

С.В. Афонин, В.В. Белов

Направления развития и результаты пассивного спутникового зондирования системы «атмосфера – подстилающая поверхность» в Институте оптики атмосферы СО РАН

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 28.09.2005 г.

Дается обзор результатов исследований, выполненных в Институте оптики атмосферы СО РАН по проблемам пассивного зондирования характеристик земной поверхности и атмосферы на основе тематической обработки спутниковых изображений в видимой и ИК-областях спектра.

Первый этап развития этого направления в Институте был связан с программой комплексных теоретических и экспериментальных исследований, направленных на учет искажающего влияния атмосферы в задачах зондирования температуры подстилающей поверхности. В результате была построена модель формирования собственного излучения системы «атмосфера–океан» в окнах атмосферной прозрачности 3–5 и 8–13 мкм и изучены наиболее важные факторы, влияющие на ослабление радиации в этих спектральных диапазонах. С использованием модели в дальнейшем были выполнены подспутниковые эксперименты по контролю точности абсолютной калибровки теплового канала (10,4–12,6 мкм) прибора МСУ-СК, установленного на ИСЗ «Космос-1689», «Космос-1939».

Дальнейшие усилия концентрировались на исследовании основных закономерностей формирования изображений в видимой и инфракрасной областях спектра при наблюдении через неоднородную многокомпонентную рассеивающую и поглощающую атмосферу. В это же время осваивались существующие и разрабатывались новые методики атмосферной коррекции спутниковых измерений. В последнее десятилетие в ИОА СО РАН ведутся активные работы по созданию эффективных алгоритмов тематической дешифровки спутниковых данных для различных приложений, организации оперативного мониторинга, по решению задачи раннего обнаружения лесных пожаров из космоса и другим направлениям.

Введение

Институт оптики атмосферы (ИОА) был создан в 1969 г. Идея его создания, основные направления исследований связаны с именем академика В.Е. Зуева. Он же был и его бессменным директором на протяжении почти 30 лет. За это время Институт стал широко известен мировой научной общественности своими впечатляющими успехами в создании теории, методов и средств лазерного зондирования атмосферы, в развитии исследований в области атмосферной спектроскопии, в изучении процессов взаимодействия оптического излучения с многокомпонентными детерминированными и случайно-неоднородными средами, в области исследований газового и аэрозольного состава атмосферы.

Институт создавался как мощная комплексная научная организация, совмещающая, точнее, органично соединяющая в себе два взаимодополняющих направления развития науки: фундаментальное и прикладное.

В начале 70-х гг. на основе индивидуального отбора в Институт были приглашены ученые, уже имеющие опыт научно-исследовательской и научно-организационной работы, а также выпускники высших учебных заведений (прежде всего универ-

ситета и институтов г. Томска). Эти сотрудники и стали основной творческой силой одного из двух первых научно-исследовательских институтов академического профиля в г. Томске. За достаточно короткий срок (практически за первые 10 лет) многие работы Института стали известны и признаны как в СССР, так и за его пределами. Все они вошли в 9-томник «Современные проблемы атмосферной оптики», который был издан под общей редакцией акад. В.Е. Зуева. Первый его том вышел в 1986 г. (Л.: Гидрометеоиздат), а последний — в 1996 г. (г. Томск: издательство «Спектр», ИОА).

Этой статьей нам хотелось бы обратить внимание коллег на еще одно направление исследований, которое также было инициировано акад. В.Е. Зуевым. Речь пойдет о формировании и развитии в Институте научного направления, связанного с применением спутниковых средств пассивного зондирования окружающей среды. Видимо, Институт был объективно обязан принять участие в решении этого круга задач исходя из того, что любое изображение земной поверхности, получаемое с борта космического аппарата, содержит в себе атмосферный след. Он может быть явным — это, например, изображение облаков, или неявным, изменяющим спектральный состав регистрируемого

оптического излучения или искажающим яркостные, геометрические и иные характеристики наблюдаемых на земной поверхности (или в атмосфере) объектов. Поскольку одно из основных направлений (которое Институт призван развивать и которое определено причинами его создания) связано с исследованием закономерностей переноса оптического излучения в рассеивающих и поглощающих средах, то именно на эти вопросы в Институте должны находиться ответы при развитии теории, методов и средств пассивного зондирования Земли из космоса.

Дистанционная оценка температуры поверхности океана

Решение проблемы дистанционной оценки температуры приповерхностного слоя морей и океанов с требуемой точностью имеет важнейшее значение, прежде всего, для прогноза погоды. Температура в узлах некоторой регулярной сети, покрывающей земной шар, является одним из входных параметров, необходимых для работы расчетных программ прогноза погоды. Появление спутниковых дистанционных методов исследования окружающей среды переводит эту задачу в разряд практически разрешаемых, при условии, что алгоритмы тематической обработки этих измерений будут удовлетворять требуемой точности. Уже на раннем этапе развития аэрокосмических пассивных методов зондирования температуры водных поверхностей встал вопрос о необходимости исследования искажающего влияния атмосферы на точность измерений. Так, в ИОА появились два государственных заказа на выполнение программы научно-исследовательских работ, связанных с поиском путей повышения эффективности дистанционных методов и средств измерения температуры подстилающей поверхности, с разработкой рекомендаций к совершенствованию приборных средств зондирования температуры поверхности океана (ТПО) из космоса. Наряду с решением этих исследований была поставлена не менее актуальная задача организации и проведения подспутниковых экспериментов по контролю радиометрической точности ИК-каналов спутниковых приборов.

К этому моменту в Институте имелись все необходимые внутренние предпосылки для успешного решения этих задач. В частности, был опыт проведения соответствующих теоретических и экспериментальных исследований, была материальная база, были необходимые мощности вычислительной техники. Для выполнения этой комплексной программы исследований сформировался коллектив, включающий около 30 сотрудников Института (Фомин В.В., Афонин С.В., Хамарин В.И., Третьяков О.И., Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Белан Б.Д., Титов Г.А. и др.), ядром которого была лаборатория зондирования атмосферы космическими средствами.

Комплексность этих исследований состояла в том, что для решения поставленных задач потре-

бовались знания по спектроскопии атмосферы в ИК-диапазоне, специалисты по решению уравнения переноса излучения как для случая слабозамутненной атмосферы, так и в условиях разорванной облачности. Кроме того, требовались наземные и самолетные измерения характеристик световых потоков и метеосостояния атмосферы. Т.е. необходимо было организовать и провести серию подспутниковых экспериментов для того, чтобы осуществить контроль качества работы спутниковой аппаратуры МСУ-СК и осуществить верификацию методов учета искажающего влияния атмосферы на спутниковые измерения.

