

УДК 551.521.681.7

## ПРОГНОЗ ИЗЛУЧЕНИЯ НЕБА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМАХ ОБЛАЧНОСТИ В ДИАПАЗОНЕ 8-13 МКМ

© 2019 г. Алленов М. И., Алленов А. М., Новиков Н. Н., Якименко И. В.

*Приводятся результаты многолетних исследований пространственно-временных структур полей собственного излучения различных форм облачности в диапазоне 8-13 мкм при помощи быстродействующей, высокоразрешающей (до единиц минут дуги) высокочувствительной аппаратуры, запатентованной в России.*

*Ключевые слова:* формы облачности, излучение, статистические характеристики, прогноз, параметризация, полусфера, корреляция.

Исследованиям пространственно-временных структур полей излучения облачности посвящено большое число научных работ. Большинство из них представлены в монографиях и обзорных статьях [1-3, 5-8]. Однако, многие из этих работ содержат результаты, полученные по эпизодическим кратковременным измерениям, и не являются статистически обеспеченными данными для оценки надежности представленной информации. Многие представлены без учета требований стандартизации средств измерений и принятой в практике Международной метеорологической классификации облачности.

В предлагаемой статье приводятся результаты многолетних исследований облачности, полученные при помощи аттестованной аппаратуры, защищенной патентами РФ на изобретения, обладающей пространственным разрешением до единиц минут дуги, чувствительностью до сотых долей градусов (в диапазоне 8-13 мкм). Аппаратура позволяет регистрировать полусферическое собственное излучение облачности с различными временными интервалами наблюдений, за доли секунды.

### **1. Кучевая облачность (Cu).**

Пространственно-временная структура полей облачности исследовалась в различных странах. Наиболее полно информация о ней приведена в США [9], Эстонии [12,13], Японии [15]. В СССР и в России эти исследования проводились многие годы в различных районах России и в различных районах океанов. Исследования также проводились совместно с учеными Эстонии в экспедиционных работах в океанах. То есть кучевые облака, как часто встречаемые популяции, интересовали исследователей многих стран. Они достаточно подробно описаны в научной литературе. Действительно, в 30% случаев небо закрыто кучевой облачностью. Типичный процесс развития облачного поля выглядит следующим образом. В утреннее время облака возникают и изменяются до 3 баллов. Затем количество облачности возрастает до 7-8 бал-

лов и после 15-18 часов облачность начинает разрушаться. Сценарии развития и разрушения иногда изменяются, но тенденция (зарождение – развитие – разрушение) повторяется. Этот процесс изучался в различных районах над сушей и над океанами. В таблице 1 приведены данные о размерах отдельных облаков на небосводе. И в тропической зоне, и над сушей размеры (сечения) зависят от балла. В таблице приведены статистические данные, полученные за многолетний период наблюдений.

Таблица 1.

Средние размеры  $C_u$  (в км) при различном их количестве в баллах

Район (зона)	Балл облачности						
	2	3	4	5	6	7	8
Тропики	0,25	0,32	0,37	0,60	0,87	1,2	1,62
Эстония	0,37	0,40	0,50	0,60	0,70	0,87	-
Тропики	0,3	0,34	0,4	0,55	0,7	0,9	-
Смо- ленск- Обнинск	0,32	0,38	0,5	0,65	0,9	1,2	1,58

Размеры по данным: Тропики – Эстония получены учеными Эстонии. Размеры: Тропики – Смоленск – Обнинск получены учеными ФГБУ НПО «Тайфун». Как видно из данных размеры облаков в тропической зоне в утреннее время слегка различаются (по данным Эстонии).

Таблица 2.

Зависимости средних значений  $\mu$  и дисперсий  $\sigma^2$  флуктуаций ЭЯ полей  $C_u$  (4-6 баллов) тропических облаков и ЕТР от зенитного угла

Район (зона)	Зенитный угол $\theta$					
		40	50	60	70	80
Тропики	$\mu$	2,2	2,4	2,8	3,2	3,3
	$\sigma^2$	7,2	7,4	7,1	0,8	0,4
ЕТР	$\mu$	2,0	2,15	2,4	2,8	3,1
	$\sigma^2$	4,2	4,4	4,1	1,0	0,2

Примечание.  $\mu$  – в  $[Вт \cdot см^{-2} \cdot ср^{-1}] \cdot 10^{-3}$ ,  $\sigma^2$  в  $[Вт \cdot см^{-2} \cdot ср^{-1}]^2 \cdot 10^{-8}$

