

ДИНАМИКА СТРАТОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ НАД КАМЧАТКОЙ И ЕЕ СВЯЗЬ С ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Б.М. Шевцов, В.В. Бычков, В.Н. Маричев, А.С. Пережогин, А.В. Шумейко

STRATOSPHERIC AEROSOL DYNAMICS OVER KAMCHATKA AND ITS ASSOCIATION WITH GEOPHYSICAL PROCESSES

B.M. Shevtsov, V.V. Bychkov, V.N. Marichev, A.S. Perezhogin, A.V. Shumeiko

В течение 2007 г. были выполнены комплексные дистанционные наблюдения в атмосфере на Камчатке с помощью лазерного зондирования, доплеровского ионозонда, GPS-радиотомографии и фотокамеры регистрации свечения ночного неба с целью исследования механизмов формирования аэрозоля в условиях изменчивости солнечной и других видов природной активности. Подведены итоги первого года наблюдений, определены интенсивности и пространственно-временные масштабы аэрозольных слоев, анализируется связь динамики аэрозоля с геофизическими процессами, совершенствуются методы и средства обработки сигналов, разрабатываются предложения по развитию лидарной станции с целью увеличения высоты зондирования.

В этом году продолжался анализ лидарных данных, полученных ранее над Томском. Эти данные использовались в первую очередь для сравнения с результатами камчатских наблюдений, кроме того, был исследован механизм формирования аэрозольных слоев в верхней стратосфере в периоды зимнего аномального поглощения радиоволн. Выявлена роль водяных паров и геофизических процессов, сопровождающих образование слоев с повышенными значениями коэффициента аэрозольного рассеяния. Обнаружена связь образования аэрозоля в области стратосферы с радиопоглощением на частотах 1–2 МГц в нижней ионосфере и показано, что оба этих явления обусловлены появлением водяного пара на высотах 50–60 км.

Использование лидаров для исследования ионосферы в связи с большой высотой зондирования, которая составляет сотни километров, всегда было сопряжено с немалыми техническими трудностями, которые, однако, в последнее время успешно преодолеваются благодаря развитию средств генерации и регистрации оптического излучения.

При наблюдениях в верхних слоях атмосферы из-за большой ее оптической толщины создаются условия для многократного рассеяния, которые существенно затрудняют интерпретацию результатов зондирования и требуют использования более развитых методов обработки сигналов и решения обратных задач.

Еще в 80-е гг. с помощью мощных лидарных систем были обнаружены светорассеивающие слои в ионосфере, механизмы формирования и динамика которых до сих пор остаются еще не достаточно исследованными. Ионосферные светорассеивающие слои формируются в условиях повышенной ионизации атмосферы, при сильном воздействии солнечной радиации, космических лучей и электромагнитных полей, а также при протекании фотохимических реакций.

Кроме этого, молекулы воздуха на ионосферных высотах находятся в сильно возбужденных состояниях, в результате чего возможно вынужденное резонансное и комбинационное рассеяние с очень высокими эффективными сечениями.

Влияние многочисленных факторов на формирование аэрозоля в ионосфере требует привлечения комплексных методов исследования. Из четырех видов дистанционных наблюдений, используемых на Камчатке, остановимся на характеристиках только одного из них – лидарной системы:

- длина волны излучения – 532 нм, диаметр луча – 6 см,
- энергия импульса – 0.4 Дж, длительность импульса – 8 нс,
- частота повторения импульсов – 10 Гц,
- диаметр приемного зеркала – 60 см,
- фокусное расстояние зеркала – 210 см,
- угол зрения приемника – 10^{-4} рад.

Установки с такими характеристиками позволяют выполнять зондирование в атмосфере до высот 100–150 км, которых можно достичь в ясные ночи. Число благоприятных ночей в лучшие месяцы не превышало половины, а в среднем было чуть больше 20 %. И это не удивительно, поскольку малейшая дымка в тропосфере затрудняла наблюдения и интерпретацию данных на рабочих высотах.

