

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ
И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.29

С.В. Афонин, А.Д. Быков, Ю.В. Гриднев, В.В. Зуев, М.Ю. Катаев, В.С. Комаров, А.А. Мицель,
О.В. Науменко, К.М. Фирсов, Т.Ю. Чеснокова, А.А. Чурсин

ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВОГО ИК-РАДИОМЕТРА HIRS/2

Проведен анализ возможности зондирования вертикальных профилей температуры воздуха и общего содержания газов H₂O, O₃, N₂O в вертикальном столбе атмосферы над территорией Томской и Новосибирской областей при использовании данных HIRS/2. Описаны регрессионные методы восстановления общего содержания H₂O. Рассмотрено влияние неточности исходной спектроскопической информации на погрешность восстановления профилей температуры. Определены первоочередные задачи, решение которых обеспечит создание надежных методик восстановления метеопараметров атмосферы.

Введение

Спутниковые приборы-зондирующие находят все большее применение для исследования Земли из космоса. В настоящее время они широко используются для решения задач в различных отраслях человеческой деятельности – сельском хозяйстве, метеорологии, экологическом мониторинге окружающей среды, в военных целях.

В 1997 г. в ИОА СО РАН установлена станция приема данных с метеорологических спутников серии NOAA (NOAA-12, NOAA-14). Каждый спутник имеет околополярную, солнечно-синхронную орбиту с периодом обращения порядка 102 мин [1]. Два действующих спутника дают в среднем 4 ежедневных наблюдения для большинства точек земной поверхности. На борту этих спутников установлены 4 прибора: HIRS/2, AVHRR, MSU и SSU. В статье представлены результаты исследования возможностей прибора HIRS/2 по определению общего содержания газов и профиля температуры атмосферы.

Основные характеристики HIRS/2

Прибор HIRS/2 является модификацией HIRS/1, работавшего на спутнике NIMBUS-6. Этот прибор сконструирован отделом аэрокосмической оптики Международной телеграфно-телефонной корпорации (ITT, Fort Wayne, Indiana). HIRS/2 регистрирует излучение в 19 инфракрасных и одном видимом канале, характеристики и предназначение которых приведены в табл. 1, 2. Некоторые ключевые технические параметры прибора приводятся в табл. 3. Все эти данные взяты из работы [2] и из сети Интернет.

Таблица 1

Спектральные характеристики HIRS/2 (NOAA-14)

Номер канала	Центр ν , см ⁻¹	Центр, мкм
1	669	14,95
2	679	14,72
3	690	14,5
4	703	14,21
5	703	14,21
5	714	13,99
6	732	13,65
7	750	13,34
8	899	11,1
9	1028	9,72
10	796	12,56
11	1361	7,35
12	1481	6,75
13	2191	4,56
14	2207	4,53
15	2236	4,47
16	2268	4,41
17	2420	4,13
18	2512	3,98
19	2648	3,77
20	14367	0,7

Таблица 2

Каналы прибора HIRS/2 и их предназначение [2]

Номер канала	Длина волны, мкм	Предназначение
1–7	14,95–13,35	Профили температуры
5–7		Высота и количество облаков
8	11,11	Температура поверхности, облака
9	9,71	Полное содержание озона
10–12	8,16–6,72	Профили влажности, обнаружение тонких перистых облаков
13–17	4,57–4,24	Профили температуры
18–20	4,00–0,69	Облака, температура поверхности при частично-облачном небе

Таблица 3

Параметры HIRS/2 [2]

Параметр	Значение
Поперечный скан	$\pm 49,5^\circ$ (± 1125 км)
Время сканирования	6,4 с на одну линию
Число шагов	56
Оптическое поле зрения	$1,25^\circ$
Шаг по углу	$1,8^\circ$
Шаг по времени	100 мс
Разрешение на поверхности (в надире)	17,4 км в диаметре
Разрешение на поверхности в конце скана	58,5 км поперек скана \times 29 км вдоль скана
Скорость сбора данных	2880 бит в 1 с

Калибровка данных

Общая методология калибровки спутниковых радиометров изложена в [3]. Процесс калибровки прибора описан в [2]. Калибровка проводится во время полета каждые 256 с (40 линий сканирования) и заключается в наведении на две мишени на спутнике (горячая мишень с $T = 290$ К и холодная с $T = 260\text{--}270$ К) и на космос ($T = 0,3$ К). Температура мишеней определяется с помощью вмонтированных в них термисторов. Из-за больших температурных градиентов, вызванных влиянием Солнца, температура холодной мишени не может быть определена с требуемой точностью, поэтому для практической калибровки используются только горячая мишень и космос ($T = 0,3$ К).

