли.

5. Предложенный способ повышения точности фотометрического метода, измерений характеристики которого подвержены дрейфу из-за временной нестабильности характеристики опто-электронного тракта фотометра позволяет на практике существенно повысить точность серийных

метеорологических измерений для изучения динамики метеообстановки.

6. Предложенный вариант реализации трехволнового фотометрирования, в котором достигается значительное увеличение отношения сигнал/шум за счет проведения фотометрических измерений, при моделируемых низких значениях оптической воздушной массы на практике расширяет потенциальные возможности использования трехволновых солнечных фотометров в плане устранения остаточного влияния атмосферного аэрозоля на результат проводимых измерений.

7. Усовершенствованный метод диаграмм Ленгли, используемый для калибровки солнечных фотометров, позволит на практике существенно повысить точность калибровки солнечных фотометров, и как результат точность проводимых солнечно-фотометрических измерений.

Апробация и внедрение работы. Основные положения и результаты исследований диссертации доложены и обсуждались на следующих международных республиканских конференциях: V Заочной Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы экологии и охраны труда». Курск, 2014, 4-й международной межвузовской научно-практической конференции «Инженерно-конструкторские расчеты и технологические решения в создании новых прикладных направлений в технике», Великие Луки. 2014. Основные результаты диссертационной работы были внедрены в ОКР “İşıqlanan obyektin (signal raketinin) uçuş hündürlüyünün ölçən qurğunun işlənməsi” проводимый г. в НИИАИ по заказу ПО “Radioquraşdırma – zavodu” ММС в 2013 – 2014г.

Название организации, где выполнена диссертационная работа. Диссертационная работа выполнена в Научно-Исследовательском Институте Аэрокосмической Информатики Национального Аэрокосмического Агентства.

Общий объем диссертации, с учетом объемов отдельных структурных разделов. Введение состоит из 21000 знаков, I глава из 52000 знаков, II глава 50000 знаков, III глава 52000 знаков, IV глава 80000 знаков. Общий объем диссертаций составляет 255000 знаков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертации обоснована актуальность проблемы, проанализировано ее состояние, сформированы цель работы, задачи исследования и положения выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена предлагаемым новым методам исследования степени загрязненности приземного слоя тропосферы. Наличие температурной инверсии, сформированной по различным причинам на нижнем (далее под нижним слоем подразумевается пограничный и приземные слои) слое атмосферы, приводит к накоплению загрязнителей в слое перемешивания под слоем инверсии, что неизбежным образом отражается на экологическом состоянии всего приземного слоя тропосферы.

Для исследования степени загрязнения нижнего слоя тропосферы обычно используют лидары, DOAS, радиозонды, а также спутниковые микроволновые радиометры. В последние годы в ряде работ японских ученых Йоши, Кузе, Шираки и др. был предложен оригинальный способ исследования приземного слоя тропосферы, заключающийся в использовании в качестве излучателя DOAS высотных сигнальных ламп.

Как отмечено в работе, в университете Chiba (Япония) впервые была предложена особая разновидность DOAS спектрометра, в котором в качестве источника света была использована белая сигнальная лампа, установленная на крыше высотного объекта, такие сигнальные лампы обычно

предназначаются для безопасного функционирования авиационного транспорта. В Японии и во многих других странах существует стандарт, обязывающий установку белой сигнальной лампы на крыше высотных объектов, высотой более 60 м. В качестве источника обычно используется ксеноновые лампы, мигающие, через каждые 1,5 сек. При этом, фон в виде свечения неба очень легко учесть, при анализе спектра сигналов. В работе сообщается об использовании в составе спектрометра 2048 элементного CCD приемника в диапазоне длин волн 200 – 800 нм, что обеспечивало среднее разрешение на уровне 0,3 нм/пиксель. Схема проведения измерений с использованием высотного излучателя показана на рис.1.