Результаты лидарного зондирования принято представлять в виде относительного рассеяния (<http://eosweb.larc.nasa.gov/>), которое определяется по формуле

$$R(H) = \frac{\rho_m(H) + \rho_a(H)}{\rho_m(H)} = 1 + \frac{\rho_a(H)}{\rho_m(H)},$$

где ρ_a – коэффициент аэрозольного рассеяния, ρ_m – коэффициент молекулярного рассеяния на нейтральных газовых компонентах атмосферы, H – высота зондирования.

Из интенсивности наблюдаемого сигнала $I(H)$ с помощью записанного в приближении однократного рассеяния лидарного уравнения

$$I(H) = Ap(H) \frac{\exp(-2 \int_0^H \rho(h) dh)}{H^2},$$

где A – нормировочная константа, восстанавливается суммарный коэффициент рассеяния $\rho = \rho_a + \rho_m$, а величина ρ_m вычисляется по формуле $\rho_m = 0.432 \cdot 10^{-3} \frac{P[\text{мб}]}{T[\text{К}]}$ [км⁻¹], где давление P и температура T находят-

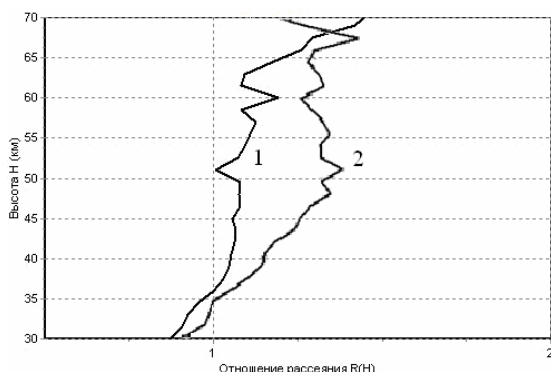


Рис. 1. Высотные профили 1 и 2 отношения рассеяний, полученные с интервалом 20 мин.

ся с помощью модели атмосферы MSIS или CIRA.

Примеры отношения коэффициентов рассеяния в зависимости от высоты даны на рис. 1. Профили 1 и 2, полученные через 20 мин при времени накопления 10 мин, демонстрируют динамичность стратосферных и ионосферных светорассеивающих слоев.

На рис. 1 представлены результаты лидарных наблюдений в атмосфере над Камчаткой, которые сопоставимы с данными, полученными ранее над г. Томск [1], но для высот в полтора раза меньших, т. е. до 50 км, где сопоставимость имела место и по интенсивности аэрозольных слоев, и по их динамике.

Однако на ионосферных высотах характеристики светорассеивания существенно отличаются. Результат восстановления профиля суммарного рассеяния ρ и вычисленное молекулярное рассеяние на нейтральных компонентах воздуха ρ_m в зависимости от высоты показаны на рис. 2. Четырехчасовой интервал накопления сигнала позволил получить надежные усредненные данные измерений ρ до высот 150 км.

Разность между кривыми 1 и 2 на рис. 2 начинает нарастать на ионосферных высотах примерно как плотность электронов. Это указывает на то, что рассеяние в этой области высот определяется в основном флуктуациями плотности ионосферной плазмы, в то время как в стратосфере – флуктуациями нейтральных компонентов атмосферы.

Аэрозольные слои в стратосфере во время магнитной активности и их механизмы образования рассматривались в работах [1, 2]. Показано, что их появление в эти периоды связано с вариациями интенсивности космического излучения и высыпаниями заряженных частиц из радиационных поясов.

Обнаружена связь образования аэрозоля в верхней стратосфере с зимним аномальным поглощением радиоволн в нижней ионосфере [3]. Показано, что причиной этому является наличие водяного пара на этих высотах, который способствует как образованию светорассеивающих слоев, так и увеличению степени ионизации атмосферы, усиливающему поглощение радиосигналов мегагерцового диапазона. Корреляция минимальной частоты f_{min} , на которой появляются радиоотражения от ионосферных E- или F-слоев, с возникновением аэрозоля в стратосфере показана на рис. 3. Коэффициент корреляции 0.8.