Практически калибровка производится следующим образом: сначала определяется температура T_{wt} горячей мишени, для чего используются показания четырех термисторов (выборка из пяти для каждого термистора), записанные в элемент номер 58 линии показаний HIRS/2 (всего для калибровки, как отмечалось выше, используется 40 линий, т.е. $40 \times 5 = 200$ показаний для каждого термистора). Усредненный отсчет термистора определяется по формуле

$$X_k = \frac{1}{200} \sum_{i=1}^{40} \sum_{j=1}^5 X_{ij}, \quad k = 1, 2, 3, 4.$$

Температура T_k для каждого из пяти термисторов определяется по простой формуле:

$$T_k = a_0 + a_1 X_k + a_2 X_k^2 + a_3 X_k^3 + a_4 X_k^4,$$

где X_k – среднее из 200 показаний для k -го термистора, а a_j – коэффициенты преобразования, приведенные в таблицах [2] и на страницах Интернет.

Температура горячей мишени определяется как среднее от показаний всех пяти термисторов:

$$T_{wt} = \frac{1}{5} \sum_{k=1}^5 T_k.$$

Определив величину T_{wt} , можно определить поток излучения N , принимаемый некоторым каналом

от мишени, по формулам и таблицам, приведенным в [2]. Отметим, что существуют два способа определения этого потока:

1. Вместо величины T_{wt} используется некоторая эффективная температура T_{ef} , вычисляемая по формуле

$$T_{ef} = b + c T_{wt},$$

где коэффициенты b и c протабулированы для каждого спутника и приводятся в [2] и на страницах Интернет.

Далее поток излучения вычисляется по формуле Планка

$$N_w = c_1 v_i^3 [\exp(c_2 v_i / T_{ef}) - 1],$$

где $i = 1, 19$ – номера каналов, а c_1 и c_2 – стандартные коэффициенты в формуле Планка, $c_1 = 1,1910659 \cdot 10^{-5}$ мВт/(м² · ср · см⁻¹), $c_2 = 1,438833$ см · К.

2. Поток излучения можно определить и через аппаратные функции каналов:

$$N(T) = \frac{\int_{v_1}^{v_2} B(v, T) F(v) dv}{\int_{v_1}^{v_2} F(v) dv},$$

где $B(v, T)$ – функция Планка, а $F(v)$ – функция спектрального отклика канала (протабулирована в [2] и в Интернет).

Окончательная формула для пересчета показаний прибора X_E в поток излучения N_E , принимаемый от Земли, имеет вид

$$N_E = M X_E + I,$$

где M – так называемая крутизна канала; I – смещение канала. Методика определения этих величин подробно изложена в [2]:

$$M = \frac{N_{sp} - N_w}{X_{sp} - X_w}; \quad I = N_{sp} - M X_{sp},$$

где N_{sp} и N_w – соответственно потоки излучения от космоса и горячей мишени; X_{sp} и X_w – соответствующие усредненные отсчеты приборов, вычисляемые по формулам:

$$X_{sp} = \frac{1}{48} \sum_{j=1}^{48} X_{sp}(j); \quad X_w = \frac{1}{56} \sum_{j=1}^{56} X_w(j).$$

Чувствительность каналов HIRS/2 к вариациям атмосферных параметров

Изменчивость интенсивности восходящего излучения, которую регистрируют радиометры

HIRS/12 и HIRS/14, обусловлена, главным образом, двумя факторами – вариациями вертикальных профилей температуры и подстилающей поверхности, а также наличием или отсутствием облачности и различием их типов. Изменчивость профилей концентрации газов оказывает существенно меньшее влияние на вариации интенсивности.

В табл. 4, 5 показана чувствительность каналов HIRS/14 к изменчивости температуры и общего содержания атмосферных газов для двух метеомоделей. Интенсивность уходящего излучения атмосферы, регистрируемая радиометром, рассчитывалась с

учетом аппаратной функции каждого канала и пересчитывалась затем в радиационные температуры. Во второй колонке приведена частота центра полосы пропускания светофильтра, в третьей – радиационная температура, а в последней колонке – изменчивость радиационной температуры при изменении всего температурного профиля на 2 К. Расчет проводился для случая, когда коэффициент излучения подстилающей поверхности равнялся единице, т.е. отраженное излучение отсутствовало. Температура подстилающей поверхности не отличалась от температуры воздуха.

Таблица 4

Чувствительность каналов радиометра HIRS/14 к изменчивости температуры и профилей концентрации атмосферных газов, метеомодель – лето средних широт

Номер канала	$\nu, \text{см}^{-1}$	T_p	Изменение радиационной температуры при изменении общего содержания газа на 30%						$T_{\pm 2}$
			H ₂ O	CO ₂	O ₃	N ₂ O	CO	CH ₄	
1	668,90	238,73	0,00	1,27	0,04	0,00	0,00	0,00	1,96
2	679,36	228,03	0,00	1,05	0,10	0,00	0,00	0,00	1,95
3	689,63	226,59	0,00	0,44	0,09	0,00	0,00	0,00	1,98
4	703,56	235,25	0,08	1,99	0,04	0,00	0,00	0,00	1,76
5	714,50	246,73	0,22	2,71	0,18	0,00	0,00	0,00	1,67
6	732,28	261,24	0,55	2,99	0,28	0,00	0,00	0,00	1,73
7	749,64	172,71	1,03	1,87	0,23	0,00	0,00	0,00	2,06
8	898,67	291,97	0,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,06
9	1028,31	268,88	0,43	0,04	3,22	0,00	0,00	0,00	2,01
10	796,04	287,04	1,49	0,26	0,04	0,00	0,00	0,00	1,99
11	1360,95	258,97	1,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	1,92
12	1481,00	242,48	1,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	2,01
13	2191,32	278,54	0,26	0,01	0,00	2,13	0,18	0,00	1,85
14	2207,36	269,30	0,21	0,08	0,00	3,40	0,08	0,00	1,94
15	2236,39	257,37	0,08	1,26	0,00	2,82	0,00	0,00	1,79
16	2268,12	235,75	0,01	2,06	0,00	0,02	0,00	0,00	1,92
17	2420,24	287,77	0,08	1,70	0,00	0,00	0,00	0,00	2,01
18	2512,21	293,79	0,08	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	2,01
19	2647,91	292,80	0,32	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	2,01

Таблица 5

Чувствительность каналов радиометра HIRS/14 к изменчивости температуры и профилей концентрации атмосферных газов, метеомодель – зима арктических широт

Номер канала	$\nu, \text{см}^{-1}$	T_p	Изменение радиационной температуры при изменении общего содержания газа на 30%						$T_{\pm 2}$
			H ₂ O	CO ₂	O ₃	N ₂ O	CO	CH ₄	
1	668,90	222,75	0,00	0,72	0,01	0,00	0,00	0,00	2,00
2	679,36	217,30	0,00	0,14	0,01	0,00	0,00	0,00	1,99
3	689,63	217,26	0,00	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	2,00
4	703,56	223,71	0,03	1,41	0,08	0,00	0,00	0,00	1,783
5	714,50	231,48	0,03	1,91	0,22	0,00	0,00	0,00	1,76
6	732,28	241,15	0,05	1,87	0,26	0,00	0,00	0,00	1,80
7	749,64	248,92	0,07	1,06	0,20	0,00	0,00	0,00	1,81
8	898,67	257,16	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00
9	1028,31	238,89	0,00	0,01	2,27	0,00	0,00	0,00	2,01
10	796,04	256,32	0,09	0,11	0,03	0,00	0,00	0,00	1,97
11	1360,95	245,85	1,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	1,93
12	1481,00	233,75	1,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	2,01
13	2191,32	249,14	0,01	0,00	0,00	1,25	0,11	0,00	1,91
14	2207,36	242,80	0,01	0,03	0,00	2,20	0,05	0,00	1,98
15	2236,39	235,69	0,01	0,73	0,00	1,94	0,00	0,00	1,88
16	2268,12	221,74	0,00	1,05	0,00	0,01	0,00	0,00	1,98
17	2420,24	254,12	0,00	0,88	0,00	0,00	0,00	0,00	2,01
18	2512,21	257,12	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	2,00
19	2647,91	257,09	0,03	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	2,00

Чувствительность радиометра к вариациям содержания CO_2 приведена в табл. 4, 5 ради общности изложения. В задаче зондирования атмосферы при помощи радиометра HIRS каналы, в которых поглощает углекислый газ, используются для определения температуры. Вследствие того что число каналов у данного прибора ограничено, одновременно определять профили температуры и содержание CO_2 не представляется возможным, поэтому концентрация CO_2 полагается известной. Из анализа этих таблиц следует, что чувствительность радиометра к вариациям концентрации CO и CH_4 мала, вследствие чего восстановить общее содержание этих газов невозможно. Для того чтобы определить концентрации таких газов, как H_2O , O_3 , N_2O , необходимо, чтобы вся неопределенность состояния атмосферы, связанная с неопределенностью в температуре подстилающей поверхности, профиле температуры, аэрозольном ослаблении и облачности, укладывалась по крайней мере в 1–2°.

Таблица 6

Чувствительность каналов радиометра HIRS/14 к изменчивости температуры подстилающей поверхности. Температура подстилающей поверхности менялась на величину $\pm 5^\circ$

Номер канала	ν , см^{-1}	Лето средних широт		Зима полярных широт	
		T_p	ΔT	T_p	ΔT
1	668,90	238,73	0,00	222,75	0,00
2	679,36	228,03	0,00	217,30	0,00
3	689,63	226,59	0,00	217,26	0,00
4	703,56	235,25	0,00	223,71	0,04
5	714,50	246,73	0,07	231,48	0,33
6	732,28	261,24	0,33	241,15	1,15
7	749,64	272,71	0,77	248,92	2,52
8	898,67	291,97	3,48	257,16	4,90
9	1028,31	268,88	2,44	238,89	2,84
10	796,04	287,04	2,03	256,32	4,39
11	1360,95	258,97	0,00	245,85	0,48
12	1481,00	242,48	0,00	233,75	0,00
13	2191,32	278,54	2,43	249,14	2,79
14	2207,36	269,30	1,47	242,80	1,54
15	2236,39	257,37	0,68	235,69	0,73
16	2268,12	235,75	0,01	221,74	0,01
17	2420,24	287,77	3,53	254,12	3,42
18	2512,21	293,79	4,82	257,12	4,95
19	2647,91	292,80	4,39	257,09	4,85

Особого внимания заслуживает вопрос о влиянии подстилающей поверхности, когда ею является суша. Коэффициент излучения суши может сильно варьироваться, причем его спектральная зависимость в отличие от водной поверхности может непредсказуемо меняться. Оценки показывают, что погрешность определения температуры подстилающей поверхности может достигать 5 К. В табл. 6 приведены результаты моделирования для случая, когда температура подстилающей поверхности отличается от температуры воздуха на 5 К. Сопоставляя табл. 4, 5 с табл. 6, можно отметить, что погрешность определения общего содержания озона вследствие возможных погрешностей определения температуры подстилающей

поверхности может достигать 30% и выше. В случае N_2O каналы 13, 14 также весьма чувствительны к неопределенностям в температуре подстилающей поверхности, и лишь для канала 15 влияние поверхности минимально.

Радиометр HIRS чувствителен к вариациям водяного пара в каналах 7, 8, 10–12 для летних условий и в каналах 11–12 для зимних месяцев. Из табл. 5 следует, что в 7, 8 и 10-м каналах для зимних условий радиационная температура весьма чувствительна к неопределенностям температуры подстилающей поверхности, а для летних условий только в 10-м канале.

Из приведенного выше анализа видно, что следует разрабатывать методику восстановления общего содержания с использованием данных 7, 11, 12-го каналов для H_2O и 14-го, 15-го каналов для N_2O . Для восстановления O_3 имеется лишь один канал – 9-й, использование которого может приводить к большим погрешностям в концентрации O_3 , так как помимо влияния температуры подстилающей поверхности дополнительная погрешность будет возникать вследствие того, что высота озонового слоя неизвестна.

Определение общего содержания O_3 , H_2O и N_2O

Задача восстановления общего содержания газов может быть решена двумя путями. Первый путь состоит в том, что вначале определяется профиль температуры по тем каналам, где определяющим поглощающим газом является CO_2 . Затем по прозрачным каналам определяется температура подстилающей поверхности, и на последнем этапе восстанавливается общее содержание газа либо его концентрация на некоторых высотах. Такой подход реализован в работе [4] при разработке методики определения общего содержания озона. Для этой цели используются яркостные температуры 1, 3, 8, 10, 18, 19-го каналов HIRS и 4-го канала (57,94 ГГц) MSU.

Данная методика основана на точной физической двухслойной модели переноса излучения, причем термические характеристики слоев определяются на основе измерений в других каналах HIRS и MSU, а вариации содержания озона анализируются на основе изменений сигнала в канале 9,7 мкм.

Физическое обоснование алгоритма восстановления содержания озона можно изложить следующим образом: в работе исследуется влияние отклонений содержания озона от стандартного профиля, описанного в [5], на пропускание радиации в канале 9,7 мкм. Содержание озона в разных слоях и их классификация в используемой двухслойной модели приведены в табл. 7.

Очевидно, что радиация, излучаемая поверхностью в диапазоне 9,7 мкм, будет поглощаться и переизлучаться озоном, причем значительная ее часть (40%) поглощается слоем от 4 до 23 км. Таким образом, «теплое» излучение поверхности заменяется «холодным» излучением стратосферы и, соответственно, колебания концентрации озона будут оказывать влия-

ние на измерения (яркостную температуру) HIRS в канале 9,7 мкм. Авторы [4] считают, что увеличение содержания озона в нижней стратосфере (или верхней тропосфере) на 15 ед. Добсона приводит к уменьшению яркостной температуры в канале 9,7 мкм на 1°.

Другой путь построения методики восстановления концентрации того или иного газа может быть основан на использовании корреляционных связей между

радиационными температурами в отдельных каналах и концентрациями газов. Преимущество этого подхода состоит в том, что он, с одной стороны, не связан с решением обратной задачи, а с другой – позволяет оценить влияние неопределенностей, связанных с изменчивостью атмосферы, на точность определения концентрации газа. В качестве примера приведем регрессионную методику определения содержания H₂O [6].

Таблица 7

Слой озона в стандартном профиле [6] и двухслойной модели

Слой	Высота, км	Давление, ГПа	Стандартное содержание, е.Д.	Название слоя в двухслойной модели
Верхний	38–54	0–4	16	Верхний
Средний	23–38	4–31	143	Верхний
Нижний	4–23	31–600	177	Нижний
Приземный	0–4	600–1000	9	Не используется

Модель влажности может быть в первом приближении представлена в виде уравнения множественной линейной регрессии. Уравнение выражает зависимость содержания влажности в атмосфере (переменная y) от радиационных температур (независимых переменных x_i), измеренных в различных каналах спутника для N ситуаций:

$$y_i = b_0 + b_1 x_{1i} + \dots + b_p x_{pi} + e,$$

где $i = 1, \dots, N$ – число наблюдений; для метеомодели зимы Новосибирска $N = 117$; p – число рассматриваемых каналов.

Для построения методики были взяты 4–16-й каналы радиометра. Минимизируя сумму квадратов отклонений

$$S = \sum_{i=1}^N (y_i - b_0 - b_1 x_{1i} - \dots - b_p x_{pi})^2,$$

находим коэффициенты регрессии b_0 , b_1 (для 4-го канала), b_2 (для 5-го канала) и т.д. для всех рассмат-

риваемых каналов. После этого осуществляется проверка статистической значимости гипотезы $b_k = 0$, т.е. что вкладом переменной x_k в общее содержание водяного пара можно пренебречь, чтобы улучшить предсказание переменной y . Для проверки гипотезы был выбран уровень значимости $\alpha = 0,05$. Если рассчитанное p -значение было больше α , то гипотеза $b_k = 0$ принималась и канал выводился из рассмотрения. Методом последовательного отбора были оставлены 4, 11, 14-й каналы, у которых p -значение меньше α . Параметры регрессии приведены в табл. 8.

Таблица 8

Коэффициенты линейной регрессии. Новосибирск, зима

Номер канала	Коэффициенты регрессии	Стандартная ошибка коэффициентов b_k
	$b_0 = 0,19759$	0,83788
4	$b_1 = -0,02355$	0,00488
11	$b_2 = -0,05669$	0,00353
14	$b_3 = 0,08018$	0,0033

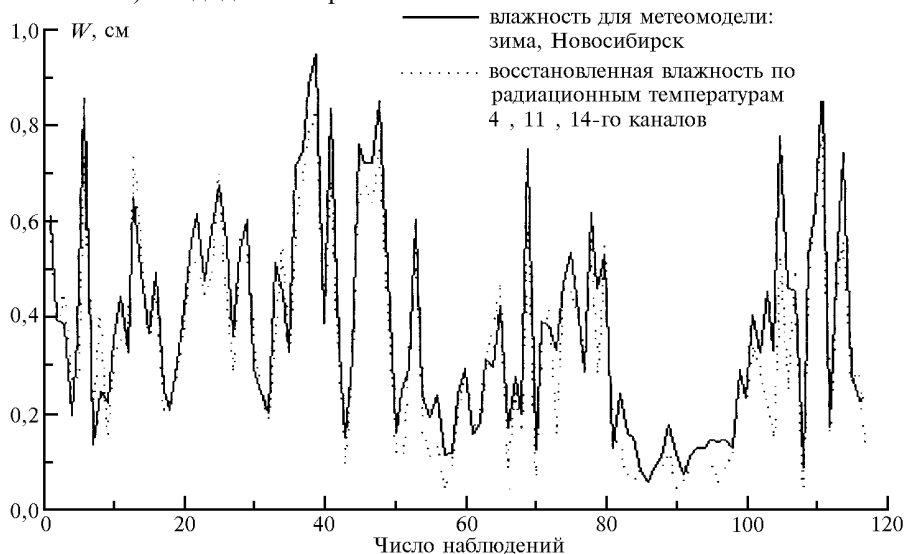


Рис. 1. Общее содержание водяного пара в вертикальном столбе атмосферы, восстановленное по модельным радиационным температурам по трем каналам с применением множественной линейной регрессии для условий зимы

Графики погрешности восстановления общего содержания водяного пара по трем каналам показаны на рис. 1. Наилучшие результаты для зимы дает совместное использование 4, 11, 14-го каналов. Погрешность по одному каналу почти в два раза выше, аналогичные результаты получаются при попытке аппроксимации влажности одновременно по всем каналам с 4-го по 16-й.

Приведенная методика определения общего содержания H_2O предполагает знание температуры подстилающей поверхности (ТПП). Поэтому дальнейшее развитие этой методики связано с определением ТПП. Для этой цели необходимо дополнительно использовать данные каналов AVHRR и MSU.

Определение концентрации N_2O также сопряжено с большими трудностями, связанными с тем, что этот газ поглощает в каналах 13–15, в которых заметный вклад в интенсивность восходящего излучения дает подстилающая поверхность (см. табл. 6). Поэтому при разработке методики определения общего содержания N_2O необходимо наряду с каналами HIRS использовать данные каналов AVHRR.

Определение профиля температуры атмосферы

Основным соотношением, позволяющим связать измеряемую величину (интенсивность уходящего излучения (УИ)) с распределением температуры в атмосфере, является интегральная форма уравнения переноса излучения. Выражение для УИ на верхней границе атмосферы (будем считать, что на пути от верхней границы атмосферы до спутника ослабление и трансформации излучения не происходят) можно представить в следующем виде:

$$I_v(\mu) = \delta_v B_v(T(h_0)) P(h_0, H_0, \mu) + \int_{h_0}^{H_0} B_v(T(z)) \frac{dP_n(z, H_0, \mu)}{dz} dz + I_n^0(\delta_v, \mu), \quad (1)$$

где v – центр канала; δ_v – излучательная способность поверхности (для АЧТ $\delta_v = 1$) при данном угле визирования; $\mu = 1/\cos(\varphi)$, φ – угол, отсчитываемый от надира; P – пропускание атмосферы слоя ($z - H_0$) в направлении φ ; B_v – функция Планка на данной частоте канала при температуре T ; h_0 – высота нижней границы; H_0 – высота верхней границы атмосферы (в нашей задаче полагаем, что $H_0 = 100$ км); I^0 – поток излучения, отраженный от поверхности Земли.

Наиболее информативными каналами для определения температуры атмосферы являются каналы 1–7 [7], совпадающие с 15-мкм полосой CO_2 . При этом предполагается, что содержание CO_2 известно либо взято из модели. Дополнительно к этим каналам может использоваться 16-й канал для уточнения содержания углекислого газа (см. табл. 1). Кроме того, необходимо знать ТПП.

Следует отметить, что если задача дистанционного определения температуры поверхности океана по данным измерений уходящего ИК-излучения в окне 10,5–12,5 мкм доведена до уровня оперативных технологий [8–12], то эта же задача для поверхности суши пока не получила удовлетворительного решения вследствие необходимости учета дополнительных факторов [13]: нечернота поверхности, т.е. варьирование ее излучательной способности в зависимости от типа и состояния почвы, значительная пространственная и временная изменчивость поля температур.

Для дистанционного определения температуры поверхности в литературе широко известен метод так называемых «расщепленных» окон прозрачности [9], основанный на использовании линейной комбинации измерений в каналах 10,5–11,5 и 11,5–12,5 мкм для оценки атмосферного ослабления излучения (основного мешающего фактора при измерениях температуры). Однако этот метод неэффективен для измерений над сушей, поскольку он требует задания излучательной способности поверхности в месте зондирования с высокой точностью (лучше 0,01).

В [13] предложен оригинальный метод оценок температуры поверхности суши с точностью порядка 1–2° на основе спутниковых измерений в диапазоне 10,5–12,5 мкм. Данный метод использует концепцию так называемых температурно-инвариантных спектральных индексов (ТИСИ) [14] – специальных нелинейных комбинаций данных в двух или трех каналах, не зависящих от температуры поверхности суши, и совмещенные в пространстве и времени измерения в каналах 4 и 5 AVHRR и в канале 8 HIRS/2, а также усредненные для данной местности сезонные высотные профили температуры и влагосодержания.

На наш взгляд, задача определения ТПП для суши не может считаться окончательно решенной и требует дополнительного исследования. По этой причине в данной статье определение профиля температуры атмосферы проводится в предположении, что ТПП и температура приземного воздуха совпадают.

Другой проблемой в задаче термического зондирования является необходимость решать интегральное уравнение Фредгольма I рода. Известно, что решение такого уравнения неустойчиво. В настоящее время разработаны различные методы решения задачи термического зондирования с привлечением разнообразной информации об исследуемом профиле температуры [7,8,15]. В работе [7] предложен подход с использованием метода функции Грина для решения интегро-дифференциального уравнения, возникающего при использовании регуляризации Тихонова со стабилизатором 1-го порядка [16].

На рис. 2, 3 приведен пример решения модельной задачи при уровне шума правой части 0,5 и 3%. Модель атмосферы – лето средних широт. Видно, насколько неустойчива реальная модельная задача к погрешностям эксперимента. Уровень ошибки 0,5%

уже приводит к искажениям восстанавливаемого профиля температуры ($\Delta_T = 2$ К), а уровень погрешности в 3% приводит к существенному искажению профиля температуры (максимальная погрешность Δ_T достигает 13 К). Из литературных источников известно, что уровень погрешности измерения УИ не превышает 1%. Результаты моделирования показывают, что если максимально учтены все физические неопределенности в задаче (внеинтегральные члены (1)), то при данном уровне погрешности измерений можно рассчитывать на приемлемую точность восстановления профиля температуры.

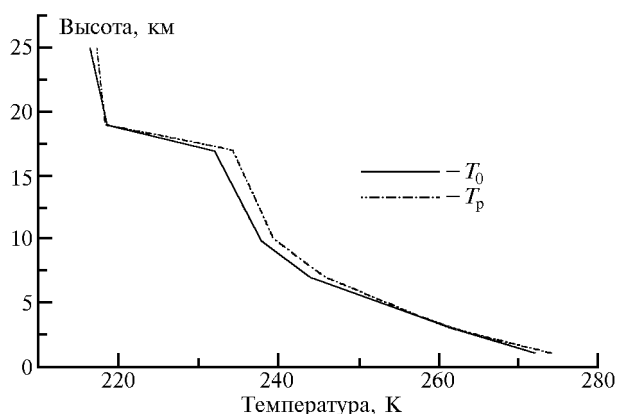


Рис. 2. Восстановленный профиль температуры T_p в сравнении с модельным профилем T_0 (лето средних широт) при погрешности шума 0,5 %

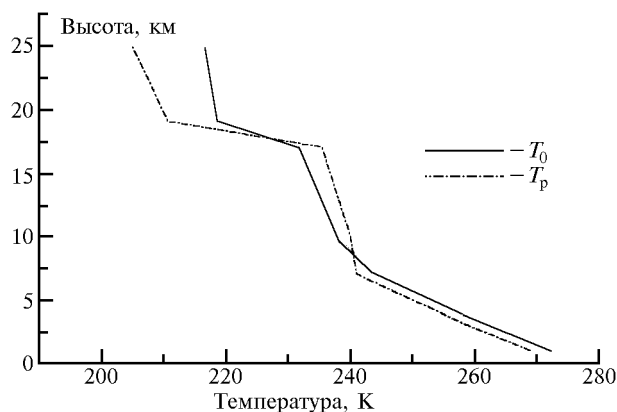


Рис. 3. Восстановленный профиль температуры T_p в сравнении с модельным профилем T_0 (лето средних широт) при погрешности шума 3 %

В [7] рассмотрены также погрешности восстановления профиля температуры, обусловленные ошибками спектроскопической информации и ошибками определения ТПП. Там же приведены результаты решения задачи методом оптимальной параметризации и статистической регуляризации.

На рис. 4 приведены профили температуры, восстановленные из реальных данных, полученных над Арктикой. Излучение подстилающей поверхности моделировалось и удалялось по модельным данным.

Из рисунка видно, что восстановленные значения температуры, по крайней мере, не противоречат здравому смыслу и согласуются с модельными представлениями о термическом состоянии атмосферы. Для более конкретных выводов необходимо проводить сравнение с данными радиологического зондирования температуры.

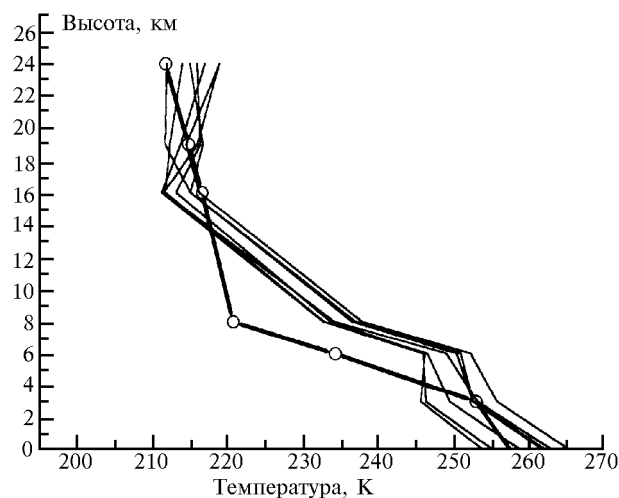


Рис. 4. Восстановленные профили температур для нескольких линий в сравнении с модельным профилем температуры (субарктическая зима), обозначенным сплошной линией с кружочками

Заключение

Проведенные исследования возможностей радиометра HIRS/2 по определению газового состава и температуры атмосферы показали, что по данным прибора HIRS/2 можно восстанавливать профиль температуры и общее содержание газов H_2O , O_3 , N_2O в безоблачной атмосфере в ночное время. Общее содержание CO и CH_4 по данным HIRS/2 определить с разумной точностью не удастся.

Для создания рабочих методик определения газового состава и температуры в безоблачной атмосфере необходимо решить следующие проблемы:

- 1) определить температуру подстилающей поверхности и альбедо ПП,
- 2) выбраковать данные HIRS/2, полученные для облачных условий.

Задача о температуре и коэффициенте излучения ПП является не менее сложной, чем задача определения параметров атмосферы. Для ее решения необходимо привлекать данные приборов AVHRR, MSU, установленных на ИСЗ NOAA на одной платформе с приборами HIRS/2, SSU.

Выборка данных, полученных для облачных условий, возможна только на основе специальных методик с привлечением различной информации физического характера, данных о синоптическом состоянии, о лидарном зондировании и др.

Для разработки методик определения параметров атмосферы в облачных условиях, и в частности

при сплошной облачности, требуются дополнительные исследования и моделирование.

Данные прибора HIRS/2 позволяют определить профиль температуры до высот 25–27 км. Увеличить потолок зондирования температуры до высот 50 км можно с помощью данных стратосферного зондирующего SSU.

Для решения обратных задач по определению газового состава и температуры атмосферы над г. Томском с использованием методов на основе априорных данных об исследуемых параметрах необходимо:

– построить по данным аэрологических наблюдений ближайшей к г. Томску метеостанции (ст. «Новосибирск») региональные статистические модели высотного распределения температуры и влажности в ясные дни;

– оценить по данным наблюдений ОСО (г. Томск) и данным высотного зондирования температуры и влажности ст. «Новосибирск» взаимокорреляционные связи ОС озона и влажности с температурой отдельных атмосферных уровней;

– провести исследования взаимокорреляционных связей между ОС озона, влажности и температуры атмосферы на различных уровнях с радиационными температурами каналов HIRS.

1. *Vazquez J., Van Tran A. et al.* NOAA/NASA AVHRR Oceans Pathfinder /Sea Surface Temperature Data Set. User's Guide. Version 1.3. August 29, 1996 (an internet site).
2. *NOAA* Technical Memorandum NESS 107-Rev. 1. Data Extraction and Calibration of TIROS-N/NOAA Radiometers/ Ed. Walter G. Planet. Washington, D.C., 1979 (Revised in 1988).
3. *Williamson L.E.* Calibration Technology for Meteorology Satellites / Atmospheric Laboratory, U.S. Army Electronics Command. White Sands Missile Range. N.M., 1977.

4. *Neuendorffer A.C.* Ozone monitoring with TIROS-N operational vertical sounders // *Journal of Geophys. Research.* 1976. V. 101. No. D13. P. 18.807–18.828.
5. *Krueger A.J., and R.A. Mizner.* A mid-latitude model for the 1976 U.S. Standard Atmosphere // *J. of Geophys. Research.* 1976. V. 81. P. 4477.
6. *Фирсов К.М., Катаев М.Ю., Комаров В.С., Чеснокова Т.Ю.* Корреляционные методики восстановления параметров атмосферы по данным спутникового зондирования // V Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана», 15–18 июня 1998 г.
7. *Катаев М.Ю., Мицель А.А.* Термическое зондирование атмосферы по данным многоканального ИК-радиометра HIRS2 // V Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана», 15–18 июня 1998 г.
8. *Малкевич М.С.* Оптические исследования атмосферы со спутников. М.: Наука, 1973.
9. *Сумовской В.М., Успенский А.Б.* Использование дополнительной информации при дистанционном определении температуры поверхности океана // *Исследование Земли из космоса.* 1985. N 4. С. 75–78.
10. *McClain E.P., Pichel W.G., and Walton C.C.* Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperatures // *J. of Geophys. Research.* 1985. V. 90. N. C6. P. 11587–11601.
11. *Suskind J., and Reuter D.* Retrieval of sea surface temperatures from HIRS2/MSU // *Journal of Geophys. Res.* 1985. V. 90. N. C6. P. 11602–11608.
12. *Emery W.J., Yunyue Y., and Wick G.A.* Correcting infrared satellite estimates of sea surface temperature for atmospheric water attenuation // *J. of Geophys. Res.* 1994. V. 99. N. C3. P. 5219–5236.
13. *Успенский А.Б.* Об оценке температуры поверхности суши по данным спутниковых измерений уходящего ИК-излучения в диапазоне 10,5–12,5 мкм // *Метеорология и гидрология.* 1992. N 10. С. 19–27.
14. *Becker F., and Li Z.-L.* Temperature independent spectral indices in thermal IR bands // *Remote Sensing of Environ.* 1990. V. 32. P. 315–318.
15. *Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М.* Термическое зондирование атмосферы со спутников. Л.: Гидрометеониздат, 1970. 410 с.
16. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 264 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
2 июля 1998 г.

S.V. Afonin, A.D. Bykov, Yu.V. Gridnev, V.V. Zuev, M.Yu. Kataev, V.S. Komarov, A.A. Mitsel, O.V. Naumenko, K.M. Firsov, T.Yu. Chesnokova, A.A. Chursin. **Sounding of the Atmosphere with Satellite IR Radiometer HIRS/2.**

The possibilities of sounding of the air vertical temperature profiles and total content of H₂O, O₃, and N₂O over Tomsk and Novosibirsk regions, using the HIRS/2 data, have been analyzed. Regression methods of reconstructing the H₂O total content are described. The influence of inaccuracy of initial spectroscopic information on the error of the temperature profiles reconstructing is observed. The problems of the first importance are determined for creation of reliable methods for reconstructing the meteorological parameters of the atmosphere.