

Н. Ж. ТАКИБАЕВ, Л. М. ЧЕЧИН, Ч. Т. ОМАРОВ

О ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБРАЗОВАНИЯ МЕЗОСФЕРНЫХ СЕРЕБРИСТЫХ ОБЛАКОВ

Предлагается физическая модель образования мезосферных серебристых облаков (МСО). Дается анализ динамических процессов в мезосфере, ведущих к появлению и изменениям МСО, закономерностям их формирования и связи с возможными метеоритными дождями, пусками ракетно-космических комплексов и вулканической активностью.

В атмосфере Земли происходят сложные процессы, которые еще не имеют однозначного объяснения. Между стратосферой и термосферой на высотах примерно от 50 до 80–90 км находится за-служивающий особого внимания промежуточный слой называемый мезосферой. Мезосфера служит переходной областью от плотной атмосферы к околоземному космическому пространству и считается наиболее труднодоступной и мало изученной областью атмосферы.

К специфическим оптическим явлениям в мезосфере относятся мезосферные или серебристые облака (МСО), которые формируются в зоне мезопаузы на высоте около 83–85 км. МСО регулярно наблюдались с борта ОК «Мир» и наземными экспедициями. Имеются факты регистрации космонавтами довольно многочисленных и короткоживущих локальных облачных образований в верхней атмосфере, которые, по предположениям, могут быть следами вторжения в земную атмосферу мини-комет. Ракетные эксперименты, выполненные в 80-е годы в Швеции, дали важную информацию о составе МСО. На высотах 80–94 км обнаружен слой “тяжелых” положительных ионов, присутствие которых указывает на возможность образования ледяных частиц при сравнительно слабых колебаниях температуры. Теоретически вероятно образование этого вида облаков при мощных взрывах, землетрясениях и извержениях вулканов. Так, 17 июня 1996 г. мощное поле серебристых облаков наблюдалось из Алматы над территорией Казахстана через 3 ч после извержения вулкана Руапеху в Новой Зеландии. В 2004 г. серебристые облака наблюдались в США с широт менее 40°, т.е. даже южнее, чем наблюдавшиеся ранее из Алматы (с широты 43°). Существует еще категория полярных мезосферных облаков, наблюдения которых возможны лишь с полярных спутниковых орбит.

Недостатком наземных наблюдений является их зависимость от погодных условий в пункте наблюдения, т.е. невозможность осуществления регулярного слежения за МСО и их появлением и развитием. Поэтому необходимы наблюдения МСО с борта МКС, которые могут дать важную и наиболее полную информацию о глобальном распределении МСО в северном и южном полушариях Земли, их структуре, динамике течений и волновых процессах в мезосфере, о происхождении МСО. Эта информация важна также для изучения загрязнения земной атмосферы как индустриальными источниками, так и довольно частыми запусками ракет-носителей космических аппаратов.

Физические особенности мезосферы в области образования МСО

Температура в мезосфере понижается с высотой от 260–280 до 170–200 К° вблизи мезопаузы – переходного слоя к термосфере. В верхней части мезо-сферы расположена большая часть области D ионо-сферы.

Как известно, в ионосфере непрерывно протекают процессы ионизации и рекомбинации. Наблюдаемые концентрации электронов и ионов есть результат баланса между скоростью их образования и нейтрализации (в частности, рекомбинации, захвата и т.д.). Причины и процессы ионизации и нейтрализации разные в различных областях. В верхней части области D на высотах 85–100 км ионизацию вызывает в основном солнечное рентгеновское излучение с $\lambda < 85 \text{ \AA}$, а ниже 60–70 км днем и ниже 80–90 км ночью ионизация осуществляется космическими лучами галактического происхождения.

Кроме того, солнечные вспышки создают всплеск внезапных возмущений в мезосфере и соответственно повышенную ионизацию на высотах

50–100 км, особенно сильную в полярных шапках. Когда в близком к Земле космическом пространстве возрастает солнечный корпускулярный поток, происходят не только возмущение геомагнитного поля и изменение радиационных поясов Земли, но и усиление корпускулярных потоков в зоне полярных сияний, разогревание верхней атмосферы и изменение условий ионизации верхней мезосферы и ионосферы. В свою очередь, эти изменения и движения влияют на явления в верхней атмосфере.

