

А.В. Казанский

**СПЕКТРАЛЬНО-УГЛОВАЯ ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ СПУТНИКОВЫХ ИК-ИЗМЕРЕНИЙ  
ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА**

Показана неадекватность линейной теории многоканального метода (МКМ) ИК-измерений температуры поверхности океана (ТПО) через атмосферу. С помощью аппроксимации второго порядка функции пропускания атмосферы в уравнении переноса радиации получена четырехканальная параметризация ИК-измерений ТПО — привлечены два спектральных измерения под двумя зенитными углами. На данных ТПО *in situ* и NOAA-10/AVHRR в диапазонах 3,7 и 10,8 мкм тестированы различные двухканальные редукции этой параметризации. Делается вывод о необходимости угловых ИК-измерений (или, по крайней мере, синоптической адаптации углового параметра) для точного определения ТПО.

Многоканальный метод (МКМ) определения температуры поверхности океана (ТПО) в окнах прозрачности атмосферы (спектральные диапазоны 3,5–4,0 и 10–12 мкм) использует либо спектральные, либо угловые различия для учета искажающего влияния атмосферы [1]. На практике наибольшее распространение получила его двухспектральная версия, поскольку доступная информация поступала с линейно-сканирующих ИК-радиометров типа AVHRR, не позволяющих, как считалось, использовать угловые различия. Однако в этом случае для обеспечения приемлемой точности (порядка 0,5–0,7°K) в оперативных алгоритмах приходилось ограничиваться данными с зенитными углами  $\vartheta < 45^\circ$  [2], что приводило к существенному сокращению полезной информации. Например, в формате GAC (глобальный обзор с пространственным разрешением  $4 \times 4 \text{ км}^2$ ) при этом отбрасывалось около 40% измерений. Но даже при таком ограничении в сложных метеорологических условиях (в особенности в тропиках) ошибка определения ТПО оставалась высокой (более 1°С [3]) и, что самое главное, имела тенденцию к росту с увеличением зенитного угла.

Последний факт не объясним с позиции существующей теории МКМ, поскольку двухспектральная коррекция должна приводить к отсутствию углового хода у восстановленных ТПО. В попытках учета этого эффекта в последнее время были предложены «спектрально-угловые» алгоритмы [4–7] определения ТПО с использованием дополнительных членов вида  $\beta(\sec \vartheta - 1)$  или  $\gamma \Delta T (\sec \vartheta - 1)$ , где  $\beta$  и  $\gamma$  — априорно фиксированные параметры, а  $\Delta T = T_1 - T_2$  — разность радиационных температур в каналах. Все предложенные спектрально-угловые алгоритмы были получены либо с помощью эвристических предпосылок, либо эмпирической подгонкой по реальным или модельным данным. И хотя в последнем случае они называются «теоретическими» [7], никакой гарантии того, что основные факторы, влияющие на точность определения ТПО, параметризованы правильно, по существу нет.

Между тем потенциальное число коэффициентов для всевозможных комбинаций спектральных измерений и углозависимых величин может быть весьма велико. Например, в [7] подбирается около десяти коэффициентов регрессии. Поэтому не всегда ясно, являются ли полученные коэффициенты оптимальными и какова их стабильность. Ответ на эти вопросы должна дать теоретически обоснованная схема параметризации МКМ, вывод и экспериментальное исследование которой является основной целью данной работы.

В качестве экспериментального материала используются данные AVHRR в диапазонах 3,7 и 10,8 мкм, принятые в режиме АРТ (соответствует формату GAC) с ИСЗ NOAA-10 в период с августа по октябрь 1990 года, во время проведения эксперимента «Тайфун-90» в Филиппинском море. Районы и сроки съемок, показанные в табл. 2, выбирались малооблачными с небольшой изменчивостью ТПО (в пределах одного градуса). Последнее свойство позволяет приписать всем измерениям среднюю для каждого района температуру поверхности океана  $T_0$ , которая оценивалась по декадным картам, выпускаемым Японским метеорологическим агентством, и данным судовых метеорологических наблюдений. Для каждого витка ИСЗ по заданному району строились гистограммы радиационных температур, включающие полосы из девяти элементов строк обзора с центрами, соответствующими выбранным зенитным углам, после чего проводилось пороговое отсеивание облачных элементов. Съемка за определенный срок представляет собой суммы таких усеченных гистограмм по нескольким виткам. Например, в первой съемке суммированы 3 витка, во второй — 21 виток ИСЗ NOAA-10. Поскольку примененный способ фильтрации облачности не гарантирует ее полного удаления (и это вряд ли вообще возможно [8]), то в качестве средней радиационной температуры бралась ее помехоустойчивая оценка — 75-перцентиль выборочной функции квантилей, для применения которой достаточно, чтобы имела место только известная степень однородности выборки [8], что и достигалось усечением гистограмм. Дополнительный контроль степени этой однородности осуществлялся по разнице 75- и 50-перцентилей [9], требовалось, чтобы эта разница была меньше 1°С.

