

УДК 535.012.2

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛИДАРОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕДЯНЫХ (ПЕРИСТЫХ) ОБЛАКОВ

<sup>1,2</sup>С.А. Будунова, <sup>1</sup>А.Г. Боровой, <sup>1</sup>Н.В. Кустова

## USING SPACE LIDARS TO EXAMINE ICE (CIRRUS) CLOUDS

<sup>1,2</sup>S.A. Budunova, <sup>1</sup>A.G. Borovoi, <sup>1</sup>N.V. Kustova

Работа носит обзорный характер. Проведен обзор литературы по классификации облачных систем и методам дистанционного зондирования околоземной атмосферы. Оптика перистых облаков – одна из наиболее актуальных и быстро развивающихся областей атмосферных исследований. Оптические модели перистых облаков необходимы для включения их в радиационный блок численных моделей циркуляции атмосферы и, следовательно, в численные модели изменения климата.

The article has an observing character. The literature review on classification of cloudy systems and methods of distant sounding of circumterrestrial atmosphere has been led. Optics of cirrus clouds appears to be one of the most actual and quickly developing areas of atmospheric researches. Optical models of cirrus clouds are necessary for their switching-on in the radiation unit of numerical models of circulation of atmosphere and, hence, in climate change numerical models.

Современные численные модели радиационного баланса и циркуляции атмосферы Земли, а также, соответственно, численные модели долгосрочного прогноза погоды и изменения климата нуждаются в надежных данных по оптическим характеристикам облаков.

Имея сложный состав и переменные параметры, облака верхнего яруса (далее ОВЯ) являются одним из климатообразующих факторов планетарного масштаба. Необходимо отметить также, что являясь по существу функциональным природным элементом значительного масштаба, ОВЯ влияют на экологическую ситуацию, что также говорит о необходимости изучения природы ОВЯ. Таким образом, определение характеристик ОВЯ становится одной из актуальных задач современности. ОВЯ при сравнительно малой оптической толщине дают значительный вклад в парниковый эффект и изменение альбедо (характеристика отражательной (рассеивающей) способности) системы Земля–атмосфера до 5 %. Тонкие ОВЯ, расположенные над подстилающей поверхностью с малым альбедо, больше влияют на альбедо системы, чем плотные нижерасположенные облака. Перистые облака являются наиболее общей формой ОВЯ и состоят из кристаллов льда, которые возникают из переохлажденных капелек воды. Отличаются большей протяженностью и тем, что не заполняют все небо, а главное, обладают характерной прерывистой структурой. По внешнему виду представляют собой отдельные белые волокнистые облака в виде тонких нитей или хлопьев. Располагаются на высотах от 6 до 10 км, летом до 12 км, в тропиках до 14–18 км. Толщина облачного слоя составляет несколько сотен метров, иногда 1–2 км. Горизонтальные размеры отдельных частей – от 300–500 м до нескольких километров, в целом облачные массивы могут занимать несколько сотен километров. Температура воздуха в облачном слое составляет от –30 до –60 °С. Скорость перемещения зависит от фактической скорости ветра в этом слое и варьирует в широких пределах от 10–20 до 100–120 км/ч, иногда до 150–200 км/ч. Сквозь облака хорошо просвечивают Солнце, Луна, звезды (по крайней мере, наиболее яркие). Солнечные тени от предметов резкие. Иногда видны сегменты кругов (гало) вокруг Солнца (Луны) размером 22° или 46°. Редкие слабые осадки в виде ледяных игол достигают

земной поверхности лишь при сильных морозах (–30 °С и ниже).

Оптика облаков, содержащих кристаллы льда, к настоящему времени изучена недостаточно. Исследования форм кристаллов в облаках проводились с помощью аэростатов и самолетов. На основании имеющихся статистически малообеспеченных данных трудно сделать обоснованное заключение об общих закономерностях повторяемости форм кристаллов в облаках. Формы облачных кристаллов весьма разнообразны. По принятой Международной метеорологической организацией классификации встречающиеся в облаках и осадках кристаллы подразделяются на 10 видов (рис. 1). Нельзя не упомянуть также о существовании системы Магоно и Ли, обладающей более высокой информативностью и наглядностью.

