

М.В. Кабанов

УСПЕХИ АТМОСФЕРНОЙ ОПТИКИ И МОНИТОРИНГ ФИЗИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРЫ

Дается ретроспективный обзор результатов исследований по атмосферной оптике, включая исследования по спектральной прозрачности атмосферы, по закономерностям переноса оптического излучения и изображения в рассеивающих средах, по оптической рефракции в земной атмосфере. Обсуждаются достижения по методике и технике оптического эксперимента, перспективность их использования для комплексного климато-экологического мониторинга. Приводятся результаты обработки однородных рядов наблюдений по отдельным климато-экологическим параметрам атмосферы.

По многим признакам формирование атмосферной оптики как раздела точной науки (физики) следует отнести к первой половине текущего столетия. Именно в этот период под влиянием достижений в смежных разделах точных наук осуществляется переход от преимущественно качественного описания атмосферно-оптических явлений к количественному. К описанию оптических явлений, связанных с радиационным режимом в атмосфере, делаются попытки применить мощный математический аппарат теории переноса излучения [1]. Развиваются подходы к количественному описанию функций поглощения атмосферными газами [1,2]. Применение точной теории рассеяния света сферическими частицами (теории Ми [3]) для описания рассеяния оптических волн атмосферным аэрозолем обеспечивает физически обоснованный и количественный подход к интерпретации таких оптических явлений в атмосфере, как спектральная зависимость прозрачности в атмосферных дымках, туманах и облаках, спектральные закономерности в радугах и gloriaх, поляризационные эффекты при рассеянии [4–6]. Аналогичные попытки предпринимаются в эти годы и по другим проблемам атмосферной оптики.

Наиболее интенсивное развитие атмосферная оптика получает в последние десятилетия. Этот период характеризуется возрастающим практическим применением оптико-электронной и лазерной техники для работы в атмосфере и за ее пределами. Соответственно обновляется и техника научного эксперимента в атмосферной оптике, стремительно вытесняя визуальные наблюдения и оптические приборы старого поколения. Прогресс вычислительной техники и компьютеризация научных исследований открыли новые возможности для математического и физического моделирования атмосферно-оптических процессов и явлений.

Упомянутые и ряд других новых возможностей эффективно использованы научным коллективом Объединенного института оптики атмосферы Сибирского отделения РАН, созданного в 1969 г. и работающего под руководством академика Зуева В.Е. Результаты научных исследований, полученные этим самым мощным в России коллективом, занимающимся проблемами атмосферной оптики, обобщены в уникальной библиотеке современных проблем атмосферной оптики [7] и во многих других монографиях В.Е. Зуева и его учеников, к числу которых относится себя и автор этих строк.

В последние годы воздействие хозяйственной и производственной деятельности человека на окружающую среду приобрело настолько угрожающие масштабы, что становится причиной обеспокоенного беспокойства не только в отдельных регионах и странах, но и во всем мировом сообществе. Следствием этой тревоги является создание региональных, национальных и международных программ по охране различных компонентов окружающей среды, среди которых земная атмосфера (воздушный бассейн) относится к числу приоритетных. Необходимость подобных исследований признана первоочередной для выживания и устойчивого развития мировой цивилизации [8]. К решению таких первоочередных задач атмосферная оптика имеет непосредственное отношение. И это определяется не только высоким потенциалом атмосферно-

оптических методов для эффективного контроля практически всех параметров атмосферы, но и уже существующим широким арсеналом оптико-электронных средств для такого контроля. Среди последних особое место занимают лазерные средства дистанционного зондирования [9].

В настоящем обзоре обсуждаются отдельные принципиальные результаты исследований по атмосферной оптике, полученные с участием автора в последние десятилетия. Цель обзора состоит в том, чтобы проиллюстрировать не столько значение самих результатов, сколько перспективность разработанных в процессе их получения технических средств для комплексного мониторинга атмосферы.

Формирование программы работ по такому мониторингу под руководством автора в настоящее время завершается в рамках межведомственного проекта <Климато-экологический мониторинг Сибири>, краткая характеристика которого в обзоре также приводится.

Некоторые принципиальные результаты атмосферно-оптических исследований

Принципиальные результаты атмосферно-оптических исследований, полученные в последние десятилетия, в том числе и с участием автора, представляют интерес с двух точек зрения. Во-первых, многолетние исследования привели к получению новых знаний, состоящих в выявлении новых закономерностей взаимодействия оптического излучения с компонентами земной атмосферы или оптико-физических свойств последней. Во-вторых, в процессе проведения таких исследований, как правило, с помощью оригинальных методов и приборов и в полевых условиях, последние прошли через многолетний этап испытаний и модернизации до уровня, вполне удовлетворяющего получению однородных рядов наблюдений. Все эти новые научные результаты существенно повысили значение методов и достижений атмосферной оптики при решении современных проблем физики атмосферы.

1. Спектральная прозрачность атмосферы. Основными составляющими спектральной прозрачности атмосферы на горизонтальных и наклонных трассах является молекулярное поглощение атмосферными газами и аэрозольное ослабление. В условиях расширяющегося применения лазеров исследования первой из составляющих в последние десятилетия были сосредоточены преимущественно на проблемах спектроскопии высокого и сверхвысокого разрешения [10]. Использование лазеров для таких исследований обеспечили и новые научные знания и новые методы для практического контроля атмосферных газов. Примером завершённой в ИОА СО РАН разработки последних лет является трассовый лазерный газоанализатор для контроля загрязняющих атмосферных газов с помощью метода дифференциального поглощения. Активное научное руководство академиком В.Е. Зуева исследованиями по составляющей прозрачности атмосферы, связанной с молекулярным поглощением, определило получение отмеченных и многих других важных научных результатов по спектроскопии атмосферы. В то же время внимание автора было сосредоточено на исследованиях составляющей спектральной прозрачности, связанной с аэрозольным ослаблением.

Один из принципиальных результатов многолетних экспериментальных исследований прозрачности атмосферы связан со спектральной зависимостью коэффициентов аэрозольного ослабления в атмосферных дымках. Под атмосферными дымками при исследованиях понимались такие атмосферно-оптические ситуации в приземном слое, при которых метеорологическая дальность видимости $S_m = 3,9/k$, где k – коэффициент аэрозольного ослабления при $\lambda = 0,55$ мкм, превышает 1 км. Такие ситуации являются типичными в реальной атмосфере и охватывают более 90% времени в большинстве географических районов.

