

Пассивное спутниковое зондирование земной поверхности в оптическом диапазоне длин волн

С.В. Афонин^{1,2}, В.В. Белов^{1,2}, Ю.В. Гриднев¹, К.Т. Протасов^{1,3*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

³Томский университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40

Поступила в редакцию 18.05.2009 г.

Рассмотрены основные результаты, полученные в Институте оптики атмосферы СО РАН, по проблемам пассивного спутникового зондирования земной поверхности. Акцент сделан на результатах исследований, полученных в течение последних лет и связанных с созданием программно-информационных средств, позволяющих учесть влияние атмосферы на измеряемые характеристики световых потоков с помощью оптико-электронных приборов космического или авиационного базирования.

Ключевые слова: спутниковое зондирование, аэрокосмические изображения, адаптивная атмосферная коррекция; satellite sensing, aerospace image, adaptive atmospheric correction.

Введение

Исторические аспекты и некоторые результаты, полученные в Институте оптики атмосферы СО РАН в направлении, связанном с применением спутниковых средств пассивного зондирования земной поверхности, описаны в работе [1]. При решении этого круга задач мы исходим из того, что любое изображение земной поверхности, получаемое с борта космического или авиационного 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.

В зависимости от постановки задачи атмосферная компонента изображения может рассматриваться как полезный сигнал (если речь идет о восстановлении из спутниковых измерений состава и характеристик атмосферы) или как искажающий фактор, если целью пассивного зондирования являются характеристики земной поверхности или объектов, находящихся на ней или в атмосфере. Наши усилия последних лет были направлены на решение именно этой задачи и концентрировались на двух конкурирующих подходах. Технология первого состоит

в устранении из изображений атмосферного следа на основе информации (модельной, прогностической или полученной из оперативных измерений) о внешних условиях формирования изображений (RTM-метод атмосферной коррекции изображений). Во втором подходе данные об оптико-геометрических условиях съемки оцениваются на основе анализа изображения. Рассмотрим кратко результаты этих исследований в ИОА СО РАН.

RTM-метод в задачах ИК-зондирования земной поверхности из космоса

Обратимся к анализу основных источников ошибок RTM-метода (*Radiative Transfer Model*) при решении, например, задачи восстановления температурных аномалий на земной поверхности на основе анализа спутниковых ИК-изображений. В рамках этого метода учет влияния атмосферы на измеряемые световые потоки осуществляется через решение уравнения переноса излучения при граничных условиях и оптических свойствах рассеивающей и поглощающей среды, определяемых на основе априорной оптико-метеорологической информации о состоянии атмосферы в момент спутниковых наблюдений. Примеры применения такого подхода можно найти в работах [2–5].

Интенсивное развитие вычислительной техники и современных технологий параллельного программирования [6, 7] снимает вопрос о трудоемкости проведения большого объема вычислений, которые

* Сергей Васильевич Афонин (afonin@iao.ru); Владимир Васильевич Белов (belov@iao.ru); Юрий Владимирович Гриднев (yurigi@iao.ru); Константин Тихонович Протасов (prot@iao.ru).

требуется выполнить, реализуя этот метод. Кроме того, в работе [5] предлагается использовать комбинированный подход – быстрый SW-метод для «стандартных» ситуаций и RTM-метод для ситуаций, выходящих за их рамки (при наличии оптически плотного аэрозоля, полупрозрачной или перистой облачности). Рассмотрим суть применения метода на примере обработки изображений прибора EOS/MODIS (спутники Terra, Aqua).

Выполненный нами анализ влияния различных атмосферных составляющих на измеряемые световые потоки показал, что из общего списка молекул следует выделить оптически активные, которые и определяют требуемую точность атмосферной коррекции изображений с использованием RTM-метода. К их числу относятся молекулы H_2O , CO_2 , O_3 , N_2O , CH_4 . Влияние селективного поглощения атмосферными газами на погрешность δT_λ восстановления температуры земной поверхности T_S во всех каналах EOS/MODIS превосходит уровень 0,25 К (здесь и далее T_λ – радиационная или яркостная температура, когда при переводе измеряемых световых потоков в температуру не учтено влияние атмосферы; T_S – температура земной поверхности, восстановленная из измеренных световых потоков с учетом этого влияния). В каналах 20 и 21 влияние селективного поглощения на δT_λ определяется линиями молекул H_2O , N_2O и CH_4 . Наконец, в каналах 31 и 32 достаточно учитывать только вклад линий H_2O .

