

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТИВОИЗЛУЧЕНИЯ ОБЛАЧНОГО НЕБА В ДНЕВНОЕ И НОЧНОЕ ВРЕМЯ В ДИАПАЗОНЕ 8–13 мкм

© 2011 г. М. И. Алленов, доктор техн. наук; А. В. Артюхов, аспирант;  
Д. Н. Третьяков, аспирант; Н. Д. Третьяков, доктор техн. наук

ГУ “НПО “Тайфун”, г. Обнинск, Калужская обл.

E-mail: allenov@typhoon.obninsk.ru

Представлены результаты параметризации структур полей собственного излучения различных форм облачности, полученные с помощью сканирующего полусферического радиометра, а также результаты определения направления и скорости движения облачности в дневное и ночное время.

**Ключевые слова:** излучение неба, параметризация облачности, оптические характеристики облаков, сканирующий радиометр, сканирование облачности.

Коды OCIS: 010.1615, 010.5630.

Поступила в редакцию 15.06.2011.

## Введение

Слоистые (St), высокослоистые (As), перисто-слоистые (Cs) формы облачности, как правило, являются устойчивыми метеорологическими состояниями, которые могут иногда продолжаться несколько суток. Формы такой облачности сравнительно легко могут объективно распознаваться и прогнозироваться. На протяжении 2007–2009 гг. в весенне-осенние периоды были получены несколько тысяч полусферических изображений этих форм в диапазоне 8–13 мкм с помощью полусферического сканирующего радиометра [1, 2]. Информация о других пространственно-временных структурах приведена в [3–11].

## 1. Радиационные характеристики слоистых (St), высокослоистых (As) и перисто-слоистых (Cs) форм облачности в диапазоне от 8 до 13 мкм

Средние значения энергетической яркости (ЭЯ) St в весенне-осенне время изменяются в интервале  $\mu = (3,1–3,7) \times 10^{-3}$  Вт см<sup>-2</sup> сп<sup>-1</sup>, радиационная температура  $T_{\text{рад}}$  всегда положительна и близка к абсолютной температуре  $T_{\text{абс}}$ , так как коэффициент излучения облачности этой формы близок к единице. Абсолютная температура St отличается от приземной температуры на 3°–11°. Дисперсия флуктуаций ЭЯ близка к дисперсии шума аппаратуры

ры  $\sigma_{\text{ш}}^2 \approx 4 \times 10^{-11}$  (Вт см<sup>-2</sup> сп<sup>-1</sup>)<sup>2</sup> и не превосходит  $(2–3) \times 10^{-9}$  (Вт см<sup>-2</sup> сп<sup>-1</sup>)<sup>2</sup>.

Средние значения ЭЯ As в весенне-осенне время изменяются от  $\mu = 1,2 \times 10^{-3}$  до  $\mu = 1,8 \times 10^{-3}$  Вт см<sup>-2</sup> сп<sup>-1</sup>. Дисперсии не просвечивающейся солнечным светом облачности (As op) близки к дисперсии шума аппаратуры, дисперсии просвечивающейся облачности (As trans) в диапазоне зенитных углов  $\theta$  от 60° до 30° изменяются до  $(8–11) \times 10^{-10}$  (Вт см<sup>-2</sup> сп<sup>-1</sup>)<sup>2</sup>, при углах  $\theta > 60^\circ$  дисперсии практически близки к дисперсии шума аппаратуры  $\sigma_{\text{ш}}^2$ .

В структурах полей As trans наблюдаются оптические неоднородности от 3 до 15 угловых градусов, причем неоднородности иногда имеют периодическую структуру, но чаще – случайное (стохастическое) распределение. Распределение дисперсий флуктуаций по пространственным частотам в области  $\omega > 4$  рад<sup>-1</sup> может быть аппроксимировано, как и в [5], выражением

$$G(\omega) \approx \sigma^2(\omega_4) \omega^{-S}, \quad (1)$$

где  $S \approx 1,6–1,8$  – показатель степени,  $\sigma^2(\omega_4)$  – дисперсия флуктуаций ЭЯ на пространственной частоте 4 рад<sup>-1</sup>.