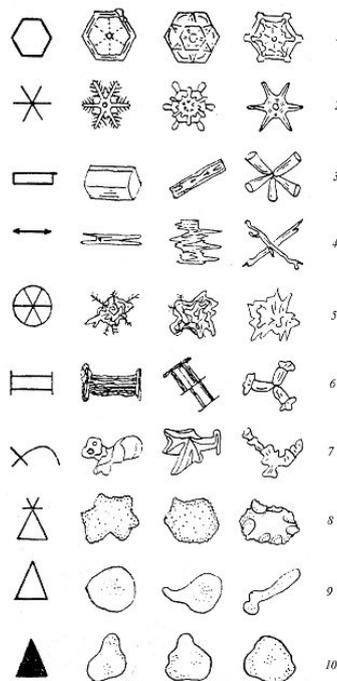


Рис. 1. Международная классификация форм ледяных кристаллов и гидрометеоров: 1 – гексагональные пластинки; 2 – звездочки, плоские дендриты; 3 – гексагональные столбики (включая пучки столбиков); 4 – иглы; 5 – пространственные дендриты; 6 – запонки; 7 – кристаллы неправильной формы; 8 – крупа; 9 – мокрые снежинки; 10 – градины.

Однако при исследовании оптических свойств кристаллических облаков используют более простое подразделение облачных кристаллов: столбчатые, пластинчатые и кристаллы объемной формы. Оно позволяет аппроксимировать кристаллы телами простых геометрических форм: цилиндрами, призмами и пластинками.

Настоящим прорывом в развитии методов исследования характеристик облачности считается использование лазеров, которое дало возможность оперативно измерять высоту, вертикальную протяженность, распределение плотности и динамику ОВЯ. Таким образом, рассеянное облаками излучение лазера, зафиксированное с помощью регистрирующей аппаратуры, позволяет получить большой объем информации об ОВЯ. Лазер обладает когерентным и монохроматическим излучением. Эти свойства определяют возможности лазерного зондирования, их огромные преимущества по сравнению, например, с прожекторным лучом. Налетая на молекулу или частицу аэрозоля, фотон может участвовать в нескольких процессах. Первый: фотон полностью передает свою энергию, например молекуле. Вещество нагревается, а сам фотон исчезает – это процесс поглощения. Второй: фотон при столкновении изменяет направление движения – происходит рассеяние. Столкнувшись с молекулой, фотон может поглотиться с последующим испусканием других фотонов. Это третий процесс – спонтанное комбинационное рассеяние (СКР). При совпадении частоты энергетического перехода в спектре атома с частотой излученного лазером фотона наблюдается процесс резонансного рассеяния (РР). Важно отметить, что небольшая часть фотонов (12 % при молекулярном рассеянии и около 3 % при аэрозольном) все-таки, испытав рассеяние, направляется обратно к лазеру. Это позволяет поставить рядом с ним приемник фотонов, т. е. осуществить локационный принцип измерений, создать лазерный локатор – лидар. Этот прибор по принципиальному устройству аналогичен радиолокатору (радару), а назван по английской аббревиатуре Light Detection and Ranging (свет детектирует и измеряет расстояние). С помощью приемной оптики он собирает обратное излучение и направляет его на фотодетектор, который преобразует это излучение в электрический сигнал, пропорциональный его интенсивности (рис. 2).

При лазерном зондировании плотная облачность существенно ослабляет лазерное излучение, и с поверхности Земли уже нельзя получить сведения о состоянии атмосферы выше облаков. Выход один – зондировать атмосферу с космических аппаратов. По сравнению с лидарами, установленными на самолетах и на земной поверхности, лидарная система, выведенная на околоземную орбиту, имеет ряд преимуществ. Основными являются возможность зондирования атмосферы на таких длинах волн, излучение которых полностью поглощается в нижних слоях атмосферы, а также обеспечение высокой разрешающей способности при синоптических масштабах наблюдения. В рамках программы NASA EOS (Earth Observing System – Система наблюдения Земли) 28 апреля 2006 г. были запущены спутники