С нашей точки зрения, эта программа исследований на 1980–1990 гг. была выполнена блестяще. В чем же ее суть и каковы основные результаты? При выполнении этой программы исследований было осуществлено имитационное моделирование работы спутниковых радиометров типа МСУ-СК через атмосферу для различных оптико-метеорологических условий пассивного зондирования поверхности океана. Исследована проблема учета и минимизации влияния атмосферы при восстановлении ТПО на основе спутниковых радиометрических методов. Построена модель переноса излучения в системе «океан – атмосфера» в диапазоне длин волн 3–5 и 8–13 мкм. Выполнен анализ существующих методов атмосферной коррекции спутникового зондирования ТПО. Исследованы наиболее важные факторы, влияющие на ослабление радиации в окнах прозрачности атмосферы 3,5–4 и 8–13 мкм с акцентом на диапазон 10,4–12,6 мкм. Этот акцент был сделан потому, что в СССР в это время испытывался и вводился в штатную эксплуатацию аппаратный спутниковый комплекс МСУ-СК, разработанный для природно-ресурсных целей. Один из каналов этого прибора работал в спектральном диапазоне 10,4–12,6 мкм, имел пространственное разрешение 600 м и использовался для температурного зондирования подстилающей поверхности.

Другим важным результатом этих работ было создание экспериментальной радиометрической аппаратуры для выполнения подспутниковых экспериментов. Кроме того, была осуществлена интерпретация данных измерений комплекса МСУ-СК, установленного на ИСЗ «Космос-1689», «Космос-1939» для районов Канарских островов и Ботнического залива, Черного, Каспийского и Азовского морей. Наконец, были проведены серьезные подспутниковые эксперименты, в которых участвовали самолет-лаборатория Института оптики атмосферы [1] и НИС «Академик Вернадский» (40-й рейс, 1989 г.) с нашими сотрудниками на борту для проведения зондирования оптических свойств атмосферы в подспутниковых точках.

На рис. 1 представлены результаты сравнения измерений радиационной температуры в двух инфракрасных каналах прибора AVHRR и модельных расчетов, выполненных с учетом геометрических условий спутниковых наблюдений и оптического состояния атмосферы. На рис. 2 дано аналогичное сравнение для теплового канала прибора МСУ-СК.

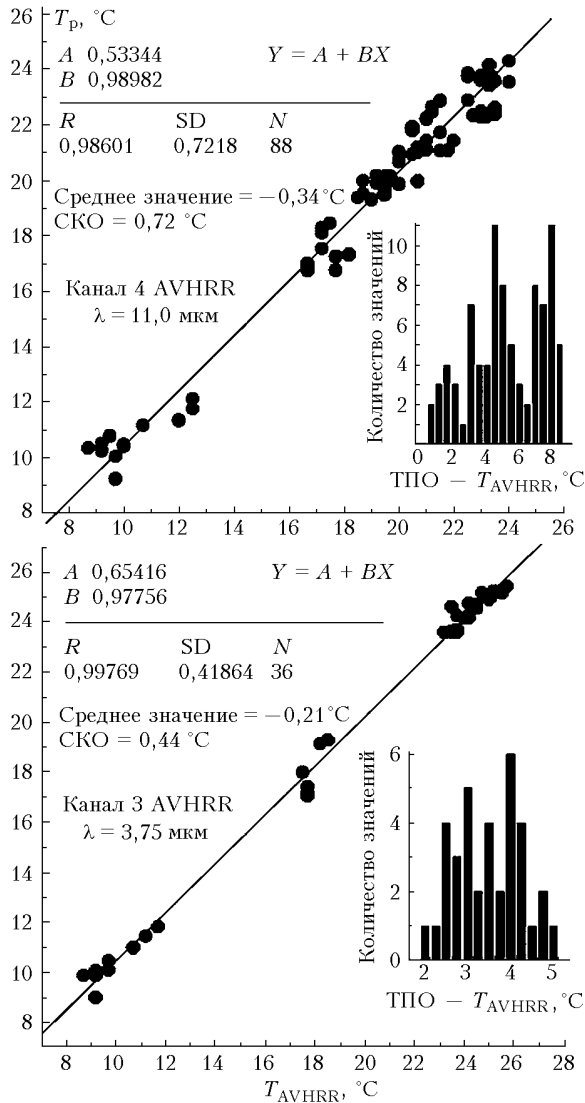


Рис. 1. Результаты сопоставления для прибора AVHRR измеренных (T_{AVHRR}) и расчетных (T_p) значений радиационных температур

Вывод, который следует из рис. 1 и 2, — построенная модель оптического сигнала достаточно точно воспроизводит его реальные значения. Эти данные стали основой для анализа точности алгоритмов интерпретации спутниковых измерений ТПО и проведения атмосферной коррекции подобных измерений. Наконец, рис. 3 дает представление о районах тестовых спутниковых измерений, выполненных по этой программе исследований с 1982 по 1989 г. Результаты этих исследований опубликованы в [2–9].

Итак, один из основных результатов первого этапа исследований по обсуждаемой здесь тематике состоит в том, что для задачи спутникового зондирования океана была построена модель формирования изображения, достаточно точно учитывающая процесс поглощения и ослабления ИК-излучения в атмосфере, ее собственное излучение в этом диапазоне длин волн и излучательные свойства поверх-

ности океана. При этом не учитывался процесс рассеяния в атмосфере и отражения солнечного излучения от точек, смежных с наблюдаемой точкой поверхности. Специфика задачи позволяла это сделать.

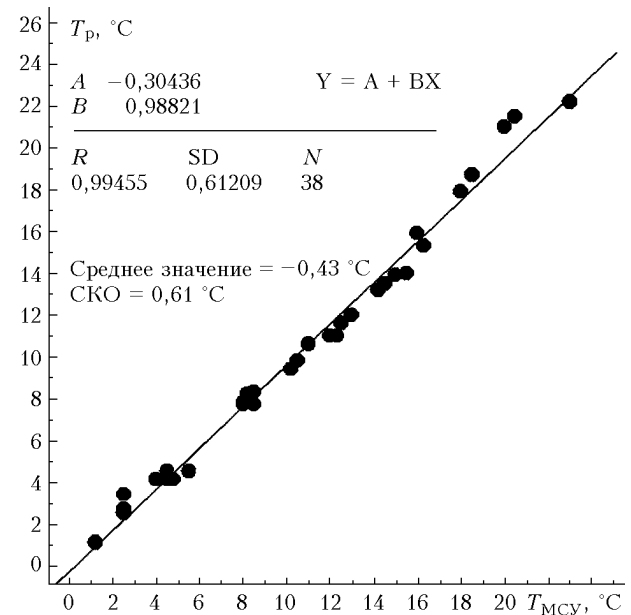


Рис. 2. Результаты сопоставления для прибора МСУ-СК спутниковых (T_{MSU}) и расчетных (T_p) значений радиационных температур

В частности, благодаря свойству статистической однородности излучательных характеристик вод океана, удаленных от суши. Это предположение ограничивает область применения алгоритмов восстановления температуры поверхности океана той его частью, которая удалена от суши примерно на 200 км. В этой переходной области, как правило, не выполняется условие однородности оптических свойств воды.

