

Задача определения из космоса облаков физиологически активных веществ (ФАВ) в приземном слое атмосферы

Н.А. Князев ¹, А.М. Антохин ², С.А. Втюрин ¹, Ю.А. Палатов ²

¹ *Институт космических исследований РАН,
117997 Москва, Профсоюзная 84/32, ИКИ РАН*

E-mails: nknyazev@iki.rssi.ru

² *ФГУ "27 Научный Центр МО РФ"
105005 Москва, Бригадирский пер., 13, ФГУ «27 НЦ МО РФ»*

Рассматриваются основные научно-технические направления решения задачи определения из космоса облаков физиологически активных веществ (ФАВ) в приземном слое атмосферы. Приведены результаты прямой задачи - расчета уходящего инфракрасного (ИК) в диапазоне 3-4 мкм излучения системы "атмосфера- поверхность" с разными уровнями концентраций различных видов ФАВ в облаке. В соответствии с этими результатами оценивается возможность выявления и идентификации ФАВ по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса. Предлагается проектный облик перспективного спутникового ИК спектрометра для решения целевой задачи выявления облаков ФАВ в приземном слое атмосферы.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, спектрометрия, экология, спутниковая аппаратура, моделирование

В Российской Федерации в настоящее время функционирует свыше 10 тысяч потенциально опасных химических объектов, относящихся к топливно-энергетическому комплексу, цветной и черной металлургии, химической, целлюлозно-бумажной, пищевой и другим отраслям промышленности и сельского хозяйства (при этом 70% из них расположены в 146 городах с населением более 100 тысяч человек). В атмосферный воздух ежегодно продолжает поступать около 20 млн. тонн химических веществ, а накопленные токсичные отходы составили более 84 млн. тонн. По данным международных организаций, 75% всех смертельных случаев, возникающих в результате аварий, связаны с воздействием химических факторов. Кроме того, текущее десятилетие характеризуется все возрастающей угрозой террористических актов с применением химических, биологических и радиоактивных веществ - или иначе физиологически активных веществ (ФАВ).

Для обеспечения химической и биологической безопасности России разработана Федеральная Целевая Программа "Национальная система химической и биологической безопасности Российской Федерации (2009-2013 годы)", принятая Постановлением Правительства РФ от 27 октября 2008 г. № 791, которая предусматривает совершенствование системы химического и биологического мониторинга.

По данным Контрольного управления Президента Российской Федерации в настоящее время в сфере промышленного, оборонно-промышленного и топливно-энергетического комплексов функционирует более 3,6 тысячи опасных химических объектов. Суммарная площадь, на которой может возникнуть очаг химического заражения в результате возможных аварий на этих объектах, составляет 300 тысяч кв. км (с населением ~ 54 миллионов человек). Поэтому весьма актуально создание системы химического, биологического и радиоактивного мониторинга, обеспечивающей оперативный контроль экологической обстановки на территориях промышленных регионов России и сопредельных стран, в которой важная роль отводится космическим средствам и методам дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

В отличие от большинства задач ДЗЗ из космоса, предполагающих использование, в первую очередь, средств высокодетального наблюдения, решение ряда задач экологического мониторинга, контроля за чрезвычайными ситуациями предполагает проведение спутниковых спектрометрических измерений в различных диапазонах спектра с повышенными требованиями к радиометрическому и спектральному разрешению. При этом выявление химической обстановки (содержания ФАВ в нижних слоях атмосферы) во многом определяется спецификой таких малых газовых составляющих (МГС) атмосферы, опасных для здоровья и жизни человека при весьма их малых концентрациях (десятые, сотые и меньше процентов содержания в миллиграммах на литр).

Обсуждение вопроса возможности индикации той или иной газовой компоненты в нижних слоях атмосферы космическими средствами ДЗЗ носит условный характер, пока не будет проведено моделирование регистрируемого на спутнике уходящего от поверхности излучения. Такой подход предопределяет и решение вопроса о создании целевой спутниковой аппаратуры- только на основе численного моделирования для того или иного участка спектра с учетом различных мешающих факторов (вариации состояния атмосферы и поверхности) возможен выбор спектрального диапазона, необходимого спектрального и радиометрического разрешения, реализация которых в конструкции спутникового прибора обеспечат успешное решение целевых задач.