Величина сигнала для коллимированного света может быть оценена как

$$I_1 = I_0 e^{-\alpha \cdot L \cdot C}, \quad (1.)$$

где I_1 - интенсивность радиации на входе фотометра;

I_0 - интенсивность радиации до поглощения;

α - коэффициент адсорбции;

L - длина пути;

C - отношение перемешивания малого газа.

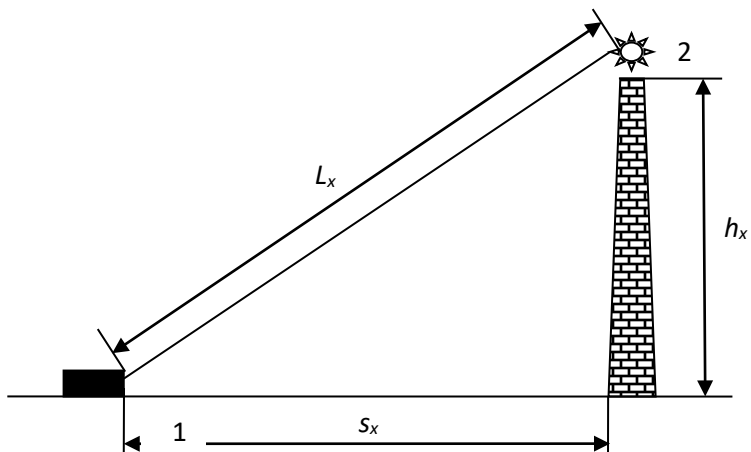


Рис.1. Схема проведения фотометрических измерений с использованием сигнальной лампы: 1 - фотометр; 2 - сигнальная лампа

Для измерения концентрации малых газов в тропосфере в память спектрометра заранее заносится значения дифференциального поперечного сечения $\Delta\alpha$ в нескольких каналах. Были использованы следующие длины волн для обнаружения малых газов: O_3 :(265,7 – 304,4) нм; SO_2 :(280,7 – 319,3) нм; NO_2 :(406,2 - 444) нм.

Согласно работе была измерена оптическая толщина NO_2 , используя сигнальные лампы, установленные на высотах 20 – 130 м. Как было отмечено выше, что модель (1) верна для источника коллимированного света. В реальном случае свет сигнальной лампы является неколлимированным и для этого случая верна модель Алларда, математически выражаемая следующим образом

$$E(\lambda) = \frac{I_0(\lambda)}{L_x^2} e^{-L_x \delta}, \quad (2)$$

где δ - удельная оптическая плотность;
 $E(\lambda)$ - энергетическая освещенность.

По указанной причине, далее используя формулу (1) подразумеваем, что используется коллимированный свет, т.е. пучок не расходящийся радиально. Примером такого источника может стать лазер, луч прожектора или любой другой соответствующий излучатель.

Для применения вышеизложенного метода запишем выражение (1.2.2) для случая

$$L_x \cdot \delta \ll 1. \quad (3)$$

При выполнении условия (1.2.3) имеем

$$E(\lambda) = \frac{I_0(\lambda)}{L_x^2} e^{-\delta L_x} = \frac{I_0(\lambda)}{L_x^2} (1 - \delta \cdot L_x). \quad (4)$$

Как видно из выражения (1.2.4), для измерения δ должны быть известны значения $E(\lambda)$, $I_0(\lambda)$, L_x . С учетом выражения (2) оптическая толщина может быть вычислена по формуле

$$\tau = L_x \delta = \ln \left(\frac{I_0(\lambda)}{E(\lambda) L_x^2} \right). \quad (5)$$

Для проведения измерений по формулам (4) и (5) должны быть приведены совокупные измерения с помощью фотометра и лазерного дальномера.

Таким образом, при неизвестном значении L_x алгоритм измерения δ заключается в следующем:

1. Лазерным дальномером измеряется L_x .
2. Фотометром измеряется $E(\lambda)$ по формуле (4).
3. По формуле (5) вычисляется δ .

Покажем, что если $I_0(\lambda)$ имеет временную нестабильность интенсивности излучения, такая нестабильность может быть исключена с помощью предлагаемого метода радиально – разностных измерений.