Уместно здесь, видимо, упомянуть про технологию обработки спутниковых данных, которая осуществлялась в те годы. Сами исходные данные предварительно заказывались на определенную дату и время, совпадающие с датами и временем проведения подспутниковых экспериментов. Если погода благоприятствовала (малооблачное небо), то первый этап этой цепочки заканчивался и начинался второй — доставка в ИОА на магнитных носителях первичных спутниковых данных и их обработка. Первые два этапа этой процедуры занимали значительный промежуток времени. Поэтому очень важно было осуществлять надежные подспутниковые эксперименты, поскольку, как правило, невозможно было их повторить в короткие сроки (учитывая время, которое уходило на согласование в различных ведомствах всех вопросов, связанных с организацией подобных экспериментов).

Очевидно, что без прямого организующего участия акад. В.Е. Зуева скорее всего этой программы не было бы вообще или она не была бы выполнена на таком, с нашей точки зрения, достаточно высоком уровне.



Рис. 3. Географическая карта расположения участков (крестики) проведения тестовых спутниковых измерений прибором MSU-CK

Параллельно с этими работами в Институте выполнялись исследования процесса формирования и переноса изображений через среды атмосферного типа в видимом диапазоне длин волн, где процессами рассеяния, как правило, пренебречь нельзя. Они проводились экспериментально (прежде всего, В.Н. Гениным, Б.Д. Борисовым, В.А. Крутиковым) и теоретически (В.В. Беловым, И.Ю. Макушкиной, Г.М. Крековым). Результаты этих исследований в полном объеме отражены в работе [10]. Кратко они сводятся к следующему. Установлены основные закономерности формирования помехи бокового подсвета, возникающей для изображений объектов, наблюдаемых через рассеивающие среды, и обусловленной процессами отражения (излучения) элементами объекта и окружающего его фона. Изучено ее влияние на такие характеристики систем видения, как изопланарность, пространственная разрешающая способность, радиус бокового подсвета, интегральный боковой подсвет, на импульсную передаточную характеристику и оптические передаточные функции каналов с рассеянием. Установлены причины и условия возникновения экстремального искажения изображения объектов при вариации пространственного положения слоя рассеивающей среды повышенной оптической плотности на линии визирования и т.д.

К сожалению, с распадом СССР и свертыванием в России космических программ дистанционного зондирования Земли из космоса доступ к этим

спутниковым отечественным данным прекратился. Прекратились и в Институте работы, связанные с тематической обработкой спутниковых данных, с созданием технологий атмосферной их коррекции.

Тем не менее было решено продолжать программу теоретических исследований, связанную с изучением закономерностей формирования и переноса изображений через рассеивающие и поглощающие среды в ИК-диапазоне длин волн. Результаты этих исследований опубликованы в [11–14]. Акцент в этих работах (в отличие от выполненных ранее для видимого диапазона длин волн) был сделан уже не на абстрактные постановки задач, а на конкретные действующие системы спутникового дистанционного зондирования Земли из космоса. Наш интерес был связан со спутниковой группировкой NOAA и прибором AVHRR в частности. Это обусловлено тем, что в данном случае можно получать одновременно изображения в пяти диапазонах длин волн и, что не менее важно, эти спутниковые данные доступны в оперативном (без предварительного заказа) режиме любому (юридическому, физическому) лицу, имеющему наземную станцию их приема.

Поэтому, когда при поддержке президента РАН акад. Ю.С. Осипова, президента СО РАН акад. В.А. Коптюга и председателя президиума Томского научного центра д.ф.-м.н. В.А. Крутикова в ИОА поступила станция СканЭкс, работы по развитию методов автоматического дешифрирова-

ния спутниковых данных были продолжены практически с первых сеансов приема первичных спутниковых данных. И вновь следует подчеркнуть, что именно акад. В.Е. Зуев, его видение развития этого направления в Институте определили эту поддержку и привели к тем результатам, о которых пойдет речь ниже.

Малоразмерные тепловые аномалии. Технология атмосферной коррекции изображений

К моменту появления в ИОА станции оперативного приема спутниковых данных NOAA в России за Уралом уже действовали несколько таких станций в составе центров спутникового мониторинга окружающей среды (гг. Красноярск, Иркутск, Новосибирск, Якутск, Томск). Известно, что теоретически с помощью спутниковых пассивных методов зондирования в оптическом диапазоне длин волн можно решать широкий спектр задач природоохраны и природопользования (контроль состояния растительного покрова, водных ресурсов, ледников, обнаружение лесных пожаров, состояние ледового покрова в северных морях, наличие фитопланктона в морях, урожайность сельскохозяйственных культур и т.д.). Тем не менее можно считать, что только некоторые из них сегодня решены на таком уровне, что начинают быть регулярно востребованы потребителем. Одно из таких направлений связано с обнаружением и мониторингом лесных пожаров.

Лесные пожары остаются одним из мощных природных факторов, влияющих на глобальные изменения окружающей среды, происходящие на планете. Следы этого катастрофического явления огромных масштабов можно найти на каждом континенте. К сожалению, достаточно часто реализуются ситуации, при которых все известные технологии борьбы с огнем не приносят результата и только сама природа в состоянии остановить вырвавшуюся из-под контроля человека огненную стихию. Хорошо известны своими катастрофическими последствиями пожары последних лет в США, Мексике, Австралии, России.

Характеристики спутниковой группировки NOAA и оптико-электронных приборов, созданных для решения прежде всего метеорологических задач, оказались приемлемыми для использования их в системах спутникового мониторинга лесных пожаров. Этому способствовали следующие обстоятельства: а) тип орбиты (полярная); б) ее высота (820–870 км); в) широкая полоса обзора (почти 3000 км); г) количество находящихся на орбите спутников (до пяти одновременно), что позволяет контролировать почти каждую точку поверхности земного шара с периодичностью до десяти и более раз в сутки; д) наличие у прибора AVHRR спектрального канала 3,75 мкм (расположенного вблизи максимума интенсивности инфракрасного излучения лесных пожаров); е) наличие каналов в види-

мой и дальней ИК-областях спектра (что позволяет разделять пожары, некоторые атмосферные фоны и поверхностные объекты, не различимые по измерениям в канале 3,75 мкм).

