

М.В. Кабанов

КОМПЛЕКСНЫЙ МОНИТОРИНГ ФИЗИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРЫ СТАЦИОНАРНЫМИ НАЗЕМНЫМИ СРЕДСТВАМИ

Представлен обзор методов и целевых программ исследования земной атмосферы, реализуемых в Институте оптики атмосферы СО РАН совместно с другими институтами сибирского региона.

Земная атмосфера представляет собой сложный физический объект, состояние которого определяется многими явлениями, а также взаимодействующими и воздействующими факторами и процессами в атмосфере. Многокомпонентный состав атмосферы и многопараметрический характер атмосферно-физических процессов и явлений определяют как чрезвычайно широкий диапазон реальных состояний земной атмосферы, так и высокую пространственно-временную изменчивость этих состояний.

Многовековые исследования земной атмосферы особенно интенсивный путь прошли в последние десятилетия. Существенные результаты достигнуты в области разработки комплекса принципиально новых, современных методов для таких исследований [1]. Принципиальное значение имеют методологические обоснования и реализация замкнутых атмосферных экспериментов типа полного радиационного эксперимента [2] и комплексных аэрозольных исследований [3]. С учетом именно этих и других мировых достижений, обеспечивающих высокий стартовый уровень, в Институте оптики атмосферы осуществляются в настоящее время исследования земной атмосферы в форме комплексных физических и численных экспериментов, комплексных экспедиционно-натурных экспериментов и, наконец, в форме осуществления стационарного комплексного мониторинга атмосферы.

Задача настоящего обзора – краткое описание комплексного мониторинга атмосферы, осуществляемого преимущественно стационарными наземными средствами и выполняемого ИОА СО РАН совместно с другими научно-исследовательскими институтами. Базовыми площадками для стационарных наблюдений при этом являются Базовый полигон в г. Томске (в Академгородке), Южный полигон (в 25 км к югу от города) и Западный полигон (в 50 км к западу от города, на берегу реки Обь).

По своему содержанию осуществляемый в настоящее время комплексный мониторинг физического состояния атмосферы стационарными наземными средствами включает следующие целевые программы:

1. Мониторинг озона и компонентов озонного цикла.
2. Мониторинг атмосферного оптически эффективного аэрозоля.
3. Мониторинг потоков атмосферной радиации в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах длин волн.
4. Мониторинг атмосферного электромагнетизма, включающего электромагнитные поля в СВЧ-, КВ-, СВ-, ДВ- и ОДВ-диапазонах, а также атмосферное электричество и вариации геомагнитного поля.

Все целевые программы, приведенные на рис. 1 по объектам мониторинга, сформулированы по принципу замкнутого эксперимента и, следовательно, предполагают одновременный контроль нескольких компонентов атмосферы.

Целевая программа по атмосферному электромагнетизму, осуществляемая СФТИ при Томском госуниверситете совместно с Институтом оптики атмосферы, является в определенном смысле расширением программы по атмосферной радиации, но имеет и собственное продолжение в части одновременного контроля геофизических, биофизических и меди-

кобиологических событий. Изложение проблемно-целевой концепции, методов и результатов по этой программе содержится в отдельной публикации [4].

Выполнение перечисленных выше целевых программ нуждается в учете, наряду с указанными на рис. 1 компонентами атмосферы, некоторых дополнительных внешних по отношению к атмосфере факторов, которые можно рассматривать компонентами окружающей среды.



Рис. 1

Первая группа этих компонентов названа «факторами существенного взаимодействия», включающими: взаимодействие 1) атмосферы и океана; 2) атмосферы и суши; 3) атмосферы и ближнего космоса.

Вторая группа компонентов окружающей среды объединена под названием «факторы существенного воздействия» и включает в себя:

- 1) космофизические воздействия, в том числе солнечно-земные связи;
- 2) макрофизические воздействия, включая метеорные потоки, вулканические и индустриальные выбросы, взрывы, пыльные бури и другие;
- 3) прямые и косвенные геохимические и геобиофизические воздействия;
- 4) гравитационные эффекты.

Целевая программа исследований озона и озонного цикла, как будет видно из отдельного обзора на эту тему, выполняется в ИОА по принципу замкнутого эксперимента. Это означает, что наряду с дистанционным зондированием непосредственно озона осуществляются одновременные наблюдения и исследования ряда других, участвующих в озонном цикле атмосферных газов, а также еще четырех компонентов атмосферы согласно схеме на рис. 1.