Процесс, обратный ионизации, – нейтрализация или рекомбинация. Механизм рекомбинации меняется с высотой. В основной части ионосферы происходит диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов с коэффициентом $\sim 10^{-7} (300/T_e)^{1/2} \text{ см}^3/\text{с}$. На малых высотах (< 70 км), где концентрация свободных электронов много меньше концентрации ионов, преобладает взаимная нейтрализация ионов противоположных зарядов или идет ион-ионная рекомбинация с участием стабилизирующей нейтральной частицы – рекомбинация Томпсона.

Скорость исчезновения ионов характеризуется эффективным коэффициентом рекомбинации β , который определяет величину концентрации электронов n_e и ее изменение во времени. На малых высотах значение β на несколько порядков выше, чем на больших высотах. Поэтому область D оказывается в целом слабо ионизированной, причем существенным становится образование комплексных ионов-гидратов типа $(\text{H}_2\text{O})_n \text{H}^+$, а также отрицательных ионов типа O_2^- , NO_3^- и др. Важно отметить, что отрицательные ионы наблюдаются лишь в D области.

При переходе от дня к ночи концентрация электронов в области D еще больше уменьшается, поскольку ионизирующее излучение от Солнца закрывается Землей, а способность захвата электронов атомами и молекулами сохраняется высокой.

Наконец, в областях D и E ионосферы иногда наблюдаются кратковременные, очень узкие слои повышенной ионизации, состоящие из ионов металлов Mg^+ , Fe^+ , Ca^+ и др.

Приведенные здесь, хотя и конспективно, физические особенности верхних слоев мезосферы создают основу для описания происходящих в них процессов, как процессов, соответствующих слабо ионизированной ионной плазме, т.е. плазме, состоящей из положительных и отрицательных ионов и практически без участия свободных электронов. При этом среда будет представлять собой почти иде-

альный разреженный газ, почти постоянный по составу: 80% N_2 и 20% O_2 .

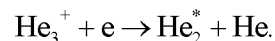
Содержащиеся в этой среде молекулы воды будут собираться в молекулярные ионные комплексы, например вида $(\text{H}_2\text{O})_n \text{H}^+$, или еще более активные комплексы типа $(\text{H}_2\text{O})_n \text{O}^-$. Квазистатические процессы их образования, роста или испарения будут происходить в условиях химического (или ионизационного) равновесия. Температурные условия существования такой плазмы будут близки к условиям так называемой квази-криогенной плазмы.

Криогенная плазма, кластерные ионы и конденсация водяных капель

В рассматриваемом нами случае температура среды (верхних слоев мезосферы) выше температуры жидкого азота и тем более жидкого гелия. Однако можно назвать условия квазикриогенными, поскольку значения тепловой энергии частиц существенно меньше температуры дневной электронной компоненты, а плотность и температура достаточно низкие. И, что главное, температурные перепады между дневным и ночным периодами времени будут значительными. Поэтому можно назвать эту слабо ионизированную плазму еще и квазикриогенной.

Отметим, что в лабораторных условиях распадающуюся (рекомбинирующую) криогенную плазму помещают во внешнее электрическое поле для того, чтобы поддержать температуру электронной компоненты T_e на заданном уровне, и тем самым продлевают время жизни криогенной плазмы. В нашем случае поток радиации от Солнца в дневное время будет автоматически поддерживать существование квазикриогенной плазмы в верхних слоях мезосферы, и этот поток играет роль внешнего поля. Солнечное излучение и солнечные космические лучи будут при этом постоянно поставлять или порождать достаточное количество заряженных частиц, в частности свободных электронов и положительных ионов.