Обоснована возможность фотометрического измерения оптической толщины нижнего слоя тропосферы с использованием высотных сигнальных ламп в качестве излучателя. Предложен радиально-разностный метод фотометрических измерений, позволяющий исключить временную нестабильность интенсивности излучения высотных сигнальных ламп и определить основное направление загрязнения приземного слоя тропосферы. Схема проведения радиально - разностных фотометрических измерений показана на рис. 2.

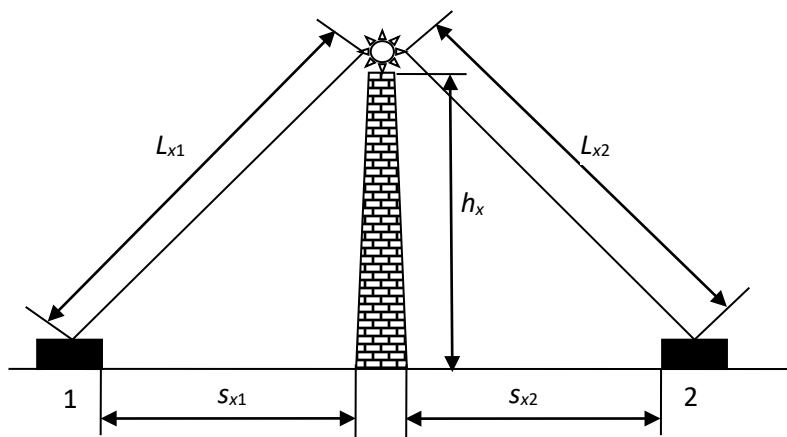


Рис. 2. Схема проведения радиально – разностных измерений.

Алгоритм радиально – разностных измерений заключается в следующем:

1. Определяются позиции фотометра 1 и 2, относительно высотного излучателя, где выполняются условия $L_{x_1} = L_{x_2}$; $S_{x_1} = S_{x_2}$.

2. Осуществляется фотометрическое измерение с позиции 1, по формуле

$$\delta = \frac{1}{L_x} \ln \left[\frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)} \right]. \quad (6)$$

в результате чего оптическая толщина L_1 определяется как

$$\delta_1 = \frac{1}{L_x} \ln \left[\frac{I_0(\lambda)}{I_1(\lambda)} \right], \quad (7)$$

где $I_0(\lambda)$ - исходная интенсивность излучателя; $I_1(\lambda)$ - интенсивность излучения на входе фотометра 1.

3. Осуществляется фотометрическое измерение с позиции 2, по формуле (6), в результате чего оптическая толщина L_2 определяется как

$$\delta_2 = \frac{1}{L_x} \ln \left[\frac{I_0(\lambda)}{I_2(\lambda)} \right], \quad (8)$$

где $I_2(\lambda)$ - интенсивность излучения на входе фотометра 2.

Вычитая выражение (7) и (8) получаем

$$\Delta\delta = \delta_1 - \delta_2 = \frac{1}{L_x} \ln \left[\frac{I_2(\lambda)}{I_1(\lambda)} \right]. \quad (9)$$

Как видно из выражения (9), при радиально – разностном методе измерений, удается избежать временной нестабильности интенсивности излучения высотных сигнальных ламп.

В результате проведения радиально – разностных измерений строятся радиально – разностные диаграммы загрязненности приземного слоя тропосферы вокруг высотного излучателя.