При этом синхронные исследования ряда сопутствующих компонентов представляют и самостоятельный интерес. Так, натурные наблюдения потоков оптического излучения в ультрафиолетовой области спектра имеют самостоятельное экологическое значение, особенно в области так называемой биологически эффективной ультрафиолетовой радиации (290–330 нм). Как известно [5], более коротковолновая область оказывает уничтожающее воздействие на живые организмы, а более длинноволновая имеет большую курортологическую ценность (для загара).

Соотношение между тремя областями ультрафиолетовой радиации в целом определяет параметр, характеризующий для работающих условия ультрафиолетовой безопасности, а для отдыхающих условия наиболее подходящего курортного места и сезона. Этот параметр относится к числу пока еще слабо учитываемых в медицинской практике и зависит не только от содержания озона в атмосфере, но и от содержания атмосферного аэрозоля. На рис. 2 по результатам численного моделирования [6] показана зависимость коротковолновой границы солнечной УФ-радиации на поверхности Земли от аэрозольных моделей со слабой (кривая 1, $S_M = 50$ км), средней (кривая 2, $S_M = 10$ км) и повышенной (кривая 3, $S_M = 2$ км) замутненностью тропосферы. Римские цифры у кривых соответствуют различным моделям содержания озона. Как видно из рисунка, зависимость границы от содержания аэрозоля оказывается заметной.

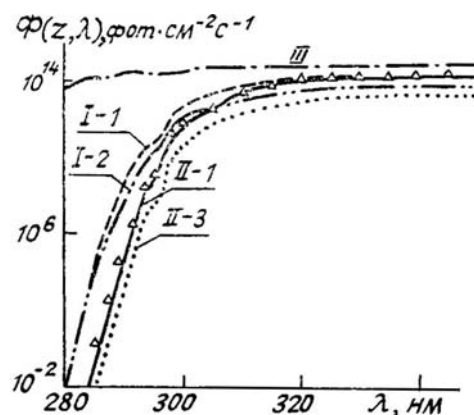


Рис. 2. Зависимость коротковолновой границы солнечной радиации на поверхности Земли. I, II — $\Phi(z, \lambda)$ для двух моделей распределения аэрозоля на высоте [6], III — $\Phi(100 \text{ км}, \lambda)$ на верхней границе атмосферы

Целевая программа исследований атмосферного аэрозоля, выполняемая в Институте оптики атмосферы, ориентирована на получение в конечном счете их оптических свойств, а поэтому относится прежде всего к оптически эффективному аэрозолю. Тем самым из рассмотрения выпадает та многочисленная часть мелких частиц, размеры которых менее 10–100 нм. Программа в целом включает в себя три дополняющих друг друга блока.

Один из блоков программы состоит в сборе, обработке и обобщении всей мировой информации по микрофизическим и оптическим характеристикам атмосферного аэрозоля и в разработке на этой основе глобальной оптической модели аэрозольной компоненты атмосферы [7]. В этом направлении в настоящее время завершается работа над третьей версией модели. Одновременно предпринимаются попытки учесть наиболее изученные динамические процессы в аэродисперсных системах. В результате каждая из последующих версий статистической модели отличается от предыдущей более высокой степенью учета соответствующих динамических процессов. Данное направление исследований является важной составной частью мониторинга атмосферного аэрозоля, поскольку, с одной стороны, обеспечивает пополнение банка данных за счет результатов непосредственных наблюдений атмосферного аэрозоля в натурных условиях, а с другой — восполнение возможных пропусков по данным об атмосферном аэрозоле как сопутствующем компоненте при мониторинге других компонентов атмосферы.

Другой блок целевой программы по атмосферному аэрозолю состоит в мониторинге стратосферного аэрозоля и слоистых облаков. Такой мониторинг осуществляется как с помощью лидара с двухметровым приемным зеркалом, установленного на станции высотного зондирования, так и с помощью специального так называемого поляризационного лидара.

