

ДИАГНОЗ И ПРОГНОЗ СТРУКТУР СОБСТВЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ФОРМ ОБЛАЧНОСТИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ИХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

М.И. Алленов, А.В. Артюхов, Д.Н. Третьяков

ГУ «НПО «Тайфун», г. Обнинск Калужской обл.;
allenov@typhoon.obninsk.ru

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: излучение; небо; облачность; параметризация; пространство; радиометр; сканирование; форма.

Аннотация: Приведены результаты параметризации пространственно-временных структур собственного излучения форм облачности для мониторинга их загрязнений. Данные о пространственно-временной структуре излучения облачности были получены с помощью автоматизированной системы для объективной параметризации форм и балла облачности.

Одной из важных проблем современности является параметризация природных сред (атмосферы, облачности, водных объектов, растительных покровов, почв и др.) для контроля и распознавания их состояния.

В статье представлены результаты параметризации структур полей собственного излучения различных форм облачности, наиболее часто встречающихся в изменчивой природной обстановке, которые маскируют многие загрязняющие природную среду объекты нефтегазовой, химической, перерабатывающей промышленности, предприятия переработки отходов производств.

Эти антропогенные воздействия иногда приводят к тяжелым последствиям для безопасности окружающей среды и населения, когда их реабилитация становится весьма сложной, а иногда невозможной. Предприятия выбрасывают вредные газы, сыпучие вредные вещества (цемент, известковые, угольные аэрозоли и т.д.), которые вызывают повышенную коагуляцию облачных частиц, выпадение кислотных дождей, сажи, других химических веществ в виде поверхностно активных соединений. Все это приводит к изменению пространственно-временной структуры облачности, по которой возможно контролировать нарушение состояния параметризованной среды [1]. В настоящее время в ГУ «НПО «Тайфун» разрабатывается логическая система сортировки признаков распознавания форм облачности, которая должна отфильтровывать сомнительные данные и выдавать потребителю объективную информацию о форме и количестве облачности. Приведенные результаты, несомненно, могут быть использованы для разработки методов и средств контроля для мониторинга окружающей среды.

Слоистые (St), высокослоистые (As), перисто-слоистые (Cs) формы облачности, как правило, являются устойчивыми метеорологическими образованиями, которые могут иногда продолжаться несколько суток. Формы такой облачности сравнительно легко могут объективно распознаваться и прогнозироваться.

На протяжении 2007–2010 гг. в весенне-осенние периоды нами были получены несколько тысяч полусферических трехмерных изображений полей собственного излучения этих форм в диапазоне 8–13 мкм при помощи полусферического сканирующего радиометра [2, 3]. (Информация о других пространственно-временных структурах приведена в [4–7]).

Радиометр содержит охлаждаемый жидким азотом приемник излучения на основе CdHgTe, который находится в фокусе двухкомпонентного зеркального объектива Кассегрена. Перед объективом установлена маска модулятора и далее модулятор с таким же числом лопастей. Промодулированный сигнал с приемника поступает на предусилитель, масштабный усилитель, двухполупериодный синхронный детектор, фильтр нижних частот и далее на аналоговый вход АЦП платы сопряжения ЛА-70М4 с РС. Управление шаговыми двигателями сканирующей системы осуществляется персональным компьютером. Обмен командами происходит через цифровые входы (выходы) платы ЛА70М4 и блок управления. Сканирующее зеркало обеспечивает полный оборот вокруг своей оси за время 1 с, то есть полное круговое сканирование по альмукантарату осуществляется за 1 с. За это время регистрируется 360 значений энергетической яркости облачного поля через каждый градус. После завершения записи данных поступает сигнал на шаговый двигатель, и зеркало меняет угол наклона (от 20 мин до нескольких градусов в зависимости от задачи), цикл повторяется. После следующего оборота угол меняется на заданную величину. Через заданное количество шагов (строк), например 17, шаговый двигатель возвращает сканирующее зеркало в исходное начальное положение, цикл повторяется и записывается следующий кадр. Таким образом, мы получаем набор матриц, где по горизонтали 360 значений, а по вертикали – 17 (или другое, заданное нами количество строк). Каждое из 6120 значений представляет собой конкретную область – изображение в ИК области на небесной сфере. Сканирующий полусферический радиометр имеет следующие основные характеристики:

- чувствительность – $1,3 \cdot 10^{-5}$ Вт·см⁻²·ср⁻¹ или 0,1 К;
- спектральный диапазон – 8...13 мкм;
- поле зрения – 10 мин дуги;
- динамический диапазон регистрируемых энергетических яркостей – 60 дБ;
- скорость сканирования – 360°/с;
- дискретность углов по вертикали – от десятков минут до единиц градусов;
- дискретность углов по горизонтали – 1°;
- количество задаваемых строк (по зенитному углу) – 1...80;
- масса прибора (без системы регистрации) – 8 кг.