Непосредственное использование методов расчета *line-by-line* в рамках RTM-метода практически невозможно в силу их трудоемкости, поэтому целесообразно применять проверенные практикой и доступные широкому пользователю упрощенные методы решения уравнения переноса излучения, которые, например, использованы в широко известной программе MODTRAN. В настоящее время программа MODTRAN_v4.x [8] является коммерческим продуктом, но ее предыдущая версия MODTRAN_v3.x [9] и ее коды доступны пользователю. Результаты сравнения значений δT_λ , полученных с помощью MODTRAN_v3.5 и LBLRTM_v11.3, говорят о том, что различия в этих данных составляют менее 0,15 К, а это вполне удовлетворяет практическим требованиям к точности восстановления T_S из космоса.

Согласно модели MT_CKD_v2.1 наряду с селективным поглощением теплового излучения линиями, расположенными внутри спектральных каналов, заметное влияние на измеряемые величины оказывает континуальное поглощение крыльями линий интенсивных полос H_2O , CO_2 , O_3 , N_2 , лежащих вне этих спектральных каналов.

Анализ влияния на δT_λ каждого компонента континуума приводит к следующим выводам. Для каналов 20 и 21 влияние континуумов H_2O и CO_2 на T_S составляет менее 0,05 К. Влияние континуума N_2 на $\delta T_\lambda(\text{cont})$ в канале 20 имеет такой же порядок величины, но заметно возрастает в канале 21, превышая уровень 1 К. Сравнивая значения δT_λ , полученные на основе программ LBLRTM_v11.3 и MODTRAN_v3.5, можно утверждать, что разли-

чия этих значений в каналах 20, 31, 32 составляют менее 0,1 К, но в канале 21 увеличиваются до 0,2 К за счет континуума N_2 .

Очевидно, что еще одним источником ошибок при восстановлении температуры T_S RTM-методом являются ошибки задания профилей метеопараметров, определяющих состояние молекулярно-газовых составляющих атмосферы. Поскольку информация о метеорологических параметрах атмосферы $X(z)$ (где z – высота над земной поверхностью) может содержать ошибки измерений (восстановления) $\delta X(z)$, то, очевидно, следует оценить влияние и этих ошибок на точность восстановления T_S .

Нами эти оценки проведены следующим образом. Для выбранной метеорологической модели атмосферы (например, лето средних широт) вычисляется радиационная температура $T_\lambda(0)$. В заданный профиль вносятся ошибки изменения $\delta X(z)$ и вычисляются $T_\lambda(\delta X)$ для «искаженного» профиля $X(z)$ и $\delta T_\lambda(\delta X) = T_\lambda(0) - T_\lambda(\delta X)$, определяющая степень влияния ошибок задания метеопараметров на величину радиационной температуры. В табл. 1 приведены некоторые результаты этих расчетов.

Таблица 1

Изменение яркостной температуры за счет вариаций профилей метеопараметров: температуры δT_{AIR} и влажности $\delta W_{\text{H}_2\text{O}}$ воздуха, содержания малых атмосферных газов δW_{GAS} . Данные LBLRTM_v11.3

Параметр	Спектральные каналы			
	#20	#21	#31	#32
<i>Лето средних широт</i>				
$\delta T_{\text{AIR}} = +2 \text{ К}$	+0,206	+0,150	+0,632	+0,786
$\delta W_{\text{H}_2\text{O}} = +20\%$	-0,153	-0,010	-0,659	-0,820
$\delta W_{\text{GAS}} = +40\%$	-0,168	-0,151	-0,068	-0,043
<i>Тропики</i>				
$\delta T_{\text{AIR}} = +2 \text{ К}$	+0,241	+0,147	+0,968	+1,170
$\delta W_{\text{H}_2\text{O}} = +20\%$	-0,218	-0,020	-1,199	-1,418
$\delta W_{\text{GAS}} = +40\%$	-0,186	-0,169	-0,075	-0,043

