

Угольников О.С. (отдел 64)

Широкоугольные трехцветные и поляризационные измерения микрофизических свойств облачных частиц в средней атмосфере Земли

Цикл из 3 статей:

1. Ugolnikov, O.S., Kozelov, B.V., Pilgaev, S.V., Roldugin, A.V., 2021. Retrieval of particle size distribution of polar stratospheric clouds based on Wide-Angle Color and Polarization Analysis. *Planetary and Space Science*, V.200, P.105213. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2021.105213>.
(О.С. Угольников – единственный соавтор из ИКИ)

2. Ugolnikov, O.S., 2023. Altitude and particle size measurements of noctilucent clouds by RGB photometry radiative transfer and correlation analysis. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, V.296, P.108433. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2022.108433>.

3. Ugolnikov, O.S., 2023. Cross-wave profiles of altitude and particle size of noctilucent clouds in the case of one-dimensional small-scale gravity wave pattern. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, V.243, P.106024. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2023.106024>.

Общая формулировка проблемы и ее актуальность

Изменения состава и свойств атмосферы Земли, происходящие в последние десятилетия, в том числе антропогенной природы, существенно зависят от высоты, а также могут иметь выраженный сезонный характер. Рост содержания парниковых газов вызывает нагрев тропосферы, однако на больших высотах температура падает вследствие ослабления исходящего инфракрасного излучения Земли, а еще выше – за счет механизма радиативного выхолаживания на молекулах CO₂.

Охлаждение средней атмосферы делает возможным появление жидких и твердых частиц вблизи слоев температурных минимумов – около 20 км зимой и 80-85 км летом. Частицы полярных стратосферных облаков (насыщенные растворы H₂SO₄ и HNO₃ – I тип и водяной лед – II тип) играют важную роль в химических процессах, в конечном итоге ведущих к разрушению стратосферного озона. Полярные мезосферные (или серебристые) облака, самые холодные в земной атмосфере, являются чувствительным маркером не только температуры, но и содержания водяного пара выше 80 км, также проявляющего тенденцию к увеличению в последние десятилетия.

Конкретная решаемая в работе задача и ее значение

Для изучения связи образования частиц и физических характеристик слоев атмосферы и их возможных трендов важны данные о высотах облачных слоев и микрофизики частиц, прежде всего – их размеров. В работе предлагаются методы пассивного наземного измерения, точность которых сопоставима с лидарным и спутниковым зондированием, а стоимость – существенно ниже. Методика может лечь в основу систематического (в том числе сетевого) мониторинга из большого числа наблюдательных пунктов на поверхности Земли.

Задача работы состоит в проведении измерений облачных полей посредством широкоугольной фотометрии камерами всего неба. Для определения средних размеров частиц полярных стратосферных облаков трехцветных (RGB) данных недостаточно,

необходимы также поляризационные измерения. Подобная работа была проведена в соавторстве с коллегами из Полярного геофизического института [1]. Частицы мезосферных облаков в несколько раз меньше, для них применим упрощенный вариант теории Ми, и размер можно определить на основе только RGB-фотометрических данных.

Одновременно с размером частиц мезосферных облаков возможно найти и их среднюю «теневую» высоту на основе цветовых изменений облаков при вхождении в тень Земли. Для ярких облаков точность таких измерений достигает 100-200 метров. Модельные расчеты показывают, что рост содержания парниковых газов должен влечь за собой негативный тренд средней высоты мезосферных облаков, что делает альтиметрию также важной и актуальной. При сетевой реализации метода высота может также определяться на основе триангуляционных измерений.

Используемый подход, его новизна и оригинальность

Для реализации метода разработана полностью оригинальная методика обработки широкоугольных фотометрических данных, включающая точную координатную привязку поля и определение атмосферной экстинкции (на основе анализа изображений звезд), при необходимости – вычисление экваториальной и зональной скорости облачного фронта. Наиболее сложной задачей является количественное выделение облачного поля на фоне неба. Соответствующая методика была разработана и подробно описана в первой работе цикла и использовалась в последующих работах.

Вычисление среднего размера частиц мезосферных облаков производится на основе градиента цветового индекса рассеяния света по косинусу угла рассеяния, данный подход также оригинален и разработан автором работы. Используемые упрощения были проверены на основе модели переноса излучения (работа [2]). В последней работе [3] вся методика использовалась по отдельности для разных фаз одномерной акустико-гравитационной волны, которой было модулировано облачное поле, и тем самым исследованы изменения высоты и размера частиц по ходу распространения волны.

Полученные результаты и их значимость

В работе [1] удалось с высокой точностью найти как средний размер, так и ширину распределения частиц полярных стратосферных облаков по размерам, которые оказались в хорошем согласии с существующими данными измерений частиц облаков типа Ib. В работе [2] были определены высоты и средние размеры частиц мезосферных облаков за 3 года наблюдений, а в работе [3] построены их профили поперек волнового фронта. Результаты оказались в хорошем согласии и сравнимыми по точности с данными существенно более дорогостоящих лидарных измерений.

В ходе анализа изменений размеров частиц при прохождении волны [3] был обнаружен на первый взгляд парадоксальный эффект увеличения среднего размера между волновыми максимумами яркости (минимумами температуры). Этот эффект был ранее выявлен в ходе спутниковых измерений миссии AIM (Aeronomy of Ice in Mesosphere) и связан с разной скоростью испарения мелких и крупных частиц при росте температуры. Возможности методики существенно расширятся при ее одновременном использовании в нескольких наблюдательных точках, работа над этим ведется в настоящее время.