Типичный результат статистических измерений для континентальной атмосферной дымки показан на рис. 1. Высокая селективность коэффициентов аэрозольного ослабления $k(\lambda)$ в спектральной области 0,4–2 мкм и менее селективная зависимость от длины волны в области 2–12 мкм оказались характерными в прибрежной (Крым), аридной (Балхаш) и континентальной (Томск) атмосферных дымках. На этом же рисунке штриховыми линиями показана спектральная зависимость коэффициентов аэрозольного ослабления, рассчитанная по данным измерений сухой фракции аэрозольных частиц с радиусом от 0,3 до 4 мкм. Как видно из рисунка, данные оптических измерений (результаты измерений) и микрофизических (результаты расчета) хорошо согласуются в спектральном диапазоне 2–5 мкм. Заметное различие этих данных в коротковолновой (< 2 мкм) и в длинноволновой области (> 5 мкм) естественно объясняется неучетом при расчетах мелких (< 0,3 мкм) и крупных (> 4 мкм) частиц соответственно.

Из анализа статистических результатов оптических и микрофизических измерений следует, что спектральная прозрачность атмосферных дымок в коротковолновой области спектра (< 2 мкм) определяется преимущественно субмикронной фракцией аэрозоля, а в более длинноволновой области – грубодисперсной фракцией, которая существует достаточно независимо от субмикронной, имеет иной химический состав и иначе реагирует на изменения внешних условий. Таким образом, при анализе оптических свойств атмосферных дымок в широком спектральном интервале недостаточно выделить их типы по оптическим признакам только в видимой области спектра (например, по данным о метеорологической дальности видимости), так как природа аэрозольного ослабления, по крайней мере в длинноволновой инфракрасной области спектра, оказывается иной.

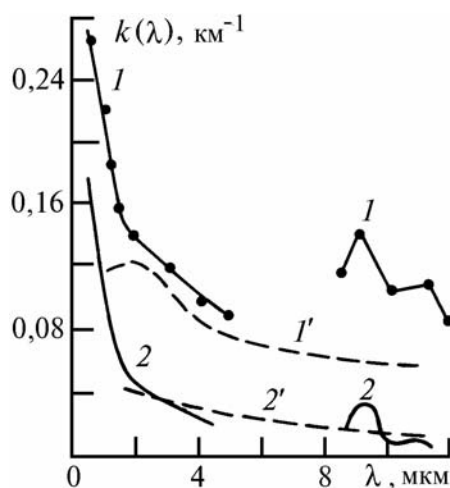


Рис. 1. Спектральная зависимость коэффициентов аэрозольного ослабления для атмосферной дымки: 1 и 2 – результаты измерений; 1' и 2' – результаты расчета

Другой важный результат экспериментальных исследований спектральной прозрачности атмосферного аэрозоля состоит в том, что в процессе многолетней модернизации методики и техники измерений на основе практического опыта были созданы уникальные многоволновые спектрофотометры для области 0,4 – 12 мкм. Описание одного из них, предназначенного для исследований спектральной прозрачности атмосферы на приземных горизонтальных трассах, содержится в [11]. Здесь лишь отметим, что этот автоматизированный спектрофотометр обеспечен специальным пакетом программ для обработки результатов измерений и выделения аэрозольной составляющей прозрачности атмосферных дымок. Для измерений аэрозольных толщ атмосферы по наклонным трассам в широкой спектральной области (0,4 – 12 мкм) разработан и испытан солнечный спектрофотометр. В состав фотометрического комплекса этого автоматизированного спектрофотометра кроме двух измерительных каналов входят автоматическая система слежения за Солнцем и телевизионная система контроля.

2. Флуктуации прозрачности атмосферы. Распространение оптических волн в земной атмосфере сопровождается не только в широких пределах изменяющимся энергетическим ослаблением, но и пространственно-временными флуктуациями ослабленного сигнала. Принципиальная неизбежность последних в замутненной атмосфере следует из того, что рассеяние оптического излучения статистическим ансамблем частиц всегда представляет собой статистический процесс. Но в земной атмосфере на параметры оптических волн существенное влияние оказывают и турбулентные неоднородности показателя преломления. Учитывая, что в турбулентной атмосфере энергетическое ослабление пренебрежимо мало, по общепринятой терминологии в этом случае говорят о флуктуациях интенсивности (или фазы) оптических волн. В реальной атмосфере аэрозольное ослабление и флуктуационные явления, связанные с турбулентными неоднородностями, сопровождают распространение оптических волн одновременно, обуславливая флуктуации регистрируемого оптического сигнала от удаленного источника излучения, и воспринимаются как флуктуации прозрачности атмосферы.

Многолетние экспериментальные исследования прозрачности атмосферы при различных типах замутнения показывают, что флуктуации прозрачности оказываются наиболее интен-

сивными при осадках. При этом спектры флуктуаций прозрачности до и во время осадков имеют столь характерные различия, что позволяют легко выделить более высокочастотную часть, обусловленную рассеянием только гидрометеорами (частицами осадков). Эти различия, впервые отмеченные в [12,13], были затем подробно исследованы с участием автора [14].

На рис. 2 приведена характерная деформация спектра флуктуаций $U(f)$ в зависимости от интенсивности осадков (при снегопаде). Как видно из рисунка, по мере увеличения интенсивности осадков формируется второй (гидрометеорный) максимум на частотах порядка килогерц. Одновременно уменьшается турбулентный максимум. При очень интенсивных осадках последний совсем исчезает, и спектр приобретает одновершинный вид. При смешанных осадках (дождь со снегом) наблюдаются трехвершинные спектры, что обусловлено появлением двух гидрометеорных максимумов, соответствующих двум типам осадков.