Анализ всего набора этих данных позволяет сформулировать следующие выводы. В каналах 20 и 21 влияние вариации профилей всех метеопараметров на δT_λ по абсолютной величине составляет менее 0,25 К, что позволяет на практике оптимизировать объем вычислений вклада атмосферы в измеряемый параметр. В каналах 31 и 32 значение δT_λ для заданного δW_{GAS} не превышает 0,1 К, поэтому задание априорной информации о содержании в атмосфере малых газовых составляющих в этих каналах не требует высокой точности. Ошибки задания профилей температуры и влажности воздуха являются значимыми ($\delta T_\lambda > 0,5 \text{ К}$). Одинаковый знак у δT_{AIR} и $\delta W_{\text{H}_2\text{O}}$ соответствует разным по знаку значениям δT_λ , т.е. при наличии положительной корреляции между δT_{AIR} и $\delta W_{\text{H}_2\text{O}}$ это может приводить к взаимной (но не гарантированно полной) компенсации ошибок задания ключевых метеопараметров для атмосферной коррекции. Тогда появляется

возможность проводить атмосферную коррекцию данных дистанционных ИК-измерений T_λ на основе метеорологической информации с относительно низкими характеристиками ее точности. Можно достичь лучшей устойчивости RTM-метода к ошибкам задания априорной метеорологической информации, если определять температуру земной поверхности по принципу «split-window» следующим образом:

$$T_S = T_{S,31} - \Delta T_S, \quad \Delta T_S = C_{ERR}(T_{S,32} - T_{S,31}),$$

где $T_{S,31}$ и $T_{S,32}$ – значения температур, восстановленных в каналах 31 и 32; $C_{ERR} \approx 2,0$ – коэффициент, полученный на основе результатов имитационных расчетов.

Восстановление температуры тестовых объектов

В качестве примера применения RTM-метода рассмотрим случай температурного зондирования участка Лугинецкого месторождения (58,15° с.ш., 78,89° в.д.) при двух различных атмосферных условиях. Спутниковые изображения этого участка размером 60×60 км были получены спутниковой системой EOS/MODIS 2 июня (облачность отсутствует, ситуация А) и 5 июня (на изображении присутствуют дым от лесных пожаров и полупрозрачная облачность, ситуация В) 2004 г. В случае А отсутствует облачность, а аэрозоль имеет фоновое содержание.

Прежде всего, рассмотрим результаты применения штатного SW-алгоритма (файлы MOD11_L2) для восстановления температурного поля тестового участка земной поверхности в ситуациях А и В (<http://edcdaac.usgs.gov/datapool/datapool.asp>).

В случае безоблачной атмосферы стандартный алгоритм MOD11 восстанавливает температуру поверхности везде, за исключением лишь нескольких пикселей. Восстановленная температурная пространственная структура данного участка почти идентична пространственной структуре яркостных температур. Для ситуации В восстановленные пространственные температурные и яркостные структуры существенно искажены дымом и облачностью, при этом значительно возрастает количество пикселей, где данные MOD11 отсутствуют. Отметим, что результаты восстановления в этом случае кроме пропусков содержат и заниженные значения T_S , лежащие в пределах облачности.

Осуществим с помощью RTM-метода «заполнение» пропусков в данных о T_S и после атмосферной коррекции на участках, где тепловое излучение поверхности в достаточной степени проходит через дым и аэрозоль, восстановим T_S и воспроизведем температурную структуру, аналогичную случаю безоблачной атмосферы.

Для этой цели используем разработанный в ИОА СО РАН программный комплекс [5], с помощью которого был произведен расчет искажающих характеристик атмосферы для канала $\lambda = 11$ мкм, осу-

ществлена коррекция измерений яркостных температур T_{11} и получено скорректированное пространственное распределение T_S .

Используя эти результаты, оценим температуру T_F пламени факельных установок:

$$B(T_\lambda) = I_{HOT} + I_{BG};$$

$$I_{HOT} = S(\theta)\epsilon_\lambda^F B(T_F)P_\lambda;$$

$$I_{BG} = I_{SRF} + I_{ATM} + I_{RFL} + I_{SCT},$$

$$B(T_F) = \frac{B(T_\lambda) - I_{BG}}{S(\theta)\epsilon_\lambda^F P_\lambda},$$

где $B(T_\lambda)$ – функция Планка; T_λ – яркостная температура теплового излучения; I_{HOT} – интенсивность ослабленного атмосферой излучения факела; I_{BG} – интенсивность излучения фона; I_{SRF} – вклад ослабленного атмосферой теплового излучения поверхности; I_{ATM} – вклад теплового излучения атмосферы; I_{RFL} – вклад отраженных от поверхности падающих на нее потоков теплового и солнечного излучений; I_{SCT} – вклад рассеянных атмосферой потоков теплового и солнечного излучений; $P_\lambda = \exp\{-\tau_\lambda\}$ – функция пропускания атмосферы; τ_λ – оптическая толщина атмосферы; $S(\theta)$ – относительная площадь факела по отношению к размеру пикселя.