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

По данным [12, 13] коэффициент излучения Cs может изменяться от 0,2 до 0,3, однако измерения, проведенные нами, показывают, что он изменяется в больших пределах, чем приводится в этих работах.

## **2. Сравнение пространственных структур собственного излучения высокослоистой (As) и слоистой (St) облачности по дневным и ночных измерениям**

### **2.1. Пространственно-временная структура высокослоистой (As) облачности**

Для сравнения структур излучения различных форм облачности были проведены измерения в ночное время As trans с 22 ч 14.10.2009 г. до 06 ч 15.10.2009 г. (табл. 1) и в такое же время 15.10.2009 г. и 16.10.2009 г. (табл. 2).

Следует отметить сходство этих измеренных структур As trans с дневными измерениями, проведенными в весенне-осенние сезоны 2008 г. Среднее значение ЭЯ в дневное время изменилось от  $\mu = 1,2 \times 10^{-3}$  до  $\mu = 1,8 \times 10^{-3}$  Вт см<sup>-2</sup> сп<sup>-1</sup>. В ночное время 2009 г. значение  $\mu$  изменилось от  $1,47 \times 10^{-3}$  до  $1,98 \times 10^{-3}$  Вт см<sup>-2</sup> сп<sup>-1</sup>, т. е. практически находилось в том же интервале значений  $\Delta\mu$ , причем это осредненное значение получено по 897 и 856 кадрам полусферическо-

го изображения соответственно, что, несомненно, следует считать статистически обеспеченной информацией.

Анализ корреляционных связей между флуктуациями, зарегистрированными по сечениям полей облачности, показал, что облака таких форм содержат оптические неоднородности, угловые размеры которых укладываются в интервал значений от 3° до 15°. Если считать изменения коэффициента взаимной корреляции  $R(m, n)$  от 1 до 0,7, эти угловые размеры укладываются в этот интервал (до 14°, где  $m, n$  – номера сечений кадра изображений облачности). Для зенитных углов  $\theta < 50^\circ$  угловые размеры оптических неоднородностей увеличиваются до 20°. Оказалось, что значения дисперсий  $\sigma^2$  ЭЯ As несколько превышают значения  $\sigma^2$ , полученные по дневным измерениям облачных структур As trans. Эти расхождения, вероятно, следует связывать с изменчивым оптическим состоянием облачных полей, т. е. контрасты ЭЯ неоднородностей в ночных облачках оказываются более высокими, что, возможно, связано с просветлением атмосферы ночью из-за выпадения аэрозоля и его охлаждения. Распределение дисперсий  $\sigma^2(\omega)$  по пространственным частотам в области  $\omega > 4$  рад<sup>-1</sup> может быть аппроксимировано (как отмечено выше) выражением (1).

**Таблица 1.** Пространственно-временная структура собственного излучения высокослоистой облачности (ночные измерения)

Угол $\theta$ , град	$\mu, (\text{Вт см}^{-2} \text{ сп}^{-1}) \times 10^{-3}$	$\sigma^2, (\text{Вт см}^{-2} \text{ сп}^{-1})^2 \times 10^{-8}$	$\sigma/\mu$	22 ч 14.10.2009 – 06 ч 15.10.09 As trans
30	1,88	0,103	0,017	Количество кадров – 897 Среднее значение $\mu = 1,98 \times 10^{-3}$ Вт см <sup>-2</sup> сп <sup>-1</sup>
40	1,97	0,094	0,015	Среднее значение $\sigma^2 = 0,115 \times 10^{-8}$ (Вт см <sup>-2</sup> сп <sup>-1</sup> ) <sup>2</sup>
50	1,99	0,107	0,016	$S$ – от 1,6 до 1,8
60	2,03	0,134	0,018	Коэффициент вариации 0,017