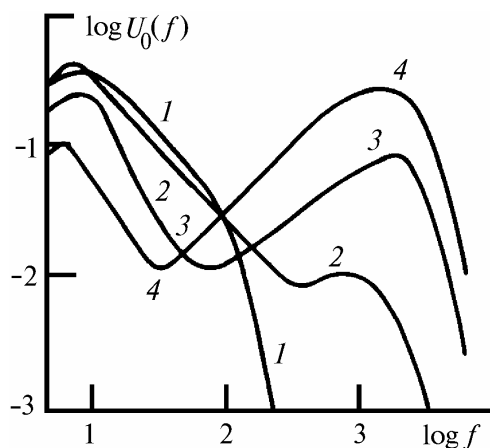


Рис. 2. Частотный спектр флуктуаций прозрачно-сти атмосферы при различных оптических толщах атмосферных осадков: кривая 1 – $\tau < 0,02$; 2 – $\tau = 0,02$; 3 – $0,05$; 4 – $0,2$

Анализ многих спектров показывает, что на описанную выше достаточно простую картину их изменений в реальной атмосфере накладывается действие многих факторов, в том числе условия эксперимента и более детальные характеристики осадков. Выбор подходящих условий и схемы эксперимента обеспечивает принципиальную возможность для решения обратной задачи: возможность по спектру флуктуаций прозрачности атмосферы определять интенсивность и микроструктурные характеристики гидрометеоров одновременно с характеристиками турбулентности атмосферы [15]. В Институте оптики атмосферы СО РАН в настоящее время создан и работает стационарный комплекс аппаратуры, обеспечивающий не только принципиальную, но и практическую возможность таких измерений. Этот результат многолетних экспериментальных исследований представляется важным для эффективного контроля атмосферных осадков при комплексном мониторинге окружающей среды.

3. Перенос оптического излучения в атмосфере. Как и при переносе других типов излучения в различных средах, закономерности затухания оптического излучения в атмосфере в полной мере описываются уравнением переноса излучения в обобщенном виде или для некоторых частных случаев в лучевом приближении [16,17]. Решение интегродифференциального уравнения переноса излучения для большинства практических случаев осуществляется численными методами [16,18]. Лишь при небольших оптических толщах уравнение переноса оптического излучения в атмосфере вырождается в формулу экспоненциального затухания (закон Бугера), а при очень больших оптических толщах в приближенную формулу экспоненциального затухания с параметрами <глубинного режима> [16,19,20].

Попытки автора решить задачу для промежуточных оптических толщ в рассеивающей атмосфере привели в 60-х гг. к получению аналитических формул в приближении однократного рассеяния и к определению границ применимости закона Бугера [16,19]. Для затухания яркости B от точечного источника излучения в однородной рассеивающей атмосфере была получена формула в виде

$$B = B_0 e^{-\tau(1 + \Lambda\tau D)}, \quad (1)$$

$\tau = kL$ – оптическая толщина атмосферы, k – коэффициент полного ослабления, L – длина трассы между источником и приемником излучения; Λ – вероятность выживания кванта (альbedo однократного рассеяния). Величина параметра D в (1) зависит от рассеивающих свойств среды и определяется формулой:

$$D = \frac{1}{2} \int_0^{\Psi} \int_0^{\Theta} f(\psi + \theta, \rho) d\psi d\theta, \quad (2)$$

где Ψ и Θ – угол зрения приемника и угол конуса излучения точечного источника соответственно; ψ и θ – текущие переменные; $f(\psi + \theta, \rho)$ – индикатриса рассеяния (нормированная функция рассеяния); параметр $\rho = 2\pi a/\lambda$, a – радиус рассеивателей, λ – длина волны.

Специальные экспериментальные исследования в искусственных туманах и дымах показали, что границы применимости формулы (1) по оптическим толщам существенно больше таковых для закона Бугера и достигают значения $\tau = 9$. Столь широкие границы применимости (1) имеют принципиальное значение для практики оптических измерений в замутненной атмосфере. В научном отношении совокупность формул типа (1), (2) и других, полученных в том же приближении [16,19], представляют собой по существу основу теории оптических измерений в рассеивающих средах.

Другой принципиальный результат получен при экспериментальных исследованиях по распространению лазерных пучков в рассеивающих средах [19]. При этих исследованиях обнаружилось, что яркость лазерного источника излучения (яркость прямого излучения) с ослаблением по закону Бугера остается выше яркости фона многократно рассеянного излучения до неожиданно больших оптических толщ. На рис. 3 показаны результаты измерений при использовании узкого пучка от гелий-неонового лазера ($\lambda = 0,63$ мкм, диаметр пучка 8 мм, угловое расхождение 6 мин). Прямые 1 и 2 в полулогарифмическом масштабе рисунка соответствуют экспоненциальному ослаблению по закону Бугера прямого лазерного и фонового излучения от лазера. Кривые 3 и 4 являются результатами измерений фонового и рассеянного вперед излучения для туманов парения и древесных дымов соответственно. Как видно из рисунка, ослабление интенсивности лазерного пучка совпадает с экспоненциальным законом затухания, а интенсивность рассеянного вперед излучения на глубине $\tau = 22$ и далее практически не уменьшается. Последующие более детальные исследования показали, что обнаруженный эффект является результатом малости освещаемого рассеивающего объема, в котором формируется фон многократно рассеянного излучения, определяющего границы применимости закона Бугера.

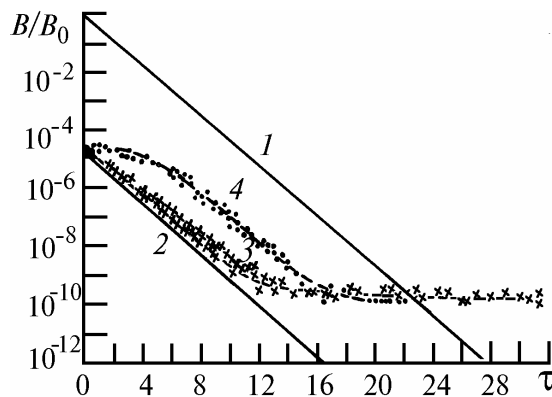


Рис. 3. Затухание яркостей прямого и рассеянного лазерного излучения в искусственном тумане: 1 – яркость прямого излучения; 2 – фона; 3 – многократно рассеянного излучения; 4 – однократно рассеянного излучения

В практическом отношении обнаруженный эффект означает, что яркостный контраст лазерного источника излучения сохраняется на аномально больших оптических глубинах и, следовательно, применение таких источников имеет преимущество по сравнению с тепловыми при наблюдении в сложных метеорологических условиях. Испытания в натуральных условиях лазерных навигационных устройств, разработанных в Объединенном институте оптики атмосферы

сферы СО РАН под научным руководством академика В.Е. Зуева, подтвердили их эффективность при использовании в условиях ограниченной видимости как для проводки морских судов, так и для посадки самолетов [21].