Однако широкая полоса обзора определяет и основной недостаток этого прибора, который заключается в сравнительно низком пространственном разрешении AVHRR, составляющем в подспутниковой точке 1,21 км². Последнее обстоятельство обуславливает сложность использования этого прибора для эффективного решения проблемы раннего обнаружения лесных пожаров. Именно это направление исследований должно считаться одним из центральных при организации спутникового мониторинга лесных территорий, особенно в тех случаях, когда наиболее надежная и испытанная практикой технология ее решения (авиапатрулирование) перестает быть доступной для природоохранных служб (например, по экономическим причинам, что характерно для России начиная с конца 80-х гг. XX в.).

С учетом научного профиля Института оптики атмосферы становится понятным, почему именно эта проблема стала центральной в программе создания средств тематической обработки данных AVHRR, которая реализуется в Институте начиная с 1997 г.

Исследования, описанные нами в работах [15–17], показали, что ослабление атмосферой инфракрасного излучения и аэрозольное рассеяние солнечного излучения являются факторами, существенно снижающими эффективность использования многоканальных AVHRR-изображений при раннем обнаружении малоразмерных (имеющих размеры меньше пространственного разрешения прибора на земной поверхности) очагов лесных пожаров. Исходя из результатов исследований общих закономерностей формирования изображений через рассеивающие и поглощающие среды в видимом и ИК-диапазонах спектра [11–14], наши усилия с 1998 г. и по настоящее время направлены на решение следующих основных задач:

– исследование влияния оптико-геометрических условий наблюдения на вклад в измеряемую радиационную температуру процессов аэрозольного и молекулярного рассеяния солнечного излучения в атмосфере;

– разработка информационно-методических основ атмосферной коррекции AVHRR-изображений;

– разработка новых алгоритмов тематической обработки спутниковых многоканальных изображений.

Важным практическим результатом выполнения этой программы стало создание в ИОА системы оперативного мониторинга из космоса очагов лесных пожаров на территории Томской области [18–21], регулярно проводящегося с 1998 г.

Проиллюстрируем полученные нами результаты в каждом из этих направлений исследований.

На рис. 4 приведены результаты моделирования зависимости от геометрических условий наблюдения

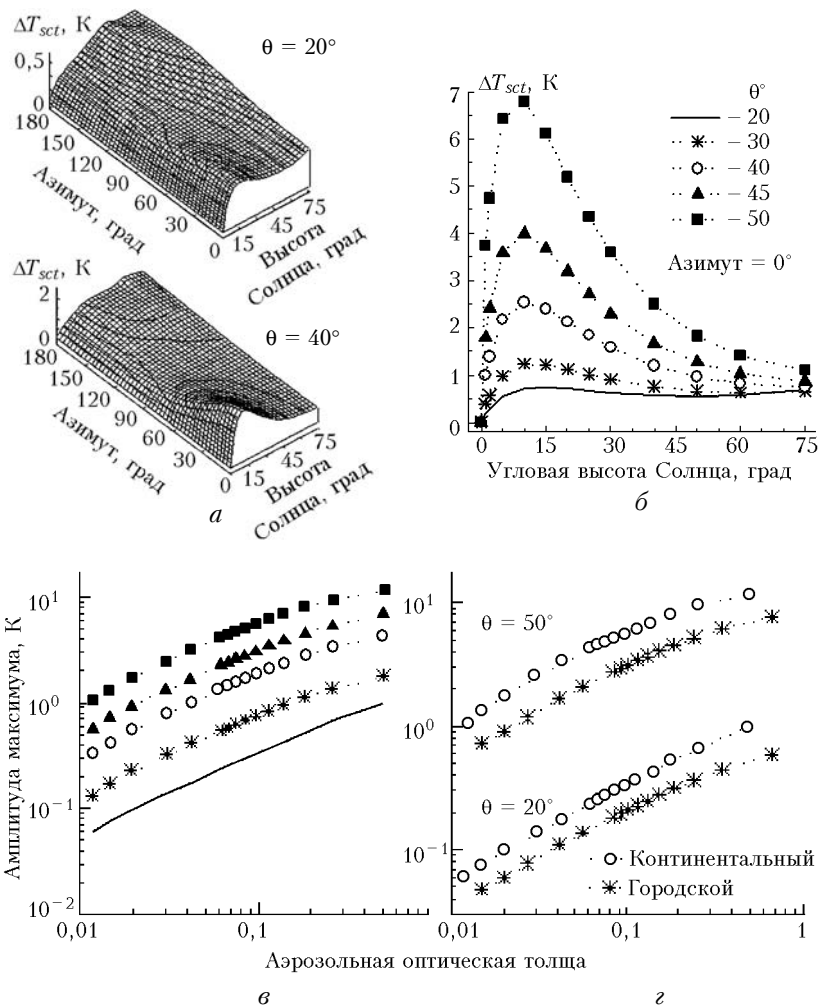


Рис. 4. Вклад температурной добавки ΔT_{sct} в радиационную температуру за счет рассеянного аэрозолем солнечного излучения в зависимости от геометрии наблюдений (θ – угол наклона оси прибора). Канал 3 AVHRR ($\lambda = 3,75$ мкм), континентальный аэрозоль (МДВ = 5 км) (а, б). Поведение локального максимума ΔT_{sct} в зависимости от θ и от АОТ континентального и городской аэрозолей (в, г)

вклада рассеянного излучения в принимаемый от наблюдаемой прибором точки сигнал (при заданном значении метеорологической дальности видимости). Эти условия включают угол наклона оси прибора относительно вертикали к земной поверхности θ , угол высоты Солнца Z и азимутальный угол ϕ между плоскостью сканирования прибора и плоскостью, проходящей через вертикаль и направление на солнце от точки расположения спутника.

Этот результат моделирования интересен тем, что позволяет объяснить иногда встречающиеся на AVHRR-изображениях в тепловом канале температурные аномалии, которые не являются тепловыми неоднородностями на земной поверхности и не являются бликами (отражением солнечного излучения) от краевых областей облаков.

Физическая природа этого явления проста – это результат отражения солнечного излучения от аэрозольной составляющей атмосферы, который связан с формой аэрозольной индикатрисы рассеяния. Т.е. при определенных угловых соотношениях

и при наличии в атмосфере аэрозоля рассеянное в направлении прибора излучение может достигать своего максимума, превышающего пороговое значение, вложенное в алгоритм автоматической обработки изображений. Это приводит к появлению ложных тревог.