В части выбора участка спектра для зондирования приповерхностного слоя атмосферы здесь необходимо сделать следующее замечание- зондирование поверхности и приповерхностного слоя атмосферы из космоса возможно только в "окнах" прозрачности. Это обусловлено физикой процесса переноса электромагнитного излучения: для ИК диапазона спектра при большей оптической толщине атмосферы уходящее ИК излучения формируется во все большей степени собственным излучением атмосферы- поверхность просто не видна. Выбор конкретного спектрального диапазона при создании целевой аппаратуры зондирования МГС обуславливается задачами определения исследуемой газовой компоненты, имеющей свои спектральные особенности в этом участке спектра- это наличие спектральных линий поглощения зондируемой газовой компоненты в рассматриваемом участке «окна» прозрачности.

В качестве анализируемой возможности индикации в нижних слоях атмосферы космическими средствами ДЗЗ здесь рассматриваются фосфорорганические соединения (ФОС), а, именно, некоторые эфиры метилфторфосфоновой кислоты, отличающиеся опасностью для здоровья и жизни человека при весьма малых их концентрациях в атмосфере. Для ФАВ исследуемого класса инфракрасные спектры молекул ФОС имеют сложную структуру колебательно-вращательных переходов, располагающихся, как правило, в средневолновой части инфракрасного диапазона $3000-700\text{ см}^{-1}$): характерны С-Н колебания, проявляющиеся в области $2600-3300\text{ см}^{-1}$, Р-С колебания ($900-700\text{ см}^{-1}$); Р-О и Р-S колебания- ($1080-1415\text{ см}^{-1}$); Р=S- ($550-860\text{ см}^{-1}$); Р-ОС- (1000 см^{-1}); Р-О- ($750-850\text{ см}^{-1}$); Р-О-С - ($350-400\text{ см}^{-1}$).

В качестве примера здесь анализируется возможность их индикации в диапазоне 3- 4 мкм («окно» прозрачности атмосферы 3.6- 3.9 мкм и «микроокна» от 3 мкм). Заданный спектральный диапазон при наличии «окон» отличается, в целом, относительно низкой прозрачностью атмосферы, с присутствием вдали мощных полос водяного пара 2,6 мкм и углекислого газа CO_2 2,7 мкм, и полосы поглощения метана CH_4 в районе 3,3 мкм. Предполагаемое отсутствие характерных спектральных особенностей некоторых рассматриваемых здесь видов ФОС (С-Н колебания), тем не менее, не исключает возможности

использования этого диапазона спектра в силу относительно высокой эффективности (чувствительности) применяемых ИК приемников.

Ниже представлены результаты расчетов для среднеклиматической модели атмосферы- лето- средник широты. Расчеты функций пропускания атмосферы (направление- надир) выполнялись с учетом вертикальных профилей концентраций атмосферных газов с использованием базы атласа спектральных линий HITRAN [1- 2] в соответствии с методикой и алгоритмами [3]. Также выполнялся расчет функций пропускания атмосферы с введением в нижнем слое атмосферы некоторых рассматриваемых здесь видов ФАВ с имеющимися у авторов их спектрами с варьированием их концентраций у поверхности Земли от 10^{-1} до 10^{-6} мг/л.

Для рассчитанных функций пропускания выполнялся расчет спектрального хода уходящего излучения $I(\lambda)$ в [вт/(см² мкм стер)]. Расчеты выполнены в соответствии с уравнением переноса в интегральном виде (1):

$$I(\lambda) = \varepsilon_0(\lambda) B_\lambda(T_0) P_\lambda(0, L) - \int_0^1 B_\lambda[T(R)] \frac{\partial P_\lambda(0, R)}{\partial R} dR, \quad (1)$$

где $\varepsilon_0(\lambda)$ – излучательная способность поверхности (элемента ландшафта) в направлении зондирования;

$B_\lambda(T)$ – функция Планка при температуре T ;

$P_\lambda(0, R)$ – функция пропускания атмосферы на пути зондирования.