4. Перенос оптического изображения в атмосфере. Рассеяние оптических волн аэрозолем и турбулентными неоднородностями в атмосфере вызывает не только энергетическое ослабление, описываемое в общем случае уравнениями переноса излучения, а также временные флуктуации прозрачности атмосферы. Одновременная регистрация яркости прямого и рассеянного вперед излучения вызывает также снижение яркостного контраста наблюдаемого объекта. Сильная угловая зависимость интенсивности рассеянного вперед излучения в реальной атмосфере обуславливает существенную зависимость искаженного атмосферой контраста от размеров объекта или его деталей. Описание переноса наблюдаемого яркостного контраста (переноса оптического изображения) через атмосферу как процесса модуляции оптических сигналов по пространственным частотам получило в последние десятилетия достаточно широкое распространение.

Основной научный результат, полученный с участием автора, по проблеме оптического видения через атмосферу состоит в том, что для количественного описания в приближении однократного рассеяния удалось получить уравнения переноса оптического изображения в дисперсных средах и формулу для оптической передаточной функции [19].

Особый интерес для решения научных и практических задач оптического видения через замутненную атмосферу представляет так называемый *t*-эффект, проявляющийся при наблюдении через тонкий рассеивающий слой. Впервые экспериментальные исследования по влиянию положения тонкого рассеивающего слоя на яркостный контраст самосветящейся полуплоскости (с широким спектром пространственных частот) были выполнены с участием автора (1972 г.). Эти исследования показали, что при некотором промежуточном положении рассеивающего слоя между приемником и объектом наблюдается минимальный контраст. Обычно положение рассеивающего слоя характеризуют отношением $t = l/L$, где l – расстояние до приемника; L – расстояние между приемником и наблюдаемым объектом. Поэтому экстремальная зависимость регистрируемого контраста от положения слоя получила название *t*-эффекта, наглядная иллюстрация которого представлена на рис. 4. Правая и левая фотографии на этом рисунке соответствуют крайним положениям рассеивающего слоя, а средняя фотография – положению слоя при минимальном контрасте.

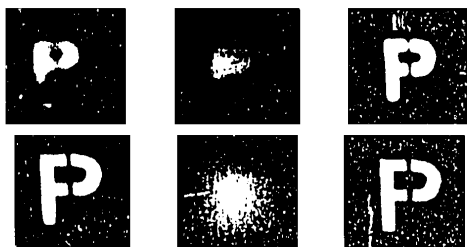


Рис. 4. Пример регистрации качества оптического изображения, наблюдаемого через рассеивающий слой: верхний ряд – молочная среда; нижний – матовое стекло

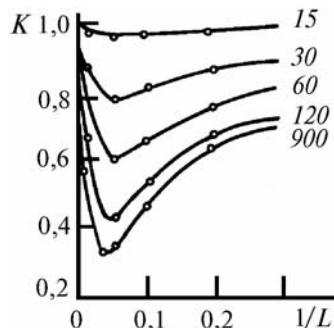


Рис. 5. Расчетная зависимость ОПФ от пространственной частоты при различных положениях рассеивающего слоя

Последующие более подробные численные эксперименты с участием автора, а также исследования других авторов позволили построить более полную картину *t*-эффекта. На рис. 5

приведены результаты расчета оптической передаточной функции рассеивающего слоя K для различных пространственных частот в рад^{-1} (указаны у кривых). Из результатов расчета, подобных приведенным на рис. 5, следует, что в постоянно и существенно неоднородной атмосфере учет t -эффекта необходим и при наземных, и при аэрокосмических наблюдениях [22].

5. Аэрозольное рассеяние в атмосфере. Помимо уже рассмотренных выше оптических эффектов, к которым приводит аэрозольное рассеяние в атмосфере, имеются и ряд других. К наиболее значительным из них следует отнести ореольное, обратное и боковое рассеяние, а также поляризационные эффекты при рассеянии атмосферным аэрозолем. Все оптические эффекты, вызванные аэрозольным рассеянием, ограничивают эффективность применения оптико-электронных систем при работе через атмосферу, обуславливая атмосферные оптические помехи [14]. Но путем решения обратных задач эти оптические эффекты могут быть использованы и в настоящее время широко используются для диагностики физического состояния атмосферы. Многие результаты исследований в этом направлении, выполненные в последние десятилетия под научным руководством академика В.Е. Зуева, стали решающими как для физических основ дистанционного оптического зондирования атмосферы, так и для практической реализации систем лазерного зондирования [23]. Отметим здесь только те из результатов исследований, которые были получены с участием автора [14].

К числу наиболее значимых относятся результаты исследований для границ применимости уравнений оптической локации при различных типах замутнений. В качестве примера на рис. 6 приведены результаты измерений и расчета зависимости яркости рассеянного назад излучения B от коэффициента рассеяния k_p при фиксированных параметрах локационной системы (кривая 1 – результат расчета по формулам однократного рассеяния, кривая 2 – с учетом двукратного рассеяния из объема перекрывания). Только кривая 3 для яркости двукратного рассеяния из ближнего объема, как видно из рисунка, хорошо описывает экспериментальные данные при $k_p > 0,3$ м. Экспериментальные точки на рисунке получены в туманах парения для локационной схемы с расстоянием до объема перекрывания в 7 м. Из сравнения расчетных и экспериментальных данных в приведенном случае следуют границы применимости для формул однократно ($\tau < 1,5$) и двукратно ($\tau < 4,5$) рассеянного назад излучения при оптической локации внутри тумана или облака.

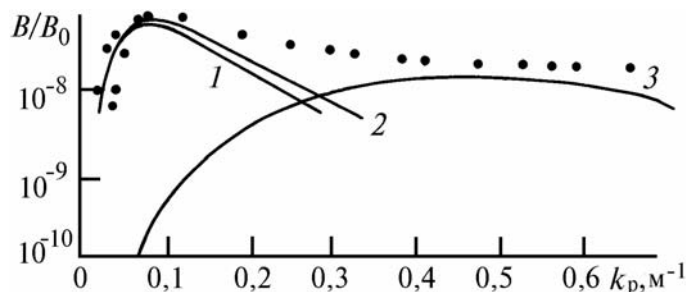


Рис. 6. Зависимость расчетных и измеренных яркостей обратнорассеянного излучения от коэффициентов рассеяния: кривая 1 – расчет по формулам однократного рассеяния; 2 – расчет с учетом двукратно рассеянного излучения из объема перекрывания; 3 – расчет с учетом двукратно рассеянного излучения из ближнего объема; точки – экспериментальные данные