Другой вывод, следующий из рис. 4, заключается в утверждении, что в пороговых алгоритмах (часто используемых в системах спутникового мониторинга лесных пожаров) значение порога не является постоянной величиной, а должно изменяться как минимум в зависимости от значений углов θ , ϕ , Z и метеорологической дальности видимости у земной поверхности. Этот же вывод можно распространить, с нашей точки зрения, и на другие тематические приложения, в которых используются пороговые алгоритмы принятия решений.

Итак, для построения эффективных пороговых алгоритмов обработки спутниковых данных необходим учет эффектов рассеяния оптического излучения в атмосфере. Источниками рассеяния кроме аэ-

розольной составляющей являются и молекулы воздуха (точнее, неоднородности их плотности). В работе [22] нами предложены информационно-методические основы атмосферной коррекции AVHRR-изображений, искаженных процессами поглощения и рассеяния теплового излучения объекта.

Для осуществления этой процедуры необходимо из регистрируемого прибором излучения устранить те его части, которые обусловлены поглощением молекулярной и ослаблением (поглощением и рассеянием) аэрозольной составляющей атмосферы. Учет поглощения можно осуществить, зная профили температуры и влажности, учет аэрозольного влияния – зная оптическую толщину аэрозоля. Относительно аэрозольного влияния следует сделать замечание. При анализе влияния рассеяния на качество изображения установлено, что возможны ситуации, когда не столько оптическая толщина рассеивающей среды, сколько профиль распределения коэффициента рассеяния вдоль линии визирования определяет его качество. К данной ситуации этот случай не относится. Это связано с тем, что пространственное разрешение прибора AVHRR невысоко и боковой подсвет, вызывающий, в частности, t -эффект [10], можно учесть интегрально, через оптическую толщину рассеивающей среды. Еще проще дело обстоит со световой дымкой, величина которой с высокой степенью точности определяется только интегральной оптической толщиной атмосферы [10].

В работе [22] нами с помощью компьютерного моделирования показано, как влияет точность задания метеопараметров (профили температуры и влажности воздуха) на точность восстановления в канале 3,75-мкм интенсивности теплового излучения малоразмерных высокотемпературных аномалий (МВТА). Очевидно, что идеальные для этой процедуры условия реализуются тогда, когда информация о метеорологическом состоянии атмосферы соответствует моменту времени проведения спутниковых наблюдений. Это условие выполнить в реальной, оперативной работе пока практически невозможно. На рис. 5 показано, как влияют на качество атмосферной коррекции точность задания фоновой температуры подстилающей поверхности (ТПП), а также степень соответствия времени проведения измерения метеорологических данных и времени осуществления спутникового наблюдения земной поверхности. Видим, что при проведении коррекции ощутимый ее результат следует ожидать, если используемые метеоданные были получены не позднее, как правило, 3–6 ч до получения спутниковых изображений земной поверхности (если не происходит, конечно, резких изменений погоды). На рис. 6 показано влияние аэрозоля на точность восстановления интенсивности теплового излучения МВТА.

Как поступать в тех случаях, когда эти данные не доступны в оперативном режиме? Эту задачу можно решить, используя данные приборов группы TOVS, размещенных на спутниках NOAA именно для этих целей. К сожалению, современное программное обеспечение, разработанное для этих це-

лей, невозможно использовать на ПЭВМ. Оно создано для машин другого класса. По этой причине и по заказу Института космических исследований и аэронавтики (ИКФИА) СО РАН нами оно было адаптировано к использованию на персональных компьютерах [24].

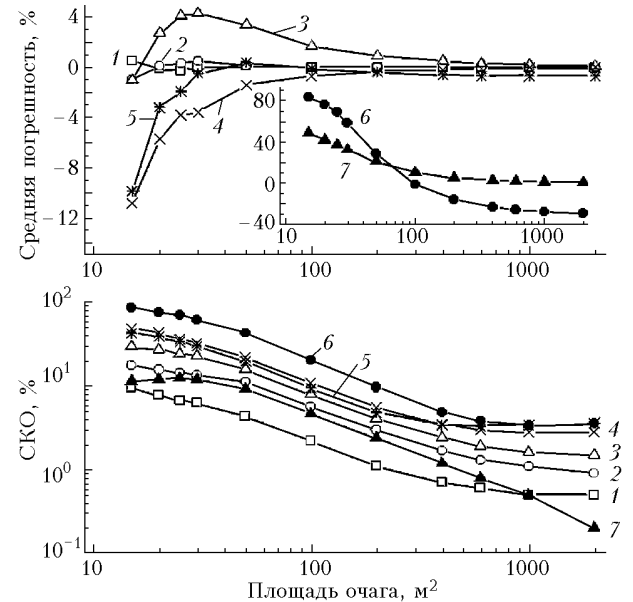


Рис. 5. Влияние характеристик априорной метеоинформации на точность восстановления интенсивности теплового излучения очага пожара: $\delta t = 0-1$ ч (1); 0–3 ч (2); 3–6 ч (3); 1 сут (4); 1 мес (5); нет коррекции (6), ТПП минус 1 К (7)

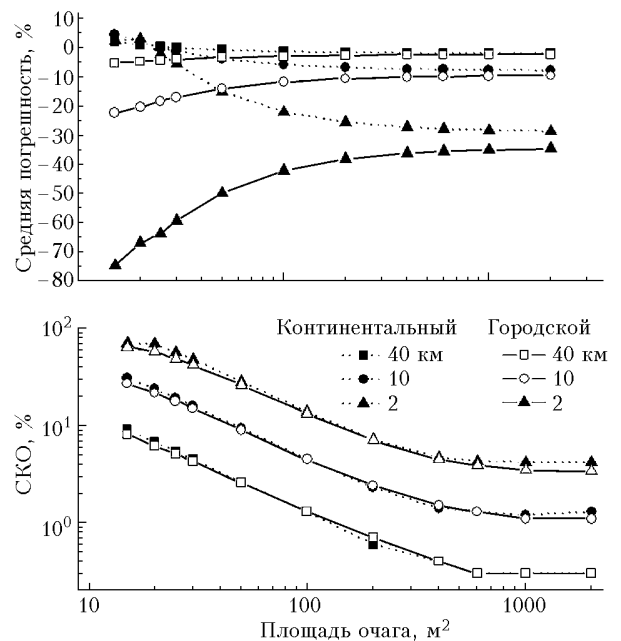


Рис. 6. Влияние аэрозоля на точность восстановления интенсивности теплового излучения очага пожара; типы аэрозоля – континентальный или городской, дальность видимости – 40, 10, 2 км

Как известно, оптические характеристики атмосферного аэрозоля не измеряются в России какими-либо службами. Их можно получить, используя

сеть AERONET (США). Однако на территории России эта сеть только формируется [25, 26] и оперативно получить данные о состоянии атмосферного аэрозоля над конкретной географической точкой не представляется возможным. Поэтому мы предприняли попытку восстановления его характеристик, используя методику, основанную на измерениях оптических характеристик атмосферы, проводимых в ИОА СО РАН, и на обработке рядов спутниковых изображений региона, где расположен Институт. В результате удалось реализовать процедуру оперативной оценки аэрозольного поля над Томским регионом [22, 23]. На рис. 7 приведен результат восстановления этого поля для одной из конкретных ситуаций.

Другая возможность восстановления оптической толщины аэрозольной составляющей атмосферы и метеопараметров может быть реализована на основе измерений прибора MODIS, размещенного на спутниках TERRA, AQUA (США, NASA), с использованием программного обеспечения MODIS Atmosphere Products. В работах [27–29] нами были осуществлены валидация и статистический анализ данных MODIS Atmosphere Products применительно к территории Томского региона Западной Сибири. Для валидации использовались временные ряды наземных измерений оптических характеристик атмосферы (ИОА, AERONET). Сравнительный анализ спутниковых и наземных измерений аэрозольной оптической толщины (АОТ) проводился для длин волн 0,47 и 0,66 мкм. Результаты сопоставления спутниковых и тестовых фотометрических измерений АОТ показали их высокую корреляцию ($R = 0,86–0,93$), хорошее совпадение абсолютных величин АОТ и их временного хода.

Созданная таким образом информационно алгоритмическая основа разделения изображения на две составляющие (атмосферную и земную) позво-

ляет реализовывать два пути решения задач тематической обработки спутниковых изображений (задачу раннего обнаружения малоразмерных очагов пожаров, в частности). Или на основе этого разделения использовать динамический порог принятия решения, или, очистив изображение от атмосферного фона, решать задачу тематического анализа обычного (не возмущенного атмосферой) изображения с помощью подходов и алгоритмов, которые нашли применение и положительную оценку не только в теории дистанционного зондирования Земли из космоса, но и других приложениях. В частности, в технологию тематической обработки спутниковых изображений, включающую атмосферную коррекцию, могут встраиваться новые алгоритмы автоматического анализа изображений, разрабатываемые в Институте к.т.н. К.Т. Протасовым и его учениками [30–33], в том числе и на основе перспективных непараметрических подходов.

Заметим, что в 2003 г. по заданию одного из предприятий Росавиакосмоса методика атмосферной коррекции применялась сотрудниками ИОА для обработки многоканальных изображений земной поверхности, полученных с борта самолета.

Подчеркнем еще раз, что предложенная процедура атмосферной коррекции не является универсальной и подходящей для любых ситуаций и условий пассивного зондирования Земли из космоса.

В тех случаях, когда пространственная разрешающая способность измерительных приборов заметно меньше радиуса бокового подсвета (см. [10, гл. 6, раздел 6.3]), данная процедура атмосферной коррекции может рассматриваться лишь как нулевое приближение и ее следует дополнять блоками учета взаимного влияния элементов объекта и фона на их изображения, в том числе и эффектов размытия изображений, к которым могут приводить процессы аэрозольного и молекулярного рассеяния.

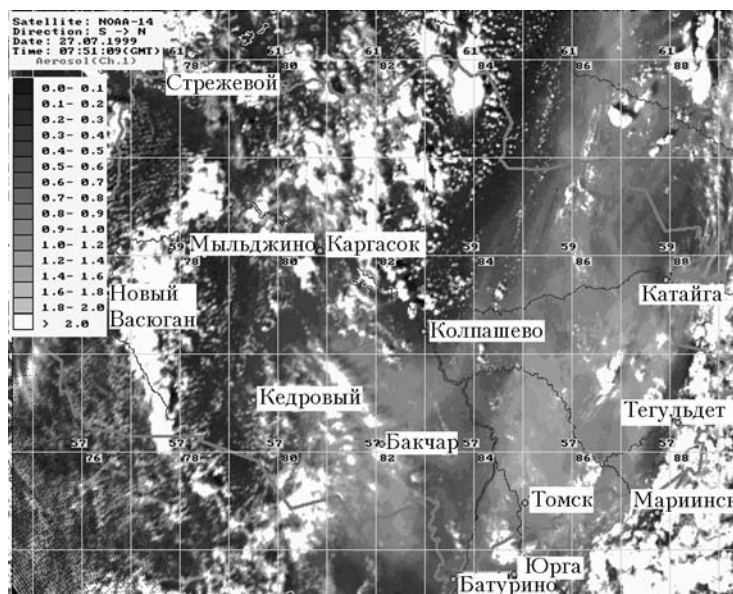


Рис. 7. Карта пространственного распределения аэрозольной оптической толщины $\tau(x, y)$ ($\lambda = 0,63$ мкм) в Томском регионе 27 июля 1999 г.

Эффективность разработанной в Институте информационно-алгоритмической технологии раннего обнаружения лесных пожаров из космоса (по крайней мере, на региональном уровне) иллюстрирует приведенная ниже таблица. Отметим, что при разработке этой технологии нами был решен ряд второстепенных, но практически важных задач, таких как уточнение координатной привязки спутниковых данных, предварительная автоматическая проверка их качества, процедура оценки эффективности спутникового мониторинга и т.д.

**Результаты сравнения эффективности детектирования пожаров из космоса при обработке данных приборов AVHRR и MODIS (Томская область, 2003 г.).
В скобках – количество приоритетных* обнаружений**

Прибор	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Всего
AVHRR/ИОА	16 (7)	60 (22)	82 (37)	28 (11)	186 (77)
MOD14	7 (4)	28 (11)	53 (16)	10 (6)	98 (37)
MOD14/TERRA	6 (3)	20 (6)	43 (13)	9 (6)	78 (28)
MOD14/AQUA	6 (4)	21 (7)	40 (8)	7 (4)	74 (23)

Примечание. MOD14 – использованы данные MODIS со спутников TERRA и AQUA; MOD14/TERRA – только со спутника TERRA, MOD14/AQUA – только со спутника AQUA.

* В скобках – количество приоритетных обнаружений лесных пожаров, которые были официально зарегистрированы ранее, чем о них поступила информация в службы охраны лесов от пожаров, от других источников (авиация, лесники и т.д.).

В таблице приведены данные о количестве обнаруженных лесных пожаров на территории Томского региона бореальных лесов Западной Сибири на основе обработки спутниковых данных AVHRR и MODIS. Напомним, что прибор MODIS превосходит сенсор AVHRR по целому ряду характеристик.