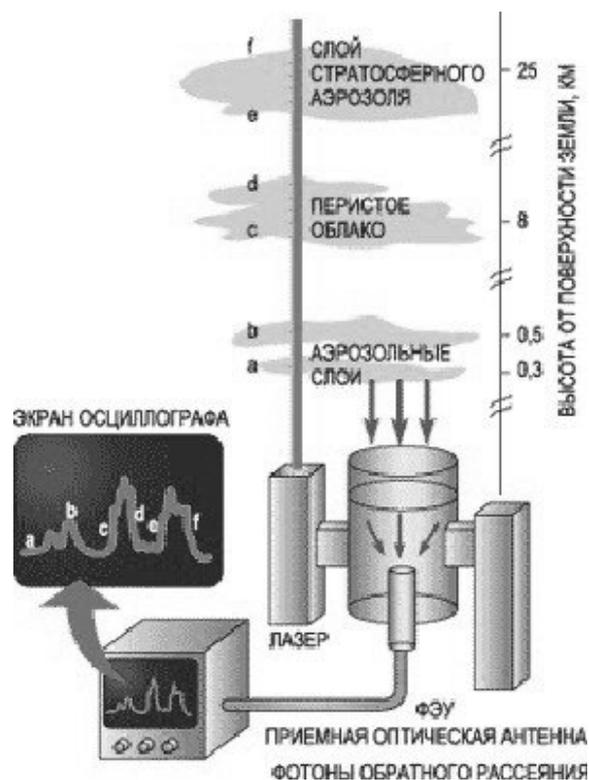


Рис. 2. Схема работы лидара.

ClouSat (Cloud Satellite) и CALIPSO (Cloud Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation), предназначенные для изучения облачного покрова Земли. Оба спутника предназначены для получения трехмерных изображений облаков и атмосферных аэрозолей, а также для исследования процесса формирования и развития облаков и их влияния на погоду, климат, качество воздуха и количество осадков.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Волковицкий О.А., Павлова Л.Н., Петругин А.Г. Оптические свойства кристаллических облаков. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 198 с.
- Ромашов Д.Н., Кауль Б.В., Самохвалов И.В. Банк данных для интерпретации результатов поляризационного зондирования кристаллических облаков // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13, № 9. С. 854–861.
- Николаева Д.А., Чукин В.В. Моделирование параметров кристаллов льда. СПб, 2008. 83 с.
- Костко О.К. Лазер исследует атмосферу // Наука и жизнь. 2002. № 12. С. 47.
- Кустова Н.В., Боровой А.Г. Метод теневых функций в ореольном рассеянии // Оптика атмосферы и океана. 2006. Т. 19, № 10. С. 865–871.
- Боровой А.Г., Кустова Н.В., Коэн А., Оппель У.Г. Разработка оптической модели перистых облаков // Международный симпозиум стран СНГ «Атмосферная радиация» (МСАР 2004). Санкт-Петербург. 2004. С. 76.
- Кустова Н.В., Боровой А.Г., Оппель У.Г. Поляризационные характеристики лидарных сигналов, отраженных от перистых облаков // Международный симпозиум стран СНГ «Атмосферная радиация» (МСАР 2004). Санкт-Петербург. 2004. С. 127–128.
- Исмару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т. 1. Intergovernmental Panel on Climate Change 2007 The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report

of the IPCC // New York: Cambridge University Press. 2007. 996 p.

Liou K.N. Influence of cirrus clouds on weather and climate process: a global perspective // Mon. Weather Rev. 1986. P. 1167–1199.

Baran J. A review of the light scattering properties of cirrus Anthony // J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. 2009. V. 110. P. 1239–1260.

Iwasaki S., Okamoto H. Analysis of the enhancement of backscattering by nonspherical particles with flat surfaces // Applied Optics. 20 November 2001. V. 40, N 33. P. 6121–6129.

Borovoi A., Galileiskii V., Morozov A., Cohen A. Detection of ice crystal particles preferably oriented in the atmosphere by use of the specular component of scattered light // Opt. Express. 2008. V. 16. P. 7625–7633.

<sup>1</sup>*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск*  
<sup>2</sup>*Томский государственный университет, Томск*