Табл. 2 иллюстрирует результаты решения этой задачи.

Таблица 2

Результаты восстановления температуры пламени (в кельвинах)

Ситуация	ТПП	P_λ, τ_λ	T_{11}	T_A	T_F
А	300,0	0,822 (0,196)	297,4	334,0	1252
В	302,0*	0,344 (1,067)	293,8	321,0	1261

* ТПП = $T_{11,COR}$ – температура восстановлена после атмосферной коррекции измерений в канале $\lambda = 11$ мкм с помощью RTM-метода.

Приведенные обозначения имеют следующий смысл: ТПП – температура фоновой поверхности, окружающей температурную неоднородность; P_λ, τ_λ – значение функции пропускания и оптической толщи атмосферы; T_{11} и T_A – температуры пикселя, содержащего факел, оцененные по измерениям в каналах $\lambda = 11$ и 4 мкм (без коррекции RTM-методом), и T_F – восстановленная с помощью RTM-метода температура факела (при условии, что диаметр пламени равен 19 м).

Таким образом, результаты восстановления температуры T_F пламени факела близки, несмотря на значительные различия атмосферных условий спутниковых наблюдений. При этом следует отметить, что без проведения атмосферной коррекции результаты восстановления температуры горения факела для ситуаций А и В существенно различаются и составляют соответственно 1192 и 956 К, т.е. атмосферные искажения измерений из космоса температуры горения факела для ситуации В превосходят 300 К.

Адаптивная атмосферная коррекция аэрокосмических изображений земной поверхности с использованием картографической информации

При тематическом анализе изображений поверхности Земли алгоритмами автоматической классификации и распознавании образов актуальна задача предварительной обработки с целью устранения искажений, обусловленных аэрозольной составляющей атмосферы (дымка, полупрозрачные туманы, облака). Сложность коррекции видеоданных заключается в том, что передаточный оператор атмосферы или функция размытия точки (ФРТ) в момент регистрации изображения, как правило, неизвестны. Конкретно сложившаяся на момент пролета спутника оптическая погода может существенно отличаться от среднестатистической, или отсутствуют источники информации о метеорологическом и оптическом состоянии атмосферы, зная которые эти условия можно воспроизвести.

Для решения задачи атмосферной коррекции таких изображений нами (например, в [10]) рассмотрен способ восстановления ФРТ по информации, извлекаемой из самого размытого изображения, предполагая: на основе картографической информации известно, что наблюдаемая территория содержит квазиоднородные ландшафтные участки (поле, лес, водная поверхность, пашня и т.п.) и градиентные перепады яркостей соседствующих разнородных ландшафтных образований (вода—берег, просека—лес, дорога—обочина, участки теней—света хребтов и лощин и т.п.).

Этапы алгоритма решения задачи восстановления ФРТ, использованного нами, схематично сводятся к следующему. Выделяется относительно стационарный участок экранированного рассеивающей средой изображения, в пределах которого ФРТ не меняет свою форму; дифференцируется полученное изображение, и строится гистограмма распределения значений оцениваемых градиентов; декомпозируется полученная гистограмма на два распределения с весовыми множителями, одно из которых описывает

распределение экстремумов градиентов, а второе — все остальные не градиентные перепады яркостей. На следующем шаге идентифицируется смешанное распределение и, после того как смесь идентифицирована, строится байесово решающее правило проверки двух гипотез: H_1 — градиент и H_0 — не градиент, которое выявит на изображении все участки видеоданных, связанных с наличием размытых границ объектов с высоким контрастом.

На основе полученных градиентных срезов реконструируется функция размытия точки и осуществляется восстановление изображения одним из стандартных методов, например с помощью инверсного фильтра или псевдообращения матрицы ФРТ.

Пример восстановления изображения с моделируемым замутнением

Для иллюстрации этого подхода атмосферной коррекции было выбрано изображение земной поверхности, полученное спутником «Ресурс» с разрешением 45×45 м в пикселе. Для моделирования замутнения «туманом» использовалась линейная модель свертки изображения с ФРТ в виде суммы двух гауссовых функций плотности с весами $p = 0,1$, $q = 0,9$ и среднеквадратическими отклонениями $\sigma_p = 1,0$ и $\sigma_q = 4,0$ соответственно. Замутненный вариант исходного изображения приведен на рис. 1, а.