T_0 – температура поверхности;

$T(R)$ – вертикальный профиль температуры атмосферы;

R – высота в относительных единицах давления ($R = p/p_0$),

p_0 – давление у поверхности).

Таким образом были получены в рассматриваемом спектральном диапазоне интенсивности уходящего ИК излучения собственно атмосферы и атмосферы со слоем ФАФ с варьируемой её концентраций у поверхности. Нагляднее выглядят результаты расчетов уходящего излучения в радиационных температура T_r ($T_r = B^{-1}(\lambda, T)$ - обратная функция Планка).

Рис. 1 иллюстрирует результаты расчетов- вклад в регистрируемое на спутнике излучение облаков различных видов ФАВ (условно: газы А-Д) при заданной для них концентрации 10^{-3} мг/л (здесь представлена разница $\Delta T_r = T_r(\text{без ФАВ}) - T_r(\text{с ФАВ})$). Отметим, что вклад различных видов ФАВ при заданной концентрации 10^{-3} мг/л достаточно велик- до 1,50 2,0°К, что позволяет судить о возможности их идентификации спутниковыми средствами наблюдения.

Рис. 2 демонстрируют возможность выявления концентраций ФАВ в приземном слое по спутниковым измерения уходящего излучения в диапазоне 2- 4 мкм. Для модельных расчетов моделировались в приземном слое облака ФАВ с концентрациями 1×10^{-4} , 1×10^{-3} , 1×10^{-2} мг/л. Представленные здесь результаты демонстрируют принципиальную возможность идентификации облаков отдельных видов ФАВ (зарина, VX, иприта) и оценки их концентраций в приземном слое спутниковыми средствами пассивного зондирования в заданном спектральном диапазоне 2700-2900 см⁻¹.

Результаты моделирования (прямой задачи) вклада приземных облаков ФАВ при различных концентрациях представляются достаточно надежными: вариации температуры поверхности и атмосферы в силу их неселективности по спектру для заданного достаточно узкого спектрального участка подлежат учету с использованием хорошо развитых и опробованных методов. В связи с отсутствием практически в выбранном участке спектра линий водяного пара влияние вариаций влажности, по-видимому, не существенны (подлежит отдельному исследованию).

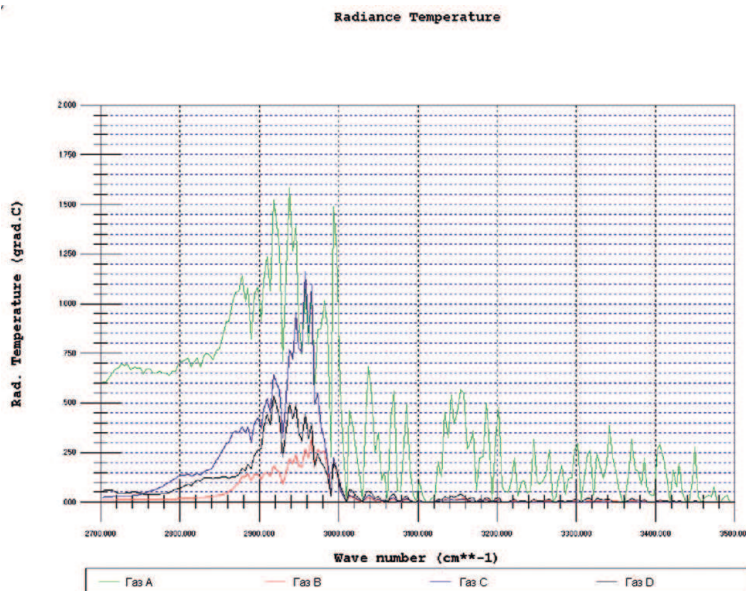


Рис. 1. Температурный контраст отдельных газов при концентрации 10^{-3} мг/л.