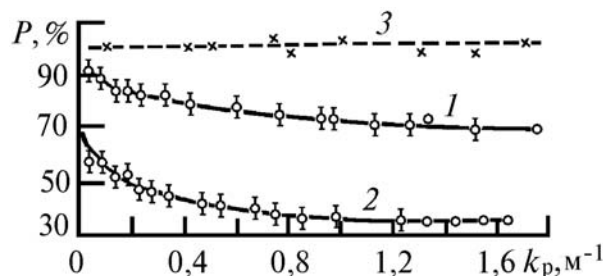


Рис. 7. Зависимость степени поляризации рассеянного назад излучения в туманах от коэффициента рассеяния: кривая 1 – для суммарного рассеянного назад излучения; 2 – для многократно рассеянного назад излучения; 3 – для однократно рассеянного назад излучения

Результаты экспериментальных исследований для зависимости степени поляризации рассеянного назад излучения P от коэффициента рассеяния k_p приведены на рис. 7. Кривые 1 и 2 – результаты измерения степени поляризации для суммарного потока и для многократно рассеянного излучения (без однократного). Штриховая прямая 3 – степень поляризации, ожидаемая при однократном рассеянии для однородных сферических частиц, а крестики около этой прямой – результат обработки экспериментальных данных. Как видно из рисунка, причиной уменьшения степени поляризации при обратном рассеянии с увеличением плотности среды является возрастающая роль эффектов многократного рассеяния, которая оказывается заметной уже для оптически тонких слоев рассеивающей среды ($\tau = 0,1 - 0,2$).

В целом результаты приведенных и других экспериментальных исследований аэрозольного рассеяния в моделируемых и натуральных условиях заложили физические основы для успешной разработки новых методов и технических средств оптического зондирования атмосферы. К числу последних относятся ореольные фотометры, нефелометры и аэрозольные лидары, последующая научно-инженерная доработка которых обеспечила создание целого комплекса измерительных средств для контроля рассеивающей атмосферы в экспедиционном и мониторинговом режиме.

6. Оптическая рефракция в атмосфере. Многовековые исследования по оптической рефракции в земной атмосфере получили в последнее десятилетие очередной импульс для оживления под влиянием новых достижений по атмосферным наукам, а также новых практических задач, связанных с расширяющимся использованием оптико-электронных приборов различного назначения. Полученные при этом научные результаты имеют принципиальное значение, так как по-новому учитывают связь угловых отклонений лучей (углов рефракции) и физического состояния атмосферы.

На горизонтальных трассах в приземном (приводном) слое атмосферы было выявлено, что значительное влияние на отклонение оптических лучей оказывает турбулентный режим в нижних слоях атмосферы [24,25]. Учет этого влияния было предложено осуществлять следующим образом. Используя понятия масштабов температуры T^* и длины L^* , распределение температуры воздуха по высоте $T(z)$ можно описать, согласно теории атмосферной турбулентности, следующей зависимостью от некоторой универсальной функции $\Phi(z/L^*)$:

$$\frac{dT}{dz} = \Phi\left(\frac{z}{L^*}\right) \cdot \frac{T^*}{z}, \quad (3)$$

где z – высота над земной поверхностью. Функция $\Phi(z/L^*)$ имеет вполне определенный вид для каждого из трех основных типов стратификации пограничного слоя (устойчивого при $z/L^* > 0$, неустойчивого при $z/L^* < 0$ и безразличного при $z/L^* \simeq 0$). Величина вертикального градиента температуры по (3) для любой высоты луча над земной поверхностью в отличие от измеренной в одной точке трассы является характерной для достаточно протяженных трасс. Поэтому разработанные алгоритмы расчета углов оптической рефракции, с учетом стратификации атмосферы, оказываются более корректными для однородных по профилю трасс и незаменимыми для неоднородных.

Разработанный с участием автора подход к оценке углов рефракции на горизонтальных трассах с учетом стратификации атмосферы дает обоснованную физическую интерпретацию давно наблюдавшейся зависимости оптической рефракции от турбулентного состояния атмосферы. Полученные на основании этого подхода подробные формулы подтверждены экспериментальными исследованиями на приземных и приводных трассах [24]. Таким образом, на основании новых знаний по физике атмосферы не только сформирован новый подход к решению прямой задачи, но и открыты возможности для решения таких обратных задач, как определение температурного и турбулентного режима в атмосфере по результатам измерения углов оптической рефракции.

На наклонных трассах проблема оценки углов рефракции является более сложной из-за технических трудностей определения физических параметров атмосферы. Классический подход решения проблемы основан на использовании глобальных моделей атмосферы либо по физическим параметрам, либо непосредственно по углам рефракции [26]. Разработанные и получившие широкое применение в последние десятилетия новые методы и средства аэрологического (шар-зондового) зондирования атмосферы обеспечили качественно новый подход к

решению проблем оптической рефракции. При оптических наблюдениях аэрологическое зондирование атмосферы обеспечивает максимально точную оценку углов рефракции в конкретном месте. При их отсутствии обработка многолетних данных аэрологического зондирования обеспечивает получение более обоснованных рефракционных моделей атмосферы. В последнем случае вопрос о точности оценки углов рефракции сводится к оценке пространственных масштабов, в пределах которых та или иная статистическая модель атмосферы оказывается обоснованной. Решению именно этого вопроса были посвящены исследования с участием автора [27].

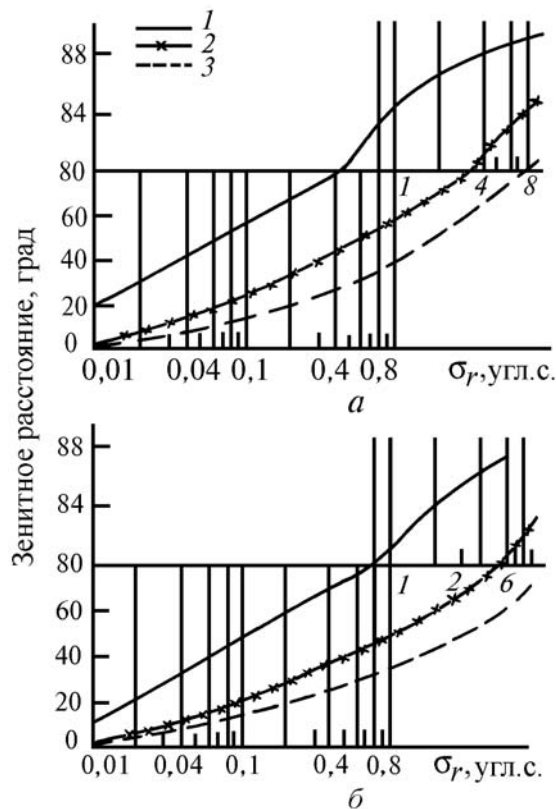


Рис. 8. Средняя квадратическая ошибка σ_r при оценке углов оптической рефракции различными методами: кривая 1 – по данным аэрологического зондирования; 2 – по данным региональной модели атмосферы; 3 – стандартной модели атмосферы; а – лето, б – зима