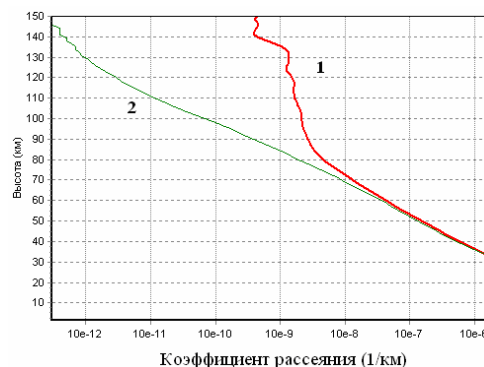


Рис. 3. Суммарное (1) и молекулярное на нейтральных компонентах (2) рассеяние в зависимости от высоты.

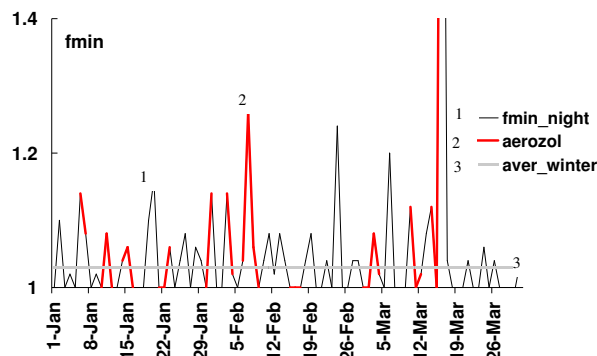


Рис. 3. Средний за ночные часы ход f_{min} по данным ст. Ключи за январь–март 1998 г.: 2 – появление аэрозольных слоев.

Постоянно присутствующие светорассеивающие слои на ионосферных высотах, как было показано выше, связаны с флуктуациями плотности плазмы, а спорадические слои, как правило, метеоритного происхождения представляют собой или пары металлов, или пылевую плазму с размером частиц около 70 нм. Современное состояние лидарных исследований ионосферы подробно изложено в отчете CEDAR lidar community [4].

Лидарные наблюдения в области низкой концентрации электронов, т. е. в области нижней ионосферы на высотах 60–80 км (см. рис. 2), где использование ионозондов неэффективно, хорошо дополняют радиозондирование атмосферы. По данным лидарных измерений коэффициента молекулярного рассеяния на флуктуациях плазмы в D-области высот можно восстанавливать десятиминутные вариации профиля плотности электронов с пространственным разрешением по вертикали и горизонтали 1 км. Сопоставление этих данных с процессами в стратосфере позволит лучше понять механизмы ионизации воздуха и образования аэрозолей.

Работа поддержана программой Президиума РАН № 16 «Изменение окружающей среды и климата: природные катастрофы»: часть 3 и проектом ИНТАС № 06-1000013-8823.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маричев В.Н., Богданов В.В., Живетьев И.В., Шевцов Б.М. Образование аэрозольных слоев в стратосфере под воздействием магнитной активности // Геомагнетизм и аэронавигация. 2004. Т. 44, № 6. С. 841–848.

2. Бычков В.В., Маричев В.Н., Матвиенко Г.Г., Шевцов Б.М. О механизмах образования аэрозольных слоев в стратосфере в периоды повышенной магнитной активности // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18, № 12. С. 1083–1088.

3. Бычков В.В., Маричев В.Н. Образование водных аэрозолей в верхней стратосфере в периоды зимнего аномального поглощения радиоволн в ионосфере // Оптика атмосферы и океана. 2008. № 2, принята к печати.

4. CEDAR Lidar Beyond Phase III: Accomplishments, Requirements and Goals (<http://cedar-l.hao.ucar.edu/community/CLRV1.pdf>).

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка