

СРЕДНЯЯ И ВЕРХНЯЯ АТМОСФЕРА ЗЕМЛИ: СЛОИ ХОЛОДА И ВЫСОКИЕ ОБЛАКА

О.С. Угольников¹, И.А. Маслов¹, Б.В. Козелов², В.И. Кириллов²

¹Институт космических исследований РАН, г. Москва

²Полярный геофизический институт, г. Апатиты

e-mail: ougolnikov@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается общая температурная структура атмосферы Земли. Отмечаются условия появления различных типов атмосферного аэрозоля в средней и верхней атмосфере: вулканический аэрозоль, перламутровые и серебристые облака. Экспериментальной основой работы являются измерения поляризации рассеяния на частицах вулканического аэрозоля под углом около 90° (после извержения вулкана Рабаул в 2006 г.) и рассеяния на частицах серебристых облаков в широком диапазоне углов (несколько случаев появления ярких облаков в 2014 и 2015 годах в средних и северных широтах). На основе этих измерений делается оценка характерных размеров частиц аэрозоля.

Атмосфера Земли представляет собой сложную физико-химическую систему, характеристики которой существенно зависят от высоты над поверхностью Земли. Известное всем разделение на основные слои (тропосфера, стратосфера, мезосфера, термосфера, экзосфера) определяется зависимостью температуры от высоты, которая характеризуется несколькими максимумами и минимумами.

Общие закономерности изменения температуры в атмосфере Земли с высотой можно качественно объяснить взаимодействием коротковолнового солнечного излучения с различными модификациями одной химической составляющей – кислорода. Молекулярный кислород O₂ занимает второе место по населенности в земной атмосфере после молекулярного азота (N₂), но значительно превосходит азот по коэффициенту поглощения ультрафиолетовой радиации в спектральном диапазоне 100-240 нм. Его зависимость от длины волны приведена на рис. 1. По нему же можно судить о высотах над поверхностью Земли, где происходит поглощение того или иного излучения.

Солнечная радиация с длиной волны менее 180 нм поглощается в высоких слоях атмосферы (100 км и выше), в существенной степени нагревая эти слои. Более мягкий ультрафиолет (до 240 нм) достигает высот порядка 30 км. Его недостаточно для нагрева этих слоев вследствие их большой плотности. Однако, поглощение приводит к диссоциации некоторого количества молекул кислорода. Образующиеся атомы кислорода соединяются с другими молекулами, образуя озон (O₃). Несмотря на свою небольшую концентрацию (около 10⁻⁵ от концентрации кислорода в стратосфере), озон полностью поглощает ультрафиолетовую радиацию до длин волн около 310 нм, что вызывает существенный прогрев верхней стратосферы. Высотная зависимость суммарного эффекта радиационного нагрева также показана на рис. 1, на ней четко видны два максимума.

На рис. 2 показаны распределение температуры [Marsh, 2005] и линии тока атмосферного воздуха [Garcia, Solomon, 1983] на разных высотах и широтах. Хорошо видны положения двух минимумов температуры (тропопауза и мезопауза) и ее максимума (стратоплауза). Их высоты зависят от широты и сезона года. Так, наиболее глубокий температурный минимум в стратосфере наблюдается зимой в полярных широтах и вблизи экватора, а в мезосфере, как ни странно, летом, причем летняя мезосфера оказывается самым холодным местом всей Земли!

Причина столь необычного температурного распределения кроется в особенностях переноса воздушных масс. Минимумы температуры в экваториальной тропосфере и летней полярной мезосфере располагаются над областями поднимающихся воздушных масс, которые подвергаются быстрому (в случае мезосферы – адиабатическому) выхолаживанию. В результате, в июне и июле на широтах севернее +50° (в декабре и январе южнее –50°) температура может упасть ниже 150 К, что при относительном содержании водяного пара в 3·10⁻⁶ (по объему) на высоте 80-85 км соответствует температуре его насыщения (кристаллизации). Так возникают серебристые облака – самые высокие в атмосфере Земли.