Как видно из таблицы 2 при количестве облачности 4-6 баллов среднее значение  $\mu$  в тропической зоне несколько превышает значение  $\mu$  над Европейской территорией России (ЕТР). Дисперсии ( $\sigma^2$ ) для облачности ЕТР меньше почти в 2 раза, чем  $\sigma^2$  для облачности тропиков. Это можно объяснить тем, что облака над ЕТР более холодные. Пространственный спектр мощности флуктуаций энергетической яркости (ЭЯ) в интервале простран-

ственных частот  $\Delta\omega_n$  от 6 до 200 рад<sup>-1</sup> может быть аппроксимирован выражением:

$$G(\omega) = G(\omega_n) \cdot S_{Cu}(\theta, t),$$

где  $G(\omega_n) = \sigma^2(\omega_n)$  - дисперсия флуктуаций энергетической яркости на пространственной частоте  $\omega_n$  в единицах рад<sup>-1</sup>;  $S_{Cu}(\theta, t)$  - функция, зависящая от зенитного угла  $\theta$  и времени  $t$  для Cu. Значения пространственных спектров мощности флуктуаций ЭЯ для различных  $\theta$  и  $t$  ЕТР содержатся в таблице 3.

Таблица 3

Значения пространственных спектров мощности  $\Delta G(\omega_6 - \omega_{10})$  флуктуаций энергетической яркости кучевых облаков и показателя  $S_{Cu}(\theta, t)$  (время московское)

Зенитный угол $\theta^0$	Интервалы $\Delta G(\omega_6 - \omega_{10})$	$S_{Cu}(\theta, t)$					
		9	11	13	15	17	19
40-50	$(3-8) \cdot 10^{-7}$	2,0	2,1	2,2	2,15	2,1	-
60	$(0,9-5) \cdot 10^{-8}$	1,9	1,9	1,9	1,87	1,75	-
70	$(0,8-6) \cdot 10^{-9}$	1,8	1,78	1,76	1,75	1,72	-
80	$(1-6) \cdot 10^{-11}$	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	-

Примечание.  $\Delta G(\omega_6 - \omega_{10})$  в  $[Вт \cdot см^{-2} \cdot ср^{-1}]^2 \cdot рад^{-1}$ .

Там же приведены значения  $\Delta G(\omega_6 - \omega_{10})$  – интервалы пространственного спектра и показатель  $S_{Cu}(\theta, t)$ , характеризующий наклон спектра. В таблице наглядно показаны параметризованные значения поля ЭЯ кучевой облачности, которые характеризуют ее энергетическое состояние.

В таблице 4 приведены значения коэффициентов корреляции  $R_{0,5}(\theta, t)$  при смещении реализаций по зенитному углу  $\theta$  на 2°, 4° и 6°, по которым видно уменьшение масштабов неоднородностей облачного поля при Cu.

Таблица 4

Коэффициенты взаимной корреляции  $R_{0,5}(\theta, t)$  при кучевой облачности в различное время  $t$  для зенитных углов  $\theta$  и смещении  $\Delta\theta$  относительно этих углов на 2, 4 и 6°

Зенитный угол $\theta, ^0$	Время московское часы	Коэффициенты взаимной корреляции			
		$\Delta\theta=0^0$	$\Delta\theta=2^0$	$\Delta\theta=4^0$	$\Delta\theta=6^0$
50	8-11	1	0,98	0,81	0,62
	12-14	1	0,95	0,84	0,74
	16-17	1	0,96	0,86	0,8
	8-11	1	0,92	0,81	0,58

60	12-14	1	0,96	0,84	0,80
	16-17	1	0,96	0,82	0,7
70	8-11	1	0,88	0,68	0,6
	12-14	1	0,91	0,76	0,64
	16-17	1	0,92	0,78	0,62
80	8-11	1	0,8	0,6	-
	12-14	1	0,81	0,68	-
	16-17	1	0,89	0,68	-

## 2. Слоисто – кучевая облачность (Sc).

Слоисто – кучевые облака по своей структуре иногда сходны с облаками слоистых форм, но имеют просветы различных масштабов. Их называют рваными или разорванными облаками [10,12]. Поля излучения Sc менее контрастны по энергетической яркости ЭЯ. Края облаков часто просветлены, размыты и излучают небольшую энергию по сравнению с кучевыми облаками. Однако, поведение некоторых параметров сходно с параметрами Cu. Эти сходства показаны в таблице 5.