Результаты исследований показали [27], что существует промежуточный вариант по точности между расчетом углов рефракции по непосредственно измеренным данным аэрологического зондирования (кривая 1 на рис. 8) и по статистическим (стандартным для планеты) моделям атмосферы (кривая 3 на рис. 8). Таким промежуточным вариантом являются региональные модели атмосферы (кривая 2 на рис. 8), построенные на основании многолетних данных аэрологического зондирования в отдельном регионе. Пространственный радиус действия региональной модели атмосферы составляет несколько сот километров для исследованных регионов. При учете этого обстоятельства по-новому формулируются требования к информации о средних и предельно возможных значениях углов рефракции в земной атмосфере для любых климатических зон и метеорологических условий. Одна из первых попыток в этом направлении при расчете таблиц по углам полной и астрономической рефракции была осуществлена в коллективной монографии [28]. Использование же результатов исследований по оптической рефракции на наклонных трассах для решения обратных задач находится пока лишь на этапе методических исследований. Исключение составляют работы по восстановлению профилей температуры в верхних слоях атмосферы на основании рефракционных искажений диска Солнца, наблюдаемых с космических аппаратов [29].

Мониторинг физического состояния атмосферы

Совокупность принципиальных результатов атмосферно-оптических исследований коренным образом изменяет на исходе 20-го столетия не только арсенал методов и технических средств, но и методологическую концепцию по мониторингу физического состояния атмосферы. При формировании последней уточняется роль пространственных масштабов мониторинга (глобального, регионального или локального), учитывается взаимосвязь климатообразующих и экологических факторов в земной атмосфере, принимается во внимание взаимодействие физических, химических и биологических процессов в ней.

Новая концепция комплексного мониторинга земной атмосферы в полной мере соответствует современным требованиям, вытекающим из основных направлений технологического развития в рамках общей проблемы устойчивого развития на планете [8], и является основой для формирования многих международных и национальных программ. Эта новая концепция была положена и в основу проекта <Климато-экологический мониторинг Сибири> (КЭМС), сформированного в 1993 г. под научным руководством автора [30].

Главная цель проекта КЭМС состоит в том, чтобы на основе систематического и комплексного контроля физико-химического состояния воздушного бассейна Сибири выявить долговременные климато-экологические изменения в регионе (научные задачи проекта) и дать своевременный прогноз по влиянию этих изменений для долгосрочной программы социально-экономического развития Сибири (практические задачи проекта).

Научно-методическое содержание проекта КЭМС определяется 12-ю целевыми объектами мониторинга, совокупность которых, на наш взгляд, в полной мере характеризует физическое состояние земной атмосферы и позволяет выявить долговременные климато-экологические изменения. При этом под влиянием таких изменений понимается не просто регистрация, а и их однозначная интерпретация, необходимая для последующего научно-обоснованного прогноза значимых тенденций. Для иллюстрации сказанного приведем несколько конкретных результатов, полученных при реализации проекта КЭМС.

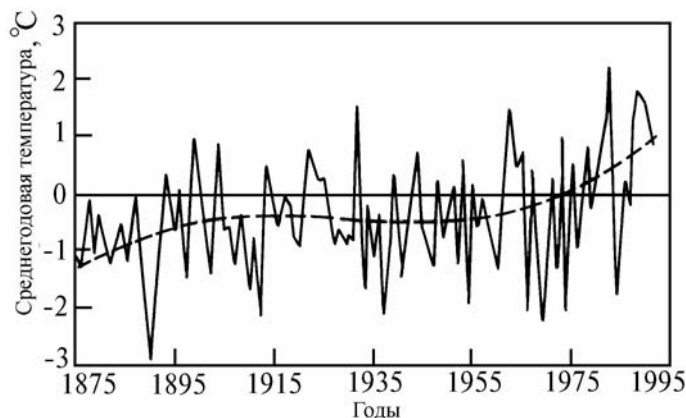


Рис. 9. Среднегодовая температура (г. Томск)

На рис. 9 представлены среднегодовые температуры воздуха по данным метеостанции в г. Томске за период с 1875 по 1993 г. [31]. Штриховая кривая на этом рисунке — усредненная методом наименьших квадратов. Как видно из рисунка, тенденция повышения среднегодовой температуры в конце прошлого века сменяется отсутствием роста. С 60-х гг. этого столетия среднегодовая температура снова растет и в 70-х гг. переходит границу нулевой температуры (по Цельсию). В целом за обследованный период среднегодовая температура изменилась более чем на 2°C. Механизм столь существенного изменения среднегодовой температуры следует из рис. 10, на котором приводятся тренды среднемесячных дневных температур по данным трех метеостанций Томской области (Томск, Колпашево, Александровское) за последние 40 лет. Для всех метеостанций, как видно из рисунка, температурные тренды близки к нулю для летних месяцев и достигают более 8°C/100 лет в зимний период. Таким образом, потепление за 120 лет в Томской области связано с зимними сезонами без заметного изменения температурного режима в летние. Причину установленного факта еще предстоит выяснить в процессе осуществления климато-экологического мониторинга.

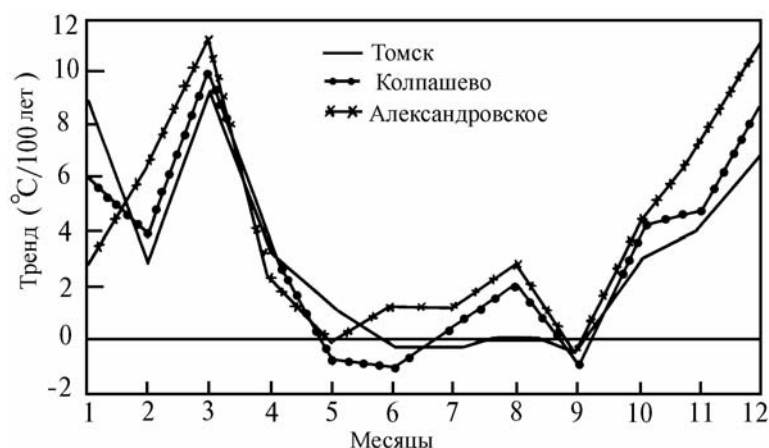


Рис. 10. Тренд среднемесячной температуры в °C/100 лет в Томской области за 40 лет