Результат его обработки алгоритмом пространственного дифференцирования и выделения градиентными перепадами радиояркостей представлен на рис. 1, б. На основе байесова решающего правила проверки гипотез из этих данных выделяются экстремальные градиентные перепады яркостей, представленные на рис. 1, в. Сканируя интенсивности размытого изображения по срезам, ортогональным выделенным линиям контуров экстремальных перепадов яркостей, получаем реализации функции размытия края, зная которые можно реконструировать ФРТ.

С помощью синтезированной таким образом ФРТ методом инверсной фильтрации восстанавливается размытый участок изображения. На рис. 2, в приведен результат восстановления замутненного

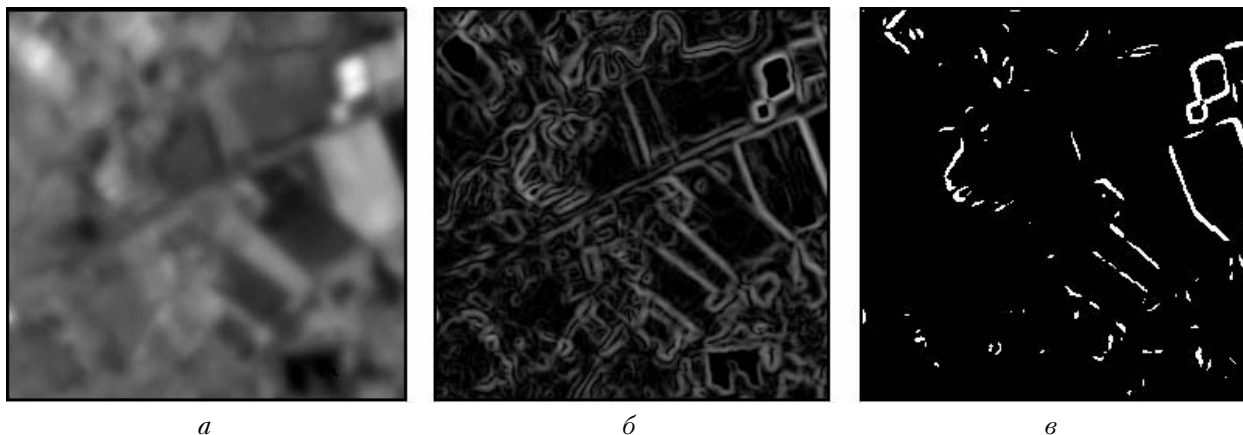


Рис. 1. Моделируемое изображение (а); градиенты контрастов (б); экстремумы градиентов (в)

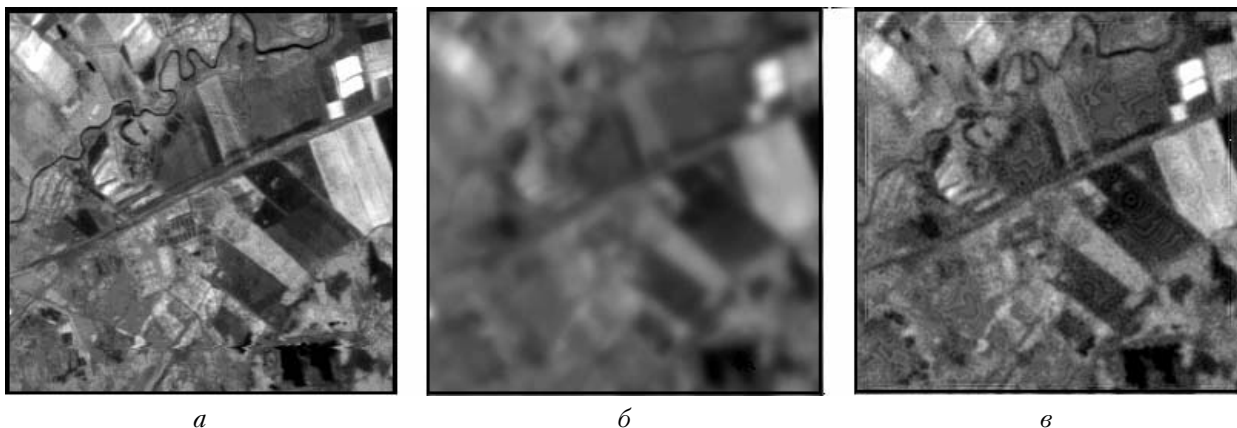


Рис. 2. Фрагмент исходного изображения (а), размытое (б) и восстановленное (в) изображения

фрагмента рис. 2, б, а на рис. 2, а, для сравнения, показано исходное неискаженное изображение. Сравнение размытого и исходного изображений убеждает в эффективности рассмотренного нами в [10] подхода.