Последний представляет особый интерес при исследованиях аэрозоля, так как обеспечивает получение всех компонент матрицы рассеяния до высот в 15–20 км. Лидарные измерения про-

водятся в режиме счета фотонов, что означает временное осреднение полученных результатов за 10 мин. В течение последних 4 лет с помощью этого лидара проведено около 250 наблюдений, в том числе около 100 в полном цикле измерений всех компонент матрицы обратного рассеяния (при четырех состояниях поляризации излучения передатчика).

Пример получаемых с помощью поляризационного лидара результатов измерений приведен на рис. 3. Здесь по данным [8] представлены профили параметров Стокса и отношения $R = (\beta_{\text{аэр}} + \beta_{\text{мол}}) / \beta_{\text{мол}}$, где $\beta_{\text{аэр}}$ и $\beta_{\text{мол}}$ – коэффициенты обратного рассеяния (аэрозольного и молекулярного). Четыре блока рисунка соответствуют четырем состояниям поляризации излучения передатчика, указанным стрелками на каждом блоке (линейная горизонтальная, линейная вертикальная, линейная под углом 45° и круговая поляризации). Как видно из рисунка, все параметры Стокса по-разному характеризуют рассеяние в аэрозольном слое на высоте 7,5 км, но оказываются нечувствительными к менее плотным слоям на больших высотах.

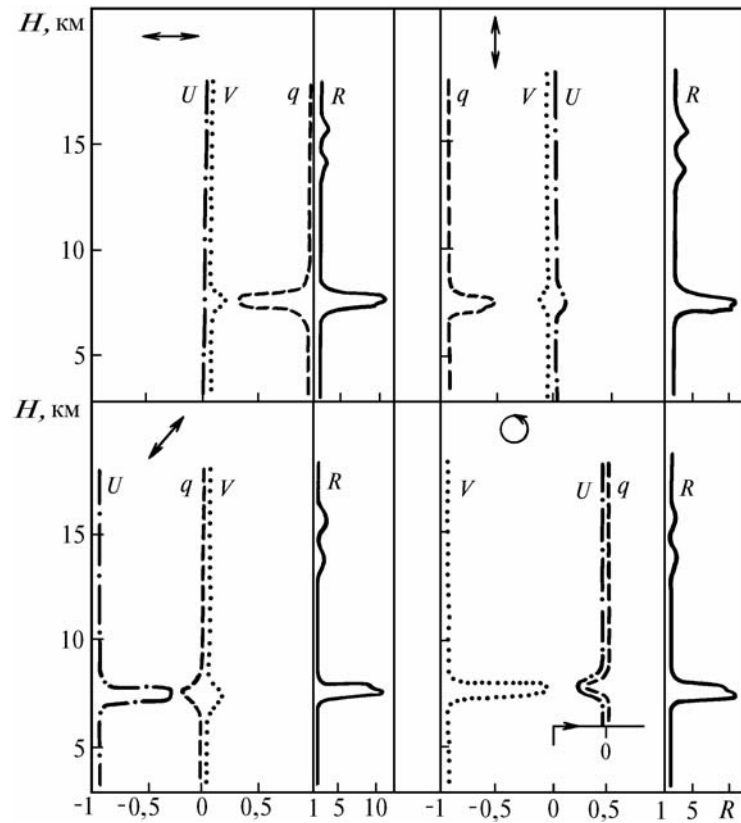


Рис. 3. Вертикальные профили отношения R и параметров Стокса по результатам измерений [8]

Представленный на рис. 3 полный цикл измерений параметров Стокса позволяет вычислить все компоненты матрицы обратного рассеяния. Для приведенного примера на высоте 7,5 км нормированная матрица обратного рассеяния (абсолютные значения элементов получаются умножением на $\beta_{\text{аэр}}$) имеет вид

$$a_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & -0,12 & -0,01 & 0,06 \\ -0,12 & 0,40 & -0,02 & 0,10 \\ 0,01 & 0,02 & -0,21 & -0,20 \\ 0,06 & 0,10 & -0,20 & -0,20 \end{pmatrix}.$$

Количественный анализ величин отдельных элементов и их соотношений, а также сравнение с расчетами для различных моделей аэрозоля показывают, что обследованный аэрозольный слой на высоте 7,5 км представляет собой ледяные иглы, частично ориентированные.