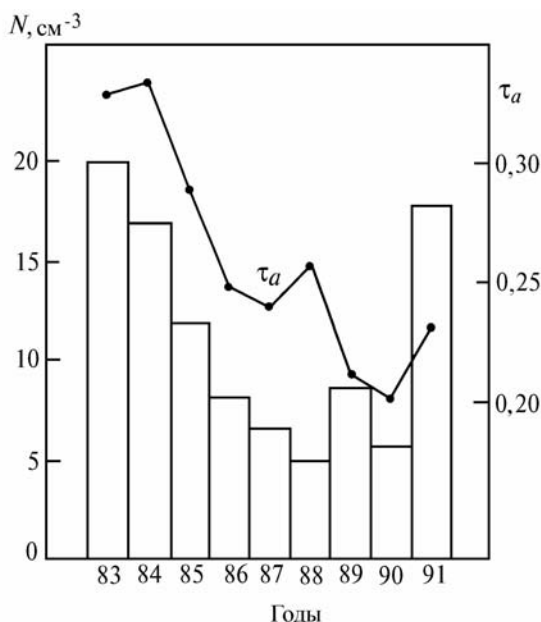


Рис. 11. Годовой ход счетной концентрации аэрозольных частиц над Западной Сибирью

Другой интересный результат получен для годовой изменчивости содержания атмосферного аэрозоля. На рис. 11 представлена счетная концентрация аэрозоля в нижнем трехкилометровом слое атмосферы по результатам самолетных измерений [32]. Из рисунка видно, что содержание атмосферного аэрозоля над Западной Сибирью в тропосфере существенно меняется от года к году. Уменьшение концентрации аэрозоля в 80-х гг. сменилось к началу 90-х гг. ростом концентрации, пока не превышающей ее значений в первые годы наблюдений. Для сравнения на рис. 11 приведена кривая изменения оптической толщи атмосферного аэрозоля над Москвой. Заметный максимум концентрации аэрозоля на кривой в 1988 г. совпадает с годом повышенной задымленности Москвы из-за подмосковных пожаров. Лесными пожарами можно объяснить и максимум счетной концентрации аэрозоля в 1989 г. в Западной Сибири. Возможное влияние годовой изменчивости содержания атмосферного аэрозоля на температурный режим региона в настоящее время уточняется более детальной статистической обработкой данных.

Неожиданный результат получен при исследованиях потоков радио-волнового излучения [33] с помощью специального радиотехнического комплекса, изготовленного для измерения потоков радиоволнового излучения в широком спектральном диапазоне. Этот радиотехнический комплекс обеспечивает также выделение низкочастотной огибающей на всех высокочас-

тотных каналах, включая радиовещательные. На рис. 12 приведена запись сигнала для такой низкочастотной огибающей в одном из радиовещательных каналов КВ-диапазона. Неожиданным оказалось наличие систематически регистрируемого сигнала в той области нескольких десятков герц, в которой наблюдаются биосигналы от человека и ведутся исследования по электромагнитной безопасности (на информационном уровне).

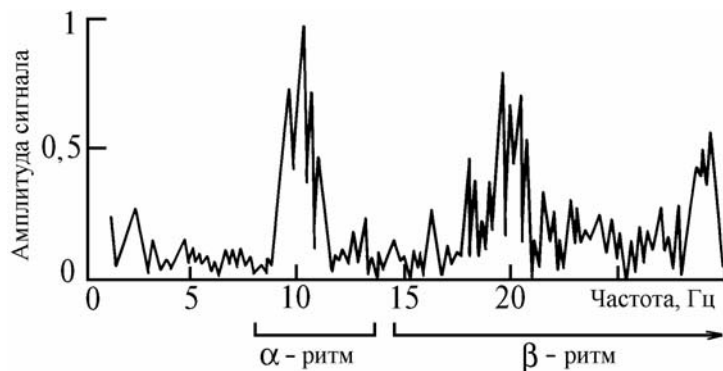


Рис. 12. Пример регистрации низкочастотного сигнала радиотехническим комплексом (18.11.93 г., местное время 15.00)

Приведенные выше и ряд других конкретных результатов, полученных на начальном этапе климато-экологического мониторинга, показывают научно-практическое значение проекта КЭМС. Предусматривается продолжение начатых в 1993 году организационных и научно-исследовательских работ по следующим разделам:

- создание сети климато-экологического мониторинга Сибири, включающей в свой состав комплекс наблюдательных станций и постов в городских (индустриальных) и внегородских (фоновых) условиях;
- измерение ключевых параметров атмосферы и информационно-аналитические исследования основных атмосферных процессов и явлений, а также анализ и интерпретацию долгосрочных региональных изменений физического состояния атмосферы;
- организация работ по международному сотрудничеству, включая интеркалибровку измерительных средств и аттестацию сети климато-экологического мониторинга как региональной в международной сети глобального мониторинга;
- организация ежегодных Сибирских совещаний по результатам климато-экологического мониторинга Сибири и выпуск ежегодных информационных бюллетеней.

Заключение

В настоящем обзоре обсуждены лишь отдельные итоги деятельности Объединенного ИОА в области атмосферной оптики и перспективы их использования. Безусловно, такие <внутренние> проблемы атмосферной оптики, как взаимодействие оптических волн с различными компонентами атмосферы, оптические свойства атмосферы, атмосферно-оптические явления и другие, были и остаются фундаментальными проблемами этого раздела науки. Но в настоящее время требует к себе внимания и ряд новых актуальных проблем атмосферной оптики, которые можно рассматривать как <внешние>.

Из предыдущих разделов обзора следует, что многие принципиальные результаты атмосферно-оптических исследований имеют широкие и надежные перспективы для успешного использования при комплексном мониторинге физического состояния атмосферы. При этом достижения атмосферной оптики за последние десятилетия существенно расширяют перечень объектов такого мониторинга. С методической точки зрения это означает, что мониторинг физического состояния земной атмосферы становится в настоящее время одной из актуальных проблем атмосферной оптики.

Из числа объектов климато-экологического мониторинга, обсужденного выше, следует особо выделить объект под названием <Физическое состояние подстилающей поверхности>. В контексте регионального мониторинга (воздушного бассейна Сибири) под объектом имеется в виду земная поверхность с различным покрытием (почвогрунты, растительность, снежный покров и т.п.). В контексте же глобального мониторинга к этому объекту относится так-

же морская поверхность. Новые методы и технические средства атмосферной оптики обеспечивают принципиальную и инструментальную возможность эффективных исследований морских поверхностей, а также взаимодействия атмосферы и океана. Проблема такого взаимодействия имеет важное значение при исследованиях глобальных изменений окружающей среды и становится новой актуальной проблемой атмосферной оптики.