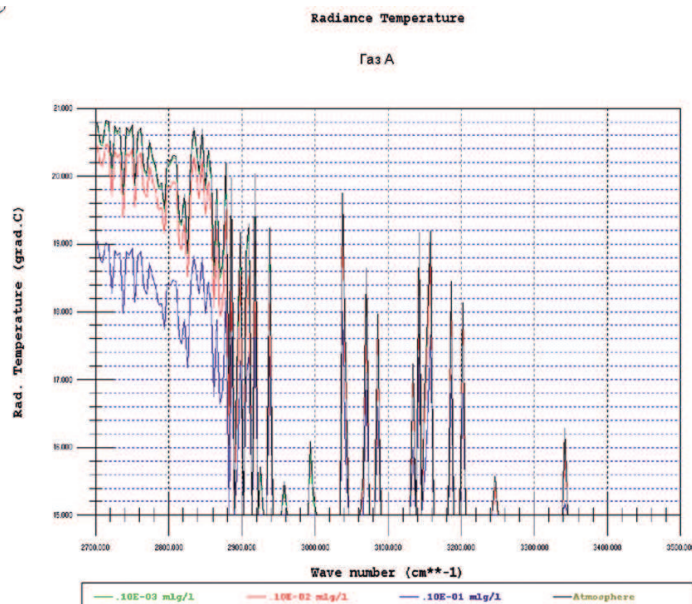


Рис. 2. Вариации температурного контраста при изменениях концентрации газа А.

Результаты моделирования возможности определения ФАВ по спутниковым измерениям ДЗЗ могут быть одними из исходных данных для определения технических требований к перспективной целевой спутниковой аппаратуре.

Исходными данными при определении тактико- технических требований к перспективной спутниковой аппаратуре являются пространственно-временные требования к космической информации для решаемой целевой задачи, требования к спектральной разрешению, спектральной полосе в заданном спектральном диапазоне и требования к радиометрическим характеристикам (динамический диапазон, радиометрическое абсолютное и/или относительное разрешение). Учет существующих и перспективных технологических возможностей создания спутниковой аппаратуры с выбором необходимой оптической схемы предопределяет реализуемость тактико- технических требований при изготовлении целевого спутникового прибора.

Пространственно-временные требования к космической информации (КИ) для выявления облаков ФАВ по возможным их размерам дают оценку 20- 30 м. Эта величина при определении необходимых контрастов в спутниковых ИК измерениях позволит в соответствии с методами обработки изображений выявить и оконтурить облако с минимальными размерами ~ 100 - 150 м. Временные требования к КИ могут быть удовлетворены при известной полосе захвата (сканирования) развертыванием соответствующей спутниковой группировки с заданными орбитальными параметрами.

При высоте орбиты ~ 500 км спутника с целевой нагрузкой простейший расчет с учетом геометрии съемки позволяет определить мгновенное угловое поле зрения прибора $\sim 1''$. Выбор приемника спектрометра (матриц или линейки в зависимости от оптической схемы и вида сканирования поперек орбиты) с заданным количеством приемных элементов предопределяет полосу захвата и требования к входной оптике. При количестве ~ 2000 элементов в строке необходим объектив с угловым полем зрения $\sim 0.2^\circ$, что обеспечивает с орбиты с высотой 500 км полосу захвата ~ 44 - 45 км, с выбором приемника с 4000 элементами в строке (что представляется реальным в современных разработках), получаем с учетом кривизны поверхности Земли полосу ~ 95 - 100 км. Увеличение полосы захвата может быть обеспечено использованием более совершенных приемников или размещением на борту спутника кратного количества измерительных головок.

Мгновенное поле зрения (пространственное разрешение) предопределяет постоянную времени измерения $\tau_{\text{изм.}}$. При заданном выше значении в 20- 30 м в соответствии с существующими методами оценки получим величину $\tau_{\text{изм.}} \sim 2.5$ мсек.

Эта величина предопределяет выбор спектральной схемы разрабатываемого спектрометра. Для выбранного спектрального диапазона 3- 3.7 мкм или "окна" 3.5- 3.7 мкм использование Фурье- спектрометра представляется нереальным. Предпочтительнее, как и во многих перспективных разработках спутниковых видеоспектрометров, оказывается выбор в качестве диспергирующего элемента призмы или одномерной дифракционной решетки. Особенностью этих элементов является сохранение ими пространственного распределения светового потока по одной из координат и развертывание по другой координате плоского потока спектральной линии в зависимости от ее длины. С использованием матрицы в качестве приемника таким образом обеспечивается развертка по спектру по одной из координат, а в элементах строки по другой координате обеспечиваются последовательные измерения попиксельно в полосе захвата (сканирования) спектрометра. Приведенная спектральная схема была реализована ранее в конструкции видеоспектрометра МОЗ-Обзор модуля "Природа" ОС "Мир", изготовленного в Германии по совместному со специалистами ИКИ РАН техническому заданию.