Особенностью распадающейся криогенной плазмы является образование молекулярных ионов – электрон-ионная рекомбинация в случае гелиевой плазмы, например, происходит с образованием возбужденной молекулы гелия:



Это подтверждается наблюдаемым при распаде плазмы свечением молекул He_2^* .

Другой важной особенностью криогенной плазмы является образование комплексных или кластерных ионов. Так, даже в случае упомянутой выше гелиевой плазмы в сверхкритической области для гелия в ионных кластерах число атомов может достигать нескольких сотен. Исследования криогенной плазмы, по существу, только начинаются, и она выделяется среди известных видов плазмы по сложности ее состава и весьма нетривиальной кинетике [1].

Важными в рассматриваемой области мезосферы являются процессы коагуляции, т.е. сближения и укрупнения жидких капелек воды. Причиной коагуляции могут явиться как акустические волны, так и плазменные колебания. В последнем случае особый интерес представляют процессы роста комплексных или кластерных ионов.

Кластером называют систему из большого числа слабосвязанных атомов или молекул. Они занимают промежуточное положение между ван-дер-ваальсовыми молекулами, содержащими несколько атомов или молекул, и мелкодисперсными частицами (аэрозолями). Если кластер содержит ион, то он называется кластерным ионом или ионным кластером. В этом случае энергия связи, отнесенная к одной молекуле, обычно выше, чем в ван-дер-ваальсовых молекулах. Макроскопические параметры малых кластеров могут зависеть немонотонно от числа составляющих их атомов, например, энергетически наиболее выгодным может быть магическое их число.

Кластерная физика представляет собой быстро развивающуюся область физики частиц, научную основу большого числа современных нанотехнологий, имеющих приложения в электронике, материаловедении и других отраслях производства (см., например, [1-3]). Есть предложения по использованию кластерных пучков в космических технологиях [4].

Известно, что кластеры наиболее эффективно образуются в пересыщенном паре, например при истекании газа из сопла. Они являются центрами конденсации и представляют собой промежуточную стадию образования капелек жидкости.

Следует отметить, что энергия диссоциации кластерных ионов ($\varepsilon_c = 0,09 \div 1,7$ eV) в среднем меньше, чем энергия химической связи молекул ($\varepsilon_m = 0,75 \div 11,1$ eV), но значительно выше энергии диссоциации ван-дер-ваальсовых молекул ($\varepsilon_v = 0,9 \cdot 10^{-3} \div 0,105$ eV). Связь в кластерных ионах прочнее, так как взаимодействие заряженных

частиц сильнее, чем нейтральных. Поэтому по величине энергии диссоциации кластерные ионы занимают промежуточное положение между молекулами (и молекулярными ионами) с химической связью и ван-дер-ваальсовыми молекулами.

Относительно небольшая энергия диссоциации приводит к тому, что кластерные ионы могут эффективно разрушаться (или, наоборот, образовываться) при тепловых энергиях. Это создает большое разнообразие кластерных ионов в зависимости от температуры, давления и других условий, в которых находится система. Например, в парах воды при комнатных температурах наблюдаются положительные кластерные ионы $\text{H}_3\text{O}^+ \cdot (\text{H}_2\text{O})_n$, $n = 0 \div 3$, и отрицательные кластерные ионы $\text{OH}^- \cdot (\text{H}_2\text{O})_n$, $n = 0 \div 4$.

Важную роль играют кластерные ионы как ядра конденсации паров воды и других веществ, когда давление паров превышает давление насыщенного пара при данной температуре. В этом случае образование малых капелек данного вещества оказывается термодинамически невыгодным из-за большого поверхностного натяжения. Присутствуя в газовой среде, кластерные ионы представляют собой зародыши, на которых происходит конденсация. Это является основой работы камеры Вильсона.

Кластерные ионы играют важную роль в низкотемпературной плазме. Они смещают ионизационное равновесие в плазме. Различные кластерные ионы присутствуют в атмосфере Земли, причем с изменением высоты состав ионов существенно меняется.

Особенности кластерной плазмы и химическое равновесие

Большие кластеры как макроскопические системы могут находиться в твердом и жидком агрегатном состояниях. Рассмотрим модель жидкой капли (см., например, [2]). Можно считать, что плотность такого кластера равна плотности макроскопической жидкости. Тогда радиус кластера

$$r(n) = r_w \cdot n^{1/3},$$

где n – число атомов в кластере, т.е. элементарных составляющих молекул или собственно атомов; r_w – радиус Вигнера–Зейтца:

$$r_w = \left(\frac{3m}{4\pi\rho} \right)^{1/3}.$$

Здесь m – масса элементарной составляющей (далее атома), ρ – плотность материала кластера.

В отличие от твердых кластеров параметры жидких монотонно зависят от их размера. Так, полная энергия связи атома кластера определяется формулой [2]:

$$E(n) = \varepsilon_0 n - A \cdot n^{2/3},$$

где ε_0 – удельная энергия сублимации макроскопической системы, приходящаяся на один атом, а второе слагаемое в правой части соответствует поверхностной энергии, выраженной через поверхностное натяжение. Предполагается, что энергия связи ε_0 много больше тепловой энергии элемента кластера T_m (т.е. с атома или молекулы). Здесь T_m – температура плавления, которая должна быть выражена в энергетических единицах. Кроме того, используется предположение, что энергии связи ε_0 при температуре плавления и нулевой температуре одинаковы, и это предположение ведет к погрешности лишь в несколько процентов.

Пренебрегая температурной зависимостью параметров ε_0 и A , получаем энергию связи атома в кластере

$$\varepsilon_n = dE(n)/dn = \varepsilon_0 - \Delta\varepsilon/n^{1/3}, \quad \Delta\varepsilon = (2/3)A.$$

Конечно, энергия связи атома в кластере при бесконечном увеличении размера кластера стремится к величине ε_0 , соответствующей макроскопической частице. Однако вклад поверхностной энергии существен даже для больших кластеров – поверхностные явления играют важную роль в их жизни. В то же время разложение по малому параметру $n^{-1/3}$ упрощает анализ свойств больших кластеров [2].

Модель жидкой капли позволяет анализировать кинетические параметры кластера, находящегося в газе или плазме. Например, сечение прилипания атома к поверхности кластера

$$\sigma(n) = \pi r^2,$$

где $r = r(n)$ – радиус кластера, и предполагается, что каждый контакт налетающего атома с поверхностью кластера приводит к прилипанию атома, а радиус действия атомных сил мал по сравнению с радиусом кластера, т.е. формула справедлива для больших кластеров. Для скорости прилипания следует

$$v(n) = Nv\sigma(n) = Nk_0 n^{1/3},$$

где N – плотность атомов; v – средняя их скорость. Тогда приведенная константа прилипания будет равна

$$k_0 = \sqrt{\frac{8T}{\pi m}} \pi r_w^2,$$

где T – температура газа, выраженная в энергетических единицах. В силу простой температурной зависимости этот параметр является универсальной величиной для кластеров данного типа.

Переходя к равновесию отдельного кластера в атомном паре и используя экспоненциальную зависимость для равновесной плотности атомов, получаем для частоты испарения атомов $v_{ev}(n)$ с поверхности кластера, содержащего n атомов,

$$v_{ev}(n) = v(n) \frac{P_0}{TN} \exp(-\varepsilon_n/T).$$

Таким образом, частота испарения кластера выражается через P_0 – давление насыщенного пара, энергию связи атомов кластера и частоту прилипания атомов к кластеру. Соответственно уравнение баланса для описания эволюции размера кластера имеет вид [2, 3]:

$$\frac{dn}{dt} = k_0 n^{2/3} N - v_{ev}(n).$$

Итак, модель жидкой капли позволяет описать свойства больших жидких капель и их поведение в собственном атомном паре.

Модель образования мезосферных серебристых облаков

Предлагаемая модель образования МСО (мезосферных серебристых облаков) основана на качественных особенностях верхних слоев мезосферы, смене ее температурных и иных физических режимов, известных физических процессах образования больших молекулярных кластеров, особенностях квазикриогенной плазмы, возникающей в этой области, и на ряде внешних, регулярных или эпизодических событиях, случающихся в земной атмосфере. Ее целесообразно разделить на три этапа.