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

Средние значения μ полусферической (в полусфере неба) энергетической яркости (ЭЯ) слоистых (St) облаков в весенне-осеннее время изменяются в интервале $(3,1...3,7) \cdot 10^{-3}$ Вт·см⁻²·ср⁻¹, радиационная температура $T_{\text{рад}}$ всегда положительна и близка к абсолютной температуре $T_{\text{абс}}$, так как коэффициент излучения этой формы облачности близок к единице. Абсолютная температура St отличается от приземной температуры на 3–11 °С. Дисперсия флуктуаций ЭЯ близка к дисперсии шума аппаратуры $\sigma_{\text{ш}}^2 \approx 4 \cdot 10^{-11}$ (Вт·см⁻²·ср⁻¹)² и не превосходит $(2...3) \cdot 10^{-9}$ (Вт×см⁻²·ср⁻¹)².

Средние значения μ ЭЯ высоко-слоистых (As) облаков в весенне-осеннее время изменяются от $1,2 \cdot 10^{-3}$ до $1,8 \cdot 10^{-3}$ Вт·см⁻²·ср⁻¹. Дисперсии не просвечивающихся облаков (As op) близки к дисперсии шума аппаратуры, дисперсии просве-

чивающихся облаков (As trans) – в диапазоне зенитных углов θ от 60 до 30° изменяются до $(8...11) \cdot 10^{-10}$ (Вт·см⁻²·ср⁻¹)², при углах θ больших 60° дисперсии практически близки к дисперсии шума аппаратуры $\sigma_{ш}^2$.

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. Распределение дисперсий флуктуаций по пространственным частотам (волновым числам) в области $\omega > 4$ рад⁻¹ может быть аппроксимировано выражением

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

где S – показатель степени $\approx 1,6...1,8$; $\sigma^2(\omega_4)$ – дисперсия флуктуаций ЭЯ на пространственной частоте 4 рад⁻¹.

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

Коэффициент излучения Cs по данным [8, 9] может изменяться от $0,2$ до $0,3$. Такое заниженное значение коэффициентов сомнительно. Измерения, проведенные нами, показывают, что коэффициент излучения Cs изменяется в больших пределах, чем приводится в этих работах.

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

2.1. Пространственно-временная структура высокослоистой (As) облачности

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

Следует отметить сходство структур As trans с дневными измерениями, проведенными в весенне-осенние сезоны 2008 г. Среднее значение ЭЯ μ в дневное

Таблица 1

Пространственно-временная структура собственного излучения высокослоистой облачности (ночные измерения) (22 ч 14.10.2009 – 06 ч 15.10.09, As trans)

Угол θ	$\mu \times 10^{-3}$, Вт·см ⁻² ·ср ⁻¹	$\sigma^2 \times 10^{-8}$, (Вт·см ⁻² ·ср ⁻¹) ²	σ/μ
30°	1,88	0,103	0,017
40	1,97	0,094	0,015
50	1,99	0,107	0,016
60	2,03	0,134	0,018

Примечание. Количество кадров – 897 ; общее среднее по кадрам – $1,98 \cdot 10^{-3}$ Вт·см⁻²·ср⁻¹; общая дисперсия по кадрам – $0,115 \cdot 10^{-8}$ (Вт·см⁻²·ср⁻¹)²; S (показатель степени, формула (1)) – от $1,6$ до $1,8$; коэффициент вариации – $0,017$.

Таблица 2

**Пространственно-временная структура собственного излучения
высокослойной облачности (ночные измерения)
(22 ч 15.10.2009 – 06 ч 16.10.2009, As trans)**

Угол θ	$\mu \times 10^{-3}$, Вт · см ⁻² · ср ⁻¹	$\sigma^2 \times 10^{-8}$, (Вт · см ⁻² · ср ⁻¹) ²	σ/μ
30	1,33	0,143	0,028
40	1,44	0,142	0,026
50	1,51	0,157	0,026
60	1,55	0,144	0,028

Примечание. Количество кадров – 856; общее среднее по кадрам $1,47 \cdot 10^{-3}$ Вт · см⁻² · ср⁻¹; общая дисперсия по кадрам $0,166 \cdot 10^{-8}$ (Вт · см⁻² · ср⁻¹)²; S (показатель степени, формула (1)) – от 1,6 до 1,8; коэффициент вариации 0,027.

время изменялось от $1,2 \cdot 10^{-3}$ до $1,8 \cdot 10^{-3}$ Вт · см⁻² · ср⁻¹. В ночное время 2009 г. μ изменялось от $1,47 \cdot 10^{-3}$ до $1,98 \cdot 10^{-3}$ Вт · см⁻² · ср⁻¹, то есть практически находилось в том же интервале значений $\Delta\mu$, причем это осредненное значение получено по 897 и 856 кадрам полусферического изображения соответственно, что, несомненно, следует считать статистически обеспеченной информацией.

Анализ корреляционных связей между флуктуациями зарегистрированных по сечениям полей облачности показал, что облака таких форм содержат оптические неоднородности, масштабы которых укладываются в интервал значений от 3 до 15°. Если считать изменения коэффициента взаимной корреляции $R(m, n)$ от 1 до 0,7, эти масштабы укладываются в этот интервал (до 14°, где m, n – номера сечений кадра изображений облачности). Для зенитных углов $\theta < 50^\circ$ угловые масштабы оптических неоднородностей увеличиваются до 20°. Оказалось, что величины дисперсий σ^2 ЭЯ несколько превышают значения σ^2 , полученные по дневным измерениям облачных структур As trans. Эти расхождения, вероятно, следует связывать с изменчивым оптическим состоянием облачных полей, то есть контрасты ЭЯ неоднородностей в ночных облаках оказываются более высокими, возможно это 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⁻¹ может быть аппроксимировано выражением (1).

Таким образом, отличительными признаками при распознавании облачности As trans могут быть: среднее значение ЭЯ – μ ; 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 σ^2 флуктуаций ЭЯ для дневных и ночных измерений, следует провести дополнительно исследования, возможно от этого признака следует отказаться, имея в виду достаточность других признаков для распознавания As trans.

Для непросвечивающихся облаков (As op) дисперсия σ^2 приблизительно равна $\sigma_{\text{ш}}^2$ – дисперсии шума аппаратуры и при распознавании ее применять не следует.

2.2. Пространственная структура слоистой (St) облачности

Измерения структур слоистой облачности (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 время и в сумеречное время на основе синоптических данных и визуальных данных операторов измерительного комп-

**Пространственно-временная структура собственного излучения
слоистой облачности (ночные измерения) (St – 10 баллов)**

Угол θ	$\mu \times 10^{-3},$ $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$	$\sigma^2 \times 10^{-8},$ $(\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1})^2$	σ/μ
30	3,06	0,001	0,0025
40	3,26	0,001	0,0022
50	3,38	$\sigma_{\text{ш}}^2$	0,0019
60	3,40	$\sigma_{\text{ш}}^2$	0,0012

Примечание. $\sigma_{\text{ш}}^2 \approx 10^{-11} (\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1})^2$; количество кадров – 1593; общее среднее по кадрам $3,29 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$; общая дисперсия по кадрам $0,01 \cdot 10^{-7} (\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1})^2$; S (показатель степени, формула (1)) – от 1,6 до 1,8; коэффициент вариации 0,010.

лекса АСПРФО. Было получено 1593 кадра, по которым проведено осреднение статистических характеристик структур облачности. Оказалось, что среднее значение μ флуктуаций ЭЯ не отличалось от ЭЯ облачности, зарегистрированной в дневное время, дисперсии флуктуаций σ^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 масштабы оптических неоднородностей укладываются в интервал для неоднородностей St , зарегистрированных в дневное время. Устойчивые признаки (μ , σ^2 и $\Delta R(m, n)$) могут быть использованы для автоматизированного распознавания St как в дневное, так и ночное время.