Серебристые облака могут быть видны в сумерки, при погружении Солнца под горизонт от 5° до 10°. В это время верхняя мезосфера еще освещена Солнцем, в то время как более низкие и плотные слои атмосферы уже погружаются в тень Земли. Характеристики частиц, составляющих облака, могут быть получены на основе анализа рассеянного солнечного излучения. Особенно информативными являются поляризационные измерения, так как поляризация рассеянного излучения сильно зависит от размера частиц. Для увеличения точности эти измерения должны охватывать как можно больший диапазон углов рассеяния, что удается сделать редко: серебристые облака обычно бывают видны только на фоне зари.

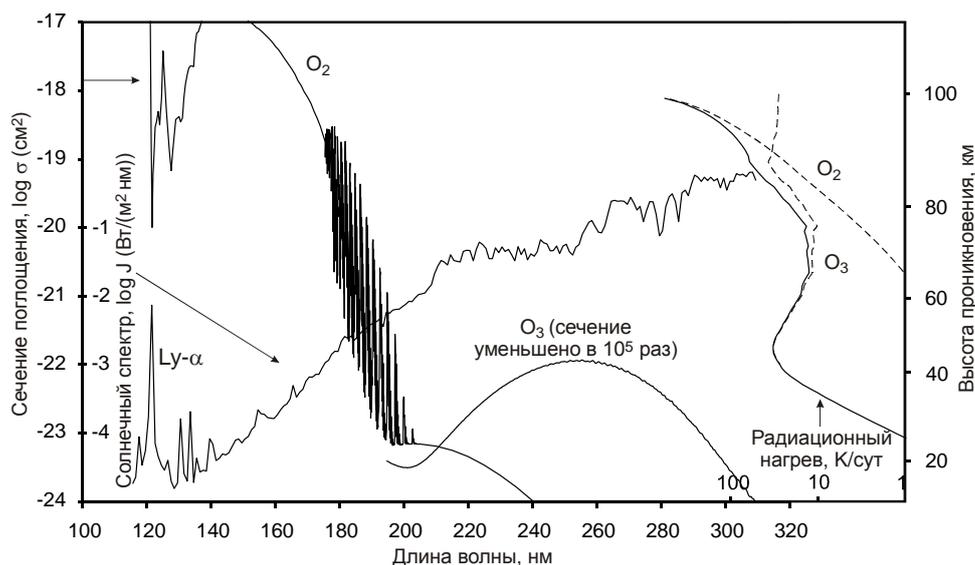


Рисунок 1. Солнечный спектр, сечение поглощения и высота проникновения УФ-излучения в атмосфере Земли, высотная зависимость темпа радиационного нагрева атмосферы.

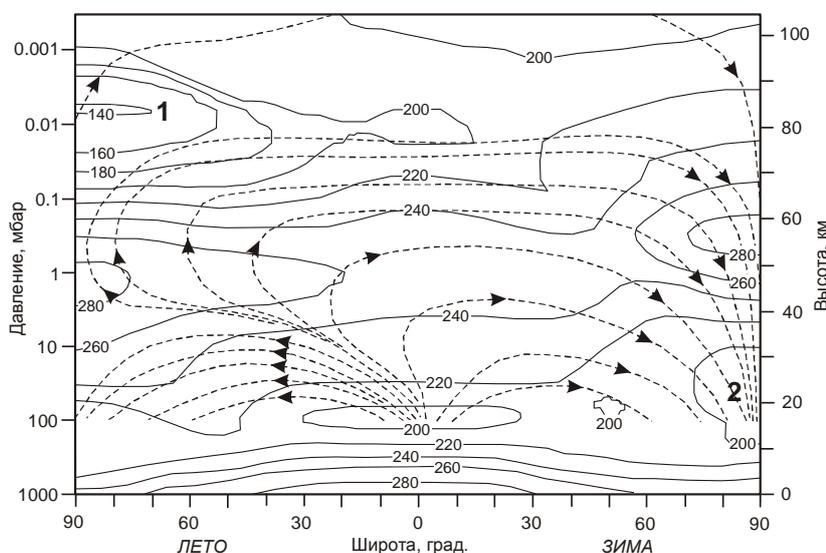


Рисунок 2. Распределение температур и линии тока в атмосфере. Цифрами 1 и 2 показаны области возможного появления серебристых и перламутровых облаков.

По ходу регулярных широкоугольных измерений фона сумеречного неба специальными поляриметрами, установленными в Чепелево (Подмосковье, 55.2°N, 37.5°E, эффективная длина волны 540 нм) и Апатитах (67.6°N, 33.4°E, эффективная длина волны 530 нм), удалось провести измерения поляризации фона излучения, рассеянного яркими серебристыми облаками, в обширном диапазоне углов рассеяния. Отметим, что поляризационные характеристики серебристых облаков при углах рассеяния, больших 90°, были определены впервые. Процедура выделения данного фона подробно описана в [Ugolnikov *et al.*, 2016], результаты приведены на рис. 3. На том же рисунке приведена релейевская зависимость, соответствующая очень малым частицам. Видно, что она оказывается в хорошем согласии с наблюдениями, особенно для случая аномально ярких и обширных серебристых облаков в Подмосковье вечером 5 июля 2015 года. Точный анализ данных этого вечера показывает, что их эффективный радиус не превышает 0.05-0.06 мкм, что оказывается в хорошем согласии с современными спутниковыми и лидарными данными (ссылки приведены в работе [Ugolnikov *et al.*, 2016]), не уступая им по точности.

Облака могут образоваться и в нижней стратосфере, но теперь уже зимой в области глубокого температурного минимума внутри полярного стратосферного вихря. В этом случае мы говорим о полярных стратосферных (или перламутровых) облаках, которые наблюдаются днем или с светлые сумерки и во

втором случае представляют собой очень красивое зрелище. По размерам частицы перламутровых облаков превышают частицы серебристых облаков. Это предопределяет более сложные спектральные и поляризационные характеристики рассеяния и необычные визуальные эффекты при появлении перламутровых облаков на небе. В настоящее время фон неба непрерывно патрулируется поляризационной камерой в городе Апатиты [Угольников, Козлов, 2016], и исследования микрофизических характеристик частиц перламутровых облаков можно будет провести при их появлении.

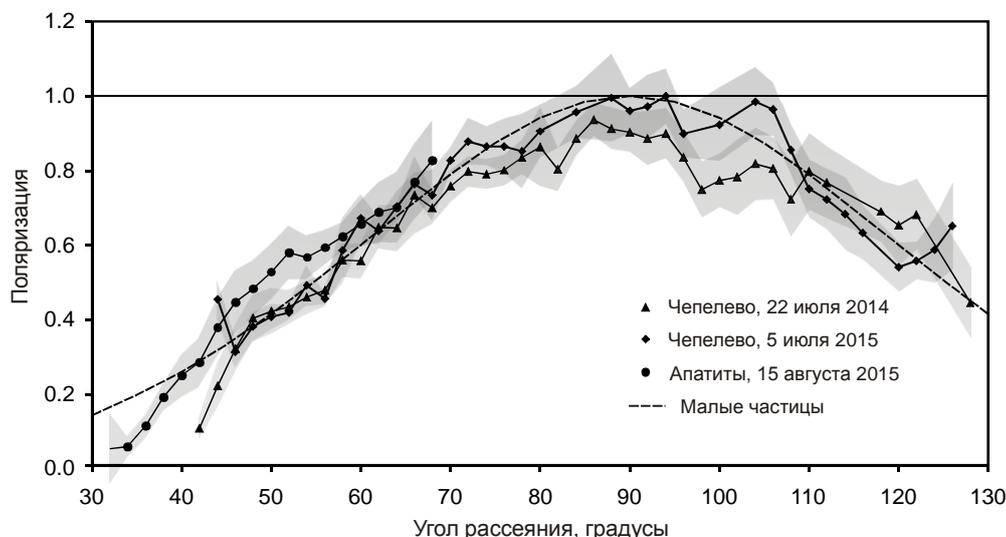


Рисунок 3. Поляризация света, рассеянного серебристыми облаками, в зависимости от угла рассеяния, длина волны 540 нм (Чепелево) и 530 нм (Апатиты).