Выбор сроков и районов съемок преследовал кроме того цель обеспечить широкую представительность как средних, так и экстремальных атмосферных условий, наблюдаемых в тропиках, по их влиянию на ИК-излучение океана. Поскольку эти условия определяются в основном вариациями содержания водяного пара на высоте около 2 км [10], его распределение контролировалось по данным температурно-влажностного зондирования (радиозондирования). Так, съемка 1 соответствует экстремально большому содержанию водяного пара (при еще большем его содержании возникает, как правило, мощная облачность, препятствующая ИК-измерениям ТПО). Съемка 3 проведена в условиях экстремального дефицита влаги на высотах в обширной зоне опускания воздуха. Съемка 2 соответствует средним условиям, что обеспечивается усреднением данных за месячный срок.

Фундаментальное значение в теории МКМ имеет предположение о постоянстве для данных атмосферных условий средней температуры атмосферы [1]  $\bar{T}_a = [1 - \tau_i(p_0)]^{-1} \int_{p_0}^0 T_a(p) \partial \tau_i(p) / \partial p dp$ , где

$T_a(p)$  — вертикальный профиль температуры атмосферы;  $p$  — давление ( $p_0$  — у поверхности);  $\tau_i(p)$  — функция пропускания ИК-излучения атмосферой в  $i$ -м канале (далее, где это не вызывает сомнений,  $i = 1$  соответствует 3,7, а  $i = 2$  — 10,8 мкм в двухспектральном алгоритме;  $i = 1, 2$  — двум различным зенитным углам  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  — в двухугловом). Оценку методической ошибки при  $\delta \bar{T}_a = \bar{T}_{a1} - \bar{T}_{a2} \neq 0$ , ( $\tau_i = \tau_i(p_0)$ ,  $\bar{T}_{a1}$  и  $\bar{T}_{a2}$  — средние температуры атмосферы в двух измерительных каналах) можно получить из выражения

$$\delta T_0 = \delta \bar{T}_a (1 - \tau_1) (1 - \tau_2) / (\tau_1 - \tau_2). \quad (1)$$

Как видно из расчетов (табл. 1), выполненных по экспериментальным данным аэрологического зондирования атмосферы (расчеты проведены в МГИ АН УССР) эта ошибка весьма велика для двухспектрального метода. Кроме того, по расчетам для зонда от 20.10.90 можно получить оценку  $\delta T_0$  и для двухуглового метода — она равна — 0,9°С в обоих каналах.

Таблица 1

Расчеты параметров МКМ по данным радиозондов с помощью модели LOWTRAN5

Характеристики зондов	sec $\vartheta$	$\tau_1$	$\tau_2$	$\bar{T}_{a1}$ (°C)	$\bar{T}_{a2}$ (°C)	$\delta T_0$ (°C)	$\gamma_1$	$\gamma_2$
17.10.90 (12GMT) 22°22' с. ш. 136° в. д.	1,24	0,68	0,29	16,1	17,6	—0,9	0,82	0,25
18.10.90 (0GMT) 19° с. ш. 137° в. д.	1,00	0,74	0,44	14,9	17,8	—1,4	0,89	0,28
20.10.90 (0GMT) 15°47' с. ш. 136°50' в. д.	1,00 1,42	0,77 0,69	0,57 0,35	16,8 17,8	20,1 20,8	—1,6 —1,8	1,13 0,91	0,39 0,29

Примечание.  $\bar{T}_{ai}$  — средняя температура атмосферы в  $i$ -м канале,  $\delta T_0$  рассчитана по (1),  $\gamma_1$  — спектральный параметр «линейной» теории,  $\gamma_2$  — то же «квадратичной» теории МКМ.

Из фактов наличия угловой и спектральной зависимости  $\bar{T}_a$  можно сделать вывод о неадекватности линейной аппроксимации функции пропускания  $\tau_i(p)$  в теории МКМ. Необходимое уточнение можно получить, разлагая  $\tau_i(p)$  в ряд Тейлора по малому параметру (коэффициенту поглощения  $\kappa_i$ ) непосредственно в уравнении переноса ИК-излучения [1], записанному для простоты через радиационные температуры:

$$T_i = T_0 \tau_i(p_0) + \int_{p_0}^0 T_a(p) \partial \tau_i(p) / \partial p dp;$$

удерживая члены второго порядка малости, имеем

$$T_0 = T_i + C \kappa_i m + D (\kappa_i m)^2, \quad (2)$$

где  $m = \sec \vartheta$ ,  $C = T_0 \omega(p_0) + \int_{p_0}^0 T_a(p) \delta \omega(p) / \delta p dp$ ,  $D = - \left[ 1 / 2 T_0 \omega(p_0)^2 + \int_{p_0}^0 T_a(p) \omega(p) \delta \omega(p) / \delta p dp \right]$ ,  
 $\omega(p)$  — влагосодержание атмосферы.

В отличие от  $\bar{T}_a$ , содержащей функцию  $\tau_i(p)$ , новые неизвестные величины  $C$  и  $D$  не зависят от выбора спектрального диапазона и зенитного угла. Для их определения необходимы, однако, как минимум трехканальные измерения. Практическое применение трехугольного метода [11] оправдано лишь на уровне погрешности ИК-измерений порядка 0,01 К [12], что нереально. Что касается трех-спектрального решения, то система уравнений (2) окажется очень близкой к вырождению и неточность задания величин  $\kappa_i$  в этих условиях приведет к большим ошибкам в определении  $T_0$ .

Рассмотрим комбинированную схему, в которой  $C$  определяется двухугловыми, а  $D$  — двухспектральными измерениями. Продифференцируем (2) по  $m$  и введем угловой коэффициент  $\beta_i(m) = \partial T_i(m) / \partial m$ . Имеем  $C \kappa_i = -\beta_i(m) - 2D \kappa_i^2 m$ . Подставляя это в (2):  $T_0 = T_i(m) - \beta_i(m) m - D(\kappa_i m)^2$ . Исключая  $D$  из системы для  $i = 1, 2$ , окончательно получим

$$T_0 = T_1(m) - \beta_1(m) m + \gamma_2 [\Delta T(m) - \Delta \beta(m) m], \quad (3)$$

где  $\Delta \beta(m) = \beta_1(m) - \beta_2(m)$ ,  $\gamma_2 = \kappa_1^2 / (\kappa_2^2 - \kappa_1^2)$ .

Расчеты, приведенные в табл. 1, показывают, что «квадратичный»  $\gamma_2$  — параметр лучше соответствует тенденции уменьшения эмпирического значения  $\gamma$  в алгоритмах, полученных регрессией по экспериментальным данным: в MCSST [2]  $\gamma = 0,5$ ; в CPSST [6]  $\gamma = 0,40 - 0,45$ . Сравнение регрессионной оценки  $\bar{\gamma}$  (табл. 2) и модельных величин (табл. 1) позволяет сделать вывод о допустимости фиксированного значения  $\gamma_2 = 0,35$  в дальнейших расчетах.

Таблица 2

Расчет параметров «квадратичного» МКМ по съемкам в Филиппинском море

№ съемки	Сроки и широты съемок, средняя ТПО <i>in situ</i>	Радиационные температуры в зависимости от длины пути $m = \sec \vartheta$				Угловые коэффициенты		Регрессионные коэффициенты			
		$\vartheta$ , град	0	45	57	63	$\beta_2$ (1,6)	$\beta$ ( $\gamma_2 = 0,35$ )	$\beta$	$\bar{\gamma} + 1$	Корреляция
		$m$	1,0	1,4	1,8	2,2	$\beta_1$ (1,6)				
1	10—12.08.90 15—25° с. ш. 29,5°C	$T_2$	22,5	21,0	19,0	17,5	-4,17	-3,04	-3,14	1,28	0,98
		$T_1$	25,5	24,0	23,0	21,5	-3,33				
2	31.08—29.09.90 20—25° с. ш. 28,3°C	$T_2$	22,5	21,0	20,0	19,0	-2,92	-2,35	-2,46	1,37	0,95
		$T_1$	25,0	23,5	23,0	22,0	-2,50				
3	20—21.10.90 10—20° с. ш. 28,8°C	$T_2$	23,5	23,0	21,5	20,5	-2,50	-1,94	-1,78	1,39	0,99
		$T_1$	26,0	25,5	24,5	23,5	-2,08				

Примечание. Параметры наклона  $\beta_i(m)$  оценивались на базе углов 0 и 63° ( $m = 1,0$  и  $2,2$ ), а регрессия определялась по формуле  $x \frac{\Delta T}{m} + y = \frac{T_0 - T_2}{m}$ ,  $\bar{\beta} = \hat{y}$ ,  $\bar{\gamma} = \hat{x} - 1$ .

Непосредственно применить (3) для определения  $T_0$ , однако, нельзя, так как практическое измерение  $\beta_i(m)$  соответствует хорде, соединяющей  $T_i(m_1)$  и  $T_i(m_2)$ , и относится к  $m$ , равному полусумме  $m_1$  и  $m_2$  (в нашем случае  $m = 1,6$ ). Однако «сводный» параметр

$$\beta = \beta_1(m) + \gamma_2 \Delta \beta(m) \quad (4)$$

уже не имеет угловой зависимости (выбор  $\gamma_2$  балансирует кривизну графиков  $T_i(m)$ , которая пропорциональна  $\kappa_i^2$ ). Поэтому практический алгоритм может иметь форму

$$T_0 = T_1(m) + \gamma_2 \Delta T(m) - \beta m, \quad (5)$$

в которой с точностью второго порядка малости (члены третьего порядка оцениваются 0,1 К) угловой параметр  $\beta$  является константой для данных атмосферных условий. Оценки этого параметра по (4) при  $m = 1,6$  и регрессией с использованием  $T_0$  *in situ* (см. примечание к табл. 2) дают близкие результаты. В связи с чем можно сделать вывод, что четырехканальный метод (5) адекватно описывает ИК-измерения ТПО через атмосферу на существующем уровне инструментальных погрешностей.

Желательно рассмотреть возможность двухканальных редукиций этого метода. Если в (4) параметр  $\beta$  считать универсальной константой (подобно 72), то получается двухспектральный алгоритм с фиксированным угловым членом. Этот алгоритм описывает главную часть всех новейших «спектрально-угловых» алгоритмов [4–7] и поэтому позволяет оценить их точностные возможности. Как видно из табл. 2, для рассматриваемой пары диапазонов в тропических условиях изменчивость  $\beta$ -параметра оценивается величиной 0,5–0,6. Это означает, что, выбирая универсальное значение  $\beta = -2,5$  (в CPSST [6]  $\beta = -1,97$ , но с учетом константы  $\sim 0,6^\circ\text{C}$  суммарно имеет ту же величину), получим погрешность определения ТПО в экстремальных условиях при  $m = 2,2$  около  $1,2^\circ\text{C}$ , а на концах линии обзора AVHRR ( $m = 2,7$ ) – до  $1,5^\circ\text{C}$ . (Фактически алгоритм CPSST на данных съемки 1 при  $m = 2,2$  дал 28,0, а для съемки 3 –  $29,5^\circ\text{C}$ . В первом случае имеем занижение на 1,5, а во втором – завышение на  $0,7^\circ\text{C}$ ).

Учитывая столь неблагоприятные оценки точности двухспектральной редукиции (а оценки для пары диапазонов 10,8 и 12 мкм еще хуже, что, в частности, обусловило попытку введения члена  $\gamma\Delta T m$  вместо  $\beta m$  в [6, 7]), рассмотрим метод квадратичной экстраполяции

$$T_0 = T_1 - \beta'_1 m - \beta''_1 m^2, \quad (6)$$

который вытекает из (2) при  $\beta'_1 = -C\kappa_1$  и  $\beta''_1 = -D\kappa_1^2$ . Спектрально-угловая параметризация ИК-измерений ТПО (3) позволяет получить следующие выражения:  $\beta''_1 m^2 = \gamma_2[\Delta T(m) - \Delta\beta(m)m]$  и  $\beta'_1 = \beta_1(m) - 2\beta''_1 m$ . В табл. 3 приведены результаты расчетов параметра  $\beta''_1$ , из которых следует, что вполне приемлемо зафиксировать  $\beta''_1 = 0,29$ . Используя это значение и расчеты угловых коэффициентов  $\beta_1(m)$  (при  $m = 1,6$ ), получим требуемые значения параметра  $\beta'_1$  метода. В табл. 3 приведены также результаты тестирования алгоритма (6) на данных съемок в Филиппинском море с этими значениями параметров. Для сравнения там же показаны погрешности четырехканального алгоритма (5), в котором в качестве  $\beta$  брались соответствующие каждой съемке измерения угловых коэффициентов (табл. 2). Видно, что оба алгоритма на усредненных данных имеют примерно одинаковые точностные характеристики, что подтверждает определяющую роль угловых измерений (или хотя бы адаптации параметра  $\beta$  к синоптическим условиям) для получения ТПО с точностью выше достигнутого сейчас барьера в  $0,7^\circ\text{C}$  [6].

Таблица 3

Результаты расчетов параметров метода квадратичной экстраполяции

№ съемки (табл. 2)	$\Delta T$ (1,6)	$\Delta\beta$ (1,6)	$\beta''_1$	$\beta'_1$	Погрешности алгоритмов	
					(6)	(5)
1	3,50	0,84	0,295	–4,26	0,0 (0,1)	0,1 (0,2)
2	2,75	0,42	0,284	–3,43	–0,2 (0,2)	–0,2 (0,2)
3	2,75	0,42	0,284	–3,00	0,1 (0,2)	0,1 (0,1)

Примечание.  $\Delta T(1,6)$  соответствует полусумме  $\Delta T(1,4)$  и  $\Delta T(1,8)$ ; погрешности алгоритмов с адаптируемым  $\beta$ -параметром – смещение (стандартное отклонение) для каждой съемки.

Преимущество более сложного алгоритма (5) может проявиться при этом за счет лучшей отработки членом  $\gamma_2\Delta T$  локальных аномалий распределения водяного пара в атмосфере. Главное же достоинство четырехканальных ИК-измерений ТПО состоит в получении дополнительной информации о водяном паре, что является актуальной проблемой [10]. Напомним, что линейная теория МКМ допускает только двухканальные ИК-измерения, с помощью которых исключают (а не определяют) неизвестную инструментальную переменную – среднюю температуру атмосферы  $\bar{T}_a$ . В предлагаемом же подходе эту информацию несут геофизические параметры  $C$  и  $D$  в (2), которые можно определить, имея четыре измерительных канала.

Более детальное исследование этого вопроса, а также рассмотрение других спектральных диапазонов и способов практического осуществления угловых измерений должно составить предмет отдельных работ. В заключение автор выражает признательность А.М. Игнатову за помощь в постановке задачи и обсуждение полученных результатов.

1. McMillin L. M., Crosby D. S. //J. Geophys. Res. 1984. V. 89. № C3. P. 3655.
2. McClain E. P., Pichel W. G., Walton C. C. //J. Geophys. Res. 1985. V. 90. № C6. P. 11587.
3. Малкевич М.С., Малкова В.С., Старцева З.П. //Исследование Земли из космоса. 1981. № 2. С. 45.
4. Тимофеев Н.А., Иванчик М.В., Севостьянов А.И. и др. //Морской гидрофизический журнал. 1990. № 5. С. 39.
5. Singh S. M. //Int. J. Remote Sensing. 1984. V. 5. № 1. P. 161.
6. Wallon C. C., McClain E. P., Sapper J. F. //WMO conf. «Ocean Remote Sensing» (Proc.). Venice. 1990. 3 p.
7. Barton I. J., Zavody A. M., O'Brien D. M. et al. //J. Geophys. Res. 1989. V. 94. № D3. P. 3365.
8. Александрова Н.В., Казанский А.В., Шевченко А.П. //Исследование Земли из космоса. 1990. № 6. С. 13.
9. Казанский А.В., Соловьев А.А. //Всес. конф. «Проблемы машинной графики и цифровой обработки изображений». (Тез. докл.). Владивосток: Изд. ИАПУ ДВО АН СССР, 1985. С. 229.
10. Dalu G. //Int. J. Remote Sensing. 1986. V. 7. № 9. P. 1089.
11. Городецкий А.К. //Исследование Земли из космоса. 1981. № 2. С. 36.
12. Игнатов А.М., Суетин В.С. //Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. № 6. С. 622.

Институт автоматки и процессов управления ДВО АН СССР,  
Владивосток

Поступила в редакцию  
29 апреля 1991 г.

**A. V. Kazansky. Spectral-Angular Parameterization of the Satellite IR-measurements of the Sea Surface Temperature.**

Inadequacy of the linear approach to the multi-channel technique for IR-measurements of the sea surface temperature (SST) through the atmosphere is shown. By means of the second-order approximation of the atmospheric transmission function in the radiative transfer equation a four-channel parameterization of the IR-measurements of SST is derived for the ease of two spectral measurements at two zenith angles. Using the *in situ* data on SST and data from NOAA-1G/AVHRR at 3.7 and 10.8  $\mu\text{m}$  wavelengths the different two-channel reductions of this parameterization are tested. It is concluded that for accurate SST determination the angular IR-measurements (or at least some synoptic adaption of angular parameter) are needed.