Таблица 5

Средние значения  $\mu$ , дисперсии  $\sigma^2$ , показатели степени S пространственных спектров, коэффициенты вариации  $\sigma/\mu$  флуктуаций излучения при слоисто-кучевой облачности

Балл Об- лачно- сти	Пока- затель	$\theta^0$					
		80	70	60	50	40	30
4 – 6	$\mu$	3,30	3,2	3,1	3,05	3,0	2,9
	$\sigma^2$	0,07	0,5	3,0	8,0	8,5	9,0
	$\sigma/\mu$	0,008	0,022	0,056	0,093	0,097	0,103
	S	1,7	1,7	1,8	1,9	2,1	-
7 – 9	$\mu$	3,50	3,35	3,25	3,1	3,05	3,0
	$\sigma^2$	0,01	0,45	2,5	5,4	6,0	7,0
	$\sigma/\mu$	0,003	0,02	0,049	0,075	0,080	0,088
	S	1,7	1,7	1,75	1,9	1,9	-

Примечание.  $\mu$  в  $(Вт \cdot см^{-2} \cdot ср^{-1}) \cdot 10^{-3}$ ,  
 $\sigma^2$  в  $(Вт \cdot см^{-2} \cdot ср^{-1})^2 \cdot 10^{-8}$ .

Хотя Sc менее плотны, концентрация частиц в них значительно меньше, чем в Cu, но они теплее Cu, поэтому среднее значение  $\mu$  энергетической яркости близко к значениям  $\mu$  кучевых облаков. Сравнимы по величине и дисперсии  $\sigma^2$  флуктуаций ЭЯ для одних и тех же зенитных углов  $\theta$ .

### 3. Высококучевая облачность (Ac).

Структура поля Ac более мелкая, чем у Cu и Sc. Взаимно – корреляционные связи весьма тесны по всему полю Ac. Коэффициенты взаимной корреляции при смещении реализаций при сканировании поля по зенитному углу  $\theta$  на  $1-2^\circ$  не более 0.7. Среднее значение флуктуаций ЭЯ ( $\mu$ ) для тех же зенитных углов  $\theta$  значительно меньше, чем у Cu и Sc. То есть по параметрам Ac надежно распознавать, используя измерительные средства ФГБУ «НПО «Тайфун».

Таблица 6

Средние значения  $\mu$ , дисперсии  $\sigma^2$ , показатели степени S пространственных спектров, коэффициенты вариации  $\sigma/\mu$  флуктуаций излучения высококучевой облачности

Балл Об- лачно- сти	Пока- затель	$\theta^0$					
		80	70	60	50	40	30
4 – 6	$\mu$	-	2,0	1,7	1,5	1,3	1,2
	$\sigma^2$	-	0,1	0,8	1,0	1,5	2,0
	$\sigma/\mu$	-	0,016	0,053	0,067	0,094	0,118
	S	-	1,65	1,7	1,75	1,8	-
7 – 9	$\mu$	-	2,2	2,0	1,7	1,4	1,3
	$\sigma^2$	-	0,02	0,1	0,5	1,0	1,5
	$\sigma/\mu$	-	0,006	0,016	0,042	0,071	0,094
	S	-	1,65	1,7	1,75	1,75	-

Примечание:  $\mu$  в  $(\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}) \cdot 10^{-3}$ ,  $\sigma^2$  в  $(\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1})^2 \cdot 10^{-8}$

### 4. Радиационные характеристики слоистых (St), высокослоистых (As) и перисто-слоистых (Cs) облаков в диапазоне 8-3 мкм

Слоистые формы облачности сравнительно легко распознаются по средним значениям  $\mu$  и дисперсиям  $\sigma^2$  флуктуаций полусферической энергетической яркости (ЭЯ). Средние значения  $\mu$  слоистых (St) облаков в весенне-осеннее время изменяются в интервале ЭЯ  $(3,1-3,7) \cdot 10^{-3} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$ , радиационная температура  $T_{\text{рад}}$  всегда положительна и близка к абсолютной температуре  $T_{\text{абс}}$ , т.к. коэффициент излучения этой формы облачности близок к единице. Абсолютная температура St отличается от приземной температуры на  $3-11^0$ . Дисперсия флуктуаций ЭЯ близка к дисперсии шума аппаратуры  $\sigma^2 \approx 4 \cdot 10^{-11} (\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1})^2$  и не превосходит  $(2-3) \cdot 10^{-9} (\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1})^2$ .

Средние значения  $\mu$  высокосоистых (As) облаков в весенне-осеннее время изменяются от 1,2 до 1,8 ( $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$ )  $\cdot 10^{-10}$ . Дисперсии не просвечивающихся облаков (As op) близки к дисперсии шума аппаратуры, дисперсии просвечивающихся облаков (As trans) - в диапазоне зенитных углов  $\theta$  от  $60^\circ$  до  $30^\circ$  изменяются до  $(8-11) \cdot 10^{-10}$  ( $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$ )<sup>2</sup>, при углах  $\theta$  больших  $60^\circ$  дисперсии практически близки к дисперсии шума аппаратуры  $\sigma^2$ .