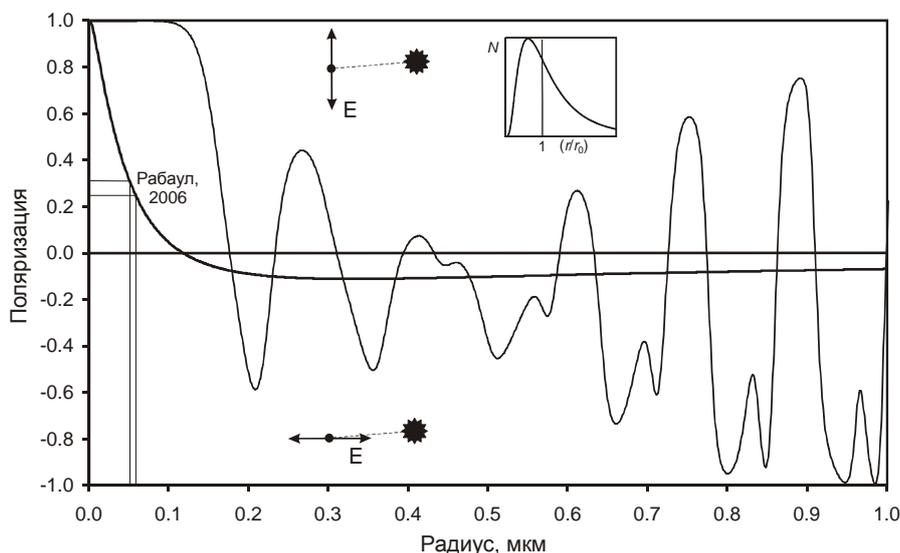


Рисунок 4. Поляризация света, рассеянного каплями серной кислоты под углом 92° , в зависимости от среднегеометрического радиуса капель, длина волны 525 нм (пунктир - монодисперсное распределение, сплошная линия - логнормальное распределение по размерам, показанное на врезке).

В другие сезоны и в других широтных поясах температура стратосферы слишком высока для конденсации водяного пара. Однако, образование аэрозоля может происходить за счет образования и конденсации других веществ, в частности – серной кислоты. Этот процесс может интенсивно развиваться после сильных вулканических извержений, при которых в стратосферу выбрасывается значительное количество сернистого газа SO_2 . Там его молекулы взаимодействуют с активными атомами и радикалами, прежде всего – с гидроксидом OH , образуя молекулы H_2SO_4 . Сульфатный аэрозоль достаточно быстро распространяется над обширными территориями над поверхностью Земли.

Подобная картина имела место, в частности, осенью 2006 года, после извержения вулкана Тавурвур (Рабаул) в Новой Гвинее 7 октября. За счет переноса стратосферных масс от экватора в высокие широты

вулканический аэрозоль достиг территории России, где уже в середине октября был зафиксирован лидарными методами в Томске [Зуев и др., 2007]. В декабре уменьшение поляризации фона сумеречного неба было отмечено в Крыму. Хотя наблюдения тогда производились камерой с узким полем только вблизи зенита, удалось оценить поляризацию света, рассеянного аэрозольными частицами под углом около 92° на длине волны 525 нм (0.28 ± 0.03 , [Угольников, Маслов, 2009; Ugolnikov, Maslov, 2009]).