Третий блок целевой программы по атмосферному аэрозолю связан с мониторингом тропосферного аэрозоля. Объектами исследований при этом являются естественный и индустриальный аэрозоли, а методами исследований являются экспедиционные и стационарные.

Экспедиционные исследования тропосферного аэрозоля по целевой программе направлены на необходимое уточнение существующих аэрозольно-оптических моделей и выполняются в ряде характерных географических районов. Так, многолетние экспедиционные исследования были выполнены в районе Карадагской станции ГГО (Крым) с помощью спектрометрической (в диапазоне 0,4–13 мкм) и нефелометрической аппаратуры при сопровождении исследований одновременными метеорологическими наблюдениями и измерениями химического состава аэрозоля [9]. В результате были выявлены региональные особенности временной изменчивости прибрежного аэрозоля и его оптических свойств, в том числе влияние влажности и направления ветра на трансформацию аэрозольного состава, на соотношение долей аэрозоля континентального и морского происхождения. При наличии ряда специфических особенностей были вместе с тем подтверждены практически те же самые границы применимости однопараметрической модели восстановления спектральной структуры коэффициентов ослабления, разработанной в ИФА РАН по результатам исследований на Звенигородской базе, а также разработана двухпараметрическая модель для исследованного региона.

В экспедиционном режиме были также проведены исследования тропосферного аэрозоля в аридной зоне Казахстана.

В более ограниченном объеме и с иными задачами были выполнены и планируются наблюдения над Атлантическим океаном атмосферных толщ в широком спектральном интервале (от 0,4 до 12 мкм) с помощью многоканального спектрофотометра [10]. Результаты таких наблюдений обеспечивают решение обратной задачи и получение микрофизических характеристик в среднем по высоте, но преимущественно в тропосфере. Лишь в отдельных случаях подобные наблюдения выявляют и стратосферный аэрозоль. Именно такой эпизод наблюдался в рейсе № 43 1991 г., когда было обнаружено в районе Канарских островов повышенное замутнение (от типичного $\tau_{0,55}$ в 0,06 до 0,10). Обсуждение этого результата с американскими коллегами и сравнение его с космическими снимками показало, что такое повышенное замутнение естественно объяснить последствиями извержения вулкана Пинатубо (совместный семинар в рамках рабочей группы «Наука о земле», Балтимор, США, 1991 г.).

В настоящее время с помощью комплекса наземных средств, разработанных и используемых в экспедиционном режиме, развернуты наблюдения в стационарном режиме на базовом полигоне г. Томска.

В заключение обсуждения целевой программы по атмосферному аэрозолю в целом следует подчеркнуть важность предусматриваемых программой одновременных наблюдений других компонентов атмосферы. В частности, при исследованиях и аэрозоля, и газового состава атмосферы необходимо, как показывают лабораторные и некоторые натурные эксперименты [11, 12], для однозначной интерпретации результатов одновременно регистрировать квазистатические электромагнитные поля. Влияние последних на оптические свойства отдельных газов и фракций аэрозоля оказывается столь заметным, что соответствующие закономерности послужили основой для разработки способов их дистанционной диагностики.

Целевая программа по атмосферной радиации, выполняемая в ИОА СО РАН ориентируется на решение трех проблем.

Первая классическая проблема связана с радиационным режимом атмосферы. Дело в том, что до сих пор одним из основных недостатков существующих моделей климата являются большие расхождения при учете радиационного режима по различным схемам параметризации даже в безоблачной атмосфере. Еще большими становятся расхождения при облачной атмосфере. В обоих случаях дальнейшее совершенствование радиационных блоков в моделях климата невозможно без комплексных натурных наблюдений по принципу замкнутого эксперимента. Именно этот принцип закладывается нами в мониторинг атмосферной радиации при решении проблемы по учету радиационного режима в современных моделях климата.

Важной и пока не решенной до конца проблемой является экстремальная изменчивость радиационных полей в пространстве и времени. Все существующие схемы параметризации радиационного режима практически не учитывают стохастическую структуру радиационных полей, модулируемых облачными полями со случайной геометрией (разорванной облачностью), взволнованной водной поверхностью с пеной, горными системами (со случайным рас-

пределением высот, нормалей и альбедо поверхности) и т.д. Сущность проблемы проиллюстрируем примером по радиационным полям для разорванной облачности.