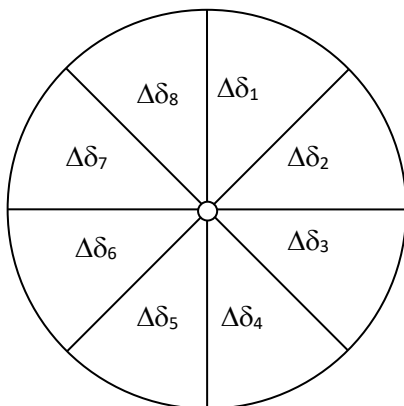


Рис.3. Радиально разностная схема проведения фотометрических измерений

Как это показано на рис. 3, проведение 4-х пар фотометрических измерений позволяет разделить всю круговую площадь вокруг излучателя на 8 сегментов и определить направления, в которых загрязнение нижнего слоя тропосферы наиболее сильно. В заключение настоящего раздела рассмотрим вопросы калибровки фотометрических измерений с применением высотных неколлимированных излучателей. Из выражения (4) нетрудно получить следующее квадратичное уравнение:

$$L_x^2 + \frac{I_0(\lambda) \cdot \delta L_x}{E_1(\lambda)} - \frac{I_0(\lambda)}{E_1(\lambda)} = 0. \quad (10)$$

Решение уравнения (10) имеет следующий вид:

$$L_x = -\frac{I_0(\lambda) \cdot \delta}{2 E_1(\lambda)} + \sqrt{\frac{I_0^2(\lambda) \cdot \delta}{4 E_1^2(\lambda)} + \frac{I_0(\lambda)}{E_1(\lambda)}}. \quad (11)$$

Выражение (11) позволяет предложить следующие алгоритмы калибровки фотометрического излучателя:

1. Осуществляется фотометрическое измерение по выражению (5).

2. Вычисляется значение L_x по формуле (11).

3. Осуществляется сравнение вычисленного значения L_x с показанием лазерного дальномера.

Таким образом, степень калиброванности фотометрического измерителя может быть оценена фактической разностью между вычисленным и измеренным значениями L_x . Точное совпадение этих величин будет означать высокую степень калиброванности измерителя.

В заключение сформулируем основные выводы и положения проведенного исследования:

1. Показана возможность фотометрического измерения оптической толщины нижнего слоя тропосферы с использованием высотных сигнальных ламп в качестве излучателя.

2. Предложен радиально - разностный метод фотометрических измерений, позволяющий исключить временную нестабильность интенсивности излучения высотных

сигнальных ламп и определить основное направление загрязнения приземного слоя тропосферы.

3. Предложен способ калибровки фотометрического излучателя по степени совпадения результатов вычисления и опорного измерения расстояния до излучателя.

Предложен метод вариации угла наблюдения сигнальной лампы для коррекции временной нестабильности и интенсивности излучения. Дано математическое обоснование преимущества предложенного метода, заключающегося в обеспечении высокой величины отношения сигнал/шум.

Предложен разностный метод измерения оптической толщины приземного слоя тропосферы, заключающийся в проведении двух солнечно-фотометрических измерений – одного при помощи наземного фотометра, другого с помощью фотометра установленного на верхней границе приземного слоя и дальнейшего вычитания полученных результатов измерения. Рассмотрены различные варианты реализации этого метода. Показано, что при предложенном методе определения малой аэрозольной нагрузки нет необходимости проведения измерения прямого солнечного луча.

Вторая глава диссертационной работы посвящена модельным исследованиям по реализации радиально – разностного метода проведения метеорологических измерений приземного слоя атмосферы.

Предложен аппроксимационный способ определения коэффициентов коррекции в трехволновых солнечных фотометрах. Показан пример применения интерполяционного и экстраполяционного методов для вычисления корректирующих коэффициентов.

Предложена процедура нахождения оптимальных величин оптических толщин мелких и грубых дисперсных составляющих атмосферного аэрозоля, обеспечивающих достижение минимальной величины сигнала коррекции влияния диффузной

радиации на значения оптических толщин аэрозоля на трех фиксированных длинах волн. Дана геометрическая интерпретация решения сформулированной задачи оптимизации. Отмечено, что предложенная процедура оптимизации может быть распространена и на случай наличия трех и более дисперсных компонентов атмосферного аэрозоля.