Заключение

RTM-метод с использованием оперативных спутниковых метеоданных о состоянии атмосферы в момент спутниковых наблюдений позволяет осуществлять учет искажающего влияния молекулярной атмосферы с погрешностью менее 0,5 К. Применение RTM-метода по принципу «split-window» делает это решение устойчивым к ошибкам задания априорной метеорологической информации.

При проведении температурного зондирования земной поверхности из космоса в сложных оптико-метеорологических условиях наблюдений RTM-метод имеет значительные преимущества перед стандартными алгоритмами обнаружения температурных неоднородностей.

В случае, когда невозможно реконструировать оптическое состояние атмосферы в момент проведения аэрокосмической съемки, может быть рекомендован алгоритм адаптивной атмосферной коррекции с использованием априорной картографической информации, реализованный в ИОА СО РАН.

Авторы статьи выражают глубокую признательность академику Ю.И. Шокину, д.т.н. Е.А. Лупяну и д.с.-х.н. Г.Н. Коровину за многолетнюю поддержку этих исследований.

1. Афонин С.В., Белов В.В. Направления развития и результаты пассивного спутникового зондирования системы

«атмосфера – земная поверхность» в Институте оптики атмосферы СО РАН // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 12. С. 1031–1041.

2. Becker F., Li Z.L. Towards a local split window method over land surface // Int. J. Remote Sens. 1990. V. 11. N 3. P. 369–393.
3. Thome K., Palluconi F., Takashima T., Masuda K. Atmospheric correction of ASTER // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. 1998. V. 36. N 4. P. 1199–1211.
4. Sobrino J.A., Jiménez-Muñoz J.C., Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5 // Remote Sens. Environ. 2004. V. 90. N 4. P. 434–440.
5. Афонин С.В., Соломатов Д.В. Методика учета оптико-метеорологического состояния атмосферы для решения задач атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21. № 2. С. 147–153.
6. Wang P., Liu K.Y., Cwik T., Green R. MODTRAN on supercomputers and parallel computers // Parallel Comput. 2002. V. 28. N 1. P. 53–64.
7. Головкин В.А. Современные технологии устранения влияния атмосферы на многоспектральные измерения высокого пространственного разрешения из космоса // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 2. С. 11–23.
8. Berk A., Anderson G., Acharya P., Hoke M., Chetwynd J., Bernstein L., Shettle E., Matthew M., Adler-Golden S. MODTRAN4 Version 3 Revision 1 User's Manual, Air Force Res. Lab. Hanscom Air Force Base, Mass., 2003.
9. Kneizys F.X., Abreu L.W., Anderson G.P., Chetwynd J.H., Shettle E.P., Berk A., Bernstein L.S., Robertson D.C., Acharya P., Rothman L.S., Selby J.E.A., Gallery W.O., Clough S.A. The MODTRAN 2/3 Report and LOWTRAN 7 Model, Phillips Laboratory, Hanscom AFB contract F19628-91-C-0132 with Ontar Corp., 1996.
10. Протасов К.Т., Белов В.В., Артамонов Е.С. Адаптивное восстановление космических снимков подстилающей поверхности Земли с использованием априорной информации // Вычисл. технол. 2000. Т. 5. Спец. выпуск. С. 69–81.

S.V. Afonin, V.V. Belov, Yu.V. Gridnev, K.T. Protasov. Passive satellite sensing of the Earth's surface in the optical wavelength range.

We consider the main results, obtained at the Institute of Atmospheric Optics SB RAS in context of the problems of passive satellite sensing of the Earth's surface. The emphasis is on results of studies, obtained during the last years and associated with the creation of programming-information means, allowing us to take into account the influence of the atmosphere on the measured characteristics of light beams with the help of satellite- or aircraft-based optical-electronic devices.