Теоретическая зависимость поляризации рассеяния света сферическими каплями серной кислоты под данным углом от их радиуса приведена на рис. 4. В случае монодисперсных (одинаковых по размеру) частиц эта зависимость достаточно сложная с большим количеством максимумов как в положительной области (направление поляризации перпендикулярно плоскости рассеяния), так и в отрицательной области (направление поляризации параллельно плоскости рассеяния). Величина поляризации, найденная экспериментально, может соответствовать многим значениям радиуса. Однако на практике стратосферный аэрозоль представлен ансамблем частиц разного размера. В случае логнормального распределения с параметром $\sigma=0.7$ [Russell et al., 1981, Hoffman, Rosen, 1984], типичного для стратосферного аэрозоля и представленного на врезке к графику, колебания поляризации для больших размеров будут замыты, и ее зависимость от среднегеометрического радиуса частиц окажется практически монотонной кривой, также показанной на графике (жирная линия). Отметим, что наибольший вклад в рассеяние света вносят самые крупные частицы ансамбля, существенно превышающие по радиусу средние, поэтому поляризация оказывается существенно меньше, чем для монодисперсного распределения с тем же радиусом. Среднегеометрический радиус частиц (0.05 мкм) определяется с хорошей точностью и также оказывается в согласии с некоторыми экспериментальными работами [Russell et al., 1981].

Поляризационные измерения фона сумеречного неба могут также использоваться для измерения температур в верхней мезосфере [Ugolnikov, Maslov, 2013; Угольников, Козелов, 2016; Угольников, Маслов, 2016], данная работа продолжается в настоящее время. Представленные примеры показывают высокую эффективность данного метода исследований средней и верхней атмосферы, который характеризуется стоимостью, на много порядков меньшей, чем другие экспериментальные методы (лидарное, ракетное и спутниковое зондирование).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант №16-05-00170-а.

Литература

- Garcia R. R., Solomon S. A Numerical Model of the Zonally Averaged Dynamical and Chemical Structure of the Middle Atmosphere // *Journal of Geophysical Research*, 88, 1379, 1983.
- Hoffman D.J., Rosen J.M. Measurements of the sulphuric acid weight per cent in the stratospheric aerosol from the El Chichon eruption // *Geophys. Int.*, 23, 309, 1984.
- Marsh D. The Neutral Atmosphere // *SpaceWeather: The National Center for Atmospheric Research Summer Colloquium*, 2005.
- Russell P.B., et al. Satellite and correlative measurements of the stratospheric aerosol: 1. An optical model for data conversions // *Journal of Atmospheric Science*, 38, 1279, 1981.
- Ugolnikov O.S., Maslov I.A. Polarization detection of dust and aerosol in middle and upper atmosphere // *Physics of Auroral Phenomena. Proc. XXXII Annual Seminar, Apatity, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences*, 215, 2009.
- Ugolnikov O.S., Maslov I.A. Summer mesosphere temperature distribution from wide-angle polarization measurements of the twilight sky // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 105-106, 8, 2013.
- Ugolnikov O.S., Maslov I.A., Kozelov B.V., Dlugach J.M. Noctilucent Clouds Polarimetry: Twilight Measurements in a Wide Range of Scattering Angles // *Planetary and Space Science*, 2016 (submitted), e-print <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1511/1511.06927.pdf>.
- Зуев В.В., Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Невзоров А.В. Аномальное аэрозольное рассеяние в атмосфере над Томском в осенне-зимний период 2006/07 г. // *Оптика атмосферы и океана*, 20, 524, 2007.
- Угольников О.С., Маслов И.А. Исследования стратосферного аэрозольного слоя на основе поляризационных измерений сумеречного неба // *Космические исследования*, 47, 198, 2009.
- Угольников О.С., Козелов Б.В. Исследования мезосферы на основе широкоугольной поляриметрии сумеречного неба: первые результаты за Полярным кругом // *Космические исследования*, 2016 (в печати).
- Угольников О.С., Маслов И.А. Анализ направления поляризации фона сумеречного неба как средство выделения однократного рассеяния // *Космические исследования*, 2016 (в печати).