**Таблица 2.** Пространственно-временная структура собственного излучения высокослоистой облачности (ночные измерения)

Угол $\theta$ , град	$\mu, (\text{Вт см}^{-2} \text{ сп}^{-1}) \times 10^{-3}$	$\sigma^2, (\text{Вт см}^{-2} \text{ сп}^{-1})^2 \times 10^{-8}$	$\sigma/\mu$	22 ч 15.10.2009 – 06 ч 16.10.2009 As trans
30	1,33	0,143	0,028	Количество кадров – 856 Среднее значение $\mu = 1,47 \times 10^{-3}$ Вт см <sup>-2</sup> сп <sup>-1</sup>
40	1,44	0,142	0,026	Среднее значение $\sigma^2 = 0,166 \times 10^{-8}$ (Вт см <sup>-2</sup> сп <sup>-1</sup> ) <sup>2</sup>
50	1,51	0,157	0,026	$S$ – от 1,6 до 1,8
60	1,55	0,144	0,028	Коэффициент вариации 0,027

Таким образом, отличительными признаками при распознавании облачности As trans могут быть следующие: среднее значение ЭЯ –  $\mu$ , интервал значений коэффициентов взаимной корреляции  $\Delta R(m, n)$  от 1 до 0,7, показатель степени  $S$  от 1,6 до 1,8. Что касается изменчивости дисперсий  $\sigma^2$  флуктуаций ЭЯ для дневных иочных измерений, то следует провести дополнительные исследования. Возможно, от этого признака следует отказаться, имея в виду достаточность других признаков для распознавания As trans.

Для непросвещивающейся облачности As определение дисперсии  $\sigma^2$  приблизительно равна дисперсии шума аппаратуры  $\sigma_{\text{ш}}^2$  и при распознавании ее применять не следует.

## 2.2. Пространственная структура слоистой (St) облачности

Измерения структур St проводились в ночное время 01, 22, 26, 27, 28 октября 2009 г. (табл. 3). Форма St определялась по рассеянному свету от источников освещения в ночное и сумеречное время на основе синоптических данных и визуальных данных операторов измерительного комплекса [1, 2]. Было получено 1593 кадра, по которым проведено осреднение статистических характеристик структур облачности. Оказалось, что среднее значение  $\mu$  флуктуаций ЭЯ не отличалось от ЭЯ облачности, зарегистрированной в дневное время, а дисперсии флуктуаций  $\sigma^2$  также укладываются в интервал вариаций  $\Delta\sigma^2$ , зарегистрированных днем. То есть эти характеристики оказались устойчивыми признаками, которые уверенно можно использовать для распознавания как в дневное, так и в ночное время. Выявленные угловые размеры оптических неоднородностей

учладываются в интервал для неоднородностей St, зарегистрированных в дневное время. Устойчивые признаки ( $\mu$ ,  $\sigma^2$  и  $\Delta R(m, n)$ ) могут быть использованы для автоматизированного распознавания St как в дневное, так и в ночное время.

## 2.3. Пример определения направления и скорости движения облачности в дневное и ночное время

Проводились оценки определения скорости и направления движения облачных структур по полученным кадрам, в том числе и для измерений в ночное время суток. Методы и алгоритмы такого определения подробно изложены в [14, 15]. Результаты определения направления (рис. 1), проведенные на основе кадров,

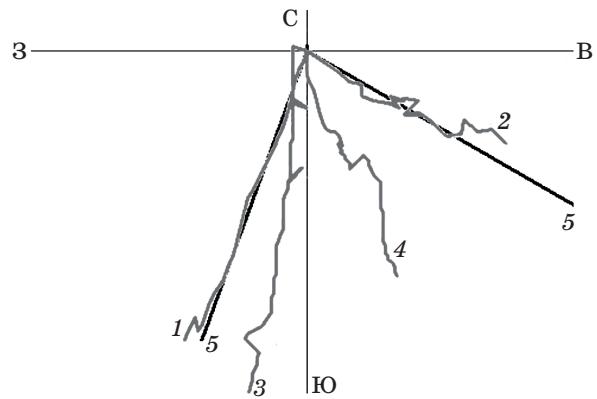
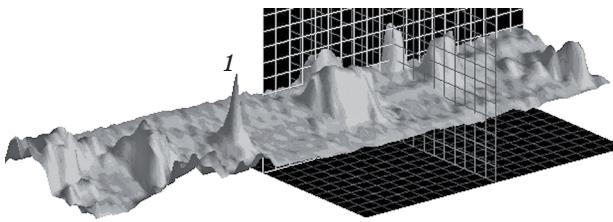


Рис. 1. Примеры определения направления движения облачности. 1–2 – линии векторов движения облачности (дневное время) (1 – 21.09.09 14:00–15:00, Cu – 6 баллов, вычисленная скорость 8,1 м/с), (2 – 21.06.07 12:20–14:00, Cu – 5 баллов, вычисленная скорость 10 м/с), 3–4 – примеры определения направления движения в ночное время суток, 5 – направление ветра в указанные интервалы времени согласно метеорологическим данным.