1-й этап, дневной период времени. Солнечное излучение и солнечные космические лучи создают в области D нижней ионосферы и верхних слоях мезосферы относительно небольшую степень ионизации, т.е. слабо разреженную плазму. В этой части атмосферы присутствуют небольшое, но достаточное для дальнейших процессов количество па-

ров воды, молекулярные ионы различного типа, особенно отрицательные, которые создают условия образования комплексных или кластерных ионов типа $O^- \cdot (H_2O)_n$ и других, когда $n \gg 1$.

Электронная компонента слабо разреженной плазмы, т.е. свободные электроны, быстро захватываются молекулами, и ее плотность определяется в основном усредненным потоком солнечной радиации. Иными словами, в дневное время свободные электроны постоянно порождаются солнечным излучением, хотя время их жизни невелико вследствие высокой вероятности захвата электронов атомами и молекулами разреженной среды. Таким образом, процессы, происходящие в дневной мезосфере, не могут быть отнесены к равновесным, или квазиравновесным, поскольку в основном определяются внешним энергетическим потоком, его временными изменениями и т.п.

Среднее число и характеристики кластерных ионов могут быть найдены в этом случае в соответствии с приведенными в предыдущем разделе формулами и общими оценками.

2 этап, ночной период времени. Поток частиц и излучения от Солнца закрывается Землей, генерация свободных электронов и ионизация в разреженной среде прекращаются, температура среды резко падает.

Квазикриогенная плазма переходит в стадию рекомбинации (т.е. распада) с образованием некоторого числа кластерных ионов, рассеянных хаотично по всей рассматриваемой области.

3 этап, пробуждение – переход к дневному времени. Появившийся поток солнечных лучей и частиц приводит к распаду кластеров, появлению новых ионизированных частиц и слабо Разреженной плазмы – наступает 1-й этап, и т.д.

Рассмотрим теперь ситуацию, когда происходит неординарное внешнее воздействие – например, мезосферу пронизывает метеорный дождь или происходит выброс большого количества вещества при запуске ракетно-космических комплексов.

Предположим, что в этом случае в мезосфере возникают большие по протяженности и плотности ионизационные треки аналогично мини-трекам в камерах Вильсона, ионизационных счетчиках и других аналогичных физических приборах. Главными в нашем случае будут большой масштаб ионизированных участков и их локализация в определенной области мезосферы. В этой области и областях, при-

лежащих к ним (назовем всю эту область метеорной областью М), будут возникать специфические явления. Рассмотрим их по этапам в области М.

1-й этап, дневной период времени. В области М присутствует значительная по степени ионизация. Распадающаяся (рекомбинирующая) квазикриогенная плазма будет испытывать переход в квазиравновесное состояние. Солнечная ионизация может в этом случае рассматриваться как фоновая и незначительная по величине.

Как и ранее, возникают условия образования комплексных и кластерных ионов типа $O^- \cdot (H_2O)_n$ и многих других, но скоротечность процессов будет обусловлена быстрым падением температуры при адиабатическом расширении зоны повышенной ионизации. При этом степень роста ионных кластеров будет существенно большей, чем в предыдущем случае, т.е. средняя величина n будет значительно большей.

Кроме того, в этой области степень ионизации плазмы будет также значительно выше, чем в других обычных по режиму областях. Как и прежде, свободные электроны будут быстро захватываться молекулами среды и плазма приобретет свойства чисто ионной, т.е. без электронной компоненты. В такой плазме происходят так называемые плазменные колебания, участниками которых становятся уже тяжелые заряженные частицы (отрицательные и положительные ионы) и даже ионные кластеры.

В то же время плазма будет еще почти идеальной, в которой дебаевский радиус

$$r_D = \sqrt{kT_+T_- / 4\pi(n_+T_+ + n_-T_-)},$$

где n_+, T_+ – плотность и температура положительных ионных кластеров, а n_-, T_- – плотность и температура соответственно отрицательных кластеров.

Частота плазмы $\omega = \sqrt{4\pi n/M}$, где n – средняя плотность ионных кластеров, а M – их средняя масса.

Вследствие огромной по величине массы ионных кластеров в плазме возникнут длинноволновые плазменные колебания. Сами эти колебания будут создавать преимущественные условия для обычного роста кластеров, с одной стороны,

$$M_n + m_A \rightarrow M_{n+1},$$

и развития процессов коагуляции, или коалесценции,

$$M_n + M_q \rightarrow M_{n+q},$$

с другой стороны.

Нужно отметить, что в принципе типы, массы и заряды отрицательных и положительных кластеров могут различаться между собой. Поэтому приведенные формулы имеют оценочный (или приближенный) характер.

В отличие от обычного (фоновое) дневного режима в области М будут формироваться более крупные по размеру кластеры (жидкие капли) с достаточно упорядоченной пространственной структурой вокруг или вблизи первоначальной области макроионизационных треков.

2 этап, ночной период времени. Квазикриогенная плазма переходит в стадию адиабатического остывания, рекомбинации и коагуляции некоторого числа кластерных ионов. Падение температуры ведет к образованию ледяных кристалликов в области М.

3 этап, пробуждение – переход к дневному времени. Солнечные лучи высвечивают облака ледяных кристалликов, называемых мезосферными серебристыми облаками. Усиливающийся поток солнечных лучей и частиц приводит к постепенному испарению ледяных кристалликов, затем появлению новых ионизированных частиц и слабозреженной плазмы – наступает 1-й этап, и т.д.

Можно полагать, что серебристые облака формируются в вечернее и ночное время, хорошо наблюдаются в утренние часы, живут обычно несколько часов, но иногда их время жизни растягивается на несколько дней.

Приведенная здесь модель образования МСО и положенные в ее основу теория и данные известных физических процессов позволяют моделировать процессы и проводить измерения и расчеты.

Модель дает однозначную связь МСО с нео-

рдинарными внешними воздействиями по отношению к мезосфере и системе Солнце – Земля – атмосфера. Однако воздействия МСО на атмосферные и погодные явления остаются пока не исследованными и находятся вне проведенного здесь анализа.

Исследования мезосферных (серебристых) облаков планируются в расчете на получение новых и более полных данных о динамике процессов в зоне мезопаузы на основе организации базисных наземных наблюдений и наблюдений с МКС по новой разрабатываемой методике.

Обнаружение и изучение новых явлений в атмосфере будет способствовать более глубокому пониманию процессов, происходящих в атмосфере, выявлению закономерностей глобальных климатических явлений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов Б.М. Комплексные ионы. М., 1983.
2. Смирнов Б.М. Генерация кластерных пучков // УФН. 2003. Т. 173, № 6. С. 609-648.
3. Smirnov B.M. Clusters and small particles in Gases and Plasmas. New York: Springer. 2000.
4. Жумабекова В.Н., Такибаев Н.Ж. Использование кластерных пучков в космических технологиях // Международ. конф. «Первые Фесенковские чтения». Тез. докл. Алматы, 2005. С. 26.

Резюме

Мезосфералық күмістей бұлттардың пайда болуының физикалық моделі ұсынылады. Мезосферадағы мезосфералық күмістей бұлттардың пайда болуына және олардың өзгерістеріне, қалыптасуының заңдылықтарына, мүмкін метеорит жауындар, зымырандық-ғарыштық кешенді іске қосу және жанартаудың белсенділігіне байланысты жүргізілетін динамикалық үрдістерге талдау беріледі.

Summary

A physical model of noctilucent mesospheric clouds formation is considered. We present an analysis of dynamical processes in mesosphere leading to appearances and changes of the clouds, regularities of cloud formation and their connections with meteor rains, space rocket launches and volcanic activity.

Астрофизический институт
им. В. Г. Фесенкова МОН РК,
г. Алматы

Поступила 30.05.06г.