Данные прибора MODIS (формат MOD14) были получены на основе штатного алгоритма MODIS Fire Product [34, 35]. Анализ AVHRR-изображений осуществлялся по технологии оперативного мониторинга лесных пожаров, разработанной в ИОА [18–21] и используемой в службах охраны лесов от пожаров в Томском регионе с 1998 г.

Данные, приведенные в таблице, дают основание сделать следующие выводы. Созданная в ИОА СО РАН технология раннего обнаружения лесных пожаров из космоса, по крайней мере на региональном уровне, почти в 2 раза более эффективна, чем MODIS Fire Product (MOD14), используемая в штатном режиме в глобальном масштабе. Второй вывод, который в последнее время встречается поддержку и на международном уровне, состоит в утверждении, что оптимальная технология раннего обнаружения лесных пожаров на планете не должна исключать региональной составляющей. Более того, последняя может превосходить по своей эффективности технологии более масштабного уровня (ведомственного, национального, межнационального).

Дальнейшее развитие созданной в ИОА СО РАН технологии раннего обнаружения лесных по-

жаров из космоса связано с практической реализацией блока атмосферной коррекции AVHRR-изображений [22]. Полученные в [36] результаты обработки спутниковых данных продемонстрировали принципиальную возможность успешного применения на практике атмосферной коррекции спутниковых измерений для целей обнаружения МВТА даже при сложных оптико-геометрических условиях наблюдений.

Исследования, которые проводились в Институте по проблемам пассивного зондирования Земли из космоса начиная со второй половины 90-х гг. XX в., поддерживались Российским фондом фундаментальных исследований (проекты № 01-05-65494 и 04-07-90018), Сибирским отделением РАН (программы «Геоинформационные технологии и дистанционное зондирование» и «Информационно-телекоммуникационные ресурсы СО РАН», междисциплинарный проект «Теория, методы и программно-информационные средства тематической обработки аэрокосмических данных в системах дистанционного зондирования земных покровов и атмосферы»). К ним был проявлен интерес за рубежом (грант UK Royal Society на выполнение совместного с учеными из Великобритании проекта, связанного с влиянием лесных пожаров на углеродный цикл), в том числе в проведении совместных исследований, связанных с технологиями раннего обнаружения лесных пожаров («Development of an Integrated System of Ground-, Air- and Space-based Observations of Biomass Burning in Northern Eurasia», NASA).

Нам хотелось бы надеяться, что эта статья станет еще одной иллюстрацией того, что акад. В.Е. Зуев точно определил перспективные для Института направления научных исследований и, что не менее важно, такие направления, которые комплексно и эффективно могли быть решены именно в Институте оптики атмосферы и на высоком научном уровне.

1. Зуев В.Е., Белан Б.Д., Кабанов Д.М., Ковалевский В.К., Лукьянов О.Ю., Мелешкин В.Е., Микушев М.К., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Покровский Е.В., Сакерин С.М., Терпугова С.А., Толмачев Г.Н., Тумаков А.Г., Шаманаев В.С., Щербатов А.И. Самолет-лаборатория Ан-30 «Оптик-Э» для экологических исследований // Оптика атмосф. 1992. Т. 5. № 10. С. 1012–1021.
2. Отчет по НИР «Расчет вариаций радиационного поля системы «атмосфера–подстилающая поверхность» в диапазоне длин волн 3–15 мкм и исследование путей минимизации методических погрешностей в задачах дистанционного зондирования». 1986.
3. Отчет по НИР «Расчетно-экспериментальные исследования путей повышения эффективности дистанционных средств измерения температуры подстилающей поверхности». 1990.
4. Зуев В.Е., Селиванов А.С., Фомин В.В., Панфилов А.С., Романов А.В., Афонин С.В., Хамарин В.И. Измерение температуры поверхности океана аппаратурой МСУ-СК со спутника «Космос-1689» // Оптика атмосф. 1988. Т. 1. № 11. С. 76–80.