Полученные данные о пространственной и энергетической структурах полей радиации различных форм облачности, на основе набора представленных статистических характеристик флуктуаций энергетической яркости, позволяют использовать их в качестве классификаторов для объективной параметризации различных форм облачности.

Список литературы

1. Алленов, М.И. Распознавание природных сред, веществ и их загрязнений / М.И. Алленов, В.Г. Бирюков, В.Н. Иванов. – СПб. : Гидрометеоздат, 2004. – 268 с.
2. Сканирующий полусферический радиометр / М.И. Алленов [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – № 5. – С. 162–163.
3. Пат. 2331853 Российская Федерация, МПК G 01 J 3/06. Устройство распознавания форм облачности / М.И. Алленов, В.Н. Иванов, Н.Д. Третьяков ; заявитель и патентообладатель ГУ «НПО «Тайфун». – № 2006112101 ; заявл. 13.04.2006 ; опубл. 20.08.08, Бюл. № 23.
4. Алленов, М.И. Структура оптического излучения природных объектов / М.И. Алленов. – М. : Гидрометеоздат, 1988. – 164 с.
5. Алленов, М.И. Методы и аппаратура спектрорадиометрии природных сред / М.И. Алленов. – М. : Гидрометеоздат, 1992. – 262 с.
6. Стохастическая структура излучения облачности / М.И. Алленов [и др.]. – СПб. : Гидрометеоздат, 2000. – 174 с.
7. Алленов, А.М. Временная изменчивость пространственной структуры излучения неба в диапазоне 8–13 мкм при кучевой облачности / А.М. Алленов, Н.П. Иванова // Оптический журнал. – 2001. – Т. 68, № 3. – С. 43–44.

8. Кондратьев, К.Я. Лучистый теплообмен в атмосфере / К.Я. Кондратьев. – Л. : Гидрометеиздат, 1956. – 420 с.

9. Новосельцев, Е.П. Излучательная способность облаков различных ярусов / Е.П. Новосельцев // Актинометрия и оптика атмосферы : тр. VI Межведомств. совещ. по актинометрии и оптике атмосферы, июнь, 1966 г., Тарту / Акад. наук Эстон. ССР, Ин-т физики и астрономии ; отв. ред. В. Пылдмаа. – Таллин, 1968. – С. 131.

Diagnosis and Forecast of Structures of Natural Radiation of Cloud Types for Monitoring of Pollution

M.I. Allenov, A.V. Artyukhov, D.N. Tretyakov

*GU "NPO "Taifun", Obninsk, Kaluga region;
allenov@typhoon.obninsk.ru*

Key words and phrases: clouds; form; parameterization; radiation; radiometer; scanning; sky; spatial.

Abstract: The paper presents the parameterization results of spatial-temporal structures of clouds self-radiation for monitoring of their pollution. Data on the spatial-temporal structure of clouds radiation were obtained using an automated system for the objective parameterization of clouds shape and fraction.

Diagnose und Prognose der Strukturen der eigenen Strahlung der Bewölkungsformen für die Monitoring ihrer Verschmutzungen

Zusammenfassung: Es werden die Resultate der Parametrisierung der räumlich-zeitlichen Strukturen der eigenen Strahlung der Bewölkungsformen für die Monitoring ihrer Verschmutzungen angeführt. Die Angaben über die räumlich-zeitlichen Strukturen der Strahlung der Bewölkung wurden mit Hilfe des automatisierten System für die objektiven Parametrisierung der Formen und des Grades der Bewölkung erhalten.

Diagnostic et prévision des structures du propre rayonnement des formes de la nébulosité pour le monitoring de leur pollution

Résumé: Sont cités les résultats des paramètres des structures spatiales et temporelles du propre rayonnement des formes de la nébulosité pour le monitoring de leur pollution. Les données sur la structure spatiale et temporelle du rayonnement ont été obtenues à l'aide du système automatisé pour les paramètres des formes et les points de la nébulosité.

Авторы: *Алленов Михаил Иванович* – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник; *Артюхов Александр Викторович* – аспирант; *Третьяков Дмитрий Николаевич* – аспирант, ГУ «НПО «Тайфун», г. Обнинск, Калужская область.

Рецензент: *Позин Анатолий Александрович* – доктор технических наук, начальник Центра геофизических, экологических, ракетно-космических технологий, Институт экспериментальной метеорологии, ГУ «НПО «Тайфун», г. Обнинск, Калужская область.