Предложена математическая модель воздействия сажи на фотолитические процессы, происходящие в приграничном слое тропосферы. Согласно предложенной модели:

- существует характер взаимосвязи между приземным озоном и сажой при котором обеспечивается поступление минимального количества солнечной радиации на приграничный слой нижней тропосферы;

- для обеспечения поступления минимального количества солнечной радиации на приграничный слой следует обеспечить взаимно инверсное отношение между концентрациями сажи и приземного слоя;

- появление определенного количества сажи приводит к уменьшению солнечной радиации, поступающей на приграничный слой, что в свою очередь приводит к уменьшению генерируемого количества приземного озона.

Третья глава диссертационной работы посвящена модельным исследованиям по реализации разностного метода метеорологических измерений загрязненности приземного слоя атмосферы.

Предложен алгоритм повышения точности фотометрического метода измерения паров воды в атмосфере путем устранения временного дрейфа характеристик опто-электронного тракта. Разработаны два способа реализации предложенного алгоритма.

В результате проведения солнечно - фотометрических измерений при двух оптических воздушных массах на длине волны $\lambda = 940$ нм получим

$$I(\lambda, m_1) = I_0(\lambda) \cdot \exp[-a(m_1 W_1)^b], \quad (12)$$

$$I(\lambda, m_2) = I_0(\lambda) \cdot \exp[-a(m_2 W_2)^b], \quad (13)$$

где m_1 и $W_i, i = \overline{1, 2}$, соответственно являются оптической воздушной массой и суммарной величиной осажденной воды; a и b - постоянные опто-электронного тракта фотометра. Из выражений (12) и (13) соответственно находим

$$W_1 = \frac{1}{m_1} \sqrt[b]{\frac{1}{a} \ln \frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda, m_1)}}, \quad (14)$$

$$W_2 = \frac{1}{m_2} \sqrt[b]{\frac{1}{a} \ln \frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda, m_2)}}. \quad (15)$$

В первом способе проводятся контрольное измерение водяных паров используя метод Батлера. Согласно этому методу, общее количество осаждаемой воды может быть вычислено по следующему выражению.

$$W \approx \frac{P_0}{3T_0}, \quad (16)$$

где P_0 - частное давление водяных паров на поверхности земли; T_0 - температура на поверхности.

Таким образом, для реализации первого варианта вышеизложенного алгоритма следует параллельно измерить значения W_1 и W_2 при оптических массах m_1 и m_2 по методу Батлера и далее решить систему уравнений (14), (15) относительно коэффициентов a и b . Такое периодическое сопоставление результатов измерений по методам солнечного фотометрирования и Батлера позволит время от времени корректировать показания фотометра из-за временного дрейфа, возникающего из-за деградации опто – электронного тракта и тем самым повысить точность фотометрических измерений.

Второй вариант реализации вышеизложенного алгоритма связан с проведением измерений общего количества осажденной воды W . Используя зависимость между общим количеством осажденной воды W и зенитной влажной задержкой ZWD .

Подобно первому варианту вышеизложенного алгоритма, во втором варианте реализации этого алгоритма сначала осуществляются параллельные измерения W_1 и W_2 с помощью GPS при оптических воздушных массах m_1 и m_2 , далее решается система уравнений (14), (15) относительно постоянных a и b .

Предложен аппроксимационный способ определения коэффициентов коррекции в трехволновых солнечных фотометрах. Показан пример применения интерполяционных и экстраполяционных методов для вычисления корректирующих коэффициентов.

Предложена процедура нахождения оптимальных величин оптических толщин мелких и грубых дисперсных составляющих атмосферного аэрозоля, обеспечивающих достижение минимальной величины сигнала коррекции влияния диффузной радиации на значения оптических толщин аэрозоля на трех фиксированных длинах волн. Дана геометрическая интерпретация решения сформулированной задачи оптимизации. Отмечено, что предложенная процедура оптимизации может быть распространена и на случай наличия трех и более дисперсных компонентов атмосферного аэрозоля.