В структурах полей просвечивающихся As trans облаков наблюдаются оптические неоднородности от 3 до 15 угловых градусов, причем неоднородности иногда имеют волнистую структуру, но чаще стохастически распределенные масштабы.

Вариации излучения перисто-слоистой облачности (Cs) весьма значительны: среднее значение  $\mu$  полусферической яркости изменяется от  $0,6 \cdot 10^{-4}$   $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$  до  $1,3 \cdot 10^{-4}$   $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$ , дисперсии флуктуаций ЭЯ не превышают значений  $10^{-10}$  ( $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$ )<sup>2</sup>. Радиационная температура  $T_{\text{рад}}$  изменяется от 210 до 240К.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Алленов М. И. Структура оптического излучения природных объектов. – М.: Гидрометеиздат, 1988. – 164 с.
2. Алленов М. И. Методы и аппаратура спектрорадиометрии природных сред. – М.: Гидрометеиздат, 1992. – 262 с.
3. Алленов А. М., Алленов М. И., Иванов В. Н., Соловьев В. А. Стохастическая структура излучения облачности. – СПб.: Гидрометеиздат, 2000. – 175 с.
4. Алленов М. И., Бирюков В. Г., Иванов В. Н. Распознавание природных сред, веществ и их загрязнений. – СПб.: Гидрометеиздат, 2004. – 268 с.
5. Алленов М. И. Параметризация природных сред для их распознавания. – Обнинск, 2011. – 180 с.
6. Алленов М. И., Иванов В. Н., Третьяков Н. Д. Параметризация структур излучения и эволюции облачности. – Обнинск, 2013. – 168 с.
7. Якименко И. В. Методы, модели и средства обнаружения воздушных целей на атмосферном фоне широкоугольными оптикоэлектронными системами. г. Смоленск, Военная Академия войсковой ПВО Вооруженных Сил Российской Федерации, 2010. – 158 с.
8. Алленов А. М., Богданович С. А., Соловьев В. А., Якименко И. В. Структура излучения оптических фонов в диапазоне 0.4-15 мкм (обзор). – Труды ИЭМ. СПб.: Гидрометеиздат, 1997. – Вып. 28 (163). – С. 3-41.
9. Plank V.G. The Size Distribution of Cumulus Clouds in Representative Florida Populations. – J. Applied Meteorology. – 1969.- V.8, № 1.- P. 46-67.

10. Облака и облачная атмосфера. – Под ред. И. П. Мазина, А. Х. Хргиана, 1989. –Л.: Гидрометеиздат, 648 с.
11. Allenov A. M., Allenov M. I., Solovèv V. A. Objective parametrization of the states of a cloudy atmosphere from the structure of its own radiation in the 8-13  $\mu\text{m}$  range. – J. Opt. Technol/ - 1999. – Vol.66, №12ю – P.1096-1099.
12. Мулламаа Ю. А. Р., Сулев М. А., Пылдмаа В. К., Охврилль Х. А., Нийлиск Х. Ю., Алленов М. И., Чубаков Л. Г., Кууск А. Е. Стохастическая структура полей облачности и радиации. – Тарту: Изд. ИФА АН ЭССР, 1972. – 281 с.
13. Mullamaa Y. R. A. A statistica model of the radiation field in the presence of cumulus clouds. In Proceedings of the 9 International Clouds Physics. – Conference. Tallinn: Valgus, 1984.- P.693-697.
14. Алленов А. М., Алленов М. И., Иванов В. Н. Прогноз излучения неба при кучевой облачности. Научная конференция по результатам гидрометеорологии и мониторинга загрязнения природной среды в государствах – участниках СНГ: Сборник докладов. – С.-Петербург, апрель 2002 г. С. 30-33.
15. Itakura Y., Tsutsumi S., Takagi T. Statistical properties of the background noise for the atmospheric windows in the inter mediate infrared region. – Infrared Physics, 1974, vol.14, P.17-29.

## FORECAST OF SKY RADIATION IN VARIOUS FORMS CLOUDS IN THE RANGE OF 8-13 MICRONS

Allenov M. I., Allenov A. M., Novikov N. N., Yakimenko I. V.

The results of long-term studies of the spatial-temporal structures of self-radiation fields of various forms of frequency in the range of 8-13 microns using high-speed, high-resolution (up to 10 minutes of arc) highly sensitive equipment, patented in Russia, are presented.

**Key words:** cloud forms, radiation, statistical characteristics, forecast, parameterization, hemisphere, correlation.

Кафедра «Электромеханические системы»  
Филиал ФГБОУ ВО  
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
в г. Смоленске  
Поступила в редакцию 11.11.2019