Завершая ретроспективный обзор результатов своих исследований и фрагментарную постановку новых актуальных проблем атмосферной оптики, считаю своим приятным долгом выразить благодарность академику В.Е. Зуеву за его направляющую роль в моей научной деятельности на протяжении всех прошедших десятилетий и в настоящее время.

1. Кондратьев К. Я. Перенос длинноволнового излучения в атмосфере. М.-Л.: Гостехтеоретиздат, 1950. 287 с.
2. Кондратьев К. Я. Лучистый теплообмен в атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1956. 460 с.
3. Mie G. // J. Annal. Physik. 1908. V. 25. P. 377.
4. Stratton J. A., Houghton H. G. A theoretical investigation of the transmission of light through fog. Phys. Rev. 1931. 38. 159 – 165.
5. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами. / М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1961. 536 с.
6. Шифрин К. С. Рассеяние света в мутных средах. М.: Гостехтеоретиздат, 1951, 288 с.
7. Современные проблемы атмосферной оптики. / Под ред. В.Е. Зуева. Л.: Гидрометеиздат, 1986 – 1994. Т. 1 – 9.
8. Коптюг В. А. Информационный обзор: Конференция ООН по окружающей среде и развитию (Рио-де-Жанейро, июнь 1992 г.). СО РАН, Новосибирск, 1992. 62 с.
9. Современные проблемы атмосферной оптики. Т. 8. / Зуев В.Е., Зуев В.В. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. С-Пб, Гидрометеиздат, 1992. 232 с.
10. Современные проблемы атмосферной оптики. Т. 3. / Зуев В.Е., Макушкин Ю.С., Пономарев Ю.Н. Спектроскопия атмосферы, Л.: Гидрометеиздат, 1987. 247 с.
11. Пхалагов Ю. А., Ужegov В. Н., Щелканов Н. Н. Автоматизированный многоволновый измеритель спектральной прозрачности приземной атмосферы. Изв. РАН Сер. ФАиО. Т. 5. N 6. 1992. С. 667 – 671.
12. Кабанов М. В., Пхалагов Ю. А., Гологузов В. Е. // Изв. АН СССР. Сер. ФАиО, 1971. Т. 7. N 7. С. 804 – 807.
13. Гурвич А. С., Покасов В. В. // Изв. АН СССР. Сер. ФАиО, 1972. Т. 8. N 8. С. 878 – 879.
14. Кабанов М. В. Атмосферные оптические помехи. Томск: Изд-во ТГУ, 1991. 206 с.
15. Жуков А. Ф., Цвык Р. Ш., Вострецов Н. А. Лазерные методы измерения характеристик атмосферы при выпадении осадков. (Изв. РАН. Сер. ФАиО. В печати).
16. Зуев В. Е., Кабанов М. В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех). М.: Сов. радио, 1977. 368 с.
17. Барабенков Ю. Н., Кравцов Ю. А., Рытов С. М., Татарский В. И. // УФН. 1970. Т. 102. N 1. С. 3 – 42.
18. Марчук Г. И., Михайлов Г. А., Назаралиев М. А. и др. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука, 1976. 283 с.
19. Современные проблемы атмосферной оптики. Т. 4 / В.Е. Зуев, М.В. Кабанов. Оптика атмосферного аэрозоля. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 254 с.
20. Розенберг Г. В. Световой режим в глубине среды с рэлеевским рассеянием. Оптика и спектроскопия. 1969. Т. 7. Вып. 3. С. 407 – 425.
21. Зуев В. Е., Фадеев В. Я. Лазерные навигационные устройства. М.: Радио и связь, 1987. 160 с.
22. Белов В. В., Макушкина И. Ю. Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 8. С. 860 – 869.
23. Зуев В. В., Зуев В. Е. Лазерный экологический мониторинг газовых компонентов атмосферы. Итоги науки и техники. М.: ВИНТИ. 1992. Т. 20. С. 186.
24. Алексеев А. В., Кабанов М. В., Куштин И. Ф. Оптическая рефракция в земной атмосфере (горизонтальные трассы). Новосибирск: Наука, 1982. 159 с.
25. Голицын Г. С. Рефракция в приземном слое атмосферы. // Изв. АН СССР. Сер. ФАиО. 1982. Т. 18. N 12. С. 1282 – 1288.
26. Куштин И. Ф. Рефракция световых лучей в атмосфере. М.: Недра, 1971. 128 с.
27. Оптическая рефракция в земной атмосфере (наклонные трассы). / А.В. Алексеев, М.В. Кабанов, И.Ф. Куштин, Н.Ф. Нелюбин. Новосибирск: Наука, 1983. 230 с.
28. Оптическая рефракция в земной атмосфере. Рефракционные модели атмосферы. / А.В. Алексеев, Д.М. Дробязко, М.В. Кабанов, И.Ф. Куштин. Новосибирск: Наука, 1987. 104 с.
29. Гречко Г. М., Гурвич А. С., Киселева В. А. и др. Оптические явления при восходе и заходе Солнца в космосе. Л.: Труды ГОИ. 1989. Т. 71. Вып. 205. 120 с.
30. Кабанов М. В. Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 2. С. 146 – 162.
31. Заде Г. О., Кусков О. А. Кафедра метеорологии и климатологии Томского государственного университета. Частное сообщение. 1993 г.
32. Белан Б. Д., Панченко М. В. Отделение атмосферно-экологических исследований Института оптики атмосферы СО РАН. Частное сообщение. 1994 г.
33. Колесник А. Г., Белов В. А. Отдел геофизики и экологии Сибирского физико-технического института при Томском государственном университете. Частное сообщение. 1994 г.

M. V. Kabanov. Advances in Atmospheric Optics and Monitoring of the Atmosphere Physical State.

A retrospective review of investigation results on atmospheric optics including spectral transmittance of the atmosphere; regularities of optical radiation and image transfer in scattering media; and optical refraction in the Earth atmosphere is presented in the paper. Progress in methods and instrumentation of optical experiment, as well as prospects of their application to integrated climato-ecological monitoring are discussed. The results are presented of the processing of regular series of observations of some climato-ecological atmospheric parameters.