

Развитие в Институте оптики атмосферы СО РАН методов пассивного космомониторинга подстилающей поверхности

С.В. Афонин, В.В. Белов

*Институт оптики атмосферы СО РАН,
634055 Томск, пр. Академический, 1
E-mail: belov@iao.ru*

В статье 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 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, решению задачи раннего обнаружения лесных пожаров из космоса и др. направлениям.

Введение

Институт оптики атмосферы (ИОА), был создан в Академии наук СССР 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 более 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, органически соединяющая в себе два взаимодополняющих направления развития науки: фундаментальное и прикладное.

В начале 70-х годов на основе индивидуального отбора в Институт были приглашены как ученые, уже имеющие опыт научно-исследовательской и научно-организационной работы, так и выпускники высших учебных заведений (прежде всего, университета и институтов г. Томска). Эти сотрудниками 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. Ленинград, Гидрометеиздат), а последний – в 1996 (г. Томск, Издательство «Спектр», ИОА).

В этой статье 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, получаемого с борта космического аппарата, содержит в себе атмосферный след. Поскольку одно из основных направлений (которое Институт призван развивать) 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, являются одними 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 возник 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 спутниковой аппаратуры МСУ-СК.

Для выполнения этой комплексной программы исследований сформировался коллектив, включающий около 30 сотрудников Института, ядром которого была лаборатория зондирования атмосферы космическими средствами.

Комплексность этих исследований состояла в том, что для решения поставленных задач потребовались знания по спектроскопии атмосферы в инфракрасной области спектра, 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 оптико-метеорологического состояния атмосферы.

С нашей точки зрения, эта программа исследований на 1980–1990 г.г. 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 (ИК-канал прибора МСУ-СК).

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 Институт оптики атмосферы [1] и НИС «Акад. Вернадский» (40 рейс, 1989 г.) для зондирования метеорологических и 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 оптико-метеорологического состояния атмосферы. На рис.2 дано аналогичное сравнение для теплового канала прибора МСУ-СК.

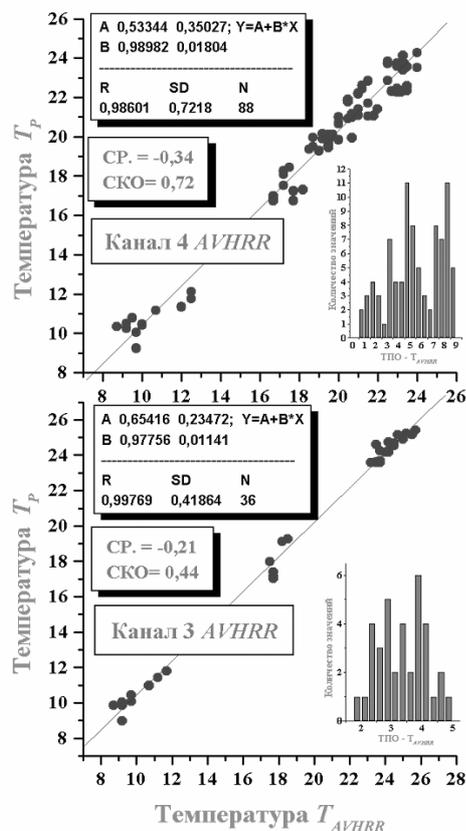


Рис. 1. Результаты сопоставления для прибора AVHRR измеренных (T_{AVHRR}) и расчетных (T_P) значений радиационных температур

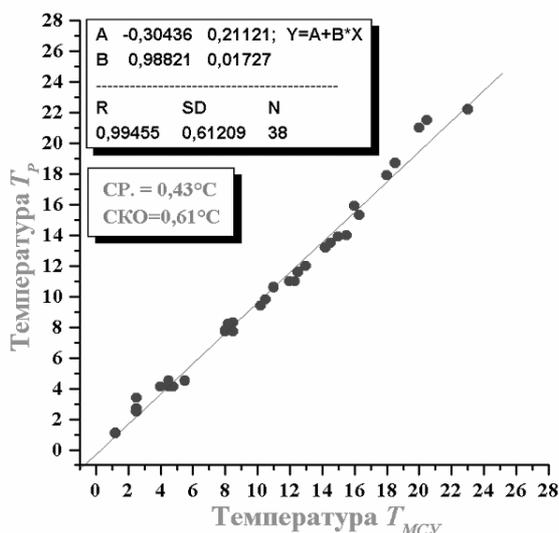


Рис. 2. Результаты сопоставления для прибора МСУ-СК измеренных ($T_{МСУ}$) и расчетных (T_P) значений радиационных температур

Вывод, который следует из рисунков 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. Основные результаты проведенных в период 1982–1989 г.г. 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 поверхности океана. При этом не учитывался процесс рассеяния в атмосфере и отражения солнечного излучения от точек, смежных к наблюдаемой точке поверхности. Специфика задачи позволяла это сделать. В частности, благодаря свойству статистической однородности излучательных свойств удаленных от суши вод океана.

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 и теоретически. 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. 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 5 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 дешифрирования спутниковых данных были продолжены практически с первых сеансов приема первичных спутниковых данных.

Малоразмерные тепловые аномалии. Технология атмосферной коррекции изображений.

К моменту появления в ИОА станции оперативного приема спутниковых данных NOAA в России за Уралом уже действовало несколько таких станций в составе Центров спутникового мониторинга окружающей среды (г. Красноярск, г. Иркутск, г. Новосибирск, г. Якутск, г. 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 видимой 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. прошлого столетия).

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

Исследования, описанные нами в работах [15–17], показали, что ослабление атмосферой инфракрасного излучения и рассеяние аэрозолями падающего на поверхность 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 года 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 года.

Проиллюстрируем полученные нами результаты в каждом из этих направлений исследований.

На рис.3 приведены результаты моделирования зависимости от геометрических условий наблюдения 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.

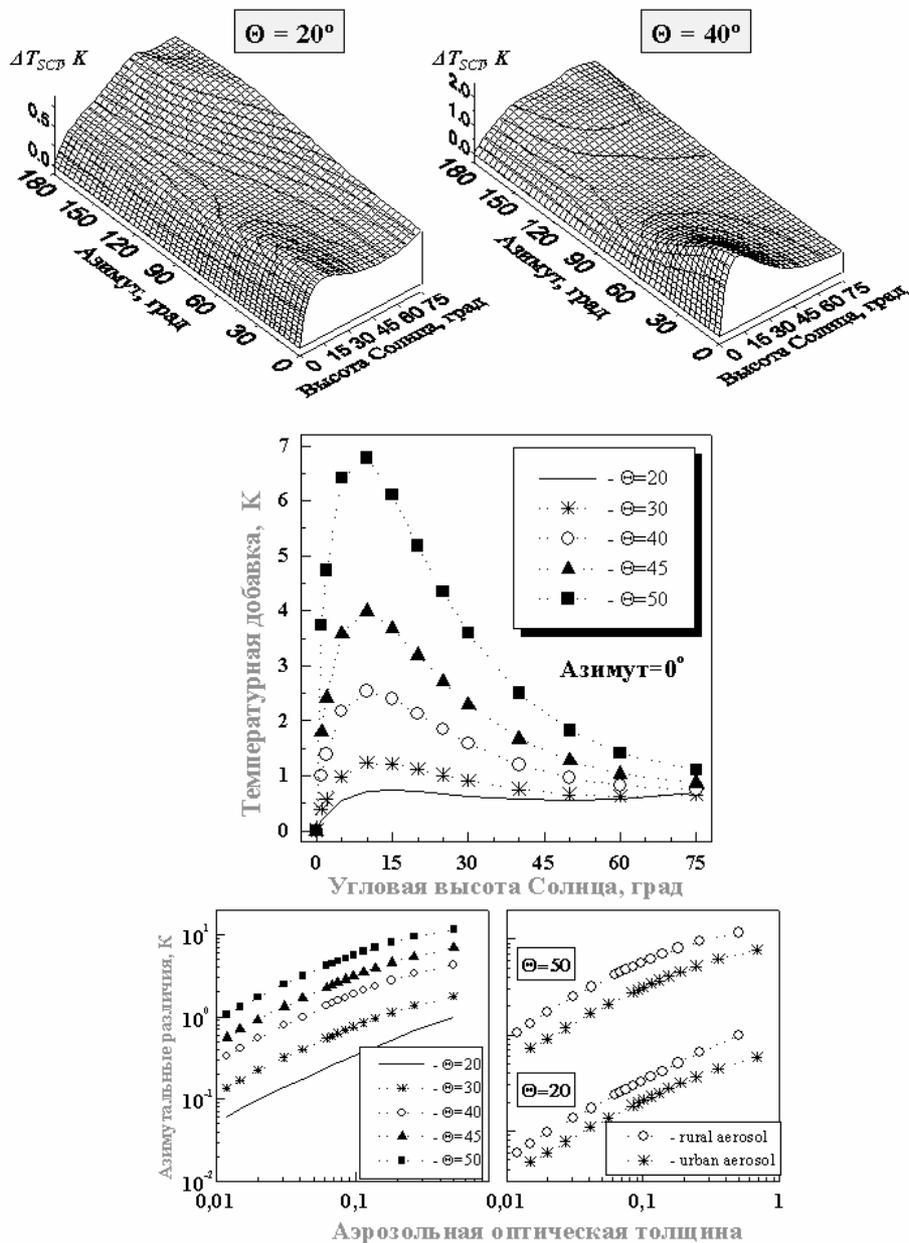


Рис. 3. Вклад температурной добавки ΔT_{SCT} в радиационную температуру за счет рассеянного аэрозолем солнечного излучения в зависимости от геометрии наблюдений (θ – угол наклона оси прибора).

Канал 3 AVHRR ($\lambda = 3,75$ мкм), rural aerosol (МДВ = 5 км)

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 такого явления проста – это результат отражения солнечного излучения от аэрозольной составляющей атмосферы и 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, применяемое в алгоритме автоматической обработки изображений. Это приводит к появлению ложных тревог.

Другой вывод, следующий из анализа рис.3, состоит в следующем утверждении. 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 аэрозольной 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 на 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 второго 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 не высоко, 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.4 показано, как влияет на качество атмосферной коррекции степень соответствия времени проведения измерения метеорологических данных и времени осуществления спутникового наблюдения земной поверхности. Как видим, что при проведении коррекции ощутимый ее результат следует ожидать, если используемые метеоданные были получены не позднее, как правило, 3-6 часов до получения спутниковых изображений земной поверхности (если не происходит, конечно, резких изменений погоды). На рис.5 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 целей, невозможно использовать на ПЭВМ. Оно создано для машин другого класса. По этой причине в сотрудничестве с Институтом космических исследований и аэронавтики (ИКФИА) СО РАН нами оно было адаптировано к использованию на персональных компьютерах [24].

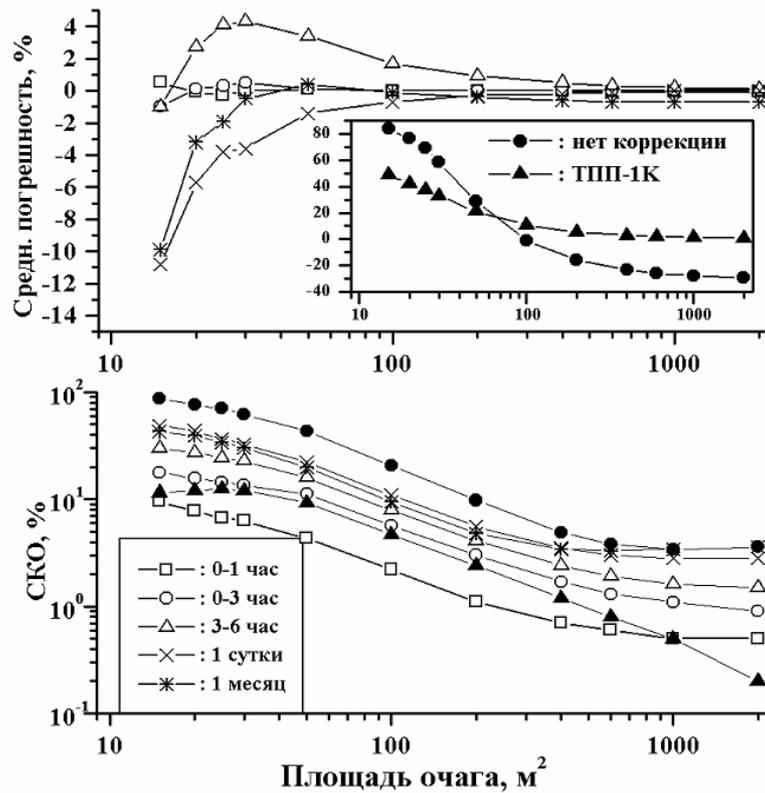


Рис. 4. Влияние характеристик априорной метеоинформации на точность восстановления в канале 3.75 мкм интенсивности теплового излучения высокотемпературной аномалии

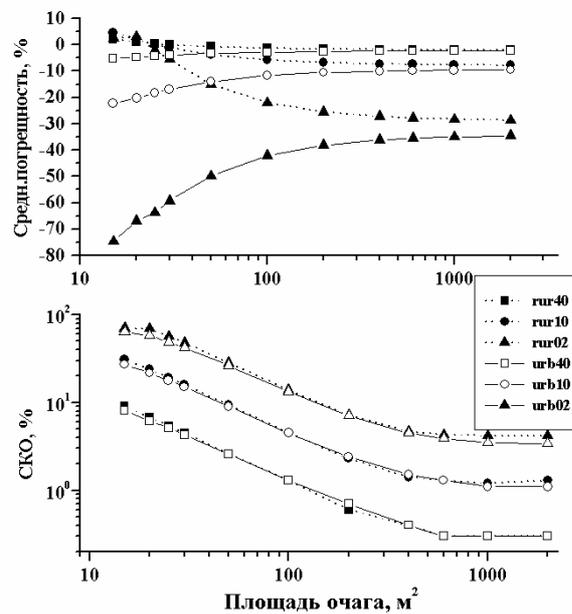


Рис. 5. Влияние аэрозоля на точность восстановления в канале 3.75 мкм интенсивности теплового излучения высокотемпературной аномалии; типы аэрозоля – rural (rur) или urban (urb), дальность видимости – 40, 10, 2 км

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, <http://www.sedoptica.es/revistasanteriores/v37n3.html>, <http://www.wmo.ch/files/arep/AODavos2004>], и оперативно получить данные о состоянии атмосферного аэрозоля над конкретной географической

точкой не представляется возможным. Поэтому нами была предпринята попытка восстановления его характеристик, используя методику, основанную на измерениях оптических характеристиках 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.6 приведен результат восстановления этого поля для одной из конкретных ситуаций.

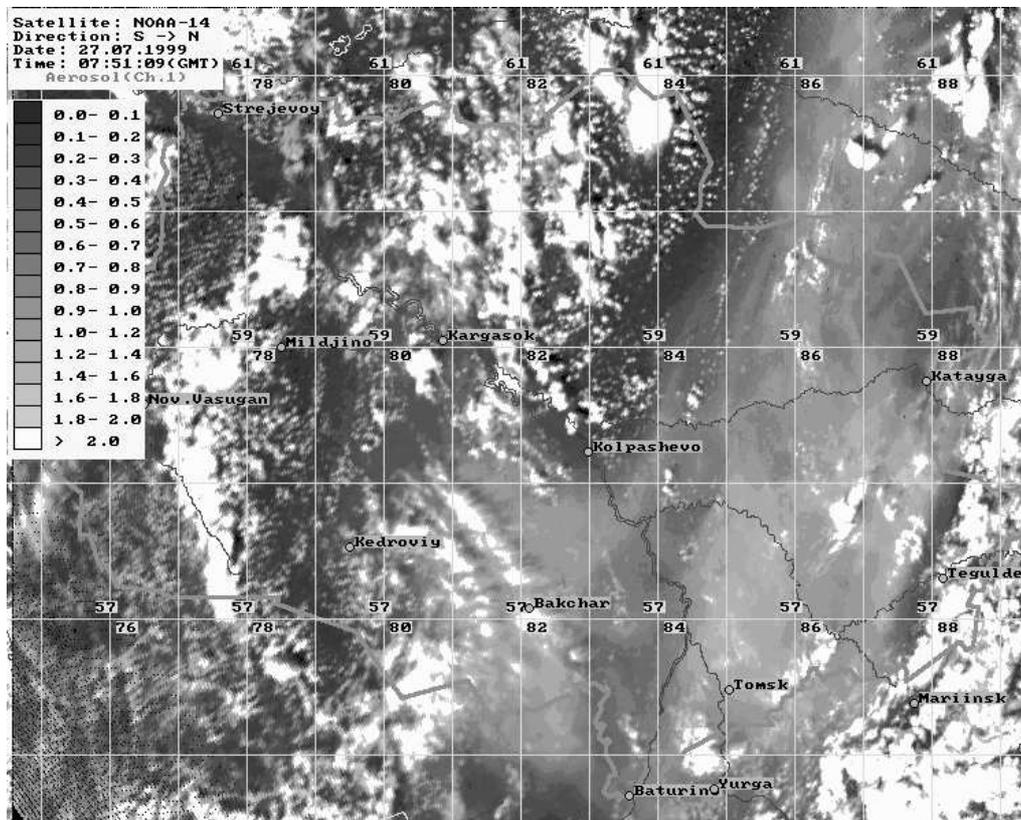


Рис. 6. Карта пространственного распределения аэрозольной оптической толщины ($\lambda=0.63$ мкм) в Томском регионе 27 июля 1999 г.

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. В работах [27–29, http://www.iki.rssi.ru/d33_2004.htm] нами была осуществлена 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 $\lambda=0.47$ 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) позволяют 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 привлечением 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. Протасовым К.Т. и его учениками [30–33], в том числе и на основе перспективных непараметрических подходов.

Заметим, что в 2005 г. по заданию одного из предприятий Росавиакосмоса методика атмосферной коррекции применялась сотрудниками ИОА для обработки ИК-изображений земной поверхности, полученных с борта спутника Landsat 7 (ETM+).

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.

Эффективность разработанной в Институте информационно-алгоритмической технологии раннего обнаружения лесных пожаров из космоса 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.

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.

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 года. Смысл обозначений, использованных в таблице: MOD14 – использованы данные MODIS со спутников TERRA и AQUA, MOD14/TERRA – использованы данные только со спутника TERRA, MOD14/ AQUA – использованы данные только со спутника AQUA.

*Таблица 1. Результаты сравнения эффективности детектирования пожаров из космоса при обработке данных приборов AVHRR и MODIS (Томская область, 2003 год).
В скобках – количество приоритетных* обнаружений*

МЕТОД	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)

* под приоритетными понимаются те обнаружения лесных пожаров, которые были официально зарегистрированы ранее, чем о них поступила информация в службы охраны лесов от пожаров из других источников (авиация, лесники и т.д.)

Данные, приведенные в табл.1, 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 встречает 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 пожаров 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 годов прошлого столетия, поддерживались:

- Российским фондом фундаментальных исследований (проекты №01-05-65494 и №04-07-90018),
- Сибирским отделением РАН (программы «Геонформационные 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 нашим исследованиям 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);
- грант NASA «Development of an Integrated System of Ground-, Air- and Space-based Observations of Biomass Burning in Northern Eurasia», для проведения совместных исследований, связанных с технологиями раннего обнаружения лесных пожаров.

Литература

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 атмосферы, 1992. Том 5. № 10. С.1012-1021.
2. Отчёт 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. Отчёт 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 атмосферы, 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" N2 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. Сер. Физика атмосферы 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. Сиб. отд-ние, 1987. С. 239-241.
10. *Зуев В.Е., Белов В.В., Веретенников В.В.* Теория систем в оптике дисперсных сред. Томск: изд-во "Спектр" Института оптики атмосферы СО РАН. 1997. 402 с.
11. *Афонин С.В., Белов В.В., Макушкина И.Ю.* Моделирование восходящего потока рассеянного аэрозолем теплового излучения. Ч. 1. Интенсивность потока // *Оптика атмосферы и океана*, 1994. Т. 7. № 6. С. 797–826.
12. *Афонин С.В., Белов В.В., Макушкина И.Ю.* Моделирование рассеянного аэрозолем восходящего теплового излучения с учетом температурных неоднородностей на поверхности. Ч. 1. Функция размытия точки // *Оптика атмосферы и океана*, 1995. Т. 8. № 9. С. 1402–1410.
13. *Афонин С.В., Белов В.В., Макушкина И.Ю.* Моделирование рассеянного аэрозолем восходящего теплового излучения с учетом температурных неоднородностей на поверхности. Часть 3. Мелкомасштабные высокотемпературные аномалии // *Оптика атмосферы 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 атмосферы 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 атмосферы 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 // *Proceedings of International Conference on Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery VIII (AeroSense 2002)*. Orlando, USA, 2002. Proc. SPIE. Vol. 4725. P. 471–478
17. *Белов В.В., Афонин С.В.* Роль атмосферной коррекции в задаче космомониторинга малоразмерных (subpixel) высокотемпературных объектов на подстилающей поверхности // *Международный симпозиум стран СНГ по атмосферной радиации "МСАР-2": Тезисы докладов*. СПб: Изд-во 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 атмосферы 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 атмосферы 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 атмосферы 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. вып. 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 атмосферы 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 атмосферы и океана*, 2005. Т.18. № 1-2. С.52-60.

25. *M.V. Panchenko, S.M. Sakerin, D.M. Kabanov, B. Holben, A. Smirnov.* Siberian System for Aerosol Monitoring-AEROSIBNET. Aeronet Photons Workshop, Proceedings, Optica pura y Aplicada, 2004. V.37, №3, P.3237-3240.
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.
27. *Афонин С.В., Белов В.В., Энгель М.В., Кох А.М.* Валидация региональных спутниковых данных MODIS Aerosol Product (MOD04). Вторая Всероссийская конференция «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы космическими средствами»: Тезисы докладов. Санкт-Петербург, 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 Всероссийская научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса»: Материалы конференции, 2004. С. 214.
29. *Афонин С.В.* Некоторые результаты изучения характеристик оптического состояния атмосферы в Томском регионе по спутниковым данным MODIS // Оптика атмосферы 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 // Вестник Томского государственного университета. 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 // Atmospheric and Ocean Optics. Proceedings of SPIE. 2002. Vol. 5026. p. 221-229.
32. *Kolodnikova N.V., Protasov K.T.* A cluster separation algorithm involving estimation of local modes of mixing distribution // Atmospheric and Ocean Optics. Proceedings of SPIE. 2002. Vol. 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 International symposium «Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics». 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., and Setzer A.W.* Potential global fire monitoring from EOS-MODIS. // Journal of Geophysical Research, 1998. V.103. № D24, P.32215-32238.
35. *Giglio L., Desclotres J., Justice C.O., Kaufman Y.J.* An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS // Remote Sensing of Environment, 2003. V.83. №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 атмосферы и океана, 2005, Т.18, №4, С. 331-334.