Будем характеризовать равновесие приходящих и уходящих радиационных потоков при разорванной облачности так называемым параметром чувствительности климата

$$\delta = -\frac{S_0}{4} \frac{\partial A}{\partial N} - \frac{\partial F}{\partial N},$$

где S_0 – солнечная постоянная; A – альбедо на верхней границе атмосферы; F – поток уходящего теплового излучения; N – количество облаков. Обычно при расчетах предполагается линейная зависимость величин A и F от N , в частности, что $A = A_s(1 - N) + A_c N$, где A_s и A_c – альбедо при облачной и безоблачной атмосфере соответственно. Исследования показывают [13], что на самом деле эта зависимость оказывается существенно нелинейной. На рис. 4 приведены примеры зависимости составляющей параметра чувствительности климата δ от облачности для двух типов облаков (штриховые – для St , сплошные – для Cu). Из рисунка видно, что только для слоистой облачности соответствующая зависимость близка к линейной. Этот результат имеет принципиальное значение для оценок региональных изменений климата, особенно с учетом возрастающих возможностей по параметризации разработанных к настоящему времени схем моделирования.

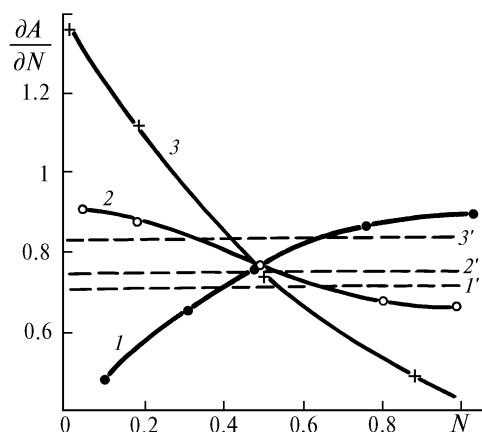


Рис. 4. Зависимость $\frac{\partial A}{\partial N}$ от балла облачности N (размер облаков 0,25 км, толщина – 0,5 км, коэффициент ослабления 60 км^{-1}) при различных зенитных углах Солнца ξ . Кривые 1, 1' – $\xi = 0^\circ$; 2, 2' – $\xi = 30^\circ$, 3, 3' – $\xi = 60^\circ$

Следующая проблема в целевой программе по атмосферной радиации связывается нами с локальными всплесками повышенной интенсивности. Эта проблема является общей по всему спектру электромагнитного диапазона длин волн. В оптическом диапазоне она часто рассматривается под названием «Оптические явления в атмосфере». Мониторинг таких явлений в последние десятилетия выходит за рамки прагматических задач и вновь приобретает мировоззренческое значение. Достаточно напомнить о возрастающем числе очевидцев неопознанных летающих объектов. С этой точки зрения остаются актуальными исследования и других воспринимаемых пока менее эмоционально оптических явлений.

Наконец, следует особо отметить широкое экологическое и технологическое значение исследований в отдельных спектральных областях оптической радиации: ультрафиолетовой, о значении которой уже упоминалось ранее; фотосинтетически активной радиации, исследования которой составляют содержание фотоактинометрии; фотографической, тепловой и других, само название которых отражает направленность их технологических приложений. Такие приложения соизмеримы с практической значимостью отдельных диапазонов радиоволнового излучения, а в совокупности с исследованиями квазистатических электромагнитных полей они составляют проблемно-ориентированную основу для мониторинга атмосферного электромагнетизма.

Все три обсужденные выше целевые программы исследований в мониторинговом режиме составляют содержание комплексного мониторинга физического состояния атмосферы.