Таблица 1. Технические требования к сканирующему ИК спектрометру

<i>Характеристика</i>	<i>Значение</i>	<i>Примечание</i>
Назначение	Выявление и идентификация облаков ФАВ по измерениям из космоса	
Спектральный диапазон, мкм	3- 3.7	Микроокна прозрачности, возможно дополнительно диапазон 9-10 мкм
Количество спектральных каналов	~ 100	Определяется количеством и видом ФАВ, учет атмосферы
Спектральное разрешение, см ⁻¹	~ 2- 10	
Мгновенное поле зрения, "	~ 1	
Пространственное разрешение, м (с высоты орбиты ~ 500 км)	~ 20- 30	
Полоса захвата (сканирования), км	~ 45/ 100	Количество элементов в строке матрицы приемника
Радиометрическое разрешение, °К	~ 0.1	
Информативность, Мбит/сек.	~ 480/ 960	

При низком количестве спектральных каналов и технологическими ограничениями использования многомерных матриц в связи с относительно низким пропусканием оптики с дифракционной решеткой предпочтительней может оказаться схема со сборкой в матрицу линеек с узкополосными фильтрами на заданные спектральные каналы.

Количество элементов в матрице при заданной постоянной времени измерений позволяет дать оценку информационного потока с выбором бортовой телеметрии. При 12 битовой телеметрии с матрицей, например, 2000 x 100 элементов информационный поток с прибора может быть оценен в величину 960 Мбит/сек. Эта величина представляется критичной для существующих отечественных телеметрических систем, что может обусловить разработку и изготовление бортового вычислительного комплекса (БВК), обеспечивающего сжатие информации (спектральных видеоизображений). Разработка БВК представляется целесообразной как для сжатия информации, так и бортовой целевой обработки измерений, что позволит в итоге обеспечить приём как сжатой информации, так и обработанной (например, уже в виде изображений).

Приведенные выше оценки тактико- технических требований к целевому прибору-спутниковому сканирующему ИК спектрометру могут быть приведены в табличном виде (Таблица 1.).

Литература

1. McClatchey R.A., Benedict W.S., Clough S.A., Burch D.E. et al. AFCRL Atmospheric Absorption Line Parameters Compilation. AFCRL-TR-0096. 1973. 108 p.
2. Rothman L.S., Gamache R.R., Tipping R.H. et al. The HITRAN Molecular Database: Editions of 1991 and 1992. *J. Quant. Spectrosc. And Rad. Transfer*, 1992. Vol. 48, p. 469.
3. Князев Н.А. О селективном поглощении атмосферы при дистанционном термическом зондировании Земли из космоса. *Иссл. Земли из космоса*. 1988. № 4, с. 12-24.

The task of determining from the space clouds of physiologically active substances in the atmospheric surface layer

N.A. Knyazev ¹, A.M. Antohin ², S.A. Vtyurin ¹, Yu.A. Palatov ²

¹ *Space Research Institute RAS
117997 Moscow, 84/32 Profsoyuznaya str.*

E-mails: nknyazev@iki.rssi.ru

² *FGU "27 Research Center of Ministry of Defense of RF"*

The main scientific and technical directions for solving of the problem of determining of the clouds of physiologically active substances in the lowest atmospheric layer are considered. The results of the direct problem, the calculation of the outgoing infrared (IR) in the range of 3-4 microns radiation in the "atmosphere-surface" system with different levels of concentrations of different types of physiologically active substances in the cloud are presented. In line with these results, estimated the possibility of detection and identification of physiologically active substances by using remote sensing from space. Proposed project look promising satellite infrared spectrometer for solutions target cloud detection of physiologically active substances in the surface layer of the atmosphere.

Keywords: remote sensing, spectrometry, ecology, satellite equipment, simulation.