Предложена математическая модель воздействия сажи на фотолитические процессы, происходящие в приграничном слое тропосферы. Согласно предложенной модели:

- существует характер взаимосвязи между приземным озоном и сажой, при котором обеспечивается поступление минимального количества солнечной радиации на приграничный слой нижней тропосферы;

- для обеспечения поступления минимального количества солнечной радиации на приграничный слой следует обеспечить взаимно инверсное отношение между концентрациями сажи и приземного слоя;

- появление определенного количества сажи приводит к уменьшению солнечной радиации, поступающей на приграничный слой, что в свою очередь приводит к уменьшению генерируемого количества приземного озона.

Четвертая глава диссертационной работы посвящена разработке новых высокоэффективных методов и средств для дистанционного зондирования нижних слоев тропосферы.

Показано, что в существующих вариантах реализации идеи трехволнового фотометрирования может быть обнаружена функциональная возможность значительного увеличения отношения сигнал/шум за счет проведения аналогичных измерений при низких значениях оптической воздушной массы в случае проведения предыдущих измерений при более высоких значениях этого параметра.

Предложен новый вариант построения фотометра. Блок-схема операционного алгоритма предлагаемого варианта трехволнового фотометра показана на рис. 4. Измеренные сигналы в предлагаемом варианте фотометра при оптической воздушной массе $d \cdot m$, $d = const$, вычисляется как:

$$I_n(\lambda_i, d_i) = I_{0_n}(\lambda_i, d_i) \cdot e^{-d_1 m [\tau_q(\lambda_i) + \tau_f(\lambda_i) + \tau_c(\lambda_i)]}, \quad i = \overline{1, 3} \quad (16)$$

Параметр d_i ; $i = \overline{1, 3}$ определяет изменение оптической воздушной массы при проведении измерений на длине волны λ_i . Параметр промежуточного преобразования в этом случае имеет вид:

$$z_2 = \frac{I_n^{k_3}(\lambda_1) \cdot I_n^{k_4}(\lambda_3)}{I_n(\lambda_2)} =$$

$$= \frac{I_{0_n}^{k_3}(\lambda_1) \cdot I_{0_n}^{k_4}(\lambda_3)}{I_{0_n}(\lambda_2)} \cdot \exp^{-m[k_3 d_1 \tau_q(\lambda_1) + k_4 d_2 \tau_q(\lambda_3) - \tau_q(\lambda_2) + k_3 d_1 \tau_f(\lambda_1) + k_4 d_2 \tau_f(\lambda_3) - \tau_f(\lambda_2) + k_3 d_1 \tau_c(\lambda_1) + k_4 d_2 \tau_c(\lambda_3) - \tau_c(\lambda_2)]}$$

(17)

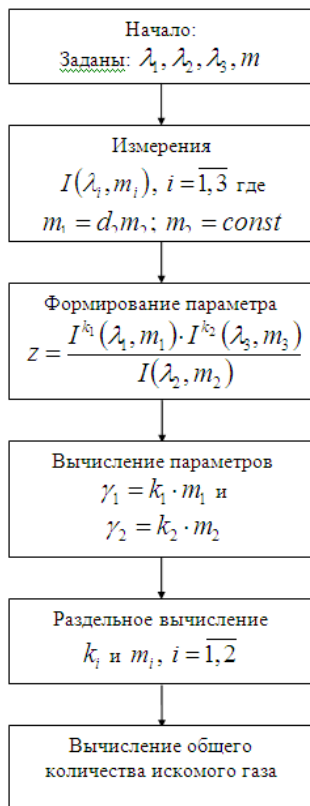


Рис. 4. Блок-схема операционного алгоритма предлагаемого построения солнечного фотометра.

Условие компенсации дисперсных составляющих аэрозоля атмосферы имеет вид

$$\begin{aligned} k_3 \cdot d_1 \tau_f(\lambda_1) + k_4 \cdot d_2 \tau_f(\lambda_3) &= \tau_f(\lambda_2) \\ k_3 \cdot d_1 \tau_c(\lambda_1) + k_4 \cdot d_2 \tau_c(\lambda_3) &= \tau_c(\lambda_2) \end{aligned} \quad (18)$$

Допустим, что решение системы уравнений (18) дает выигрыш в увеличении оценен отношения сигнал/шум в предложенном устройстве.