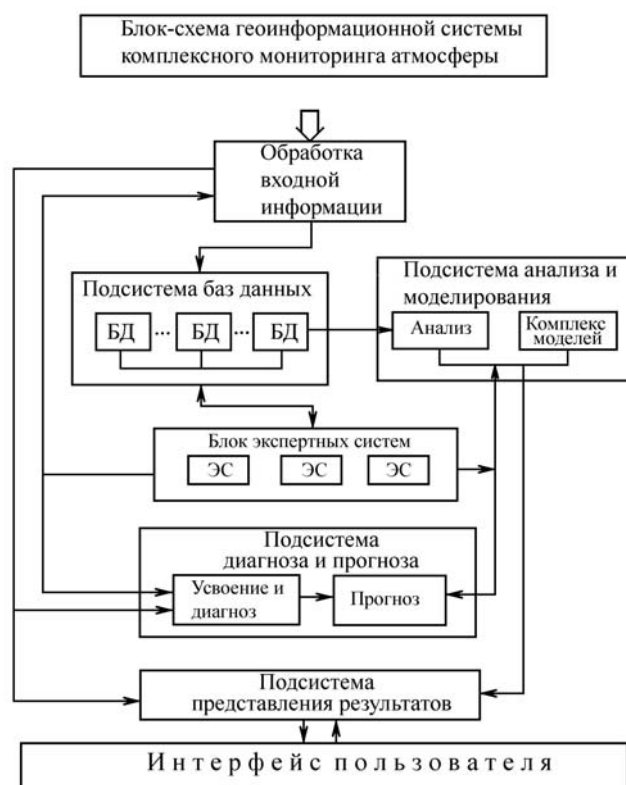


Рис. 5

Общее замечание относится к обеспечению этого комплексного мониторинга эффективной информационной технологией. Привлекательной для этих целей является так называемая геоинформационная система. Применительно к задачам физики атмосферы на основе созданного в ИОА СО РАН банка данных по параметрам различных компонентов атмосферы в настоящее время нами формируется одновременно и соответствующая геоинформационная система [14], представленная на рис. 5. Развитие этой системы, универсальной к различным наукам Отделения океанологии, физики атмосферы и географии РАН, имеет объединяющее значение и с экологической и с климатологической точек зрения, а сама система в той или иной форме естественным образом вписывается в научно-техническую программу «Глобальные изменения природной среды и климата».

1. Зуев В.Е., Зуев В.В. Современные проблемы атмосферной оптики. Т. 8. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 232 с.
2. Кондратьев К.Я. Радиационные факторы современных изменений глобального климата. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 279 с.
3. Розенберг Г.В., Горчаков Г.И., Георгиевский Ю.С., Любовцева Ю.С. Оптические параметры атмосферного аэрозоля (Физика атмосферы и проблемы климата). М.: Наука, 1980. С. 216–257.
4. Донченко В.А., Кабанов М.В., Колесник А.Г. Мониторинг электромагнитных полей в окружающей среде. Задачи и методы дистанционного зондирования. Изв. вузов. Физика. 1991. № 12. С. 69–79.
5. Белинский В.А., Гараджа М.П., Меженная Л.М., Незваль В.И. Ультрафиолетовая радиация Солнца и неба. Изд-во МГУ. 1968. С. 228.
6. Банах Г.Ф., Ипполитов И.И., Лопасова Т.А. //Космические исследования. 1986. Т. 24. Вып. 6. С. 890–895.
7. Зуев В.Е., Креков Г.М. Современные проблемы атмосферной оптики. Т. 2. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 256 с.
8. Kaul V.V., Kuznetsov A.L., Polovtseva E.R. Measurements of the backscattering Phase Matrices of Crystal Clouds. 16-th Intern. Laser Radar Conf. Abst., Cambridge, USA, 1992 (to be published).
9. Оптические свойства прибрежных атмосферных дымок /Кабанов М.В., Панченко М.В., Пхалагов Ю.А. и др. Новосибирск: Наука, 1988. 201 с.
10. Сакерин С.М., Афонин С.В., Еремина Т.А., Игнатов А.М., Кабанов Д.М. //Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. № 7. С. 695–705.

11. Зуев В.Е., Макушкин Ю.С., Пономарев Ю.Н. Современные проблемы атмосферной оптики. Т. 3. Спектроскопия атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 247 с.
12. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Современные проблемы атмосферной оптики. Т. 4. Оптика атмосферного аэрозоля. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 254 с.
13. Титов Г.А. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1987. Т. 23. № 8. С. 851–858.
14. Кошкарев А.В., Каракин В.П. Региональные геоинформационные системы. М.: Наука, 1988. 126 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
1 июля 1992 г.

M. V. Kabanov. Complex Monitoring of Atmospheric Physical State Using Stationary Ground-Based Means.

The paper deals with the review of the methods and target oriented programs of the earth's atmosphere study realized at the Institute of Atmospheric Optics SB RAS in collaboration with the other institutes of Siberian Region.