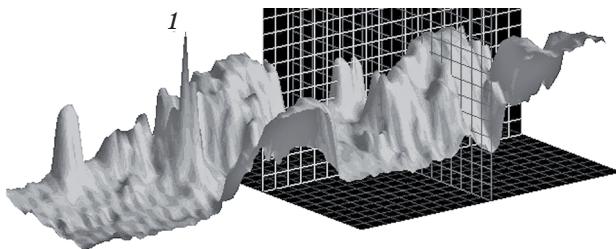
**Таблица 3.** Пространственно-временная структура собственного излучения слоистой облачности (ночные измерения)

Угол $\theta$ , град	$\mu$ , $(\text{Вт см}^{-2} \text{ср}^{-1}) \times 10^{-3}$	$\sigma^2$ , $(\text{Вт см}^{-2} \text{ср}^{-1})^2 \times 10^{-7}$	$\sigma/\mu$	St – 10 баллов
30	3,06	0,001	0,0025	Количество кадров – 1593 Среднее значение $\mu = 3,29 \times 10^{-3}$ Вт см $^{-2}$ ср $^{-1}$
40	3,26	0,001	0,0022	Среднее значение $\sigma^2 = 0,01 \times 10^{-7}$ (Вт см $^{-2}$ ср $^{-1}$ ) $^2$
50	3,38	$\sigma_{\text{ш}}^2$ *	0,0019	$S$ – от 1,6 до 1,8
60	3,4	$\sigma_{\text{ш}}^2$	0,0012	Коэффициент вариации 0,001

\*  $\sigma_{\text{ш}}^2 \approx 10^{-11}$  (Вт см $^{-2}$  ср $^{-1}$ ) $^2$



**Рис. 2.** Трехмерное изображение кучевой Си облачности (3 балла, 26.03.2008, 08 ч) 1 – прошедшее через облака излучение Солнца.



**Рис. 3.** Трехмерное изображение кучевой Си облачности (6 баллов, 26.03.2008, 11 ч) 1 – прошедшее через облака излучение Солнца.

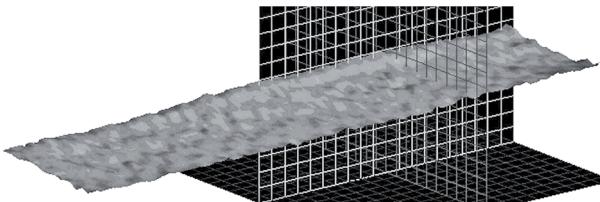
полученных как в дневное, так и в ночное время, хорошо согласуются с соответствующими данными о скорости ветра, полученными с помощью высотной метеомачты.

### 3. Характерные пространственные структуры полей собственного излучения облачности

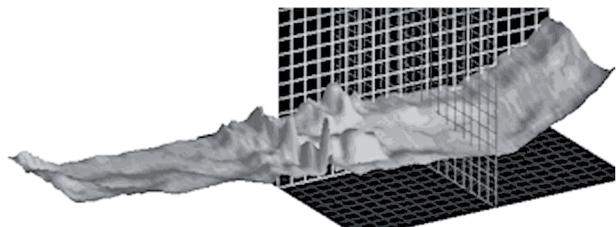
На рис. 2–5 в трехмерном виде представлены некоторые характерные ситуации для кучевой Си и смешанных облачностей различного балла, где по горизонтали отложены градусы горизонтального кругового сканирования, по вертикали – энергетическая яркость, а по диагональной оси – градусы вертикального сканирования по зенитному углу от  $30^{\circ}$  до  $62^{\circ}$ . Пик 1 на рис. 2 и 3 – прошедшее через облака излучение Солнца.