5. *Афонин С.В., Панфилов А.С., Романов А.В., Селиванов А.С., Фомин В.В., Хамарин В.И.* Подспутниковые эксперименты по контролю радиометрической точности ИК-каналов приборов МСУ-СК ИСЗ «Ресурс-01» № 2 в период ЛКИ // Сб. трудов НПО «Планета». 1993. Вып. 42. С. 33–37.
6. *Афонин С.В.* Разработка и применение атмосферной радиационной модели для определения температуры поверхности океана по данным спутникового зондирования: Дис. ... канд. ф-м.н. Томск, 1987. 192 с.
7. *Афонин С.В., Гендрин А.Г.* Информационно-программное обеспечение моделирования переноса ИК-радиации в атмосфере // Информационно-программное обеспечение задач атмосферной оптики. Новосибирск: Наука, 1988. С. 38–65.
8. *Афонин С.В., Гендрин А.Г., Фомин В.В.* Влияние аэрозольного ослабления и вариации метеопараметров на точность определения температуры поверхности океана // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1986. № 10. С. 1109–1112.
9. *Афонин С.В., Гендрин А.Г., Фомин В.В.* Влияние вариации профиля влажности на точность определения температуры поверхности океана // Оптико-метеорологические исследования земной атмосферы. Новосибирск: Наука. 1987. С. 239–241.
10. *Зуев В.Е., Белов В.В., Веретенников В.В.* Теория систем в оптике дисперсных сред. Томск: изд-во «Спектр» ИОА СО РАН, 1997. 402 с.
11. *Афонин С.В., Белов В.В., Макушкина И.Ю.* Моделирование восходящего потока рассеянного аэрозоля теплового излучения. Часть 1. Интенсивность потока // Оптика атмосфер. и океана. 1994. Т. 7. № 6. С. 797–826.
12. *Афонин С.В., Белов В.В., Макушкина И.Ю.* Моделирование рассеянного аэрозоля восходящего теплового излучения с учетом температурных неоднородностей на поверхности. Ч. 1. Функция размытия точки // Оптика атмосфер. и океана. 1995. Т. 8. № 9. С. 1402–1410.
13. *Афонин С.В., Белов В.В., Макушкина И.Ю.* Моделирование рассеянного аэрозоля восходящего теплового излучения с учетом температурных неоднородностей на поверхности. Часть 3. Мелкомасштабные высокотемпературные аномалии // Оптика атмосфер. и океана. 1997. Т. 10. № 2. С. 184–190.
14. *Афонин С.В., Белов В.В., Макушкина И.Ю.* Перенос ИК-изображений через атмосферу // Оптика атмосфер. и океана. 1997. Т. 10. № 4–5. С. 449–462.
15. *Белов В.В., Афонин С.В., Гриднев Ю.В., Протасов К.Т.* Тематическая обработка и атмосферная коррекция аэрокосмических изображений // Оптика атмосфер. и океана. 1999. Т. 12. № 10. С. 991–1000.
16. *Belov V.V., Afonin S.V.* Distorting effect of the atmosphere in satellite monitoring of small-sized high-temperature anomalies // Proc. SPIE. 2002. V. 4725. P. 471–478.
17. *Белов В.В., Афонин С.В.* Роль атмосферной коррекции в задаче космомониторинга малоразмерных (subpixel) высокотемпературных объектов на подстилающей поверхности // Междунар. Симпоз. стран СНГ по атмосферной радиации «МСАР-2». СПб.: СПбГУ, 2002. С. 96–97.
18. *Афонин С.В., Белов В.В., Гриднев Ю.В.* Система космомониторинга лесных пожаров на территории Томской области. Ч. 1. Организация системы космомониторинга // Оптика атмосфер. и океана. 2000. Т. 13. № 11. С. 996–1004.
19. *Афонин С.В., Белов В.В.* Система космомониторинга лесных пожаров на территории Томской области. Ч. 2. Оценка эффективности космомониторинга // Оптика атмосфер. и океана. 2001. Т. 14. № 8. С. 692–696.
20. *Афонин С.В., Белов В.В.* Эффективность применения спутниковых технологий для оперативного мониторинга лесных пожаров в Томской области // Исслед. Земли из космоса 2002. № 1. С. 42–50.
21. *Гриднев Ю.В.* Обнаружение малоразмерных пожаров по данным приборов AVHRR спутников NOAA // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15. № 8. С. 727–730.
22. *Афонин С.В., Белов В.В.* Информационно-методические основы построения эффективных систем спутникового мониторинга лесных пожаров // Вычисл. технологии. 2003. Т. 8. Спец. выпуск. С. 35–46.
23. *Афонин С.В., Белов В.В., Белан Б.Д., Панченко М.В., Сакерин С.М., Кабанов Д.М.* Сравнение спутниковых (AVHRR/NOAA) и наземных измерений характеристик атмосферного аэрозоля // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15. № 12. С. 1118–1123.
24. *Афонин С.В., Белов В.В., Энгель М.В., Кох А.М.* Разработка в ИОА СО РАН базы данных региональной спутниковой информации и программного обеспечения для ее обработки // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18. № 1–2. С. 52–60.
25. *Panchenko M.V., Sakerin S.M., Kabanov D.M., Holben V., Smirnov A.* Siberian System for Aerosol Monitoring-AEROSIBNET // Aeronet Photons Workshop: Proc. «Optica pura y Aplicada». 2004. V. 37. N 3. P. 3237–3240. <http://www.sedoptica.es/revistasanteriores/v37n3.html>.
26. *Sakerin S.M., Kabanov D.M., Panchenko M.V.* Regular observations of column aerosol optical properties in Asian part of Russia // WMO/GAW Expert Workshop on «A global surface-based network for long observations of column aerosol optical properties». 8–10 March 2004. Davos. Switzerland (<http://www.wmo.ch/files/arep/AODavos2004>).
27. *Афонин С.В., Белов В.В., Энгель М.В., Кох А.М.* Валидация региональных спутниковых данных MODIS Aerosol Product (MOD04) // Вторая Всерос. конф. «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы космическими средствами»: Тезисы докл. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2004. Т. 2. С. 27–31.
28. *Афонин С.В., Белов В.В., Энгель М.В.* Валидация спутниковых данных MODIS // Вторая открытая Всерос. научная конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса»: Матер. конф., 2004. С. 214 (http://www.iki.rssi.ru/d33_2004.htm).
29. *Афонин С.В.* Некоторые результаты изучения характеристик оптического состояния атмосферы в Томском регионе по спутниковым данным MODIS // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18. № 5–6. С. 400–405.
30. *Протасов К.Т., Рюмкин А.И.* Непараметрический алгоритм распознавания объектов подстилающей поверхности Земли по данным аэрокосмической съемки // Вестн. Том. ун-та. Апрель 2002. № 275. Серия «Математика. Кибернетика. Информатика». С. 41–46.
31. *Artamonov E.S., Protasov K.T.* Linear models of point spread functions proper bases and quality criterion for vision systems // Proc. SPIE. 2002. V. 5026. P. 221–229.
32. *Kolodnikova N.V., Protasov K.T.* A cluster separation algorithm involving estimation of local modes of mixing distribution // Proc. SPIE. 2002. V. 5026. P. 238–244.
33. *Kolodnikova N.V., Protasov K.T.* The recognition of clouds fields types by nonparametric algorithm in textural feature space on cosmic data // XI Joint Int. symp. «Atmosph. and Ocean Optics. Atmosph. Phys». Tomsk, 2004. P. 104–105.

34. Kaufman Y.J., Justice C.O., Flynn L.P., Kendall J.D., Prins E.M., Ward D.E., Menzel W.P., Setzer A.W. Potential global fire monitoring from EOS-MODIS // J. Geophys. Res. D. 1998. V. 103. N 24. P. 32215–32238.
35. Giglio L., Descloitres J., Justice C.O., Kaufman Y.J. An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS // Remot. Sens. of Environm. 2003. V. 83. N 2–3. P. 273–282.
36. Афонин С.В. К вопросу об атмосферной коррекции спутниковых данных в задаче мониторинга из космоса малоразмерных очагов лесных пожаров // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 4. С. 331–334.

S.V. Afonin, V.V. Belov. Directions of development and results of passive satellite sensing of the «atmosphere – underlying surface» system at the Institute of Atmospheric Optics SB RAS.

A review of the results obtained at the Institute of Atmospheric Optics SB RAS on the problem of passive sensing of characteristics of the ground surface and atmosphere based on topical processing of satellite images in visible and infrared spectral ranges is presented.

The first stage of the investigation was connected with estimation of disturbing influence of the atmosphere on the underlying surface temperature, which resulted in construction of the model of the proper radiation formation in the «atmosphere – ocean» system in the transparency windows of 3–5 and 8–13 μm . Most important factors affecting the radiation attenuation in these ranges have been studied. Using the model, satellite experiments on control for absolute calibration of the thermal channel (10.4–12.6 μm) of the MSU-SK instrument installed in the «Kosmos-1689» and «Kosmos-1939» satellites were conducted.

Further, main regularities in image formation in visible and infrared spectral ranges, when observing through inhomogeneous many-component scattering and absorbing atmosphere, have been studied; the available methods of atmospheric correction of the satellite measurements were mastered and new ones were elaborated. In the last decades, new efficient algorithms of satellite data topical decoding for various applications, for example, real – time monitoring, express-detection of forest fires, and so on, have been worked out.