В четвертой главе также предложено усовершенствование метода диаграмм Ленгли используемого для калибровки солнечных фотометров, заключающийся в реализации стабилизации диаграмм Ленгли путем изменения длины волны измерений в соответствии с изменением видимости на поверхности земли в течение времени осуществления калибровки. Изложены теоретические, физические и математические основы предлагаемого метода. Предложена функциональная схема установки, с помощью которой может быть реализован предлагаемый метод.

Предложено усовершенствование газо-фильтрового метода радиометрических измерений, заключающееся в замене блока корреляционных вычислений блоком умножения. Предложены два способа реализации предлагаемого усовершенствования газо-фильтрового метода радиометрических измерений. Проанализированы погрешности предлагаемых способов реализации газо-фильтрового метода радиометрических измерений и дано качественное сравнение полученных результатов.

Анализ существующего фактического материала показал, что согласно результатам имеющихся экспериментальных исследований сигналы на выходах отдельных каналов Landsat ETM⁺ и MODIS или их комбинации могут иметь как положительную, так и отрицательную корреляцию с

результатами наземных радиометрических измерений. Показано, что при взаимной калибровки и валидации результатов наземных и бортовых измерений должны быть использованы сигналы тех каналов бортовых измерителей, которые имеют положительную корреляцию с результатами наземных радиометрических измерений.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Проведенные исследования метода метеорологических фотометрических измерений оптической толщины приземного слоя тропосферы с использованием высотных сигнальных ламп в качестве внешнего излучателя позволили предложить радиально-разностный метод фотометрических измерений, в котором исключается временная нестабильность интенсивности излучения высотных сигнальных ламп и появляется возможность определить основное направление загрязнения приземного слоя атмосферы.

2. Проведенные исследования разностного метода метеорологических измерения оптической толщины приземного слоя тропосферы, заключающегося в проведении двух солнечно-фотометрических измерений – одного при помощи наземного фотометра, другого с помощью фотометра, установленного на верхней границе приземного слоя и дальнейшем вычитании полученных результатов измерения позволили, предложить два варианта реализации этого метода использование которого позволяет более точно определить вертикальный градиент концентрации атмосферного аэрозоля и водяных паров.

3. Разработанные методы измерения, коррекции и оптимизации касающиеся количественных показателей озона и аэрозоля в приземном слое, в том числе:

- метод измерений малой аэрозольной нагрузки атмосферы в сети аэрозольных измерений при низких высотах Солнца,
- аппроксимационный способ определения коэффициентов коррекции аэрозольной погрешности солнечных фотометров при измерении общего количества водяных паров в атмосфере;
- способ нахождения оптимальных величин оптических толщин мелких и грубых дисперсных составляющих атмосферного аэрозоля, обеспечивающих достижение минимальной величины сигнала коррекции влияния диффузной радиации позволяют повысить эффективность использование фотометрических методов в метеорологических целях и правильно учесть особенности взаимосвязи различных атмосферных составляющих нижних слоев атмосферы.

4. Разработанная математическая модель воздействия сажи на фотолитические процессы, происходящие в приграничном слое тропосферы, определяющая характер взаимосвязи между приземным озоном и сажой устанавливает условия поступления минимального количества солнечной радиации на приграничный слой нижней тропосферы может быть использована при расчетах радиационного энергобаланса нижних слоев атмосферы.

5. Разработанный способ повышения точности фотометрического метода, путем учета временной нестабильности характеристики опто-электронного тракта фотометра позволяет повысить эффективность использования солнечных фотометров в метеорологических целях.