### Заключение

Рассмотрены вопросы спектральной и пространственной структуры слоистой облачности в спектральном интервале 8–13 мкм. Полученные данные о пространственной и энергетической структурах облачности могут быть ис-



**Рис. 4.** Трехмерное изображение слоистой St облачности (10 баллов, 25.03.2008, 11 ч).



**Рис. 5.** Трехмерное изображение смешанных форм облачности (10 баллов, Ac, Cu, Sc, 29.09.2009, 16 ч).

пользованы для ее объективной параметризации. Приведена оценка аппаратурного метода определения скорости и направления движения облачности.

\* \* \* \* \*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Алленов М.И., Иванов В.Н., Третьяков Н.Д., Третьяков Д.Н. Сканирующий полусферический радиометр // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 5. С. 162–163.
2. Алленов М.И., Иванов В.Н., Третьяков Н.Д. Устройство распознавания форм облачности // Патент России № 2331853. 2008.
3. Алленов М.И. Структура оптического излучения природных объектов. М.: Гидрометеоиздат, 1988. 164 с.
4. Алленов М.И. Методы и аппаратура спектрорадиометрии природных сред. М.: Гидрометеоиздат, 1992. 262 с.
5. Алленов А.М., Алленов М.И., Иванов В.Н., Соловьев В.А. Стохастическая структура излучения облачности. СПб.: Гидрометеоиздат, 2000. 174 с.
6. Алленов А.М., Соловьев В.А. Корреляционные (пространственные) связи между флюктуациями яркости, создаваемыми облачными неоднородностями в диапазоне 8–13 мкм // Труды Института экспериментальной метеорологии. СПб.: Гидрометеоиздат, 1995. В. 25(160). С. 3–14.

7. Алленов А.М., Иванова Н.П. Временная изменчивость пространственной структуры излучения неба в диапазоне 8–13 мкм при кучевой облачности // Оптический журнал. 2001. Т. 68. № 3. С. 43–44.
8. Алленов А.М., Алленов М.И. Прогноз параметров собственного излучения неба при кучевой (Cu) облачности в диапазоне 8–13 мкм // Сб. трудов VI Междунар. конф. “Прикладная оптика-2004”. СПб., 2004. С. 88–93.
9. Алленов М.И., Артюхов А.В., Иванов В.Н., Третьяков Н.Д. Структура излучения неба при смешанных формах облачности в диапазоне 8–13 мкм // Сб. трудов VIII Междунар. конф. “Прикладная оптика-2008”. СПб., 2008. С. 263–267.
10. Мулламаа Ю.-А.Р., Сулемаа В.К., Охвиль Х.А., Нийлиск Х.Ю., Алленов М.И., Чубаков Л.Г., Күуск А.Е. Стохастическая структура полей облачности и радиации / Под ред. Ю.-А.Р. Мулламаа. Тарту: Институт физики и астрономии, АН ЭССР, 1972. 281 с.
11. Алленов М.И., Алленов А.М., Соловьев В.А. Объективная параметризация состояний облачной атмосферы по структуре ее собственного излучения в диапазоне 8–13 мкм // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 12. С. 101–105.
12. Кондратьев К.Я. Лучистый теплообмен в атмосфере. Л.: Гидрометеоиздат, 1956. 420 с.
13. Новосельцев Е.П. Излучательная способность облаков различных ярусов // Труды VI Межведомственного совещания по актинометрии и оптике атмосферы. Таллин: Валгус, 1968. С. 131.
14. Алленов М.И., Артюхов А.В., Иванов В.Н., Третьяков Н.Д., Якименко И.В. Способ определения направления и скорости движения облачности по структуре собственного излучения в диапазоне 8–13 мкм // Математическая морфология. Электронный математический и медико-биологический журнал. 2010. Т. 9. В. 4.
15. Алленов М.И., Артюхов А.В., Иванов В.Н., Третьяков Н.Д. Способ определения направления и скорости движения нижней границы облачности // Патент России № 2414728. 2011.