6. Предложенный вариант модификации трехволнового фотометрирования, где достигнуто значительное увеличение отношения сигнал/шум путем модельной реализации измерений при низких значениях оптической воздушной массы, а также

разработанный вариант построения диаграмм Ленгли для калибровки солнечных фотометров, заключающийся в стабилизации диаграмм Ленгли путем изменения длины волны в соответствии с изменением видимости на поверхности Земли позволяют существенно улучшить метеорологических показатели сложных фотометров, широко применяемых в практике метеорологических измерений.

По теме диссертации опубликованы следующие работы автора

1. Ибрагимов Э.А., Джавадов Н.Г., Фатуллаев А.А., Фатуллаев С.А. Способ повышения точности фотометрических измерений паров воды в атмосфере / Труды АзГУ, Баку, 2010, № 2, с. 61-63.

2. Агаев И.Х., Джавадов Н.Г., Фатуллаев А.А., Фатуллаев С.А. О возможности измерения малой аэрозольной нагрузки атмосферы с использованием прямой и рассеянной радиации при низких высотах Солнца / Труды АзГУ, Баку 2010, № 3, с. 91-93.

3. Джамалов А.Т., Фатуллаев А.А., Годжаева А.Ш., Мустафабейли Х.Ш. Калибровка результатов наземных и космических измерений показателей растительного покрова // Специальная техника, М., 2013, № 4, с. 24-27.

4. Фатуллаев А.А. Трехволновый солнечный фотометр для исследования приземного слоя тропосферы на основе высотных сигнальных ламп // Специальная техника, М., 2013, № 4, с. 45-54.

5. Фатуллаев А.А. Трехволновый солнечный фотометр с повышенным отношением сигнал/шум на выходе // Приборы, М., 2013, № 9, с. 8-12.

6. Фатуллаев А.А., Чалый Д.П. Оптимизация солнечного фотометрирования атмосферного аэрозоля с учетом влияния диффузной радиации / Сборник статей V Заочной Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы экологии и охраны труда». Курск, 2014, с. 163-167.

7. Фатуллаев А.А. Математическая модель влияния антропогенного аэрозоля на процессы генерации приземного озона / Материалы 4-й международной межвузовской научно-практической конференции «Инженерно-конструкторские

расчеты и технологические решения в создании новых прикладных направлений в технике» Выпуск 2. Великие Луки. 2014, с. 119-123.

8. Фатуллаев А.А. Вопросы солнечного фотометрирования атмосферного аэрозоля с учетом влияния диффузной техники // Специальная техника, М., 2014, № 3, с. 32-36.

9. Фатуллаев А.А., Асадов Х.Г. Вопросы использования газофилтрового радиометра на морских горизонтальных трассах для обнаружения углеводородных газовых скоплений // Специальная техника, М., 2014, № 4, с. 45-48.

10. Мамедбейли А.Г., Фатуллаев А.А. Новый метод фотометрического контроля аэрозоля приземного слоя атмосферы // Контроль. Диагностика. М., 2014, № 4, с. 24-27.

11. Фатуллаев А.А., Тахмазли М. Солнечные фотометры. Усовершенствование метода калибровки Ленгли // Фотоника, М., 2014, № 2 (44), с. 62-65.

12. Джавадов Н.Г., Эминов Р.А., Мурсалов. Н.З., Фатуллаев А.А. Метод адаптивной оптимизации биоремедиации загрязненных нефтью и нефтепродуктами земляной массы. // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов, 2019, №1 с.144-153.

Защита диссертации состоится «24» января 2022 года в 14⁰⁰ на заседании (регистрационный номер) Диссертационного совета ED 2.41 действующего на базе Азербайджанского Технического Университета.

Адрес: AZ 1073, Азербайджан, Баку, проспект Г.Джавида, 25.АзТУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Азербайджанского Технического Университета.

Электронная версия диссертации и автореферата размещена на официальном сайте Азербайджанского Технического Университета.

Автореферат разослан по соответствующим адресам —

27 декабря 2021 года.

Подписано к печати: 17. 12. 2021
Формат бумаги: (210x297)1\4Объём:
40006 знаков
Тираж 70